

상수리나무림의 토양호흡에 대한 뿌리호흡의 기여^{1a}이규진² · 원호연² · 문형태^{3*}Contribution of Root Respiration to Soil Respiration for *Quercus acutissima* Forest^{1a}Kyu-Jin Lee², Ho-Yeon Won², Hyeong-Tae Mun^{3*}

요 약

공주 근교의 상수리나무림을 대상으로 단근처리 방법을 적용하여 토양호흡량에 대한 뿌리호흡량의 기여율을 파악하였다. 토양호흡구(control plot)와 미생물호흡구(trenched plot)를 설치하고 2011년 6월부터 2012년 5월까지 IRGA 토양호흡측정기를 사용하여 CO₂발생량을 측정하였다. CO₂발생량은 하절기에 증가한 후 동절기에 감소하는 경향을 보였다. 토양호흡구와 미생물호흡구의 CO₂발생량은 8월에 가장 높았으며, 이때 토양호흡구와 미생물호흡구의 CO₂발생량은 각각 1.345, 0.897g CO₂ m⁻² hr⁻¹로 토양호흡구에 비해 미생물호흡구에서 33.31% 낮게 나타났다(P<0.05). CO₂발생량은 1월에 가장 낮았으며, 이때 토양호흡구와 미생물호흡구에서 각각 0.097, 0.032g CO₂ m⁻² hr⁻¹로 토양호흡구에 비해 미생물호흡구에서 67.01% 낮게 나타났다(P<0.01). 연간 CO₂발생량은 토양호흡구와 미생물호흡구에서 각각 4.320, 2.834kg CO₂ m⁻² yr⁻¹로 나타났다. CO₂발생량은 토양호흡구와 미생물호흡구에서 토양온도와 높은 상관관계가 있었다. 토양호흡구와 미생물호흡구간의 CO₂발생량 차이로 추정된 뿌리호흡량은 토양호흡량 중 약 34.40%를 차지하는 것으로 나타났다.

주요어: 토양 CO₂ 발생량, 종속 영양 생물 호흡, 독립 영양 생물 호흡

ABSTRACT

A trenching method was used to determine the contribution of root respiration to soil respiration in *Quercus acutissima* forest in the vicinity of Gongju, Chungnam Province, Korea. CO₂ efflux in soil respiration plot(R_{control}, R_c) and microbial respiration plot(R_{trenched}, R_t) in *Q. acutissima* forest were measured from June 2011 to May 2012 by using IRGA soil respiration analyzer. Seasonal CO₂ efflux in R_c and R_t were higher in summer season than in winter season. In August, maximum CO₂ efflux in R_c and R_t was 1.345 and 0.897 g CO₂ m⁻² hr⁻¹, respectively. CO₂ efflux in R_t was lower by 33.31% than that in R_c(P<0.05). In January, CO₂ efflux in R_c and R_t was 0.097 and 0.032g CO₂ m⁻² hr⁻¹, respectively. CO₂ efflux in R_t was lower by 67.01% than that in R_c(P<0.01). The amount of annual CO₂ efflux from R_c and R_t was 4.320, 2.834kg CO₂ m⁻² yr⁻¹, respectively. There was a significant correlations between soil temperatures and soil respiration. Contribution of root respiration to total soil respiration in this *Q. acutissima* forest was 34.40%.

KEY WORDS: SOIL CO₂ EFFLUX, HETEROTROPHIC RESPIRATION, AUTOTROPHIC RESPIRATION

1 접수 2012년 8월 24일, 수정(1차: 2012년 9월 18일), 게재확정 2012년 9월 19일

Received 24 August 2012; Revised(1st: 18 September 2012); Accepted 19 September 2012

2 공주대학교 생명과학과 Dept. of Life Science, Kongju National University, Gongju(314-701), Korea

* 교신저자 Corresponding author(htmun@kongju.ac.kr)

