

소나무와 굴참나무 임분의 시비에 따른 토양 CO₂ 방출 동태

백경원 · 김춘식^{ID*}

경남과학기술대학교 산림자원학과

Soil CO₂ Efflux Dynamics in Response to Fertilization in *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* Stands

Gyeongwon Baek and Choonsig Kim^{ID*}

Department of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology,
Jinju 52725, Korea

요약: 본 연구는 유사한 입지에서 생육한 소나무와 굴참나무 임분을 대상으로 시비에 따른 토양 CO₂ 방출량을 비교하기 위해 수행하였다. 성숙한 소나무와 굴참나무 임분을 대상으로 시비처리 전 캘리브레이션 기간(2015년 3월~2016년 2월)을 가진 후, 2016년 3월에 복합비료를 표면 시비하였다. 토양 CO₂ 방출량은 2015년 3월부터 2017년 2월까지 2년 동안 매월 측정하였다. 토양 CO₂ 방출량의 월별 변동은 굴참나무와 소나무 임분 모두 시비 전(2015~2016년)과 시비 후(2016~2017년) 유사하였다. 연평균 토양 CO₂ 방출량의 경우 소나무 임분의 시비구는 2015~2016년 1.620 μmol m⁻² s⁻¹였으나 2016~2017년 2.180 μmol m⁻² s⁻¹로 유의적으로 증가($P < 0.05$)하였으며, 굴참나무 임분의 시비구도 2015~2016년 1.557 μmol m⁻² s⁻¹에서 2016~2017년 1.977 μmol m⁻² s⁻¹로 약 0.420 μmol m⁻² s⁻¹ 정도 증가하였다. 그러나 비시비구는 두 임분 모두 2015~2016년과 2016~2017년 사이 토양 CO₂ 방출량에 유의적인 차이가 없었다. Q₁₀ 값은 굴참나무 임분의 시비구가 2015~2016년 3.14에서, 2016~2017년 3.41로 증가하였으나 소나무 임분의 시비구는 Q₁₀ 값에 변화가 없었다. 비시비구의 Q₁₀ 값의 경우 굴참나무 임분은 2015~2016년에 3.85였으나, 2016~2017년은 3.69로 감소하였으며, 소나무 임분은 2015~2016년은 3.15였으나, 2016~2017년은 3.65로 증가하였다. 본 연구 결과에 따르면 유사한 입지환경에서 생육한 소나무와 굴참나무 임분의 토양 CO₂ 방출량은 시비 후 증가하였으며, 시비에 따른 토양 CO₂ 방출은 소나무 임분이 굴참나무 임분에 비해 반응이 크게 나타났다.

Abstract: This study compared soil CO₂ efflux rates after fertilization, in *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* stands. Compound fertilizers were applied to the forest floor in March 2016, following a one-year calibration period (from March 2015 to February 2016). *In situ* soil CO₂ efflux rates were measured every month during the two-year study periods, using an infrared gas analyzer with a closed chamber system. Mean annual soil CO₂ efflux rates were higher following fertilizer application in the *P. densiflora* and *Q. variabilis* stands (*P. densiflora*: 2.180 μmol m⁻² s⁻¹; *Q. variabilis*: 1.977 μmol m⁻² s⁻¹) as compared with the rates measured during the calibration period (*P. densiflora*: 1.620 μmol m⁻² s⁻¹; *Q. variabilis*: 1.557 μmol m⁻² s⁻¹). The mean annual soil CO₂ efflux rates in the unfertilized treatments of both stands were not significantly different between the two-year study periods. The Q₁₀ values of fertilized treatments in *Q. variabilis* stands were higher in the fertilization period (3.41) than in the calibration period (3.14), whereas the Q₁₀ values in *P. densiflora* stands did not change between the fertilization and calibration periods. The Q₁₀ values of unfertilized treatments in the *Q. variabilis* stands were lower during the 2016–2017 period (3.69), than in the 2015–2016 period (3.85), whereas the Q₁₀ values in *P. densiflora* stands were higher during the 2016–2017 period (3.65), than in the 2015–2016 period (3.15). These results indicate that the increase in soil CO₂ efflux rates in *P. densiflora* stands could be more sensitive to fertilization compared with the rates in *Q. variabilis* stands.

Key words: carbon dioxide, fertilization, forest soil, greenhouse gas, soil property, soil respiration

* Corresponding author

E-mail: ckim@gntech.ac.kr

ORCID

Choonsig Kim ^{ID} https://orcid.org/0000-0002-3263-1187

서론

산림생태계로부터 흡수되거나 방출되는 지구온난화 관련 주요 온실가스는 크게 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)로 이들이 지구 대기환경에 미치는 영향은 매우 크다(Bravo et al., 2008). 이러한 온실가스 중 CO₂는 최근 십 년 동안 매년 1.9 ppm 정도 증가를 보이고 있다(IPCC, 2018).

산림 토양에서 발생하는 온실가스 중 지구온난화에 가장 크게 기여하는 온실가스로 알려진 CO₂의 경우 주로 미생물이나 살아있는 뿌리 호흡으로부터 발생하며, 산림생태계의 여러 가지 대사활동을 나타내주는 중요한 지표로서 의미가 있다. 산림 토양을 통한 CO₂ 방출 등에 관여하는 일련의 과정들은 인간의 활동이나 자연재해에 영향을 받으며(Jandl et al., 2007; Peng et al., 2008; Bravo et al., 2008; Oertel et al., 2016), 이러한 반응에 가장 크게 기여하는 요인은 토양온도, 토양수분 및 양분 유효도 변화 같은 입지환경요인과 토양 내 유기탄소 동태(토양 유기물, 세균생산량, 낙엽낙지량 등) 같은 기질(substrate quality)의 차가 원인으로 알려져 있다(Nishina et al., 2009; Oertel et al., 2016). 또한 산림 토양에서 발생하는 CO₂ 방출량의 변동은 시·공간적으로 상당한 변이가 발생하며(Konda et al., 2008; Jeong et al., 2013), 토양 수분 및 토양 양분 가용도 등과 같은 산림환경 변화나 산림생태계가 위치한 지리적 요인 및 계절 변화 등에 민감하게 반응하였다(Ishizuka et al., 2009; Jeong et al., 2016).

