

## 삼나무, 편백, 종가시나무 임분의 토양호흡에 관한 연구

백경린, 백경원, 최병길, 김호진, 이지현, 김춘식\*

경상국립대학교 환경산림과학부

(2022년 12월 17일 접수; 2023년 04월 03일 수정; 2023년 05월 01일 수락)

## Soil Respiration Rates in *Cryptomeria japonica* D. Don, *Chamaecyparis obtusa* Endl., and *Quercus glauca* Thunb. Stands

Gyeongrin Baek, Gyeongwon Baek, Byeonggil Choi, Hojin Kim, Jihyun Lee, Choonsig Kim\*

Division of Environmental and Forest Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, South Korea

(Received December 17, 2022; Revised April 03, 2023; Accepted May 01, 2023)

### ABSTRACT

The quantification of soil respiration rates is important to understand carbon cycles of forest ecosystems. Soil respiration rates were assessed using Li-8100A soil flux system in one evergreen broadleaved (*Quercus glauca* Thunb.) and two coniferous (*Cryptomeria japonica* D. Don and *Chamaecyparis obtusa* Endl.) stands from May 2020 to April 2022 in southern Korea. Monthly variations of soil respiration rates were higher in the *Q. glauca* stand than in the *C. japonica* and the *C. obtusa* stands. The mean soil respiration rates were significantly higher in the *Q. glauca* stand ( $2.63\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) than in the *C. japonica* ( $0.93\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) and *C. obtusa* ( $0.99\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) stands. The three stands showed exponential relationships between soil respiration rates and soil temperature ( $R^2 = 0.44-0.80$ ). The sensitivity of temperature ( $Q_{10}$  values) to soil respiration rates was highest in the *Q. glauca* stand (5.13), followed by the *C. obtusa* (3.10) and *C. japonica* (2.58) stands. These results indicate that soil respiration rates can be increased more in evergreen broadleaved stands than in coniferous stands under enhanced soil temperature.

**Key words:** Climate change, Forest soils, Soil CO<sub>2</sub> efflux, Japanese cedar, Japanese cypress, Japanese blue oak



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

## I. 서 론

지구 온도 상승에 대한 전 세계적인 우려와 함께 2015년 개최된 제21차 기후변화협약(UNFCCC) 당사국 총회에서는 “기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)”에 지구 온도가 산업화 이전 대비 1.5°C 상승 시 지구 온난화에 대한 영향과 온실가스 배출 경로에 대한 보고서를 제출하도록 요청한 바 있다. 그 결과 지구온난화가 현재 속도로 지속된다면 2030년에서 2052년 사이에 대기 온도가 1.5°C 상승할 가능성을 제시하고 있으며, 특히 온실가스 중 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 지구온난화에 가장 크게 기여하지만 복사 강제력을 통하여 온도 상승을 1.5°C 이내로 억제할 수 있는 것으로 보고하고 있다(IPCC, 2018). 그러나 온대 산림생태계 호흡의 약 60~70% 정도를 차지하는 토양호흡으로부터 대기로 방출되는 토양 CO<sub>2</sub> 방출량은 지속적으로 증가하고 있다(Bond-Lamberty, 2018).

산림 생태계에서 발생하는 토양 CO<sub>2</sub> 방출의 경우 식생유형에 따라 다양한 요인이 관여하는 것으로 알려져 있으며, 이는 임목의 생육특성, 미생물 활동, 뿌리활력, 세균 분해속도, 낙엽낙지량, 양분유효도, 토양의 물리·화학적 특성 등이 식생 발달 동안 시·공간적으로 다르게 나타나기 때문이다(Han *et al.*, 2007; Zheng *et al.*, 2010; Giasson *et al.*, 2013). 한편, 식생유형 간 토양호흡의 차이는 유기물 분해를 위한 조건이나 뿌리 호흡(Metcalf *et al.*, 2007; Kim and Jeong, 2016), 토양 유기탄소, 토양온도 및 토양 수분 함량의 차도 기여하는 것으로 알려져 있다(Vesterdal *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2017).

식생유형에 따른 임분별 토양호흡의 정량화는 대기 중 CO<sub>2</sub> 흡수 저감을 위한 조림 수종 선정(Vesterdal *et al.*, 2012; Kim and Jeong, 2016)이나 수종별 탄소 순환모델의 중요한 변수(Li *et al.*, 2017)로 다루어지고 있다. 본 연구의 대상 수종인 편백(*Chamaecyparis obtusa* Endl.)과 삼나무(*Cryptomeria japonica* D. Don)는 1970년대 이후 경제림 조성을 위해 남부지역에 대량 식재되었으며, 특히 편백은 소나무재선충병 피해지의 식생 복원을 위한 수종으로 가장 선호되고 있다. 상록 활엽수로서 증가시나무(*Quercus glauca* Thunb.)는 제주도에서 온대 남부지역까지 분포범위가 넓고 CO<sub>2</sub> 흡수능력이 매우 높은 수종으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2019). 이러한 중요성에도 불구하고 우리나라 남부지역에 이들 수종의 토양호흡과 관련된 연구는 제주도 중