서론

CO₂는 자연적 그리고 인위적 활동을 통해 방출되는 중요한 온실가스 중의 하나이며, 대기 중 CO₂ 농도는 산업화 이전의 280ppm에서 2005년에는 379ppm으로 증가하였고, 연간 CO₂ 증가율은 최근 10년동안 가장 높아 평균 1.9ppm yr⁻¹의 증가를 보이고 있다(IPCC 2007). CO₂ 증가로 인한 기후 변화가 대두되면서 이에 따른 토양호흡량의 변화에 관심이 높아지고 있다(McHale *et al.*, 1998). 토양호흡은 전 지구적 탄소 순환에서 두 번째로 큰 플럭스(75×1015g C/yr)이며(Bond-lamberty *et al.*, 2004), 산림 토양호흡은 미생물호흡과 뿌리호흡의 합으로(Hanson *et al.*, 2000; Zhou *et al.*, 2009), 토양생물과 뿌리의 활동을 나타내는 지표가 된다(Coleman, 1973). 생태계의 탄소순환에서 토양호흡의 중요성이 강조된 이후 많은 사람들이 다양한 기후대와 식생형에서 토양호흡을 측정하였다. 토양호흡에 관련된 초기의 연구는 주로 기후와 식생에 따른 토양 호흡량 비교와 연간 토양 호흡량의 추정 그리고 토양 호흡에 영향을 미치는 환경요인에 관한 것이었다.

최근에는 토양으로부터 발생하는 CO₂를 정량화하여 산림 생태계의 탄소 순환을 예측하려는 연구가 진행되고 있다(Nakane 1995, Raich and Tufekcioglu 2000). 토양호흡에서 미생물호흡은 최근에 주목을 받고 있으나, 토양호흡에 대한 뿌리호흡의 기여도는 잘 알려져 있지 않다. 그 이유는 토양호흡에 대한 뿌리호흡의 기여율을 정확히 파악하는 것이 어렵기 때문이다(Hanson *et al.*, 2000).

산림생태계의 순생태계생산량(NEP)은 순 일차생산량(NPP)과 미생물호흡(Rm)에 의해 결정되므로(Lee *et al.*, 2003; Luo and Zhou, 2006), 순생태계생산량을 측정하기 위해서는 미생물호흡과 뿌리호흡의 정확한 추정이 중요하다(Lee *et al.* 2003).

$$NEP = NPP - R_m \dots\dots\dots (1)$$

미생물호흡(Rm)은 토양호흡(Rs)과 뿌리호흡(Rr)의 차이로 나타낼 수 있다.

$$R_m = R_s - R_r \dots\dots\dots (2)$$

$$NEP = NPP - (R_s - R_r) \dots\dots\dots (3)$$

이전의 연구에서 보고된 토양호흡량에 대한 뿌리호흡의 비는 10-90%로 다양하다(Hanson *et al.*, 2000). 토양호흡중 미생물호흡과 뿌리호흡을 추정하기 위한 연구 방법은 토양호흡의 구성요소를 직접 측정하는 방법, 뿌리를 제거하는 방법, 동위원소를 이용하는 방법 등으로 구분된다(Bond-lamberty *et*

al., 2004; Hanson *et al.*, 2000). 이중 단근처리(trenching method)는 비교적 간단하여 산림생태계에서 주로 적용되고 있다(Bowden *et al.*, 1993; Hanson *et al.*, 2000; Koo *et al.*, 2005). 뿌리 제거방법 중 하나인 단근처리를 이용한 뿌리호흡의 측정(Bowden *et al.*, 1993; Ewel *et al.*, 1987)은 연구 대상지의 자연 상태 특성을 반영하여 교란을 최소화하고 다른 실험 방법보다 비교적 간단한 과정으로 이루어질 수 있어(Koo *et al.*, 2005), 토양호흡 중 뿌리호흡의 비율을 추정하는데 사용되었다.

본 연구는 국내 산림의 주종을 이루고 있는 상수리나무림에서 미생물호흡, 뿌리호흡을 측정하여 토양호흡량 중 뿌리호흡이 차지하는 비율 및 계절적인 변화를 파악하여 조사지역의 순생태계생산량 및 탄소순환을 파악하기 위한 기초 자료를 얻는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 조사는 충청남도 공주시 금학동에 위치한 해발 약 220m (N 36° 25' 21", E 127° 07' 06")의 상수리나무림에서 실시되었다. 교목층은 상수리나무(*Quercus acutissima*)가 우점하는 가운데 굴참나무 (*Q. variabilis*)가 낮은 밀도로 출현하였다. 관목층에는 상수리나무, 밤나무(*Castanea crenata*), 생강나무(*Lindera obtusiloba*), 비목나무(*Lindera erythrocarpa*), 국수나무(*Stephanandra incisa*), 개울나무