산지 시비는 대기 중 온실가스인 CO₂의 흡수 능력 향상에 가장 효과적인 수단으로(Kim, 2008; Moscatelli et al., 2008) 제공될 수 있으며, 산림생태계의 중요한 기능인 산림생산력 증진, 산림 건강도 및 양분 유효도 향상, 산림 토양 내 양분 수지의 조절 등과 관련한 다양한 혜택을 증진한다. 이는 산지 시비 후 토양의 생물학적이나 화학적 프로세스의 변화로 인하여 지상부와 지하부 탄소 재분배 기작 발생, 유기물 분해나 토양 호흡 변화, 미생물 활동 및 토양 pH 등에 영향을 미치기 때문이다(Erickson et al., 2001). 시비 후 토양 CO₂ 방출량은 증가(Fisk and Fahey, 2001; Tyree et al., 2006), 감소(Lee and Jose, 2003), 변화가 없는(Bowden et al., 2004; Kim, 2008; Jeong et al., 2016) 등 수종, 시비량, 시비 방법 등에 따라 다양한 반응이 보고되었다. 예를 들면 시비 후 토양 CO₂ 방출 증가는 뿌리 biomass 증가가 원인이었으며(Tyree et al., 2006), 토양 CO₂ 방출 감소는 토양 내 양분 유효도의 증가와 함께 뿌리 생장이나 균근균, 세균, 곰팡이 등의 감소가 원인으로 제시된 바 있다(Wallenstein et al., 2006). 한편, Kim(2008)은 성숙한 낙엽송 임분의 경우 시비 직

후 토양 CO₂ 방출의 감소가 발생하나 곧 비시비구 수준으로 회복하여 시비구와 비시비구 사이에 토양 CO₂ 방출량에 차이가 없었다고 보고하였다.

시비는 토양 비옥도 향상을 위해 일반적으로 사용하는 산림경영기술로 임분 재적 증가 같은 물질 생산적인 관점이 주로 연구되었으며, 시비에 따른 수종별 토양 CO₂ 방출 동태와 관련한 정보는 미흡한 실정이다. 본 연구는 유사한 입지환경과 서로 인접한 지역에서 생육한 성숙한 소나무(*Pinus densiflora* S. et Z.)와 굴참나무(*Quercus variabilis* BL.) 임분을 대상으로 산림 토양으로부터 방출되는 CO₂가 시비에 따라 어떠한 반응을 보이는지를 조사하고, 토양온도, 토양수분, 토양 질소 유효도 같은 토양 환경요인이 CO₂ 방출과 어떤 관계가 있는지를 조사하기 위한 목적으로 실시하였다.

재료 및 방법

1. 일반현황

본 연구 조사지는 경상남도 진주시 국립산림과학원 “월야연구시험림” 내 성숙한 소나무와 굴참나무 임분을 대상으로 하였다. 최근 30년 동안(1981~2010년) 이 지역의 연평균 강수량은 1,513 mm, 연평균 기온은 13.1°C이다. 조사지는 유사한 입지환경에 서로 인접하며, 정상적으로 생육하고 있는 V영급 이상의 성숙하고 건전한 소나무와 굴참나무 임분을 선정하였다. 두 임분은 표고 160~180 m 내 산복의 서향에 위치하며, 사면 경사는 15~25°이다. 하층 식생으로 산초나무(*Zanthoxylum schinifolium* S. et Z.), 짚레(*Rosamultiflora* var. *multiflora* Thunb.), 청미래덩굴(*Smilax china* L.), 졸참나무(*Quercus serrata* Thunb.), 굴참나무(*Quercus variabilis* BL.), 개웃나무(*Rhus trichocarpa* Miq.), 산딸기(*Rubus crataegifolius* Bunge.) 등이 분포하나 하층 목본식물의 피도는 높지 않았다. 조사지의 모암은 퇴적암인 사암이나 혈암이 전 지역에 우세하고, 암적갈색약건산림토양형(DRb₂)이 분포하였다. 조사구는 3블록(block)으로 구성하였고, 각 블록은 2개의 10 m × 10 m 조사구를 구획하여 총 12개 조사구[2수종(소나무, 굴참나무) × 3블록 × 2반복]를 설치하였다.

2. 시비처리

시비효과에 따른 입지의 영향을 최소화하기 위해, 2년의 조사 기간(2015년 3월~2017년 2월) 동안 2015년 3월부터 2016년 2월까지의 시비처리 전의 조정 기간(calibration period)으로 하였다. 시비처리는 1년 후인 2016년 3월 9일 각 임분을 대상으로 우리나라 성숙림의 시비 기준량(N-P-K: 113-150-36 kg ha⁻¹ yr⁻¹)을 표면 시비

하였다. 시비된 비료의 종류로 질소질 비료로는 요소, 인산질 비료는 용과린, 칼리질 비료로는 염화칼리 등을 혼합하여 임상에 고르게 살포되도록 하였다.

3. 토양 CO₂ 방출량 조사

토양 CO₂ 방출량 측정을 위해 각 조사구 내 임의로 선정된 지점에 내부 직경 20 cm, 높이 11cm 원통형 PVC collar를 광물질 토양층 1~2 cm 깊이까지 매설하였다. 토양 CO₂ 방출량은 LI-8100A(LICOR Bioscience, USA)에 20 cm survey chamber인 closed opaque chamber를 연결한 후, 매설된 PVC collar 상부에 LI-8100A를 부착하고 IRGA(infrared gas analyzer) 방법에 의해 2015년 3월부터 2017년 2월까지 매월 오전 10시부터 12시 사이에 측정하였다.

4. 토양 환경요인 조사

토양온도는 토양 CO₂ 방출량이 측정되는 지점에 K-type 디지털 온도계(SDT 25, Summit, Korea)를 이용하여 지표면 8 cm 깊이의 온도를 측정하였다. 토양 pH와 토양 수분함량은 직경 5 cm와 깊이 5 cm 크기를 가지는 원통형 토양채취기를 이용하여 유기물층을 제거한 후 광물질 토양층의 토심 0~5 cm 깊이 토양 시료를 채취하고 지퍼 백에 밀봉한 후 실험실로 운반하였다. 운반된 시료는 토양 5 g에 증류수 25 ml (1:5)를 첨가한 후 토양 pH (Model 735P, istec, Korea)와 전기전도도(Orion 3 star, Thermo Scientific, Singapore)를 측정하였다. 토양 수분함량은 5 g의 신선한 토양을 건조기에서 105°C로 24시간 이상 건조 후 계산하였다. 토양 유기탄소 농도의 경우 105°C 건조한 토양을 550°C 회화한 후 얻어진 유기물 농도와 원소분석기(Thermo Fisher Scientific Flash 2000, Italy)에 의해 측정된 값을 이용하여 직선회귀식[토양 유기탄소 농도 = 1.3537x - 2.0623($r^2 = 0.56$, x = 토양 유기물 함량)]을 구한 후 매월 얻어진 유기물 함량으로부터 유기탄소 농도 추정 회귀식을 이용하여 계산하였다.

