

임령이 다른 잣나무림에서의 토양 호흡 분석

남기정

경상대학교 생물교육과·경상대학교 농업생명과학연구원

Analysis of Soil CO₂ efflux across three age classes of plantation *Pinus koraiensis*

Ki-Jung Nam

Department of Biology Education, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea.
Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea.
(Received : 25 April 2018, Revised: 01 May 2018, Accepted: 01 May 2018)

요약

산림생태계에서 대기로의 토양의 이동은 토양 호흡이라는 과정을 통해 이루어진다. 본 연구에서는 임령이 다른 잣나무림을 대상으로 생육기 동안의 토양 호흡값과 토양 내 뿌리의 양, 미생물 개체군 생물량을 측정하여, 토양 호흡량이 임령에 따라 어떻게 다르며, 뿌리와 미생물 개체군이 얼마나 기여할 것인지 알아보려고 하였다. 토양 온도와 토양 호흡은 임령과는 상관없이 유사한 패턴을 보여 7월까지의 증가하고 이후 감소하였다. 산림의 임령이 높을수록 토양 호흡량이 대체적으로 높았다. 토양 내 뿌리와 미생물을 조사한 결과, 임령이 높을수록 토양 내 존재하는 지름 2 mm 이하인 세근의 양이 많았으며 토양 미생물 개체군의 생물량이 많았다. 토양에서 뿌리를 제거하였을 때 70년 숲은 변화가 없었으나, 40년 숲에서는 토양 호흡값이 감소하였다. 본 연구결과로 볼 때, 산림의 연령이 높아질수록 토양 호흡량이 커지며, 식물 뿌리와 특히 토양 미생물이 토양 호흡값에 많은 기여를 하고 있는 것으로 생각해 볼 수 있다.

핵심어 : 토양 호흡, 잣나무림, 미생물 생물량, 뿌리 생물량, 임령

Abstract

The objective of this study was to examine effects of stand age on soil CO₂ efflux in plantation *Pinus koraiensis*, and to elucidate what extent plant (fine) root and soil microbial biomass contribute to the whole soil CO₂ efflux. In three age classes (20-yr-old, 40-yr-old, 70-yr-old) of plantation *Pinus koraiensis*, in-situ soil respiration, plant fine root biomass and soil microbial biomass were measured from April to November in 2004. Regardless of stand age, soil temperature and soil CO₂ efflux increased until July then slowly decreased. Soil respiration was higher in 70-yr-old stand than in 20- and 40-yr stands. Fine root biomass and soil microbial biomass was also higher in 70-yr-old stand. Root exclusion decreased soil respiration in 40-yr stand, but not in 70-yr stand. Soil microbial biomass was higher in 70-yr stand, but there was no monthly variation between July and November. The results suggest that soil respiration may increase as plant stand ages and microbial contribution could play more roles in older stands.

Key words : Bootstrap Method, SIR Algorithm, Snowfall Depth, Frequency Analysis

1. 서 론

토양으로부터 대기로의 탄소의 이동은 이산화탄소의 형태로 이루어지며 이 과정을 토양 호흡이라 한다 (Eugene 2003). 육상생태계에서 대기와 육상생태계 간의 이산화탄소 교환(net ecosystem exchange, NEE)은 광합성에 의한 탄소의 고정량과 호흡에 의한 탄소의 배출량 간의 미묘한 균형에 의해 이루어지며, 이 미묘한 균형의 결과, 매년 발생하는 대기중의 탄소(7~8Gton) 중 일정량(1~3Gton)을

육상생태계가 흡수하고 있고, 이는 육상생태계가 전 지구적으로 늘고 있는 이산화탄소를 흡수하는 저장고 역할을 하고 있음을 의미한다 (Valentini 2000). 그러나 지구적인 아닌 지역적인 수준에서는 어디가 진정한 탄소의 저장소(sink)이며, 탄소의 저장소가 어떤 분포를 하고 있는지 의견의 일치를 이루지 못하고 있다 (Pan et al. 2011).

토양 호흡은 뿌리에 의한 호흡(autotrophic respiration)과 미생물에 의한 호흡(heterotrophic respiration)으로 구성된다. 대기에서 광합성을 통해 고정된 탄소는 낙엽이나 뿌리 추출액(exudate), 뿌리 고사체의 형태로 토양 내로 들어오고, 토양 내에서의 생명활동의 결과 발생하는 이산화탄소의 형태로 토양 밖으로 나가게 되는데, 주로 식물 뿌리에 의한 호흡(autotrophic respiration)과 토양 내에 존재하는

* To whom correspondence should be addressed.
Department of Biology Education, Gyeongsang National University,
Jinju 52828, Republic of Korea
E-mail: Prin225@gnu.ac.kr

미생물에 의한 호흡(heterotrophic respiration)에서 이루어진다(Wiseman 2004). 토양 호흡은 이 뿌리와 미생물로부터 나온 흐름(flux)의 혼합된 결과물이기 때문에 이들이 각각 여러 다른 요인들과 상호작용하는 방식에 따라 다양하게 영향을 받으므로 시간적 공간적 변이가 나타나는 것은 자연스런 현상이다 (Buchmann 2000; Wei 2010).