가시나무 임분(Jeong *et al.*, 2017)을 제외하고 아직까지 없는 실정이다. 본 연구는 우리나라 남부 주요 조림 수종인 삼나무, 편백, 증가시나무 임분의 토양호흡을 임분간 비교 평가하기 위하여 수행하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 연구대상지 현황 및 토양호흡 측정

토양호흡은 산림 입지환경 요인의 영향이 크며 유사한 입지환경에서 조사되지 않는다면 수종과 입지요인 사이 상호효과(interaction effects)의 분리가 어려운 것으로 알려져 있다(Barba *et al.*, 2018). 이러한 문제점은 동일한 임령의 유사한 입지에 생육하는 임분을 대상으로 토양호흡을 조사함으로써 공간적 변동의 차를 극복할 수 있다. 본 연구 대상지는 경상남도 진주시에 위치한 국립산림과학원 “월아연구시험림” 내 유사한 입지환경과 동일한 년도(1999년)에 조성된 삼나무, 편백, 증가시나무 임분을 대상으로 하였다. 조사지는 사암을 모재로 생성된 암적갈색 약건 산림토양형(DRb<sub>2</sub>)이다. 조사구는 10×10m 크기의 총 12개 조사구[3 수종(삼나무, 편백, 증가시나무)×4 반복]를 설치하고, 각 조사구의 중심 부분에 직경 20cm, 높이 11cm의 PVC collar를 토양 1~2cm 깊이에 매설하였다. 토양호흡은 LI-8100A (Licor Bioscience, USA)에 survey chamber를 연결한 후 2020년 5월부터 2022년 4월까지 2년 동안 매월 정해진 날짜의 오전(09:30~12:00 AM)에 측정하였다. 토양온도는 토양호흡 조사 시점에 디지털 토양온도 측정기(K-Type, SDT 25, Summit, Korea)로 측정하였다. 토양수분, 토양 pH, 토양 EC, 토양 유기물 함량 측정을 위한 시료는 5cm 직경의 원통형 토양채취기를 이용하여 유기물층을 제거한 후 0~5cm 깊이의 시료를 채취하고 실험실로 운반한 후 분석하였다. 토양 pH와 EC는 1:5(토양:중류수) 혼합액을 대상으로 이온전극 pH 측정기(Model-735, ISTEK, Korea)와 EC 측정기(Orion 3-Star, Thermo Scientific, Singapore)로 측정하였다. 토양 수분 함량은 5g의 신선한 토양을 105°C 건조기에서 24시간 이상 건조 후 계산하였다. 토양 유기물 함량은 480°C 전기로에서 4시간 이상 회화 후 계산하였다.

### 2.2. 임목 및 토양 특성조사

각 임분의 임목 흉고직경은 2020년 3월, 12월, 2021년 11월에 직경 테이프를 조사하였다. 토양 특성은 깊이

10cm 부위를 400cm<sup>3</sup> 원통형 토양채취기를 이용하여 2020년 11월에 각 조사구별 1점씩 채취하고 실내에서 음건한 후 2mm 체로 선별하였다. 토양 입경 분포는 비중계법을 이용하여 USDA 입경 분포 기준에 따라 모래, 미사, 점토 함량을 결정하였다. 유기탄소 및 전질소 농도는 토양 건조량 시료를 0.420mm 체로 분쇄용 시료로 조제한 후 대용량 원소분석기(Vario Macro cube, Germany)로 측정하였다. 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 농도는 2.5g의 건조 토양에 암모늄 아세테이트 용액 55ml를 첨가하여 16시간 동안 진공 추출하고(Kalra and Maynard, 1991) 추출한 용액을 ICP (Perkin Elmer Optima 8000, USA)로 분석하였다.

### 2.3. 자료분석

수집된 자료의 임분 간 유의성 검정은 분산분석을 실시하였고, 유의적인 차이가 있는 경우 Tukey 방법에 의해 평균을 비교하였다(SAS Institute, 2003). 토양 호흡과 토양온도의 관계는 지수함수 모델을 개발하였으며, 토양온도에 대한 토양호흡의 민감도는  $Q_{10}$  값을 계산하였다(Saiz et al., 2006).

## III. 결 과

### 3.1. 임분 현황

임분 밀도는 편백 1,270본 ha<sup>-1</sup>, 증가시나무 1,114본 ha<sup>-1</sup>, 삼나무 1,050본 ha<sup>-1</sup> 순이었다. 2021년 11월에 조사한 결과에 따르면, 평균 흉고직경은 삼나무가 19.98cm로 가장 컸으며, 편백 18.71cm, 증가시나무가 16.66cm 순이었다. 흉고직경 증가량은 편백이 1.23cm로 삼나무 1.19cm나 증가시나무 0.83cm에 비해 크게 나타났다. 임분 흉고단면적과 흉고단면적 증가량은 증가시나무가 삼나무와 편백에 비해 작은 값을 보였다(Table 1).