토양 무기질소 농도는 토양 CO₂가 측정되는 시점에 각 챔버에 인접되는 지점을 대상으로 직경 5 cm, 깊이 5 cm 정도의 토양 core를 채취하여 실험실로 운반하였다. 실험실로 운반된 신선한 5 g의 토양을 2M KCl 50 ml를 첨가하여 진공추출기(Model 24VE, Sample Tek, KY, USA)에 의해 토양 용액을 추출한 후 암모니아태질소와 질산태질소 농도를 이온자동분석기(AQ2 discrete multi-chemical analyser, Seal Analytical Limited, UK)로 분석하였다.

5. 임분 현황 및 토양 특성 조사

각 조사구의 임목 흉고직경 생장량은 시비 전 조정 기간인 2015년에는 1월과 12월 2회, 시비 기간인 2016년에는 12월 등 총 3회 실시하였다. 토양 특성 변화는 5월부터 8월 사이 토양 깊이 0~5 cm 부위를 코어샘플러를 이용하여 각 처리별로 1점씩 수집한 후 토양 분석을 위하여 혼합하였다. 채취된 토양은 실내에서 음건한 후 석력을 제거하기 위하여 2 mm체로 선별하였다. 토양 입경분포는 비중계법, 토양 탄소와 질소 농도는 대용량 원소분석기(vario MACRO cube, Macro Elemental Analyzer, Germany), 토양 유효인산은 UV 분광분석기(Jenway 6505, UK)에 의해 측정하였다. 교환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘의 경우 2.5 g의 건조 토양에 55 ml NH₄Cl 용액을 첨가한 후 16시간 동안 진공추출기(Model 24VE, Sample Tek, KY, USA)에 의해 용액을 추출하였다(Kalra and Maynard, 1991). 추출된 용액은 ICP-OES(Perkin Elmer Optima 5300 DV, USA)를 이용하여 분석하였다.

6. 자료 분석

조사구는 3개의 block 내 시비구 및 비시비구를 포함하고 있다. 수집된 자료($P < 0.05$)는 시비구 및 비시비구를 대상으로 SAS의 일반 선형모형(GLM)을 이용하여 시비 전 조정 기간(2015~2016년 측정값)과 시비 후(2016~2017년 측정값)의 유의적인 차이를 연간 비교를 통하여 $P < 0.05$

Table 1. Stand density, DBH, and basal areas of the study site.

Stand	Treatment	Stand density (tree ha ⁻¹)	Mean DBH (cm)			Basal area (m ² ha ⁻¹)		
			Jan. 2015	Dec. 2015	Dec. 2016	Jan. 2015	Dec. 2015	Dec. 2016
<i>Quercus variabilis</i>	Unfertilization	1,633 (372)	17.19 (1.52)	17.36 (1.49)	17.69 (1.55)	37.85 (8.65)	38.74 (8.86)	40.05 (8.93)
	Fertilization	867 (168)*	18.21 (2.53)	18.43 (2.58)	18.86 (2.63)	20.46 (2.92)	21.00 (2.95)	22.05 (3.32)
<i>Pinus densiflora</i>	Unfertilization	1,433 (272)	17.71 (0.92)	18.08 (0.87)	18.48 (0.89)	38.11 (8.89)	39.79 (9.29)	41.71 (9.80)
	Fertilization	1,466 (317)	15.92 (1.61)	16.25 (1.68)	16.69 (1.74)	30.14 (2.09)	31.50 (2.17)	33.15 (1.97)

*Values in parenthesis represent standard errors. DBH: diameter at breast height.

수준에서 검정하였다(SAS Inc., 2003). 토양 CO₂ 방출량과 토양온도 변화와의 관계는 지수함수 모델을 개발하였으며[토양 CO₂ 방출량 = B₀e^{B₁×ST}(B₀, B₁ : 회귀분석을 통하여 얻어진 계수, ST : 토양온도)], 토양 CO₂ 방출량의 토양온도 민감도를 조사하기 위해 Q₁₀ 값(Q₁₀ = e^{10×B₁})을 계산하였다(Saiz et al., 2006).

결과 및 고찰

1. 임분 및 토양 특성

소나무 임분의 임분 밀도는 시비구 1,466 본 ha⁻¹, 비시비구 1,433 본 ha⁻¹로 처리 간 큰 차이는 없었으나(Table 1) 굴참나무 임분은 시비구 867 본 ha⁻¹, 비시비구 1,633 본 ha⁻¹로 비시비구의 임목 본수가 약 770 본 정도 많았다. 평균 흉고직경의 경우 굴참나무 임분의 시비구는 18.86 cm로 비시비구 17.69 cm와 유사하나, 흉고단면적 함은 비시비구가 40.05 m² ha⁻¹로 시비구의 22.05 m² ha⁻¹

에 비해 크게 나타났다. 소나무 임분의 평균 흉고직경은 시비구가 16.69 cm로 비시비구 18.48 cm에 비해 작았으며, 그 결과 흉고단면적 함도 비시비구가 41.71 m² ha⁻¹로 시비구 33.15 m² ha⁻¹에 비해 크게 나타났다.

굴참나무와 소나무 임분의 모래, 미사, 점토 비율의 경우 시비구와 비시비구 간 유의적인 차이는 없었다(Table 2). 토성급의 경우 굴참나무 임분은 미사질양토, 소나무 임분은 양토나 미사질양토로 미사 함량이 높게 나타났다. 우리나라 퇴적암 모재 산립 토양(Jeong et al., 2003)의 A 층은 모래 24.5%, 미사 51.2%, 점토 23.3%로 본 연구의 미사 함량과 유사하나 점토 함량은 평균 값보다 낮았으며, 이는 본 연구의 조사 깊이가 0~5 cm로서 표토 부분에서 세립질 입자인 점토의 세탈이나 용탈이 발생하였기 때문으로 사료된다.

시비 전과 시비 후 토양 화학적 성질에 큰 차이는 없었다(Table 3). 그러나 유효 인의 경우 굴참나무는 시비 전 10.1 mg kg⁻¹, 시비 후 21.6 mg kg⁻¹, 소나무는 시비 전 9.9 mg kg⁻¹, 시비 후 42.4 mg kg⁻¹로 타 토양 성질에 비해 뚜렷한 증가 반응을 보였다. 인산질 비료 시비 후 토양 내 유효 인 농도의 뚜렷한 증가는 타 연구에서 보고되고 있으며(Jeong et al., 2017), 인의 경우 토양 내 이동성이 크지 않아 식생에 의해 흡수되지 않는 경우 주로 잔존되기 때문으로 알려져 있다(Weil and Brady, 2017).