토양 호흡에서 식물 뿌리와 미생물이 차지하는 비중은 연구가 이루어진 지역에 따라서 편차가 아주 커서 적게는 20%에서부터 90%에 이르는데 (Hanson 2000), 토양 호흡을 제대로 이해하기 위해서는 이 두 구성 요소에 대해 더 많은 이해가 있어야 함에도 야외조건에서의 연구의 어려움 때문에 아직 충분한 연구가 이루어지지 못하고 있다 (Buchmann 2000). 숲에서는 뿌리 중에서도 세근(fine root)의 역할이 중요하다. 세근은 주로 직경이 2mm이하인 것을 의미하는데 숲의 총 중량(biomass)중에서 1% 정도를 차지하는 적은 양이지만 연 생산량이 숲의 순 생산량(the net primary production)의 절반 이상을 차지하는 것으로 추산되고 있다 (Iversen 2010). 더구나, 세근의 회전율(turnover) 시간이 매우 짧기 때문에 뿌리의 호흡 중 중요한 부분을 차지할 가능성이 높지만 세근을 호흡과 연관 지은 연구는 상대적으로 많이 이루어지고 있지 않다 (Davis et al. 2004).

또한, 토양 호흡 연구는 주로 성숙된 숲에서 이루어지고 있다 (Kolali 2004; Valentini 2000). 반면, 숲의 연령(stand age)이 토양 호흡에 미치는 영향에 관해서는 연구가 많이 이루어지지 않았고, 일부 수행된 연구들의 결과는 임령이 높아질수록 토양호흡이 증가하거나 감소하는 등 서로 상반된 결과들을 보여주고 있어, 임령에 따른 토양 호흡의 특성에 대해 더 잘 이해하기 위해서는 좀 더 많은 연구가 필요하다 (Wang et al. 2011).

국내의 토양 호흡에 관한 연구는 비교적 최근부터 이루어져 더 많은 연구가 필요한 상황이다. 예로, Lee and Moon (2001)의 활엽수림에서 숲틈과 대조지역에서 토양호흡을 측정하여 비교하였고, Son(1994) 등이 식재된 활엽수림에서, Son and Kim (1996)이 리기다 소나무림과 낙엽송림의 토양 호흡을 측정하여 비교하였고, Pyo et al. (2003)는 잣나무림을 대상으로 탄소수지를 연구하였다. 국내 토양 호흡 연구 동향에 관해서는 Lee et al. (2010)가 비교 분석하였다. 토양 호흡에 뿌리가 기여하는 정도에 관해서는 국내 거의 연구된 바가 없어, Son and Kim (1996)과 Pyo et al. (2003)에서 뿌리제거방법으로 연구함이 보고되었고, Lee et al. (2012)는 상수리나무림에서 토양호흡에 뿌리와 미생물이 기여하는 정도를 조사하였다. 그밖에 토양 호흡과 연관짓지는 않았으나 뿌리에 관한 연구가 몇몇 수행되어 Jeon and Oh (1994)에서 강원도 소나무림의 뿌리의 형태와 분포에 관해 연구하였으며, Kwak and Kim (1994)은 신갈나무와 상수리나무 숲에서 세근의 공간분포를 연구하였다.

본 연구에서는, 임령 20년, 40년, 70년된 잣나무림을 대상으로 토양 호흡값을 측정하고, 각 연령별로 뿌리(세근)의 생물량과 미생물의 생물량을 구하여, 잣나무림의 연령에 따른 토양

호흡값의 특징을 파악하고자 하였다. 또한, 임령별로 뿌리와 미생물이 토양 호흡에 관여하는 정도를 연관지어 보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사지 개황

본 연구는 강원도 홍천군 화촌면 풍천리 덕밭재(37° 49.45'N, 127° 52.42'E)내 잣나무 식재림을 대상으로 2004년 4월부터 11월까지 수행되었다. 임분 평균수령이 20년, 40년, 70년 된 곳 중 환경 변이를 최대한 줄이기 위해 인접한 (5km 이내) 위치에 있으며 사면 (북동사면, 혹은 동사면)과 고도(약 400m)가 유사한 지역을 조사지로 선정하였다. 임령 20년 숲은, 교목의 평균 수고 8 m, 식피율 41~70%이며, 하층 관목으로 고추나무, 국수나무, 싸리, 노린재나무 등이, 초본층은 애기나리, 큰 개별꽃, 제비꽃류, 양치류 등이 서식하였다. 임령 40년 숲은, 교목의 평균 수고 14 m, 식피율 41~70%이며, 하층관목으로는 생강나무, 노린재나무, 미역줄나무, 고추나무, 산초나무, 병꽃나무, 개울나무, 두릅나무 등이, 초본층은 애기나리, 큰 개별꽃, 선밀나무, 제비꽃류 등이 서식하였다. 임령 70년 숲은 교목의 평균 수고 24 m, 식피율 41~70%이며, 하층 관목으로는 생강나무, 노린재나무, 미역줄나무, 고추나무, 산초나무, 병꽃나무, 개울나무, 두릅나무 등이, 초본층은 애기나리, 큰 개별꽃, 선밀나무, 제비꽃류 등이 서식하였다. 조사지내 전체 피도 중 관목이 차지하는 비율은 적어서 10% 미만이며, 연구기간 전 및 연구기간 전체에 걸쳐 간벌이나 기타 다른 관리를 하지 않았다.

2.2 토양 이산화탄소 배출량 측정

토양의 이산화탄소 배출량은 휴대용 Infrared Gas Monitor (EGM-4, PP System, Hitchin, UK)를 이용하여 측정하였다. 장비에 부착된 직경 100 mm × 높이 150 mm인 원통형 챔버를 임상의 리터를 제거한 다음 토양에 밀착시킨 후, 토양에서 챔버로 방출되는 이산화탄소를 측정하였다. 측정은 4, 5, 6, 7, 9, 11월 월 1회 비가 오지 않은 맑은 날을 선정하였으며, 하루 중 오전 10시에서 오후 4시 사이에 측정하였다. 예비 실험결과 잣나무 수목과의 거리에 따라 토양의 이산화탄소 배출량에 차이를 보였기 때문에, 측정값에 임분 내의 공간적인 변이를 줄이기 위하여 수목과의 거리가 유사한 지역 중 무작위로 6~10군데를 선정하여 측정하였다.