### 3.2. 토양 특성

토양 입경분포 중 미사(silt)는 46.8~53.0%로 세 임분 모두 가장 높은 함량을 보였다(Table 2). 이는 조사구의 토양이 세립질의 협암이나 사암 등을 모재로 생성되었기 때문으로, 본 연구 결과는 우리나라 퇴적암 모재 산림토양의 미사 함량 51.2%와 유사하였다(Jeong et al., 2003). 토양 pH는 증가시나무 임분이 가장 낮았으나 전기전도도는 가장 높은 값을 보였으며, 토양 유기탄소, 전질소, 유효 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등은 임분 간 유의한 차이가 없었다( $P>0.05$ ).

**Table 1.** Stand density, DBH, and basal area in *Cryptomeria japonica* (CJ), *Chamaecyparis obtusa* (CO), and *Quercus glauca* (QG) stands

Stand	Stand density (tree ha <sup>-1</sup> )	DBH (cm)			DBH increment (cm)	Basal area (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )			Basal area increment (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )
		2020.03	2020.12	2021.11		2020.03	2020.12	2021.11	
CJ	1,050	18.79	19.45	19.98	1.19	30.13	32.29	34.13	4.00
CO	1,270	17.48	18.11	18.71	1.23	32.53	34.95	37.35	4.82
QG	1,114	15.83	16.18	16.66	0.83	21.69	22.66	24.06	2.37

**Table 2.** Selected soil property in *Cryptomeria japonica* (CJ), *Chamaecyparis obtusa* (CO), and *Quercus glauca* (QG) stands

Stand	Particle size distribution (%)			Soil pH	EC (uS cm <sup>-1</sup> )	Organic Carbon (%)	Total Nitrogen (%)	Avail. P (mg kg <sup>-1</sup> )	Exchangeable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )		
	Sand	Silt	Clay						K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
CJ	20.5±3.4 <sup>a</sup>	53.0±2.5 <sup>a</sup>	26.5±1.3 <sup>a</sup>	5.46±0.03 <sup>a</sup>	103±13 <sup>ab</sup>	2.55±0.5 <sup>a</sup>	0.19±0.04 <sup>a</sup>	3.9±0.93 <sup>a</sup>	0.36±0.09 <sup>a</sup>	4.08±0.54 <sup>a</sup>	0.83±0.16 <sup>a</sup>
	25.5±1.3 <sup>a</sup>	50.7±0.5 <sup>a</sup>	23.8±1.2 <sup>a</sup>	5.08±0.06 <sup>b</sup>	87±6 <sup>b</sup>	2.73±0.7 <sup>a</sup>	0.17±0.06 <sup>a</sup>	5.0±0.64 <sup>a</sup>	0.19±0.01 <sup>a</sup>	2.63±0.48 <sup>a</sup>	0.81±0.05 <sup>a</sup>
CO	26.7±3.0 <sup>a</sup>	46.8±2.1 <sup>a</sup>	26.5±2.1 <sup>a</sup>	4.61±0.06 <sup>c</sup>	140±18 <sup>a</sup>	4.50±1.4 <sup>a</sup>	0.30±0.08 <sup>a</sup>	9.4±5.4 <sup>a</sup>	0.38±0.12 <sup>a</sup>	3.03±1.39 <sup>a</sup>	1.18±0.39 <sup>a</sup>

\*Mean±one standard error. Different letters among three stands represent significant differences at  $P<0.05$ .

**3.3. 월별 토양호흡 및 환경요인 변동**

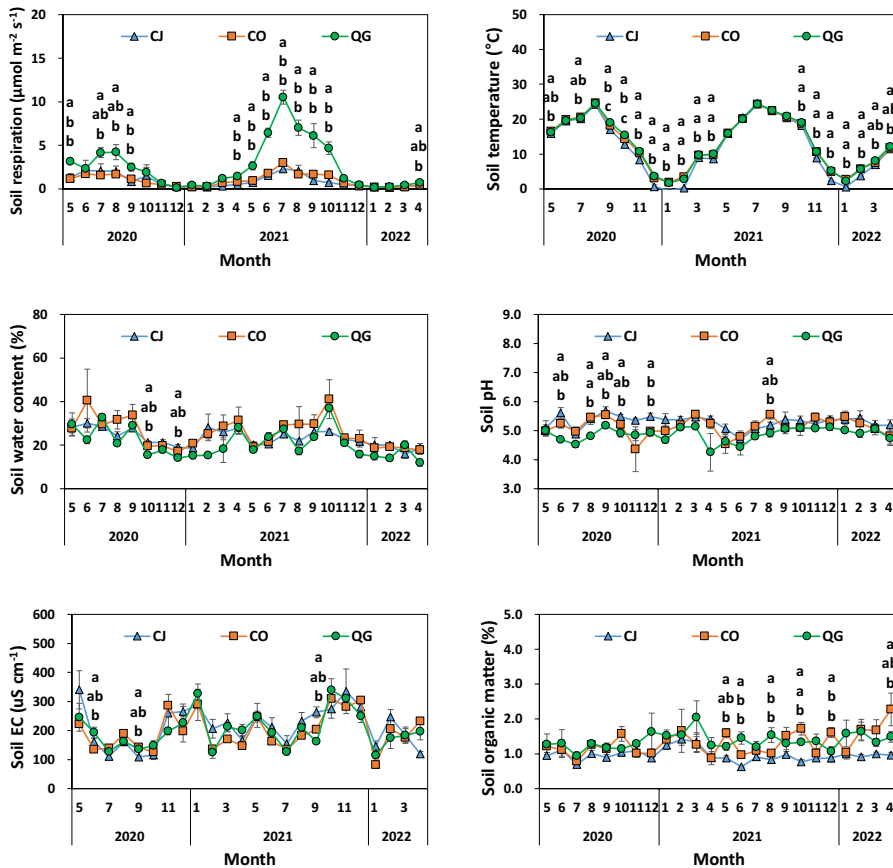
삼나무, 편백, 종가시나무 임분의 토양호흡은 계절적으로 뚜렷한 차이가 있었다. 임목 생장기(4~10월)에 측정된 토양호흡은 종가시나무 임분이 삼나무나 편백 임분에 비해 유의적으로 높은 값을 보였으나, 동절기(11~3월)는 임분 간 차이가 없었다(Fig. 1). 조사기간 동안 월별 최댓값은 2021년 7월로 종가시나무 임분이  $10.53\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 편백  $3.00\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 삼나무  $2.30\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 나타났다.