2. 토양 CO₂ 방출 및 환경요인의 월 변동

토양 CO₂ 방출량은 시비 전과 시비 후 모두 유사한 월 변동을 보였다. 최대 방출량은 소나무와 굴참나무 임분 모두 7월로서 굴참나무 임분의 비시비구는 조정 기간에 6.50 μmol m⁻² s⁻¹, 시비 기간에 6.58 μmol m⁻² s⁻¹로, 시비구의 조정 기간 3.80 μmol m⁻² s⁻¹과 시비 기간

Table 2. Soil particle size distribution of *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands.

Stand	Treatment	Particle size distribution (%)		
		Sand	Silt	Clay
<i>Quercus variabilis</i>	Unfertilization	25.7 (1.5)*	59.7 (1.2)	14.7 (0.3)
	Fertilization	28.0 (4.9)	58.7 (3.7)	13.3 (1.6)
<i>Pinus densiflora</i>	Unfertilization	41.0 (5.5)	49.0 (3.6)	10.0 (2.3)
	Fertilization	36.7 (8.3)	52.0 (6.1)	11.3 (2.3)

*Values in parenthesis represent standard errors.

Table 3. Soil chemical properties for calibration (2015) and for fertilization (2016) period in *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands.

Stand	Treatment	Organic C (mg g ⁻¹)		Total N (mg g ⁻¹)		Avail. P (mg kg ⁻¹)		Exchangeable (cmolc kg ⁻¹)					
								K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺	
		2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
<i>Quercus variabilis</i>	Unfertilization	2.71 (0.65) a	3.33 (0.37) a	0.20 (0.05) a	0.24 (0.01) a	12.69 (1.78) a	1.93 (0.65) b	0.04 (0.0003) a	0.03 (0.0003) b	0.28 (0.06) a	0.42 (0.07) a	0.11 (0.01) a	0.16 (0.03) a
	Fertilization	3.25 (0.38) a	2.76 (0.24) a	0.23 (0.02) a	0.21 (0.02) a	10.10 (2.81) a	21.61 (14.43) a	0.04 (0.009) a	0.04 (0.006) a	0.59 (0.27) a	0.36 (0.01) a	0.17 (0.04) a	0.16 (0.03) a
<i>Pinus densiflora</i>	Unfertilization	3.78 (0.08) a	2.84 (0.60) a	0.19 (0.02) a	0.17 (0.03) a	9.41 (0.62) a	8.87 (0.94) a	0.02 (0.003) a	0.03 (0.006) a	0.26 (0.11) a	0.41 (0.21) a	0.07 (0.02) a	0.10 (0.04) a
	Fertilization	2.70 (0.18) a	1.88 (0.20) b	0.15 (0.01) a	0.12 (0.01) b	9.94 (0.43) a	42.37 (18.91) a	0.02 (0.0007) a	0.03 (0.006) a	0.22 (0.01) a	0.19 (0.03) a	0.08 (0.02) a	0.08 (0.01) a

*Values in parenthesis represent standard errors. Different letters between unfertilization and fertilization plots in calibration (2015) and fertilization (2016) periods represent a significant difference between treatments at P < 0.05.

4.98 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에 비해 높은 방출량을 보이고 있다 (Figure 1). 소나무 임분의 경우도 조정 기간에 비시비구 3.93 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 시비구 1.98 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 시비 기간에 비시비구 4.25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 과 시비구 4.24 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 나타났다. 7월에 측정된 굴참나무 비시비구의 토양 CO₂ 방출량이 가장 크게 나타난 것은 타 조사구에 비해 높은 임분 밀도로 인하여 뿌리 바이오매스로부터 발생할 수 있는 호흡이 크게 나타났기 때문으로 사료 된다. 한편, 하절기와 대조적으로 뿌리 활성이 크지 않은 12월과 1월의 토양 CO₂ 방출량은 굴참나무나 소나무 모두 처리 간 유의적인 차이가 없었다($P > 0.05$).

토양 CO₂의 월별 변동에 영향을 미치는 환경요인의 경우 토양온도나 대기온도의 변동과 밀접한 관계가 나타나고 있으며, 대기습도, 토양수분 함량, 토양 pH, 토양 EC, 토양 유기탄소 농도, NH₄⁺, NO₃⁻ 농도의 월별 변동과는 큰 관계가 없었다(Figure 1). 그러나 2015년 8월의 24.9°C의 높은 토양온도에도 불구하고, 임분 밀도가 가장 높았던 굴참나무 비시비구의 토양 CO₂ 방출량은 4.10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로서, 7월의 토양온도 19.7°C의 6.50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에 비해 상당한 감소가 발생하였으며, 이 기간 동안 토양 수분량이 12.4 %로서 타 조사 기간에 비해 예외적으로 낮게 나타나 토양 CO₂ 방출량이 감소하였기 때문으로 사료 된다(Figure 1). 유사한 결과로 토양 수분함량이 15 % 이하일 경우 토양 CO₂ 방출에 영향을 미치게 되며(Deng et al., 2010), 이는 토양수분 함량이 낮을 경우, 토양 미생물이나 뿌리 활성 저하로 인하여 토양 CO₂ 방출량이 감소하는 것으로 알려져 있다(Epron et al., 1999; Borken et al., 2002; Vincent et al., 2006).

3. 토양 CO₂ 방출 및 환경요인의 연 변화

2015~2016년 조정 기간과 2016~2017년 시비 기간 동안 연평균 토양 CO₂ 방출량은 소나무 임분이 시비 전 1.620 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 였으나 시비 후 2.180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 유의적으로 증가하였으며, 굴참나무 시비구도 조정 기간에 1.557 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 시비 후 1.977 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 약 0.420 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 증가하였다(Figure 2). 동일 기간 동안 굴참나무 비시비구는 조정 기간에 3.00 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로부터 시비 기간에 2.913 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 소나무는 조정 기간에 1.593 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 시비 기간에 1.713 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 굴참나무는 0.087 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 감소하였으나, 소나무 임분은 약 0.12 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 증가하였으나 조정기간과 시비 기간 사이에 유의적인 차이는 없었다(Figure 2).