2.3 토양 온도 측정

토양의 온도는 EGM system에 부착된 STP-1 probe를 이용하여, 토양 호흡을 측정한 이후 그 자리의 토양 층 깊이가 10 cm 부분에 센서를 삽입하여 측정하였다.

2.4 잣나무 뿌리 채집

잣나무의 뿌리는 4월, 6월, 9월 세 번에 걸쳐서 채집하였다. 조사지 토양의 경우 잣나무의 굵은 뿌리들로 인해 토양

채취기(hand auger)로 토양 코어(core)를 뜨는 방법을 적용하는 것이 여의치 않았기 때문에 임상의 리터를 제거한 후 가로 세로 20 cm × 20 cm × 10 cm의 직사각형 모양의 각(momolith)을 뜨는 방식을 적용하였다. 채취한 토양은 즉시 비닐백에 나눠담아 실험실로 운반한 후, 차후 실험할 때까지 4 °C 냉장고에 보관하였다. 토양에서 뿌리를 분리하기 위하여, 젖은 체 분리 방식(wet sieving)을 이용하였다(Vanninen and Makela 1999). 비닐백에 담겨 보관된 토양을 물에 담긴 격자크기 1 mm의 체로 친 후 체에 걸러진 뿌리를 핀셋으로 걸러내어 리터나 다른 유기물과 분리하였다. 격자크기 1mm의 체에 걸러지지 않는, 뿌리 중에서 직경이 아주 작아 다른 유기물과 구분이 곤란하거나 핀셋으로 걸러내기 어려운 것들은 분석에서 제외하였다. 핀셋으로 골라낸 뿌리는 붙어있는 토양을 잘 떨어낸 다음 마를 때까지 그늘에 둔 후 길에 남아있는 토양을 다시 한번 털어낸 다음 70 °C 건조기에서 건조하였다. 건조시킨 뿌리는 직경을 0~2 mm, 2~5 mm, 5 mm 이상 의 세 개의 분류군으로 구분하여 건중량을 측정하였다. 뿌리 분리 시 살아있는 뿌리와 죽은 뿌리를 형태상으로 확실히 구분할 수 없었기 때문에 그 둘을 구분하지 않고 총 무게를 측정하였다.

일반적으로 직경 2 mm 이하의 뿌리를 세근으로 정의하지만, 본 연구에서는 직경 5 mm 이하의 뿌리를 넓은 의미의 세근으로 정의하고 다시 직경 0~2 mm 인 것을 Small Fine Root (SFR), 직경 2~5 mm인 것을 Large Fine Root (LFR), SFR과 LFR을 합한 직경 0~5 mm인 것을 Total Fine Root (TFR)으로 세분하여 정의하는 Vanninen and Makela (1999)의 구분 방법을 사용하였다. 그럼으로써 토양 호흡에 대한 토양 내 전체 뿌리의 역할을 세근의 양만으로 추론함으로써 생길 수 있는 오류를 줄여보고자 하였다.

2.5 뿌리 제거 실험

뿌리 제거 실험은 임령 40년, 70년 숲에서 실시하였다. 7월 말에 각 임분 당 세 군데를 선정하여 가로 세로 깊이 1 m × 1 m × 30 cm의 직사각형 모양의 방형구를 설치하고 리터를 걷어낸 다음 격자크기 1 cm의 망을 체로 이용하여 토양 내 존재하는 뿌리를 제거한 후, 토양을 다시 원래 자리로 되돌려 놓았다. 처리시의 교란을 최소화하기 위하여 원래 있던 리터를 잘 보존하였다가 다시 덮었고 적당한 압력을 가하여 주변토양과 부피밀도(bulk density)가 크게 달라지지 않도록 하였다. 뿌리제거 후의 토양의 이산화탄소 방출량의 변화를 측정하기 위하여 방형구를 설치한 후 Infrared gas monitor로 토양 호흡을 측정하였으며 이후 9월, 11월에 같은 방법으로 방형구내 토양 호흡을 측정하였다. 토양 온도는 토양 호흡, 토양 수분 함량은 이전과 동일한 방법으로 측정하였다.