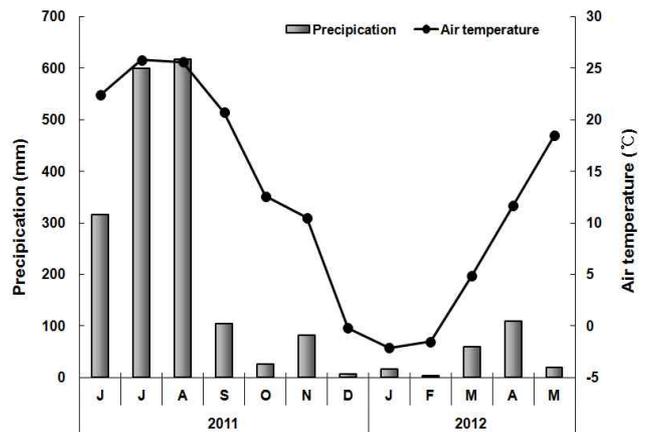


Figure 1. Seasonal precipitation and temperature from June 2011 to May 2012 at Buyeo meteorological station about 32km distance from the study area

(*Rhus trichocarpa*) 등이 분포하고 있으며, 초본층은 매우 빈약하였다. 상수리나무림내 교목층의 평균 흉고직경은 19.7cm, 임상의 낙엽층의 두께는 약 6.3cm이었다. 조사지소로부터 약 30km 떨어진 부여 측후소의 자료에 따르면 조사 지역의 30년간 (1981~2010년) 평균기온은 12.2°C, 연평균 강수량은 1,349.2mm 이었으며, 조사기간 (2011. 6~2012. 5) 동안 연평균기온은 12.4°C, 연평균 강수량은 1,961.3mm 이었다(Figure 1).

2. 단근처리

2009년 11월 단근처리를 위해 상수리나무림내 2m×2m의 방형구를 설치하고 방형구내 지피식생을 모두 제거하였다. 방형구 경계선 밖으로 폭 30cm, 깊이 50cm의 도랑을 파고 경계면의 모든 뿌리를 제거하고 0.5mm 두께의 천막용 비닐로 미생물호흡구 주변을 싼 후 도랑을 메웠다. 매월 미생물호흡구(R_i) 내 목본류의 지상부를 절단하고 초본류의 경우 토양이 교란되지 않도록 주의하여 제거하였다. 토양호흡구(R_c)와 미생물호흡구(R_i)는 각각 3개지소씩 선정하였으며, R_i 의 물리적 변화를 최소화하고 뿌리 분해에 의한 오차를 줄이기 위해 R_i 를 약 19개월 동안 안정화 시킨 후 2011년 6월부터 2012년 5월까지 매월 2회씩 R_c 와 R_i 에서 CO_2 발생량을 측정하였다.

3. 토양호흡 및 토양온도 측정

CO_2 발생량은 2011년 6월부터 2012년 5월까지 12개월 동안 정기적으로 매달 2주에 한번씩 11:00~13:00 사이에 R_c 와 R_i 에서 3회 측정하여 그 값을 평균하였다. 측정방법은 휴대용 적외선 가스 분석기(IRGA; EGM-4 PP system, UK)를 사용하여 dynamic closed chamber method를 이용하였으며, 측정지점간의 오차를 줄이기 위해서 수관폭을 고려해 수관이 겹치는 지점에서 토양호흡을 측정하였다.

R_c 에서 측정된 CO_2 발생량을 토양호흡량, R_i 에서 측정된 CO_2 발생량을 미생물호흡량으로 사용하였으며, 측정된 CO_2 발생량 중 뿌리 호흡 비율은 토양호흡구의 CO_2 발생량에서 미생물호흡구의 CO_2 발생량을 뺀 값을 토양호흡구의 CO_2 발생량에 대한 %로 추정하였다. 매달 2회씩 측정된 토양호흡량으로 매달 발생되는 평균 토양호흡량($g CO_2 m^{-2} mo^{-1}$)을 계산한 후 이를 합산하여 연간 토양호흡량($kg CO_2 m^{-2} yr^{-1}$)을 추정하였다.

조사기간 동안 조사지역의 토양온도를 측정하였다. 토양온도는 T&D Thermo Recorder(TR-71U)를 사용하여 조사기간 동안 1시간 간격으로 측정하였으며, 온도기록계 본체에 연결된 sensor는 토양층 5cm, 15cm 깊이에 묻어 깊이에

따른 온도 변화를 측정하였다.