시비에 따른 토양 CO₂ 방출량은 임분의 종류나 입지별로 상이한 결과가 보고되고 있다. 국내에서 조사된 경산남도 함양 낙엽송 조림지의 토양 CO₂ 방출량은 시비구

2.34 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 비시비구 2.52 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 시비구가 낮았으나 유의적인 차이는 없었으며(Kim, 2008), 진주에서 조사된 소나무 임분은 시비구 3.12 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 비시비구 2.95 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로서 시비구가 0.17 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 높았다(Jeong et al., 2016). 국외 연구 결과에 따르면 질소 질 비료 시비 시 온대림과 한대림 산림의 토양 CO₂ 방출량은 감소하는 것으로 알려져 있으며(Bond-Lamberty and Thomson, 2010; Janssens et al., 2010), 이는 질소 시비의 경우 토양 pH가 낮아지고 그 결과 미생물의 활성이 낮아져 토양 CO₂ 방출량이 감소하기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 인산 및 칼리를 포함하는 복합비료가 시비되었고, 시비에 따른 토양 pH 변화도 나타나지 않아 토양 CO₂ 방출 감소에 미치는 영향이 크지 않을 수 있다.

본 연구에서 나타난 소나무 임분의 시비에 따른 토양 CO₂ 방출량의 유의적인 증가는 토양 pH나 토양 환경요인의 변화보다는 시비에 따른 토양 내 가용질소인 NH₄⁺ 농도의 증가에 따른 임목의 지하부 생육환경 개선으로 인하여 뿌리 활성이 증가하였기 때문일 수 있다. 유사한 결과로 Gao et al.(2014)는 열대 상록수림에 시비 후 토양 CO₂ 방출량의 증가는 세균량의 증가에 따른 토양 호흡 증가가 원인으로 보고한 바 있다. 한편, 소나무 임분의 시비는 미생물 호흡이 약 27 % 감소하여(Jeong et al., 2016) 시비구의 토양 CO₂ 방출량의 증가에 미생물 호흡의 기여도는 낮을 것으로 사료된다.

4. 토양 CO₂ 방출량과 토양온도와의 관계

굴참나무와 소나무 임분 모두 월별 토양 CO₂ 방출량과 월별 토양온도 사이에 유의적인($P < 0.05$) 지수함수 관계가 있는 것으로 나타났다. 굴참나무 임분은 조정 기간인 2015~2016년의 결정계수(R^2)는 시비구 0.76, 비시비구 0.79(Figure 3), 소나무 임분은 시비구 0.56, 비시비구 0.72였으며(Figure 4), 굴참나무 임분의 지수식 결정계수가 소나무 임분에 비해 크게 나타났다. 또한 시비 기간인 2016~2017년 사이의 경우 굴참나무 임분 시비구의 결정계수는 0.84, 비시비구는 0.86으로 두 처리구 사이에 큰 차이는 없었다. 소나무 임분의 경우도 시비 기간인 2016~2017년 사이 지수식의 결정계수는 시비구 0.42, 비시비구 0.86으로 비시비구의 결정계수가 높게 나타나 조정 기간과 유사한 경향을 보였다. 국내에서 조사된 낙엽송 임분의 시비구와 비시비구의 지수식 결정계수도 0.88과 0.86으로 시비 영향이 크지 않았으며(Kim, 2008), 조사구와 인접한 진주 지역 소나무 임분의 경우도 시비구 0.88, 비시비구 0.91로(Jeong et al., 2016) 시비에 따른 결정계수 값에 변화는 없었다. 그러나 소나무 시비구의 결정계수 값은 굴참나무 시비구나 비시비구, 소나무 비시