2.6 미생물 생물량 측정

미생물 측정용 토양은 7월, 9월, 11월에 채취하였다. 채취한 토양은 즉시 비닐백에 담아 실험실로 옮긴 후 분석 때

까지 4 °C 냉장고에 보관하였다. 미생물 개체군의 생물량을 측정하기 위해 훈증추출방법(Fumigation-extraction method)를 이용하였다. 토양샘플을 하나당 세 개씩 만들어 각각 하나는 훈증처리구, 다른 하나는 대조구, 또다른 하나는 수분함량 측정용으로 이용하였다. 토양을 50 ml 비커 세 개에 각각 20 g, 20 g, 10 g (각각 생 토양 무게기준)을 담은 뒤, 훈증처리 토양은 에탄올(alcohol free)을 50ml 비커에 40ml 담아 테시케이터에 함께 넣고 뚜껑을 잘 닫은 뒤 진공펌프로 테시케이터를 진공상태로 만들어 사흘간 압상에 두었다. Control 샘플은 250 ml 삼각플라스크에 넣고 0.5 M K2S04 80 ml (1:4 method)넣은 후 1시간동안 분탕처리한 뒤, 필터페이퍼 (Watman No. 1)을 사용하여 여과한 후 50 ml 튜브에 담은 후, 분석 시까지 냉장 보관하였다. 훈증처리 샘플은 훈증한 후 대조구와 동일한 방법으로 처리한 후 냉장 보관하였다. 수분함량 측정용 샘플은 건조기에서 105 °C에서 이틀간 건조시킨 후, 이전과 같은 방법으로 수분함량을 측정하였다. 미생물 개체군 생물량(Biomass C)은 Vance 등(1987)이 사용한 크롬을 이용한 적정법을 이용하여 계산하였다. 냉장 보관하여 두었던 토양 추출액 8 ml을 50 ml 비커에 넣고 66.7 mM (0.4N) 중크롬산칼륨(K2Cr207) 2 ml과 HgO200 mg, 황산(H2SO4)과 인산(H3PO4) 2:1 용액 15 ml을 넣은 다음, 120°C에서 두시간 동안 반응시켰다. 이후 상온에서 서서히 식힌 다음 0.4 M 황산(H2SO4)에 33.3 mM Ferrous Ammonium sulfate을 녹인 용액을 이용하여 적정하였다. 지시약은 페로인(Ferrouin)시약을 썼으며 용액의 색깔이 오렌지 색에서 연한 녹색 내지 투명한 색으로 변했다가 다시 연한 갈색으로 변하는 순간 적정을 마무리 하였다. 미생물 개체군 생물량(Biomass C)를 산정하는 식은

$$\text{Biomass C}(\mu\text{g/g soil}) = 2.64 \times E_c$$

$$E_c : \text{non-humigated C} - \text{humigated C}$$

을 이용하였다(Vance et al. 1987).

2.7 데이터 분석

2.7.1 토양 호흡량과 토양 온도와의 관계 분석

토양 호흡량과 토양 온도와의 관계를 나타낼 때 널리 쓰이는 Q_{10} 함수의 Q_{10} 값을 구하기 위해 지수함수 모형 ($Y = \beta_0 e^{\beta_1 x}$) 이용하여 회귀분석한 후, 얻은 모형으로부터 Q_{10} 값을 산출하였다 (Yuste et al. 2004).

$$R_s = R_{10} \times Q_{10}^{(T_s - 10)/10}$$

R_s : 토양 호흡, T_s : 토양 온도, R_{10} : 10 °C에서의 토양 호흡

2.7.2 통계 분석

모든 통계처리는 SAS 9.1을 이용하였다. 각 집단 간 차이는 ANOVA GLM을 이용한 posthoc 처리방법 (DUNCAN, TUKEY, SCHEFFE, LSD 등)을 이용하여 검정하였으며,

자료가 정규분포를 이루지 않는 경우는 transformation 시켰으며 나은 효과를 보이지 않는 경우 GLM rank를 이용하여 분석하였다. 회귀분석은 Proc reg을 이용하였으며 회귀직선 간 차이 유무 검정은 F 검정을 이용하였다.

3. 결 과

3.1 토양 호흡량

4월부터 11월까지의 조사지의 토양 온도와 토양 호흡량의 변화 패턴은 임령에 상관없이 유사하여, 7월까지 증가하다가 이후에 감소하였다 (Fig. 1a,b). 토양 온도는 4월에만 20년 숲의 토양 온도가 40년, 70년 숲의 토양 온도보다 낮았고, 그 외에는 임령 간 유의한 차이를 보이지 않았다. 토양 호흡량의 경우 20년 숲에서는 4월에 가장 낮은 값을 나타낸 이후 서서히 증가하는 반면, 40년, 70년 숲에서는 4월보다 5월에 더 낮은 값을 나타내었다 (Fig. 1b). 임령 별 토양 호흡량을 비교해보면, 임령이 높을수록 토양 호흡량이

대체로 높은 경향을 나타내었으나, 4월, 6월, 11월에만 유의한 차이를 나타내었고, 5월, 7월, 9월에는 차이를 보이지 않았다 (ANOVA GLM $p < 0.05$). 4월, 11월의 경우, 20년 숲만 다른 두 숲들에 비하여 토양 호흡량이 낮았다. 6월의 경우는 70년, 20년, 40년 숲 순으로 토양 호흡량이 높았다 (Fig. 1b). 4월부터 11월까지의 토양 온도와 토양 호흡량 값을 회귀분석한 결과, 임령에 상관없이 모든 숲에서 온도와 호흡량 간에 유의한 상관관계를 보였으며, 회귀곡선으로부터 얻은 Q_{10} 값은 20년 숲, 70년 숲, 40년 숲 순으로 높았다 (Fig.1c).

3.2 임령 별 뿌리의 생물량

임령에 따른 토양 10 cm내에 존재하는 세균의 양을 조사한 결과, SFR의 양은 40년, 70년 숲 간에는 차이가 없었으나 20년 숲에서는 낮았고, LFR의 양은 40년 숲이 20년 70년 숲보다 많았다. TFR의 양은 SFR의 양과 마찬가지로 20년 숲이 40년, 70년 숲보다 낮았다 (Table 1). 월별로 살펴보면,