토양온도는 2020년 8월과 2021년 5월부터 9월을 제외하고 삼나무 임분이 편백이나 종가시나무 임분에 비해 유의적으로 낮았다. 토양온도의 월별 변동은 토양호흡의 월별 변동과 유사한 형태를 보였으나, 토양 수분 함량은 2020년 10월과 12월을 제외하고 임분 간 유의

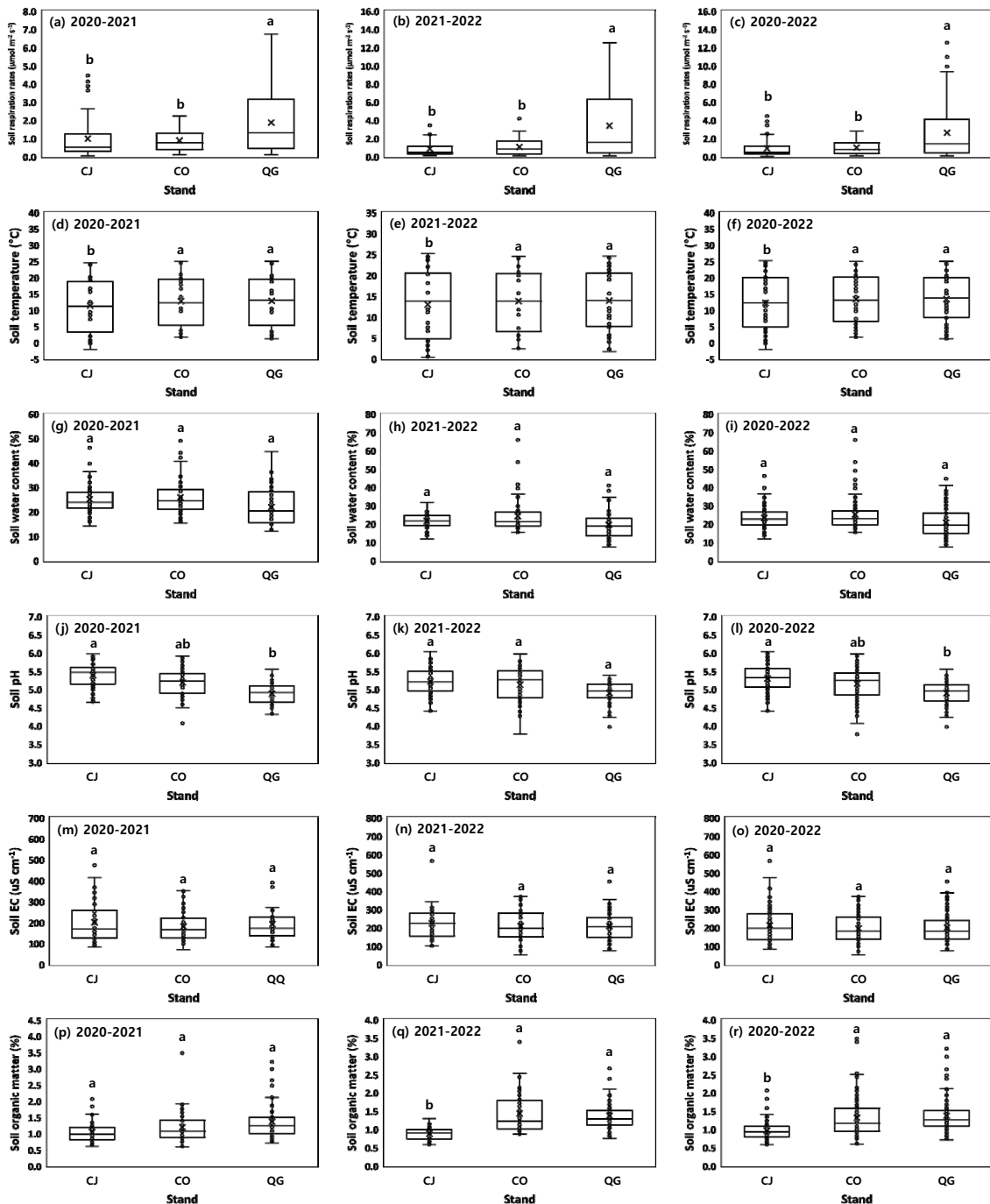
적인 차이가 없었다. 토양 유기물 함량은 주로 삼나무 임분이 종가시나무나 편백 임분에 비해 낮게 나타났다. 토양 pH는 종가시나무 임분이 삼나무나 편백 임분에 비해 낮게 나타나는 경향을 보였으나, EC는 유의적인 차이가 없었다.