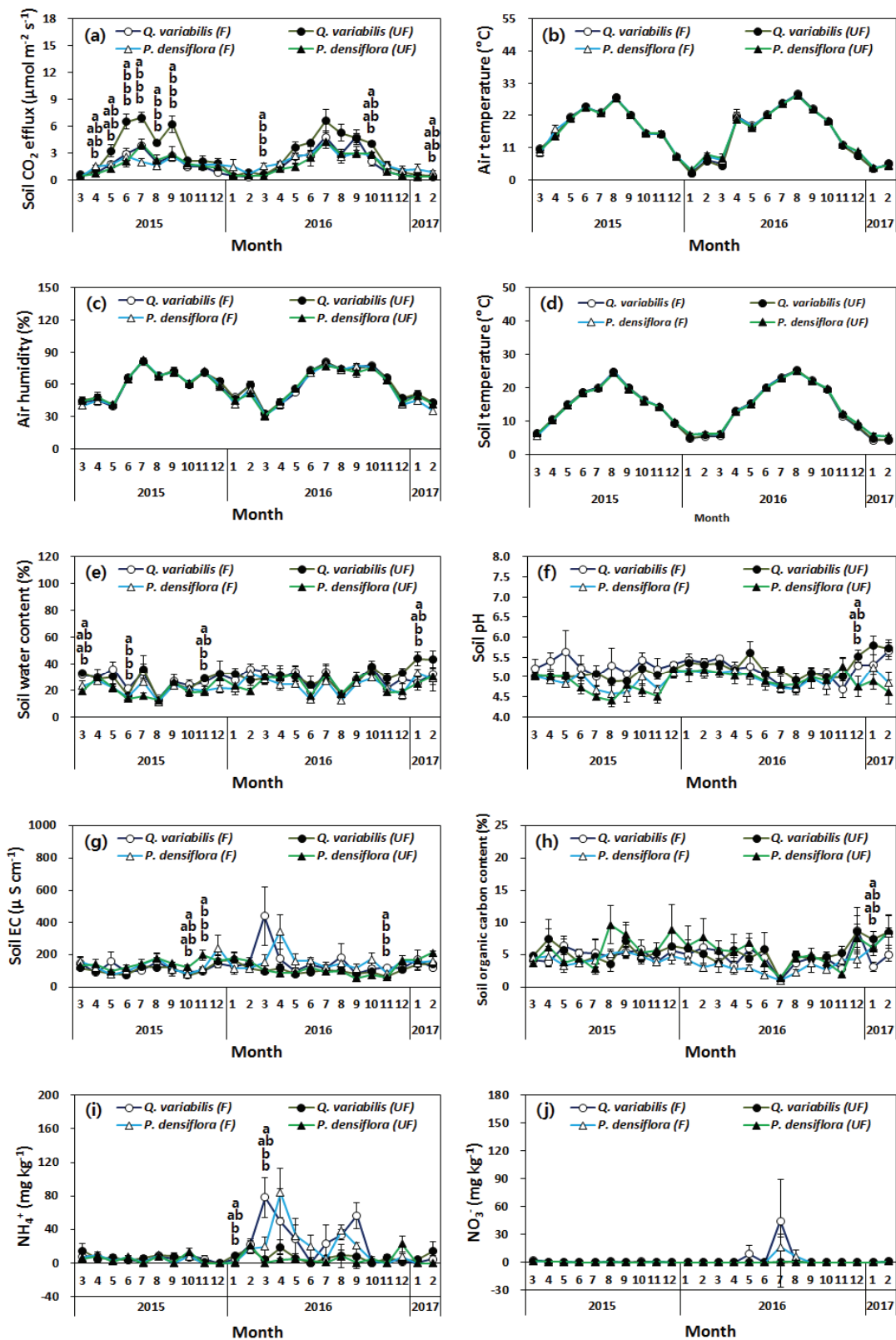


Figure 1. Monthly variation of soil CO₂ efflux (a), air temperature (b), air humidity (c), soil temperature (d), soil water content (e), soil pH (f), soil electrical conductivity (g), soil organic carbon content (h), NH₄⁺ concentration (i), and NO₃⁻ concentration (j) from March 2015 to February 2016 (calibration period), and from March 2016 to February 2017 (fertilization period) in *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands. Vertical bars indicate standard error. Different letters on the bars represent a significant difference between treatments at $P < 0.05$.

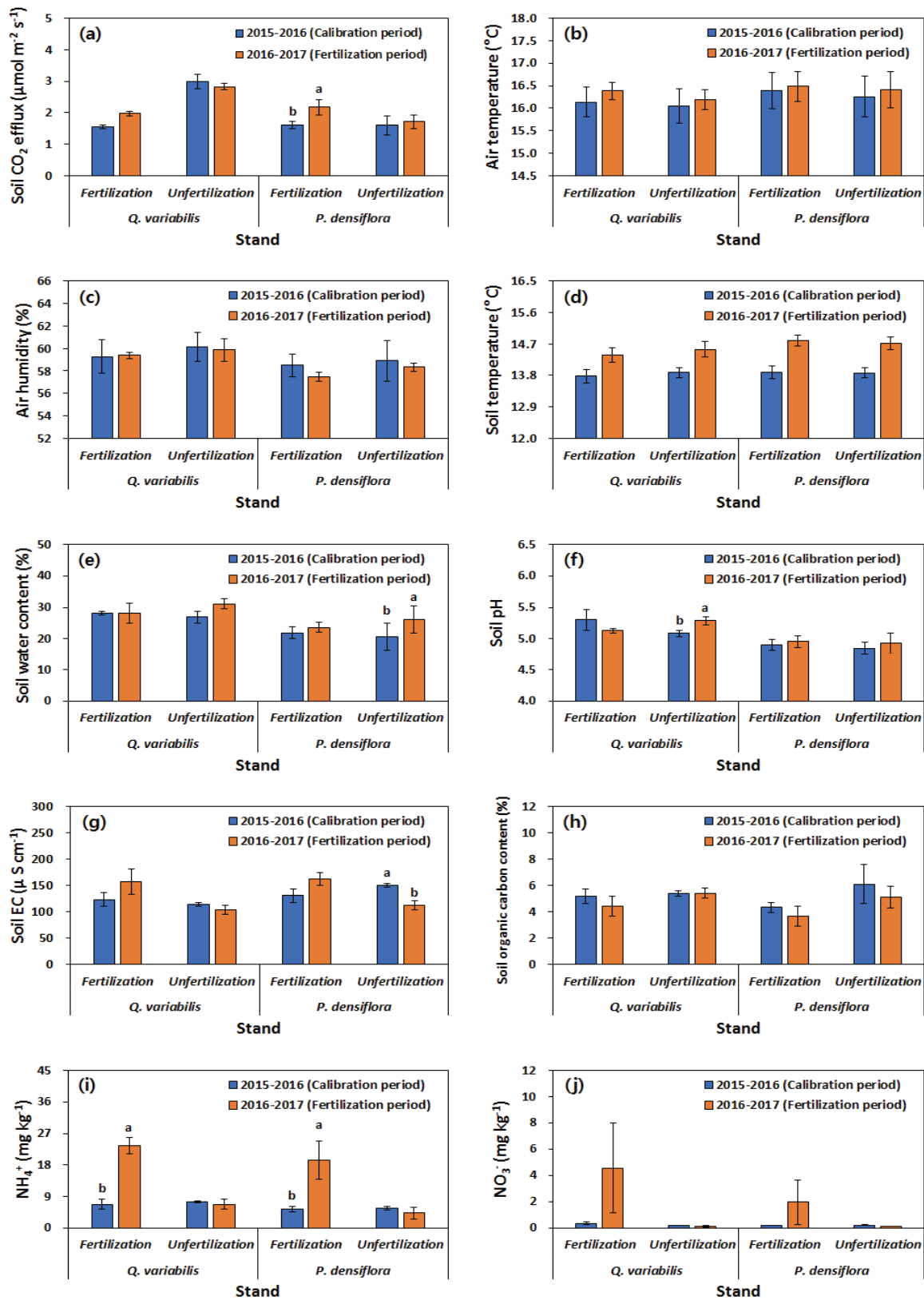


Figure 2. Mean soil CO₂ efflux (a), air temperature (b), air humidity (c), soil temperature (d), soil water content (e), soil pH (f), soil electrical conductivity (g), soil organic carbon content (h), NH₄⁺ concentration (i), and NO₃⁻ concentration (j) from March 2015 to February 2016, and from March 2016 to February 2017 in *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands. Vertical bars indicate standard error. Different letters on the bars represent a significant difference between treatments at $P < 0.05$.