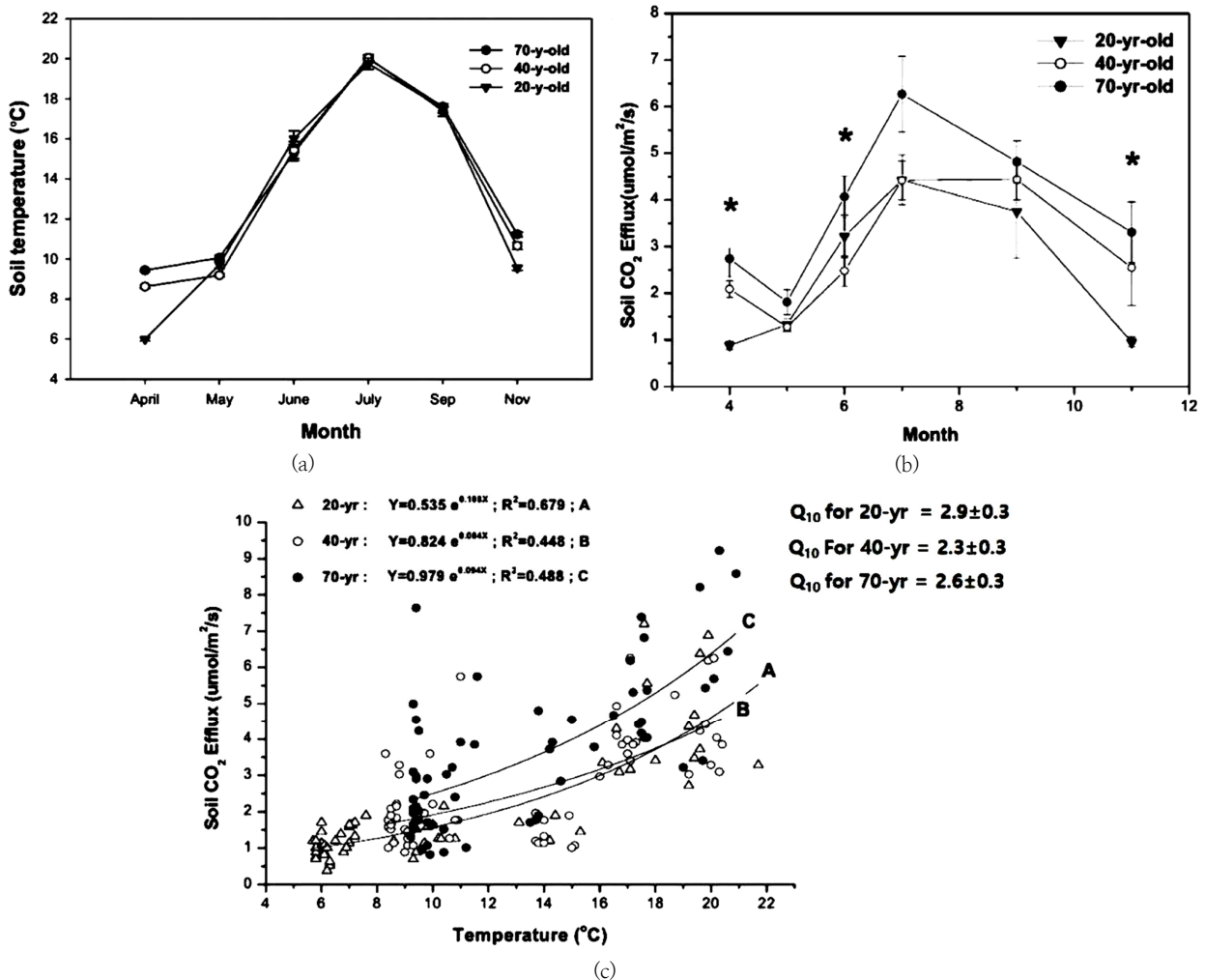


Fig. 1. (a) Mean soil temperature, (b) mean soil respirations measured during the growing season of 2004 in three age classes of *Pinus koraiensis* stands. Values are mean \pm s.e. (c) Relationship between soil respirations and soil temperature at 10 cm in three age classes of *Pinus koraiensis* stands.

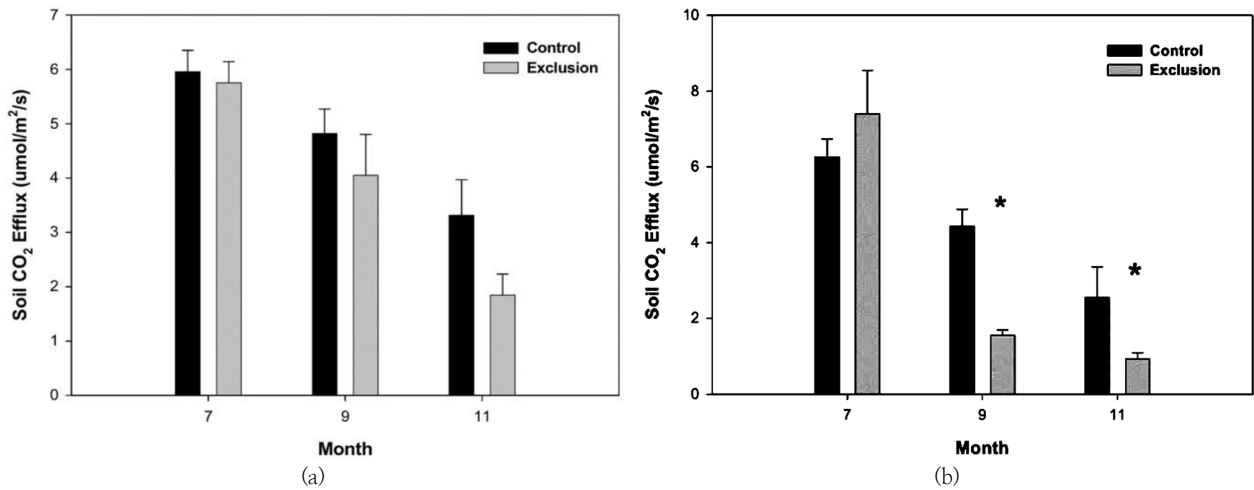


Fig. 2. Soil respirations after root exclusion treatment in (a) 70-yr and (b) 40-yr *Pinus koraiensis* stands.