**3.4. 토양호흡 및 환경요인의 연 변화**

토양호흡(Fig. 2)은 2020~2021년, 2021~2022년 모두 종가시나무 임분이 삼나무나 편백 임분보다 유의적으로 크게 나타났으며, 평균 토양호흡은 종가시나무 임분이  $2.63\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로, 삼나무 임분  $0.93\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 과 편백 임분  $0.99\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에 비해  $\text{CO}_2$  방출이 많았다.



**Fig. 1.** Monthly variation of soil respiration rates, soil temperature, soil water content, soil pH, soil EC, and soil organic matter content in *Cryptomeria japonica* (CJ), *Chamaecyparis obtusa* (CO), and *Quercus glauca* (QG) stands. Vertical bars indicate one standard error. Different letters on the bar represent significant differences at  $P < 0.05$ .



**Fig. 2.** Mean of soil respiration rates (a, b, c), soil temperature (d, e, f), soil water content (g, h, i), soil pH (j, k, l), soil EC (m, n, o), and soil organic matter content (p, q, r) in *Cryptomeria japonica* (CJ), *Chamaecyparis obtusa* (CO), and *Quercus glauca* (QG) stands. The box represents the median and the 25<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentiles, × represents the arithmetic mean, the solid lines extend to 1.5 of the interquartile range and the values outside this range are indicated by circle. Vertical bars indicate one standard error. Different letters on the bar represent significant differences at  $P < 0.05$ .

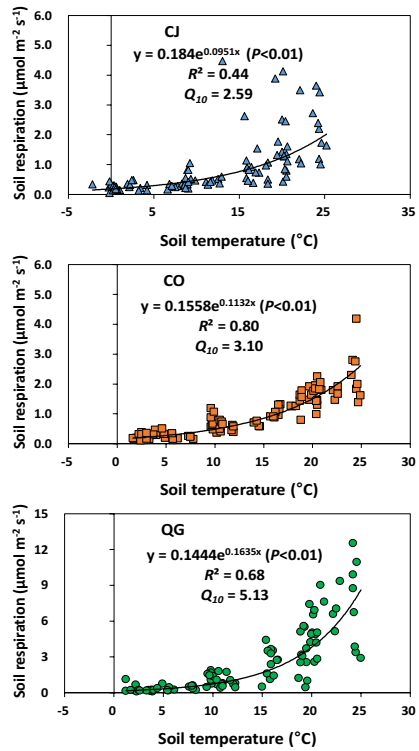
토양온도는 삼나무가 12.17°C로 편백 13.26°C와 종가시나무 13.36°C에 비해 유의적으로 낮은 값을 보였다. 토양 pH는 삼나무 임분이 지속적으로 높은 값을 보여 평균 토양 pH는 종가시나무 임분에 비해 유의적으로 높게 나타났다(Fig. 2). 토양 수분 함량과 전기전도도는 조사기간 동안 임분 간 유의적인 차이가 없었다. 토양 유기물 함량은 삼나무 임분이 편백 임분이나 종가시나무 임분에 비해 유의적으로 낮은 값을 보였다.

**3.5. 토양호흡과 토양온도와의 관계**

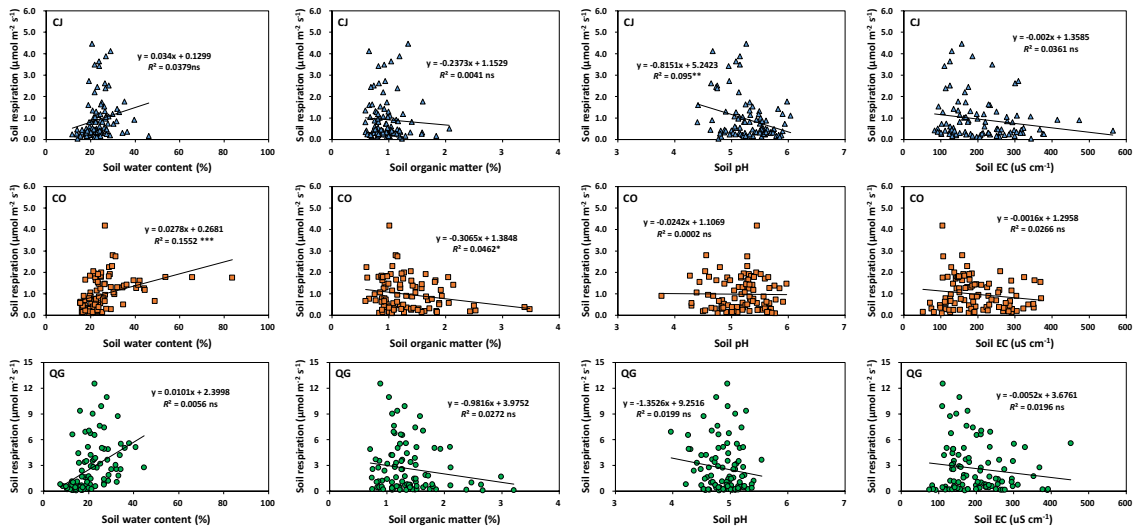
세 임분의 토양호흡은 토양온도와 유의적인( $P < 0.05$ ) 지수함수 관계를 보였다(Fig. 3). 지수함수 추정식의 결정계수(coefficient of determination:  $R^2$ )는 삼나무 임분이 0.44, 편백 임분 0.80, 종가시나무 임분 0.68로 삼나무 임분의 설명력이 가장 낮았다.  $Q_{10}$  값은 종가시나무 임분이 5.13으로, 삼나무 임분 2.59와 편백 임분 3.10에 비해 가장 크게 나타났다(Fig. 3).