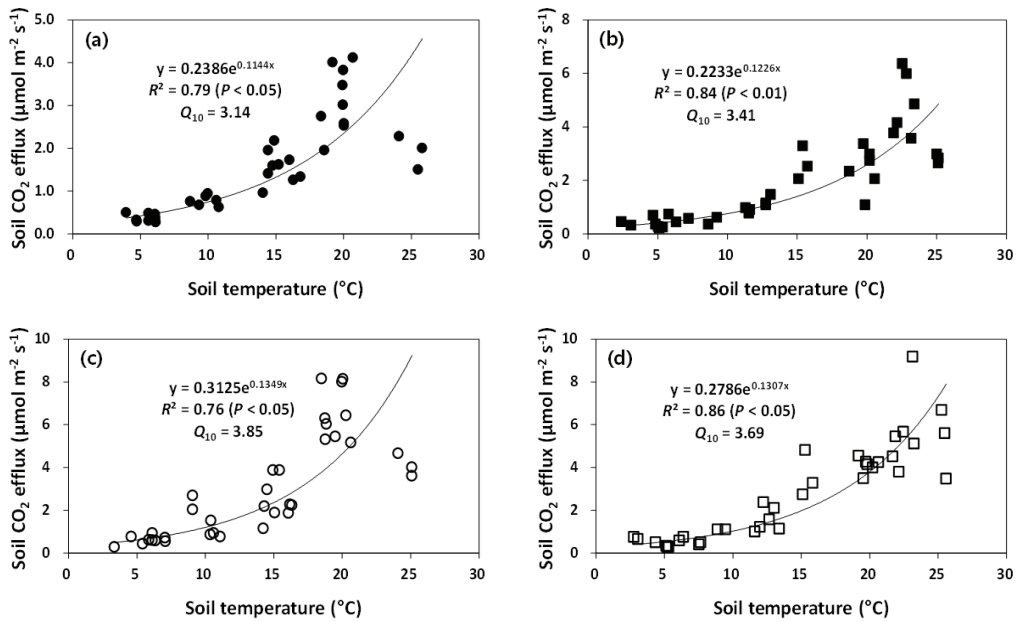


Figure 3. Exponential relationships between soil CO₂ efflux and soil temperature from March 2015 to February 2016 (a), and from March 2016 to February 2017 (b) of fertilization treatments, and from March 2015 to February 2016 (c), and from March 2016 to February 2017 (d) of unfertilization treatments in *Quercus variabilis* stands.

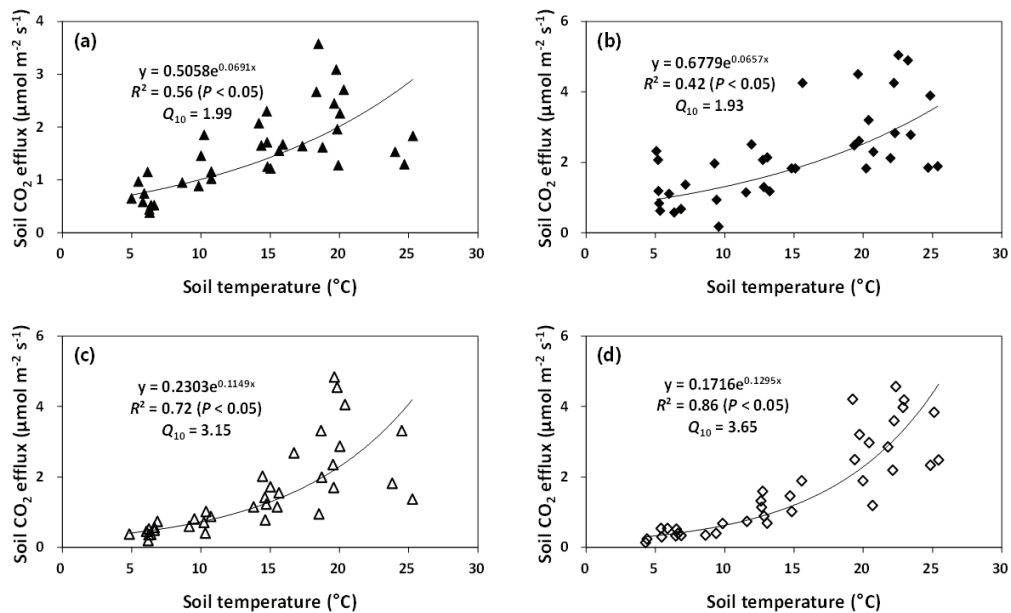


Figure 4. Exponential relationships between soil CO₂ efflux and soil temperature from March 2015 to February 2016 (a), and from March 2016 to February 2017 (b) of fertilization treatments, and from March 2015 to February 2016 (c), and from March 2016 to February 2017 (d) of unfertilization treatments in *Pinus densiflora* stands.

비구에 비해 낮게 나타나고 있으며, 시비 전의 조정 기간에도 0.56으로 낮아 타 처리구에 비해 토양온도의 시공간적 변동이 크게 나타났다.

Q₁₀ 값은 임분이나 시비처리에 따라 다르게 반응하여 굴참나무 임분은 시비 후 Q₁₀ 값이 증가하는 경향을 보인 반면에(Figure 3) 소나무 임분은 시비 전과 시비 후 Q₁₀

값에 변화가 없었다(Figure 4). 그러나 비시비구의 경우 굴참나무 임분은 조정 기간에 3.85였으나 시비 기간에는 3.69로 감소하였다. 굴참나무 임분과는 대조적으로 소나무 임분의 비시비구는 조정 기간에 3.15였으나 시비 기간은 3.65로 증가하였다(Figure 4). 인접 지역 소나무 임분에서 조사된 Q₁₀ 값은 비시비구 3.60, 시비구 3.47로(Jeong

et al., 2016), Q_{10} 값이 감소하였으며, 낙엽송 임분은 시비구 4.95, 비시비구 5.47로(Kim, 2008) 시비구가 낮은 경향을 보였다. 일반적으로 시비 후 Q_{10} 값은 감소하는 경향이 있으며(Liu et al., 2017), 이는 시비 후 미생물 호흡의 감소가 주 원인으로 알려져 있다(Jeong et al., 2016). 그러나 본 조사구에서의 시비에 따른 Q_{10} 값은 소나무 임분의 경우 변화가 없는 반면에 굴참나무 임분은 증가하는 경향을 보여 이전의 연구 결과와는 다르게 나타났다. 본 연구에서의 Q_{10} 값은 전 지구 산림 식생의 평균 Q_{10} 값인 3.46보다(Bond-Lamberty and Thomson, 2010) 높거나 낮은 경향을 보였다.

결 론

유사한 입지환경에서 생육한 소나무와 굴참나무 임분을 대상으로 시비에 따른 토양 CO₂ 방출량을 조사한 결과 두 임분 모두 시비 후 토양 CO₂ 방출이 증가하였다. 굴참나무 임분의 Q_{10} 값은 시비 전에 비해 시비 후 증가하였으나, 소나무 임분은 시비 전과 시비 후 Q_{10} 값에 변화가 없어 임분별 서로 다른 결과를 보였다. 본 연구 결과에 따르면 소나무와 굴참나무 임분의 토양 CO₂ 방출량은 시비에 따른 반응이 다르게 나타났으며, 시비에 반응하는 토양온도 상승에 대한 토양 CO₂ 방출량의 민감도도 임분별 차이가 있었다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014R1A1A2054994; No. 2020R1A2C1005791).