Table 1. Fine root biomass over a 10 cm depth across a chronosequence of *Pinus koraiensis* stands. SFR : small fine root (0-2 mm diameter) ; LFR: large fine root (2-5 mm diameter); TFR: total fine root (0-5 mm diameter). Values are means \pm s.e.

Stand age	Model	R ²	Q ₁₀
20	Y=0.535e ^{0.108x}	R ² = 0.679	2.93 \pm 0.32
40	Y=0.824e ^{0.084x}	R ² = 0.448	2.32 \pm 0.29
70	Y=0.979e ^{0.094x}	R ² = 0.488	2.55 \pm 0.32

For R² values; P<0.001; Q₁₀ values are means (\pm s.e). Q₁₀ value were obtained from the exponential function of the form $y = \beta_0 e^{\beta_1 x}$, where $Q_{10} = e^{10\beta_1}$. S.E for Q₁₀ is calculated as $Q_{10} \times 10 \times \text{s.e.} (\beta_1)$

Table 2. Seasonal fine root biomass over a 10 cm depth across a chronosequence of *Pinus koraiensis* stands: SFR : small fine root (0-2 mm diameter) ; LFR: large fine root (2-5 mm diameter); TFR: total fine root (0-5 mm diameter). Values are means \pm s.e.

Month	Stand Age(year)		
	Soil Respiration (CO ₂ g/m ² /month)		
	20	40	70
4	100.4	238.4	312.5
5	151.7	146.0	206.4
6	367.2	282.8	464.2
7	505.2	504.1	715.1
8	511.6	615.6	727.7
9	427.7	506.4	549.7
10	116.4	194.1	270.2
11	108.4	290.8	377.5
Total (CO ₂ g/m ² /y)	2288.5	2778.2	3623.3

20년 숲의 경우 SFR는 4월에서 9월까지 증가하는 반면, LFR는 4월에서 7월 사이에는 증가하고 7월 이후에는 비슷한 수준을 유지하였다. TFR는 SFR와 동일한 패턴을 보였다. 40년, 70년 숲의 경우, SFR, LFR, TFR 모두 차이가 없었다(Table 2).

3.3 뿌리 제거 후의 토양 호흡량

70년 숲의 경우, 뿌리를 제거한 7월, 9월, 11월에 뿌리 제거구와 제거하지 않은 대조구 사이에 유의한 차이가 없이 토양 온도가 감소함에 따라 유사하게 감소하였다(Fig. 2a). 반면 40년 숲의 경우 뿌리를 제거한 7월에는 뿌리 제거구와 제거하지 않은 곳 사이에 차이를 보이지 않았으나, 이후 9월과 11월에 유의한 차이를 보여 뿌리 제거구의 토양 호흡량이 제거하지 않은 곳보다 크게 낮았다 (Fig. 2b).

3.4 임령 별 토양 내 미생물 개체군의 생물량

토양 내에 존재하는 미생물 개체군의 총 생물량은, 임령이 높을수록 더 컸다 (Fig. 3). 월별로 7월에는 세 숲의 미생물 개체군 생물량이 비슷하였고, 9월, 11월에는 70년 숲의 미생물 개체군 생물량이 더 많았다 (Fig. 4). 40년 숲, 70년 숲의 경우 뿌리를 제거한 뿌리 제거구와 뿌리를 제거하지 않은 대조구에서의 토양 미생물 개체군 생물량을 조사하여 비교한 결과, 두 숲에서 모두 뿌리 제거구와 대조구 사이에 차이를 보이지 않고 비슷하였다 (Fig. 5)

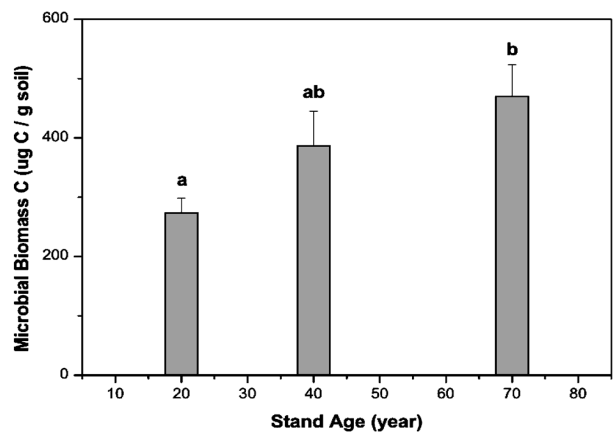


Fig. 3. Microbial biomass C of three age classes of *Pinus koraiensis* stands. Values are means \pm s.e.

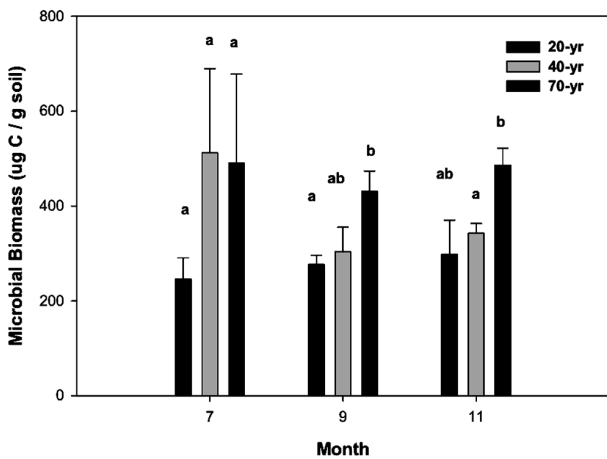


Fig. 4. Microbial biomass C of three age classes of *Pinus koraiensis* stands during the last half of growing season in 2004. Values are means \pm s.e.