4. 통계처리

토양호흡에 영향을 주는 토양온도와 관계는 상관분석과 회귀분석을 실시하였다. 토양 온도와 토양 호흡량 간의 관계를 나타낼 때 널리 쓰이는 Q_{10} 값을 구하기 위해서 지수함수식(식 4)을 이용하여 회귀분석한 후 그 모형으로부터 Q_{10} 값을 산출하였다(Boone *et al.*, 1998). 토양호흡량과 미생물호흡량의 평균치 차이는 STATISTICA 7 프로그램을 사용하여 일원분산분석을 실시하였으며, Duncan's multiple range test를 통해 유의성을 검정하였다.

$$y = \beta_0 e^{\beta_1 x} \dots\dots\dots (4)$$

y 는 토양호흡량($g CO_2 m^{-2} hr^{-1}$), x 는 지온($^{\circ}C$), β_0 , β_1 는 상수이다.

$$Q_{10} = e^{10\beta_1} \dots\dots\dots (5)$$

결 과

1. 토양온도

토양층별 토양온도는 하절기에는 상층토가 높았으며, 동절기에는 하층토가 높았다(Figure 2). 깊이에 따른 평균 토양온도는 상층토와 하층토에서 각각 11.28 ± 8.35 , $11.41 \pm 8.05^{\circ}C$ 로 큰 차이가 없었다. 토양의 최대온도는 8월중에 측정되었으며, 상층토와 하층토에서 각각 24.48 ± 2.19 , $22.10 \pm 1.91^{\circ}C$ 로 나타났다. 토양의 최저온도는 2월중에 측정되었으며,

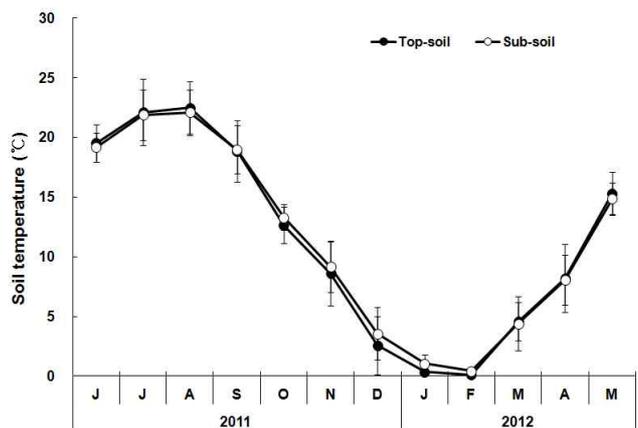


Figure 2. Seasonal soil temperature in *Quercus acutissima* forest in the study area

상층토와 하층토에서 각각 0.11 ± 0.02 , $0.42 \pm 0.32^\circ\text{C}$ 로 기록되었다(Figure 2). 토양 온도는 R_c 와 R_t 간에 유의한 차이가 나타나지 않아 두 지소의 평균값을 사용하였으며, 토양온도와 CO_2 발생량과의 상관관계 분석시 상층토 온도를 사용하였다.

2. 토양호흡량, 미생물호흡량, 뿌리호흡량의 계절적 변화

R_c 와 R_t 의 평균 CO_2 발생량은 각각 $0.500(0.097\sim 1.345)$, $0.328(0.032\sim 0.897)\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 로 지소간 유의한 차이는 없었으나, 2월과 3월을 제외한 조사기간 동안 계절별 유의한 차이가 나타났다($P < 0.05$). 토양호흡량과 미생물호흡량은 하절기에 증가한 후 동절기에 감소하는 경향을 보였다(Figure 3). CO_2 발생량이 가장 높은 8월에 토양호흡, 미생물호흡의 평균 CO_2 발생량은 각각 1.345 , $0.897\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 로 토양호흡량에 비해 미생물호흡량이 33.31% 낮게 나타났다($P < 0.05$). CO_2 발생량이 가장 낮은 1월에 토양호흡, 미생물호흡의 평균 CO_2 발생량은 0.097 , $0.032\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 로 토양호흡량에 비해 미생물호흡량이 67.01% 낮게 나타났다($P < 0.01$).

조사 지역에서 뿌리호흡의 평균 CO_2 발생량은 $0.172(0.018\sim 0.448)\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 로 나타났으며, 뿌리호흡은 토양호흡과 마찬가지로 하절기에 증가한 후 동절기에 감소하는 경향을 보였다. 뿌리호흡량은 8월에 가장 높아 그 값이 $0.448\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 이었으며, 가장 낮은 2월에는 $0.018\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 로 나타났다(Figure 3).