References

- Bond-Lamberty, B. and Thomson, A. 2010. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature* 464: 579-582.
- Borken, W., Xu, Y.J., Davidson, E.A. and Beese, F. 2002. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology* 8(12): 1205-1216.
- Bowden, R.D., Davidson, E., Savage, K., Arabia, C. and Steudler, P. 2004. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management* 196(1): 43-56.
- Bravo, F., LeMay, V., Jandl, R. and von Gadow, K. 2008. Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change. Springer. pp. 338.
- Deng, Q., Zhou, G., Liu, J., Liu, S., Duan, H. and Zhang, D. 2010. Responses of soil respiration to elevated carbon dioxide and nitrogen addition in young subtropical forest ecosystems in China. *Biogeosciences* 7(1): 315-328.
- Epron, D., Farque, L., Lucot, É. 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(3): 221-226.
- Erickson, H., Keller, M. and Davidson, E.A. 2001. Nitrogen oxide fluxes and nitrogen cycling during postagricultural succession and forest fertilization in the humid tropics. *Ecosystems* 4(1): 67-84.
- Fisk, M.C. and Fahey, T.J. 2001. Microbial biomass and nitrogen cycling responses to fertilization and litter removal in young northern hardwood forests. *Biogeochemistry* 53(2): 201-223.
- Gao, H., Hrachowitz, M., Schymanski, S.J., Fenicia, F., Sriwongsitanon, N. and Savenije, H.H.G. 2014. Climate controls how ecosystems size the root zone storage capacity at catchment scale. *Geophysical Research Letters* 41(22): 7916-7923.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C*.
- Ishizuka, S., Sakata, T., Sawata, S., Ikeda, S., Sakai, H., Takenaka, C., Tamai, N., Onodera, S., Shimizu, T., Kan-na, K., Tanaka, N. and Takahashi, M. 2009. Methane uptake rates in Japanese forest soils depend the oxidation ability of topsoil, with a new estimate for global methane uptake in temperate forest. *Biogeochemistry* 92(3): 281-295.
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D. W., Minkinen, K. and Byrne, K.A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137(3-4): 253-268.
- Janssens, I.A., Dieleman, W., Luysaert, S., Subke, J.A., Reichstein, M., Ceulemans, R., Ciais, P., Dolman, A.J., Grace, J., Matteucci, G., Papale, D., Piao, S.L., Schulze, E.D., Tang, J. and Law, B.E. 2010. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience* 3: 315-322.
- Jeong, J.H., Goo, K.S., Lee, C.H., Won, H.G., Byun, J.O. and Kim, C. 2003. Physico-chemical properties of Korean forest soils by parent rocks. *Journal of Korean Forest Society* 92(3): 254-262.
- Jeong, J., Kim, C., Lee, K.S., Bolan, N.S. and Naidu, R. 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.

- Jeong, J., Bolan, N. and Kim, C. 2016. Heterotrophic soil respiration affected by compound fertilizer types in red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) stands of Korea. *Forests* 7(12): 309.
- Jeong, J., Jo, C.G., Baek, G.W., Park, J.H., Ma, H.S., Yoo, B.O. and Kim, C. 2017. Soil and the foliage nutrient status following soil amendment applications in a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) plantation. *Journal of Sustainable Forestry* 36(3): 289-303.
- Kalra, Y.P. and Maynard, D.G. 1991. Methods manual for forest soil and plant analysis. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-319E. pp. 116.
- Kim, C. 2008. Soil carbon storage, litterfall and CO₂ efflux in fertilized and unfertilized larch (*Larix leptolepis*) plantations. *Ecological Research* 23(4): 757-763.
- Konda, R., Ohta, S., Ishizuka, S., Arai, S., Ansori, S., Tanaka, N. and Hardjono, A. 2008. Spatial structures of N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes from *Acacia mangium* plantation soils during a relatively dry season in Indonesia. *Soil Biology and Biochemistry* 40(12): 3021-3030.
- Lee, K.H. and Jose, S. 2003. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient. *Forest Ecology and Management* 185(3): 263-273.
- Liu, J., Bowman, K.W., Schimel, D.S., Parazoo, N.C., Jiang, Z., Lee, M., Bloom, A.A., Wunch, D., Frankenberg, C., Sun, Y., O'Dell, C.W., Gurney, K.R., Menemenlis, D., Gierach, M., Crisp, D. and Eldering, A. 2017. Contrasting carbon cycle responses of the tropical continents to the 2015-2016 El Niño. *Science* 358(6360): eaam5690.
- Moscatelli, M.C., Lagomarsino, A., De Angelis, P. and Grego, S. 2008. Short- and medium-term contrasting effects of nitrogen fertilization on C and N cycling in a poplar plantation soil. *Forest Ecology and Management* 255(3-4): 447-454.
- Nishina, K., Takenaka, C. and Ishizuka, S. 2009. Relationship between N₂O and NO emission potentials and soil properties in Japanese forest soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 55(1): 203-214.
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F. and Erasmi, S. 2016. Greenhouse gas emissions from soils—a review. *Geochemistry* 76(3): 327-352.
- Peng, Y., Thomas, S.C. and Tian, D. 2008. Forest management and soil respiration: Implications for carbon sequestration. *Environmental Reviews* 16: 93-111.
- Saiz, G., Byrne, K.A., Butterbach-bahl, K., Kiese, R., Blujdea, V. and Farrell, E.P. 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.
- Tyree, M.C., Seiler, J.R., Aust, W.M., Sampson, D.A. and Fox, T.R. 2006. Long-term effects of site preparation and fertilization on total soil CO₂ efflux and heterotrophic respiration in a 33-year-old *Pinus taeda* L. plantation on the wet flats of the Virginia Lower Coastal Plain. *Forest Ecology and Management* 234(1-3): 363-369.
- Vincent, G., Shahriari, A.R., Lucot, E., Badot, P.M. and Epron, D. 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.
- Wallenstein, M.D., McNulty, S., Fernandez, I.J., Boggs, J. and Schlesinger, W.H. 2006. Nitrogen fertilization decreases forest soil fungal and bacterial biomass in three long-term experiments. *Forest Ecology and Management* 222(1-3): 459-468.
- Weil, R.D. and Brady, N.C. 2017. *The Nature and Properties of Soils*. 15th edition. Pearson. pp. 1104.

Manuscript Received : June 30, 2020

First Revision : July 20, 2020

Accepted : September 1, 2020