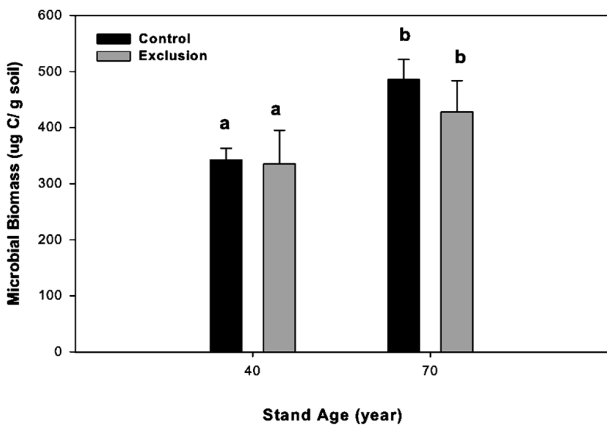


Fig. 5. Microbial biomass C after root exclusion treatment in *Pinus koraiensis* stands.

4. 고찰

본 연구에서 잣나무림의 연령이 높을수록 발생하는 평균 토양 호흡량이 많았다. 숲이 성숙해지면 생산성이 떨어지므로 대기중의 탄소를 고정하는 양이 줄어들어 고정량과 배출량이 비슷해지는 약한 탄소 흡수원이거나 고정량보다 배출량이 더 많은 탄소방출원으로 변한다는 것이 알려져 있다 (Irvine 2002). 그러나 일부 연구에서는 뚜렷한 경향을 나타내지 않거나(Gough 2004), 숲의 연령이 많아질수록 오히려 토양호흡량이 낮아지는 경우도 있다 (Kolari 2004). 본 연구에서는 토양호흡에 온도가 결정적인 역할을 한 것으로 사료되는데, 이는 온도가 토양 호흡에 주도적 역할을 하는 것으로 보고된 여러 연구와 맥을 같이 한다 (Lee and Moon 2001; Kim et al. 2014). 특히 임령 별로는 4월, 11월에 토양 호흡량에 차이가 있었다. 온도에 대한 민감도를 나타내는 Q_{10} 값도 임령별로 차이가 있었다. 70년 숲의 Q_{10} 값이 40년 숲의 Q_{10} 값 보다 크므로 온도변화에 70년 숲이 더 민감할 것임을 추론할 수 있다. 본 연구의 결과만으로는 이런 온도 변화에 대한 민감성의 차이가 무엇으로 인한 것

인지 직접적으로 알 수는 없다. 다만, 40년 숲과 70년 숲의 경우, 전체 토양호흡량에 대해서 식물 뿌리의 호흡과 미생물 호흡이 차지하는 비율이 다름을 추론해 볼 수 있다. 40년 숲의 경우, 뿌리 제거 실험에서 토양 호흡량이 제거 후 2개월만에 크게 줄어들고 이후 일정한 모습을 보이는 것에서, 40년 숲의 경우 전체 토양 호흡량에 대해서 뿌리의 호흡에 의한 토양호흡량이 차지하는 비율이 큼을 간접적으로 추론해 볼 수 있다. 그러므로 40년 숲의 경우 토양 호흡량의 온도에 대한 반응은 주로 식물 뿌리 호흡의 온도에 대한 반응 때문이라고 간접적으로 추론해 보는 것은 가능하다. 실제로 식물뿌리와 토양호흡의 온도반응곡선의 연관성을 보고한 연구가 있다(Boon et al. 1998). 70년 숲의 경우 전체 호흡량에서 뿌리가 차지하는 비율이 그리 높지 않음을 뿌리 제거 실험을 통해 유추해 볼 수 있으므로, 토양 호흡량의 온도에 대한 반응은 주로 미생물의 온도에 대한 반응에 의한 것이라 추론해 볼 수 있다.

임령이 높을수록 토양 표층 10 cm 이내에 존재하는 직경 2 mm이하의 세근의 생물량이 많았다. 그러나 생육기간 내에서는 4월을 제외하고는 임령이 다른 세 숲의 세근 생물량에 큰 차이가 없었다. 그러므로 토양호흡이 세근의 양과 직접적으로 연관이 있다고 보기는 어렵다. 그것보다는 각 임령 별 Q_{10} 값이 다르다는 점에서, 본 연구에서는 다루지 않았으나 토양 호흡값이 세근의 양 보다는 세근의 활동성과 더 관련이 있을 수 있음을 유추해 볼 수 있다. 본 연구에서는 20년 숲을 제외하고는 생육 기간 중 세근의 양의 변화가 없었다. 기존의 연구에서는 초여름 6월에 최고조에 이르렀다가 급속히 줄어들음을 보인 적이 있다. 세근과 토양 호흡간의 관계가 상관성이 떨어진 가장 큰 이유는 이처럼 세근의 생물량의 변화곡선이 온도변화와는 다른 패턴을 보이기 때문이다. 세근의 순환시간에 대해서는 아직 연구가 미진하여, 뿌리의 크기(size)나 종(species), 균근의 상태에 따라 짧게는 1년보다 짧고 길게는 8년 이상인 경우도 존재하는 정도로 다양하다 (Hendrick 1994). 본 연구의 결과로 볼 때, 본 연구대상지인 잣나무림의 세근의 순환시간은 임령과는 상관없이 일년 이상일 것으로 사료된다.