**3.6. 토양호흡과 환경요인의 관계**

토양호흡과 토양 pH와 토양 EC, 토양 수분 함량, 토양 유기물 함량의 관계를 조사한 결과 토양 pH는 삼나무 임분에서 유의적인 부의 상관이 있었으나, 편백과 종가시나무 임분에서는 유의적인 관계가 없었다(Fig. 4). 토양 수분 함량의 경우 편백 임분은 유의적인 정의 상



**Fig. 3.** Exponential regressions of soil respiration rate against the soil temperature in *Cryptomeria japonica* (CJ), *Chamaecyparis obtusa* (CO), and *Quercus glauca* (QG) stands.



**Fig. 4.** Relationships between soil respiration rate and soil environmental factors in *Cryptomeria japonica* (CJ), *Chamaecyparis obtusa* (CO), and *Quercus glauca* (QG) stands. ns: non-significance, \*:  $P < 0.05$ , \*\*:  $P < 0.01$ .

관이 있었으나 토양 유기물 함량과는 부의 상관성이 있었다. 토양 EC와 토양호흡은 상관관계가 나타나지 않았다.

## IV. 고 찰

### 4.1. 토양호흡의 월별 변동

토양호흡의 월별 변동은 증가시나무가 편백이나 삼나무 임분에 비해 크게 나타났으며, 임목 성장 기간인 4월에서 10월 사이는 임분 간 유의적인 차이가 있었다. 토양호흡은 뿌리나 균근군에서 발생하는 호흡(autotrophic respiration)과 토양 미생물에 의한 호흡(heterotrophic respiration)으로 구성되며 임목 성장 기간 동안 삼나무나 편백 임분에 비해 증가시나무 임분의 토양호흡은 이들 요인에 의한 기여도가 크게 나타났기 때문으로 사료된다. 한편 토양호흡의 계절적 변동에는 토양온도와 토양 수분 함량이 가장 크게 기여하는 것으로 알려져 있으며(Mitani *et al.*, 2006; Baek *et al.*, 2016; Baek and Kim, 2020), 일본에서 조사된 삼나무(Ohashi *et al.*, 1999)나 편백 임분에 토양호흡의 계절적 변동도 토양온도와 토양수분이 주로 관여하였다(Mitani *et al.*, 2006). 그러나 본 연구의 결과에 따르면 조사한 세 임분 모두 월별 토양호흡의 변동은 토양 수분 함량의 월별 변동과 뚜렷한 관계가 나타나지 않았다. 이는 임목 성장 기간 동안 토양 수분 함량이 15% 이하로 낮아질 경우 토양호흡의 감소가 발생할 수 있다고 알려져 있으나(Deng *et al.*, 2010), 본 연구에서는 세 임분 모두 조사 기간 동안 토양 수분 함량이 15% 이상이었기 때문으로 사료된다. 그러나 토양 유기물 함량, 토양 pH, 토양 전기전도도는 세 임분 모두 월별 변동이 크지 않아 토양호흡 월별 변동의 주요 인자가 아닌 것으로 나타났으며, 타 연구에서도 유사한 결과가 보고된 바 있다(Kim and Jeong, 2016).

### 4.2. 연 토양호흡과 환경요인의 비교

조사기간 동안 증가시나무 임분의 높은 토양호흡은 토양온도가 13.36°C로 삼나무의 12.17°C에 비해 높게 나타나고, 토양 생물의 에너지 및 영양원으로 제공될 수 있는 토양 유기물 함량도 증가시나무 임분은 1.37%로 삼나무 임분 0.96%에 비해 높기 때문일 수 있다. 그러나 토양호흡에 영향을 끼칠 수 있는 환경요인인 토양 수분 함량은 임분 간 차이가 없어 토양호흡의 차이에 기여하는 요인은 아닌 것으로 나타났다. 본 연구 결과

와는 대조적으로 일본에서 조사된 결과에 따르면 편백 임분의 토양 수분 함량은 토양호흡과 부의 상관성이 있었으며, 이는 과도한 수분 함량에 따른 미생물 활성이 산소화산의 저해와 함께 감소하고 그 결과 유기물 분해가 느리게 진행되기 때문으로 보고된 바 있다(Katayama *et al.*, 2018). 한편, 증가시나무 임분의 평균 토양 pH는 4.87로 삼나무 임분 pH 5.30, 편백 임분 pH 5.14에 비해 낮으나 토양호흡은 가장 크게 나타나 낮은 토양 pH가 이들 임분의 토양호흡에 미치는 영향은 크지 않았다.