3. 연간 토양호흡량

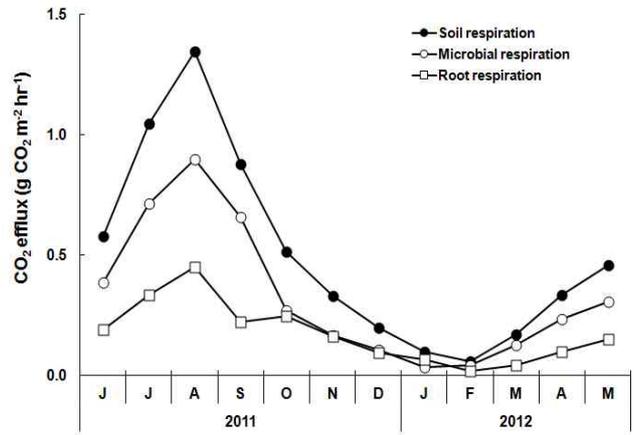


Figure 3. Seasonal soil respiration($R_{control}$), microbial respiration ($R_{trenched}$) and root respiration($R_{control} - R_{trenched}$) in *Quercus acutissima* forest in the study area

연간 토양호흡량 추정치는 $4.320\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났으며, 이중 연간 미생물호흡량과 뿌리호흡량은 각각 2.834 , $1.486\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났다. 연간 미생물호흡량과 뿌리호흡량 중 각각 50.7, 47.1% 정도가 여름철(6~8월)에 집중되었으며, 겨울철(12~2월)에 각각 4.6, 8.5% 정도로 추정되어 계절별 차이가 큰 것으로 나타났다(Table 1).

토양호흡 중 뿌리호흡 비율이 가장 높은 시기는 2012년 1월(67.14%), 뿌리호흡 비율이 가장 낮은 시기는 2011년 9월(25.00%)로 나타났으며, 토양호흡과 미생물호흡의 CO_2 발생량 차이로 추정된 뿌리호흡은 토양호흡량 중 약 34.40%를 차지하는 것으로 나타났다.

Table 1. Amount of seasonal and yearly CO_2 efflux in *Quercus acutissima* forest in the study area

Month	CO_2 efflux($\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ mo}^{-1}$)			% of root respiration
	Soil respiration	Microbial respiration	Root respiration	
Jun-11	0.416	0.279	0.137	32.93
Jul-11	0.754	0.513	0.241	31.96
Aug-11	0.968	0.646	0.322	33.26
Sep-11	0.632	0.474	0.158	25.00
Oct-11	0.369	0.193	0.176	47.70
Nov-11	0.236	0.120	0.116	49.15
Dec-11	0.143	0.076	0.066	46.15
Jan-12	0.070	0.023	0.047	67.14
Feb-12	0.042	0.030	0.013	30.95
Mar-12	0.121	0.090	0.031	25.62
Apr-12	0.239	0.169	0.070	29.29
May-12	0.330	0.221	0.109	33.03
Yearly total ($\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)	4.320	2.834	1.486	34.40

고찰

토양호흡 중 미생물호흡과 뿌리호흡의 경우 방법상의 문제로 뿌리호흡을 정확하게 측정하기 어려워 국내에서 뿌리호흡에 대한 연구는 많지 않다. 본 연구에서는 우리나라에 널리 분포하고 있는 상수리나무림에서 단근처리(trenching method)를 통해 토양호흡에 대한 뿌리호흡의 비율을 추정하고 토양온도 변화에 따른 관계를 검토하였다.

단근 처리 후 뿌리 제거 지역에서 호흡량이 급격히 증가하다 감소하는 경향을 보이는 것을 보고된바 있다(Bowden *et al.*, 1993; Ewel *et al.*, 1987). 이는 잘려진 뿌리가 토양미생물에 의해 분해되면서 CO₂가 발생하여, 자연 상태보다 미생물 호흡이 증가되는 것으로(Koo *et al.*, 2005), 단근처리된 곳의 뿌리 분해량을 추정하여 보완할 수 있으나(Lee *et al.*, 2003), 방법상의 문제로 인해 뿌리 분해에 의해 방출되는 CO₂를 측정하기 위해서 미생물호흡구내 물리적 변화가 발생하는 요인이 될 수 있다. 뿌리의 분해 영향을 최소화하기 위해 단근 처리 후 4~9개월 후에 토양 호흡을 측정한다(Ewel *et al.*, 1987; Bowden *et al.*, 1993; Haynes and Gower, 1995), 본 연구에서는 뿌리 분해에 의한 오차를 줄이기 위해 미생물호흡구를 약 19개월 동안 안정화 시킨 후 CO₂발생량을 측정하였다.