### 4.3. 토양호흡과 토양온도와의 관계

토양호흡과 토양온도는 세 임분 모두 유의적인 지수함수 관계가 있었으며, 삼나무 임분의 토양호흡 추정 지수함수식의 결정계수가 낮게 나타난 것은 유사한 토양온도에서 토양호흡의 시·공간적 변동이 타 임분에 비해 크게 나타났기 때문으로 사료된다.

$Q_{10}$  값도 임분 간 상당한 차이가 있어 증가시나무는 삼나무 임분에 비해 약 2배 정도, 편백 임분에 비해 1.5배 정도 높아 토양온도 상승에 대한 토양호흡의 민감도가 가장 클 것으로 나타났다. 유사한 결과로 국내 제주도 증가시나무 임분의  $Q_{10}$  값은 3.98로 구상나무 임분의 3.29보다 큰 값을 보였으며(Jeong *et al.*, 2017), 유사한 입지에서 생육하는 소나무  $Q_{10}$  값은 1.99, 굴참나무는 3.14로서 활엽수인 굴참나무의  $Q_{10}$  값이 크게 나타났다(Baek and Kim, 2020). 한편, 일본에서 조사된 삼나무 임분의  $Q_{10}$  값은 2.0에서 2.5 (Ohashi *et al.*, 1999), 편백의  $Q_{10}$  값은 2.00~2.20 (Mitani *et al.*, 2006) 범위에 분포하였으며, 대만 삼나무 조림지의  $Q_{10}$  값은 1.74~2.44 정도(Huang *et al.*, 2017)로, 본 연구 결과와 차이가 크지 않거나 약간 낮게 나타났다.

## V. 결 론

본 연구는 동일한 시기에 식재된 상록침엽수인 삼나무와 편백, 상록활엽수인 증가시나무 임분을 대상으로 임분 간 토양호흡을 비교하고 토양 환경요인이 토양호흡에 미치는 영향을 조사하였다. 월별 토양호흡의 변동은 증가시나무 임분이 삼나무나 편백 임분에 비해 크게 나타났다. 조사기간동안 평균 토양호흡은 증가시나무 임분이 편백 임분이나 삼나무 임분에 비해 2.5배 이상 토양 CO<sub>2</sub> 방출이 크게 나타났다. 조사한 세 임분 모두 토양온도를 독립변수로 하여 토양호흡의 추정이 가능하였으며,  $Q_{10}$  값은 증가시나무 임분이 가장 크게 나타

나 토양온도 상승에 따른 토양호흡 증가에 가장 민감하게 반응할 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 남부지방 주요 조림수종의 탄소순환 모델에 기초자료 제공과 함께, 조림수종 선정시 임분 간 토양 호흡의 차이나  $Q_{10}$  값 등의 고려가 필요함을 보여주고 있다.

## 적 요

본 연구는 동일한 임분연령과 유사한 입지환경에서 생육한 삼나무, 편백, 증가시나무 임분을 대상으로 2020년 5월부터 2022년 4월까지 2년 동안 토양호흡을 측정하고 토양 환경요인과의 관계를 조사하였다. 토양 호흡은 세 임분 모두 뚜렷한 월별 변동을 보였으며 증가시나무 임분의 변동이 삼나무나 편백 임분에 비해 크게 나타났다. 조사기간 동안 평균 토양호흡은 증가시나무 임분이  $2.63\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로, 편백  $0.99\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 삼나무  $0.93\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에 비해 유의적으로 토양  $\text{CO}_2$  방출( $P < 0.05$ )이 크게 나타났다. 한편, 토양 pH는 증가시나무가 pH 4.87로 삼나무 pH 5.30, 편백 pH 5.14에 비해 낮은 값을 보였으나, 토양수분 함량, 토양온도, 토양 전기전도도, 토양 유기탄소 함량 등은 임분 간 유의한 차가 없었다. 조사한 임분 모두 토양온도와 토양 호흡 사이에 유의적인 지수함수모델 관계가 있었으며 ( $R^2 = 0.44-0.80$ ),  $Q_{10}$  값은 삼나무 2.58, 편백 3.10, 증가시나무 5.13으로 증가시나무 임분이 가장 크게 나타났다. 본 연구 결과에 따르면 증가시나무 임분은 삼나무와 편백 임분에 비해 토양호흡이 많고 토양온도 상승에 가장 크게 반응할 것으로 나타났다.