토양호흡에 관련된 연구들은 대부분 토양호흡이 일차적으로 토양온도에 의해서 주도되며, 이들간에 상당히 높은 관계가 있음을 보고하였다(Witkamp, 1969; Son and Kim, 1996; McHale *et al.*, 1998; Knapp *et al.*, 1998; Lee and Mun, 2001). 본 연구에서도 발생원별 호흡과 토양온도 사이에 높은 상관관계가 나타났다. 동절기에서 하절기로 갈수

록 토양온도가 증가함에 따라 토양호흡량은 지수적으로 증가하였으며, 미생물호흡량도 유사한 경향성을 보였다. 토양호흡, 미생물호흡, 뿌리호흡과 토양온도의 상관관계는 각각 R²=0.9129, 0.9127, 0.7648로 나타났다(Figure 4).

Boone *et al.*(1998)과 Zhou *et al.*(2007)은 뿌리호흡이 미생물호흡보다 온도에 민감할 수 있다고 하였으며, Lee *et al.*(2010)에 의하면 참나무속 우점림(*Quercus*-dominated stands)에서 뿌리호흡(Q₁₀=4.5)이 미생물호흡(Q₁₀=2.8)보다 온도에 민감하다고 보고한바 있다. 그러나 Lee *et al.*(2003)은 미생물호흡과 토양 온도 사이의 높은 상관관계가 있는 반면, 뿌리호흡율은 토양온도와 상관관계가 낮다고 보고하였다. 본 연구결과 지수함수 관계에서 추정된 CO₂발생량의 토양온도 민감도(Q₁₀)는 토양호흡, 미생물호흡, 뿌리호흡에서 각각 3.0, 3.4, 2.6으로 나타나, 뿌리호흡에 비해 미생물호흡의 토양온도 민감도가 높게 나타났다.

본 조사지소내 토양호흡에 대한 미생물호흡 및 뿌리호흡의 기여는 생장기(3~11월)과 휴지기(12~2월) 사이에서 차이가 있는 것으로 나타났으며, 연간 미생물호흡량과 뿌리호흡량 중 각각 50.7, 47.1% 정도가 여름철(6~8월)에 집중되었으며, 겨울철(12~2월)에 각각 4.6, 8.5% 정도로 추정되었다.

Agren *et al.*(1991)은 지온이 0°C 이하이면 미생물 활성에 영향을 주어 낙엽의 분해속도가 감소하고 10~30°C에서는 급격하게 증가하며, 40°C가 넘으면 낙엽 분해속도가 다시 감소한다고 보고하였으며, Ryan and Law(2005)는 뿌리호흡은 새로운 식물조직 합성과 살아있는 조직 보전에서 소비된 대사에너지와 관련이 있다고 보고하였다. 본 연구에서 생장기와 휴지기간 미생물호흡 및 뿌리호흡의 계절적 차이는 온도 변화에 따른 미생물에 의한 낙엽 분해, 식물조직 성장과 유지에 관련된 생리활성에 기인한 것으로 사료된다.

Lee *et al.*(2005)은 냉온대활엽수림에서 뿌리호흡이 토양호흡량의 43%, Nakane *et al.*(1996)은 졸참나무림에서 뿌리호흡이 토양호흡의 51% 정도를 차지한다고 보고하였다. 국내의 경우 Lee *et al.*(2010)은 참나무속 우점림(*Quercus*-dominated stands)에서 뿌리호흡은 토양호흡량의 31%, Pyo *et al.*(2003)은 잣나무조림지에서 토양호흡량 중 뿌리호흡의 기여도는 46%라고 보고하였다. 본 연구에서는 뿌리호흡이 토양호흡 중 차지하는 비율이 34%(25.00~67.14%)로 Lee *et al.*(2010)이 보고한 31%와는 유사하며, 많은 산림 생태계에 대해서 보고된 10~90%(Hanson *et al.*, 2000) 범위 내에 포함된다.

Raich and Tufekcioglu(2000)는 뿌리 조직의 질소 농도 차이로 뿌리호흡량은 수종에 따라 다른 것으로 보고된 바 있으며, Burton *et al.*(2002)은 온도와 뿌리 질소 농도와 서

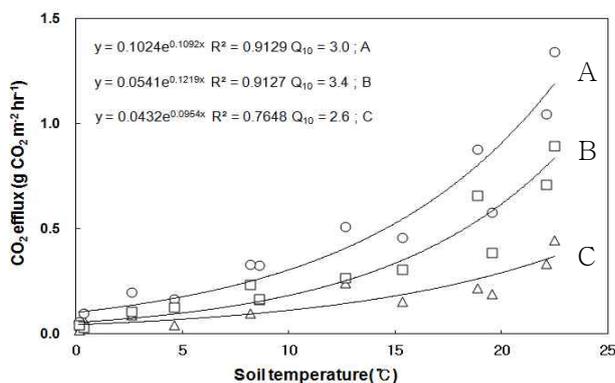


Figure 4. The correlation between soil respiration(A: R_{control}), microbial respiration(B: R_{trenched}), root respiration(C: R_{control}-R_{trench}) and soil temperature at 5cm depth in *Quercus acutissima* forest in the study area

로 관련이 있다고 보여지고 있지만, 이러한 관계가 다양한 식생형에 따라 얼마나 보편적인지 잘 알려지지 않았다고 보고하였다. 여러 연구들에서 토양의 유기물로 공급되는 낙엽의 양이 많을수록 토양호흡이 증가한다고 보고되었다 (Boone *et al.*, 1998; Bowden *et al.*, 1993). 생산된 낙엽의 분해과정에 따른 낙엽의 C와 N 그리고 P의 함량은 분해자들이 성장과 증식에 필요한 에너지원과 질소원으로 이들을 이용하기 때문에 낙엽분해에 매우 중요하다(Won *et al.*, 2012). 또한, 토양온도와 토양수분 함량은 토양 확산계수를 변경시켜 토양 CO₂농도에 영향을 미칠 수 있어(Johnson *et al.*, 1994; Nobel and Palta, 1989), 미생물호흡과 뿌리호흡은 비생물적 요인에 의해 영향을 받는다(Boone *et al.*, 1998; Widén and Majdi, 2001).

Lee and Mun(2005)은 상수리나무림의 연간 토양호흡량 추정치를 4.38kg CO₂ m⁻² yr⁻¹로 보고하였으며, Hanson *et al.*(1993)은 유럽과 미국의 참나무가 우점하는 삼림에서 연간 CO₂의 발생량은 0.6~3.9kg CO₂ m⁻² yr⁻¹ 이라고 보고하였고, Nakane(1995)는 일본의 40년생 소나무림은 3.6kg CO₂ m⁻² yr⁻¹ 로 보고한 바 있다. 또한 Son and Kim(1996)은 리기다소나무림과 낙엽송의 연간 토양호흡량 추정치를 2.3~2.7kg CO₂ m⁻² yr⁻¹이라고 보고하였다. 본 연구지소의 연간 토양호흡량 추정치는 4.32kg CO₂ m⁻² yr⁻¹로 Lee와 Mun(2005)이 보고한 연간 토양호흡량 추정치와 유사하나, 유사한 기후대의 삼림에 비해 높게 나타났다. 이는 조사지소간 식생형, 낙엽생산량, 낙엽의 분해율 등의 차이에 의한 것으로 판단된다.

앞서 언급된 여러 연구에서 토양호흡은 생물적 요인과 비생물적 요인에 의해 영향을 받는 것으로 보고된 바 있어, 토양호흡 중 뿌리 호흡을 추정하기 위해서는 수종에 따른 식물의 생리적 활력 변화, 뿌리성장에 따른 호흡 변화, 조사지소의 낙엽생산과 분해 등의 생물학적 요인과 토양 온도, 토양 수분 등의 환경 요인의 영향을 장기적으로 조사하는 것이 필요하다고 판단된다.