## 감사의 글

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

## REFERENCES

- Baek, G., C. G. Jo, and C. Kim, 2016: Seasonal variations of soil  $\text{CO}_2$  efflux rates and soil environmental factors in *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* stands. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **18**(3), 120-126.
- Baek, G., and C. Kim, 2020: Soil  $\text{CO}_2$  efflux dynamics in response to fertilization in *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* stands. *Journal of Korean Society of Forest Science* **109**(3), 271-280.
- Barba, J., A. Cueva, M. Bahn, G. A. Barron-Gafford, B. Bond-Lamberty, P. J. Hanson, A. Jaimes, L. Kulmala, J. Purnpanen, R. L. Scott, G. Wohlfahrt, and R. Vargas, 2018: Comparing ecosystem and soil respiration: Review and key challenges of tower-based and soil measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* **249**, 434-443.
- Bond-Lamberty, B., 2018: New techniques and data for understanding the global soil respiration flux. *Earth's Future* **6**(9), 1176-1180.
- Deng, Q., G. Zhou, J. Liu, S. Liu, H. Duan, and D. Zhang, 2010: Responses of soil respiration to elevated carbon dioxide and nitrogen addition in young subtropical forest ecosystems in China. *Biogeosciences* **7**(1), 315-328.
- Giasson, M. A., A. M. Ellison, R. D. Bowden, P. M. Crill, E. A. Davidson, J. E. Drake, S. D. Frey, J. L. Hadley, M. Lavine, J. M. Melillo, J. W. Munger, K. J. Nadelhoffer, L. Nicoll, S. V. Ollinger, K. E. Savage, P. A. Steudler, J. Tang, R. K. Varner, S. C. Wofsy, D. R. Foster, and A. C. Finzi, 2013: Soil respiration in a northeastern US temperate forest: a 22-year synthesis. *Ecosphere* **4**(11), 1-28.
- Han, G., G. Zhou, Z. Xu, Y. Yang, J. Liu, and K. Shi, 2007: Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry* **39**(2), 418-425.
- Huang, Y. H., Y. Hung, I. R. Lin, T. Kume, O. V. Menyailo, and C. H. Cheng, 2017: Soil respiration patterns and rates at three Taiwanese forest plantations: dependence on elevation, temperature, precipitation, and litterfall. *Botanical Studies* **58**, 49.
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global warming of  $1.5^\circ\text{C}$ . Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3-24.
- Jeong, H. M., R. H. Jang, H. R. Kim, and Y. H. You, 2017: Soil  $\text{CO}_2$  efflux in a warm-temperature and sub-alpine forest in Jeju, South Korea. *Journal of Ecology and Environment* **41**, 23.
- Jeong, J. H., K. S. Goo, C. H. Lee, H. G. Won, J. O. Byun, and C. Kim, 2003: Physico-chemical properties of Korean forest soils by parent rocks. *Journal of Korean Forest Society* **92**(3), 254-262.
- Kalra, Y. P., and D. G. Maynard, 1991: Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis.



- Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-319E, 116pp.
- Katayama, A., T. Enoki, T. Kume, and K. Otsuki, 2018: Characteristics of soil respiration in upper and lower slope positions with different aboveground biomass: a case study in a Japanese cypress forest. *Journal of Agricultural Meteorology* **74**(2), 63-70.
- Kim, C., and J. Jeong, 2016: Comparison of soil CO<sub>2</sub> efflux rates in *Larix leptolepis*, *Pinus densiflora* and *P. rigitaeda* plantations in Southern Korea. *Dendrobiology* **76**, 51-60.
- Kim, C., S. Kim, G. Baek, and A. R. Yang, 2019: Carbon and nitrogen responses in litterfall and litter decomposition in red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) stands disturbed by pine wilt disease. *Forests* **10**(3), 244.
- Li, W., Z. Bai, C. Jin, X. Zhang, D. Guan, A. Wang, F. Yuan, and J. Wu, 2017: The influence of tree species on small scale spatial heterogeneity of soil respiration in a temperate mixed forest. *Science of the Total Environment* **590-591**, 242-248.
- Metcalfe, D. B., P. Meir, L. E. O. C. Aragão, Y. Malhi, A. C. L. da Costa, A. Braga, P. H. L. Gonçalves, J. de Athaydes, S. S. de Almeida, and M. Williams, 2007: Factors controlling spatio-temporal variation in carbon dioxide efflux from surface litter, roots, and soil organic matter at four rain forest sites in the eastern Amazon. *Journal of Geophysical Research* **112**, G04001.
- Mitani, T., Y. Kosugi, K. Osaka, S. Ohkubo, S. Takanashi, and M. Tani, 2006: Spatial and temporal variability of soil respiration rate at a small watershed revegetated with Japanese cypress [*Chamaecyparis obtusa*]. *Journal of the Japanese Forest Society* **88**(6), 496-507.
- Ohashi, M., K. Gyokusen, and A. Saito, 1999: Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest floor using an open-flow chamber method. *Forest Ecology and Management* **123**(2-3), 105-114.
- 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.
- Vesterdal, L., B. Elberling, J. R. Christiansen, I. Callesen, and I. K. Schmidt, 2012: Soil respiration and rates of soil carbon turnover differ among six common European tree species. *Forest Ecology and Management* **264**, 185-196.
- Zheng, Z. M., G. R. Yu, X. M. Sun, S. G. Li, Y. S. Wang, Y. H. Wang, Y. L. Fu, and Q. F. Wang, 2010: Spatio-temporal variability of soil respiration of forest ecosystems in China: Influencing factors and evaluation model. *Environmental Management* **46**(4), 633-642.