인용문헌

- Agren, G.L., R.E. McMurtrie, W.J. Parton, J. Pastor and H.H. Shugart(1991) State-of-the-art of model of production-decomposition linkage in conifer and grassland ecosystems. *Ecological Applications* 1: 49-53.
- Bond-Lamberty, B., C. Wang and S.T. Gower(2004) Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree physiology* 24: 1,387-1,395.
- Boone, R.D., K.J. Nadelhoffer, J.D. Canary and J.P. Kaye(1998) Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature* 396: 570-572.
- Bowden, R.D., K.J. Nadelhoffer, R.D. Boone, J.M. Melillo and J.B. Garrison(1993) Contributions of aboveground litter, belowground litter and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Can. J. For. Res.* 23: 1,402-1,407.
- Burton, A.J., K.S. Pregitzer, R.W. Ruess, R.L. Hendrick and M.F. Allen(2002) Root respiration in North American forest: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia* 131: 559-568.
- Coleman, D.(1973) Compartmental analysis of total soil respiration: an exploratory study. *Oikos* 24: 465-468.
- Ewel, K.C., W.P. jr. Cropper and H.L. Gholz(1987) Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantation. II. Importance of root respiration. *Can. J. For. Res.* 17: 330-333.
- Hanson, P.J., N.T. Edwards, C.T. Garten and J.A. Andrews(2000) Separation root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observation. *Biogeochemistry* 48: 115-146.
- Hanson, P.J., S.D. Wullschleger, S.A. Bohlman and D.E. Todd(1993) Seasonal topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest. *Tree Physiology* 13: 1-15.
- Haynes, B.E. and S.T. Gower(1995) Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin. *Tree physiology* 15: 317-325.
- IPCC(2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 104pp.
- Johnson, D., D. Geisinger, R. Walker, J. Newman and J. Vose (1994) Soil pCO₂, soil respiration, and root activity in CO₂-fumigated and nitrogen-fertilized ponderosa pine. *Plant and Soil* 165: 129-138.
- Knapp, A.K., S.L. Conard and J.M. Blair(1998) Determination of soil CO₂ flux from a subhumid grassland: Effects of fire and fire history. *Ecological Application* 4: 760-770.
- Koo, J.W., Y. Son, R.H. Kim and J. Kim(2005) A study on Methods of Separating Soil Respiration by Source. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 7(1): 28-34. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.J. and H.T. Mun(2005) Organic Carbon Distribution in an Oak Forest. *Kor J. Ecol.* 28(5): 265-270. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.S., K. Nakane, T. Nakatsubo and H. Koizumi(2005) The importance of root respiration in annual soil carbon fluxes in a cool-temperate deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 134: 95-101.
- Lee, M.S., K. Nakane, T. Nakatsubo and H. Koizumi(2003) Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant and*

- Soil 255: 311-318.
- Lee, N.Y., J.W. Koo, N.J. Noh, J. Kim and Y. Son(2010) Autotrophic and heterotrophic respiration in needle fir and *Quercus*-dominated stands in a cool-temperate forest, central Korea. J. Plant Res. 123: 485-495.
- Lee, Y.Y. and H.T. Mun(2001) A Study on the Soil Respiration in a *Quercus acutissima* Forest. Kor J. Ecol. 24(3): 141-147. (in Korean with English abstract)
- Luo, Y. and X. Zhou(2006) Soil respiration and the environment. Elsevier, San Diego, California, pp. 17-19.
- McHale, P.J., M.J. Mitchell and F.P. Bowles(1998) Soil warming in a northern hardwood forest: trace gas fluxes and leaf litter decomposition. Can. J. For. Res. 28: 1,365-1,372.
- Nakane, K.(1995) Soil carbon cycling in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation. Forest Ecology and Management 72: 185-197.
- Nakane, K., T. Kohno and T. Horikoshi(1996) Root respiration rate before and just after clear-felling in a mature, deciduous, broad-leaved forest. Ecological Research 11: 111-119.
- Nobel, P.S. and J.A. Palta(1989) Soil O₂ and CO₂ effects on root respiration of cacti. Plant and Soil. 120: 263-271.
- Pyo, J.H., S.U. Kim, H.T. Mun(2003) A Study on the Carbon Budget in *Pinus koreansis* Plantation. Kor J. Ecol. 26(3): 129-134. (in Korean with English abstract)
- Raich, J.W. and A. Tufekcioglu(2000) Vegetation and soil respiration: correlations and controls. Biogeochemistry 48: 71-90.
- Ryan, M.G. and B.E. Law(2005) Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. Biogeochemistry 73: 3-27.
- Son, Y. and H.W. Kim(1996) Soil Respiration in *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* Plantations. J. Kor. For. Soc. 85(3): 496-505. (in Korean with English abstract)
- Widén, B. and H. Majdi(2001) Soil CO₂ efflux and root respiration at three sites in a mixed pine and spruce forest: seasonal and diurnal variation. Can. J. For. Res. 31: 786-796.
- Witkamp, M.(1969) Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from the forest floor. Ecology 47: 492-494
- Won, H.Y., K.H. Oh, J.H. Pyo and H.T. Mun(2012) Decay Rate and Nutrient Dynamics during Litter Decomposition of *Quercus acutissima* and *Quercus myrsinaefolia*. Kor. J. Env. Eco. 26(1): 74-81. (in Korean with English abstract)
- 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. Journal of geophysical research 114: 1-9.
- Zhou, X., S. Wan and Y. Luo(2007) Source components and inter-annual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem. Glob Chang Biol. 13: 761-775.