임령이 높을수록 토양 내 미생물 개체군의 생물량이 많았다. 토양 호흡에 미생물 개체군의 생물량이 영향을 주는가에 대해서는 몇몇 연구가 진행되어있고 서로 상반된 결과들이 나와 있다 (Santruckova 1991; Wang 2003). 본 연구에서는 직접적인 관련성을 증명해 보이지는 못했지만, 임령이 높을수록 미생물 개체군의 생물량과 토양 호흡량이 함께 증가하는 것으로 보아 개체군의 생물량이 토양 호흡량에 긍정적인 역할을 할 수 있음을 간접적으로 추론해 볼 수 있다. 또한 뿌리 제거 실험에서 미생물 개체군의 생물량이 많은 70년 숲의 뿌리 제거구의 토양 호흡량이 대조구와 큰 차이가 없는데 비해, 생물량이 상대적으로 적은 40년 숲에서는 뿌리 제거구의 토양 호흡량이 대조구에 비해 크게 감소한 점을 볼 때, 미생물 개체군이 많을수록 전체 토양 호흡량에서 미생물이 차지하는 비중이 커질 수 있음을 추론

할 수 있다. 토양 미생물 개체군의 생물량이 계절에 따라 변동하는가에 대해서도 일치된 의견이 없고 서로 상반된 결과들이 보고 되고 있다 (Li 2004). 본 연구에서는 생육 기간 내에서 토양 미생물 개체군의 생물량에 변동이 없었다. 이것 또한 토양 호흡량의 온도 민감성에 뿌리가 큰 역할을 한다는 하나의 증거가 될 수 있다.

5. 결 론

토양에서 대기로 방출되는 이산화탄소의 양은 산림의 임령에 따라 달라질 수 있고, 그러한 차이를 만드는 데 기여하는 요인들은 다양할 것이다. 그 중 식물의 뿌리와 토양 내 미생물은 호흡이라는 과정을 통해 토양 속으로 이산화탄소를 내보내는 방법으로 토양 호흡에 기여하고 있지만, 어느 정도로 어떻게 기여하는지는 더욱 많은 정교한 연구가 필요하다. 본 연구에서 살펴본 20, 40, 70년 잣나무림에서의 토양호흡량에 관한 실험결과는, 임령에 상관없이 토양호흡에 토양온도가 결정적인 인자로 작용하며, 임령이 높을수록 전체 토양호흡에 식물뿌리의 호흡보다는 미생물 호흡에 의한 부분의 기여도가 높을 수 있음을 시사한다.

References

- Boone, RD, Nadelhoffer, KJ, Canary, JD and Kaye, JP (1998). Roots exert a strong influence in the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 396(6711), pp. 570–572 [DOI: 10.1038/25119]
- Buchmann, N (2000). Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil biology and biochemistry*, 32(11), pp. 1625–1635. [DOI: 10.1016/S0038-0717(00)00077-8]
- Davis, JP, Haines, B, Colman, D and Hendrick, R (2004). Fine root dynamics along an elevational gradient in the southern Appalachian Mountains, USA. *Forest Ecology and Management*, 187(1), pp. 19–33. [DOI: 10.1016/S0378-1127(03)00226-3]
- Eugene, SE, Chen, J, Gustafson, JE and Ma, S (2003). Soil respiration at dominant patch types within a managed Northern Wisconsin landscape. *Ecosystems*, 6(6), pp. 595–607. [DOI:10.1007/pl00021505]
- Gough, CM and Seiler, JR (2004). The influence of environmental, soil carbon, root, and stand characteristics on soil CO₂ efflux in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations located on the South Carolina Coastal Plain. *Forest Ecology and Management*, 191(1), pp. 353–363. [DOI: 10.1016/j.foreco.2004.01.011]
- Hanson, PJ, Edwards, NT, Garten, CT and Andrews, JA (2000). Separating root and soil microbial contribution to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48(1), pp. 115–146. [DOI:10.1023/A:1006244819642]
- Iversen, CM (2010). Digging deeper: fine-root responses to rising atmospheric CO₂ concentration in forested ecosystems. *New Phytologist*, 186(2), pp. 346–357. [DOI: 10.1111/j.1469-8137.2009.03122.x]
- Jeon, KW and Oh, KH (1994). Studies on characteristics of *Pinus densiflora* forest in Kangwon Province(III)– Studies on the tree-root form and distribution on the campus forest, Kangwon National University. *J. of Forest Science*, 10, 8–24.
- Kim, JS, Kong, SJ and Yang, KC (2014). A study on the soil CO₂ efflux in *Quercus acutissima* stand at Mt. Bulam urban nature park. *Korean J. of Environmental Ecology*, 28(6), pp. 762–768.
- Kolali, P, Purnpanen, J, Rannik, U, Ilvesniemi, H, Hari, P, Vogt, F, Vogt, DJ, Palmiotto, PA, Boon, P, O'Hara, J and Asbjotnsen, H (1996). Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate. *Plant and Soil*, 187(2), pp. 159–219. [DOI: 10.1007/bf00017088]
- Kolari, P, Pumpanen, J, Rannik, U, Ilvesniemi, H, Hari, P, Berninger, F (2004). Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland. *Global change biology*, 10(7), pp. 1106–1119. [DOI: 10.1111/j.1529-8817.2003.00797.x].
- Kwak, YS and Kim, JH (1994). Spatial distribution of fine roots in *Quercus mongolica* and *Quercus acutissima* stands. *The Korean J. of Ecology*, 17(2), pp. 113–119.
- Lee, EH, Lim, JH, Lee, JS (2010). A review on soil respiration measurement and its application in Korea. *Korean J. of Agricultural and Forest Meteorology*, 12(4), pp. 264–276. [DOI: 10.5532/KJA FM .2010.12.4.264]
- Lee, KJ, Won, HY and Moon, HT (2012). Contribution of Root Respiration to Soil Respiration for *Quercus acutissima* Forest. *Korean J. of Environmental Ecology*, 26(5), pp. 780–786.
- Lee, YY and Moon, HT (2001). A study on soil respiration for *Quercus acutissima* Forest. *Korean Journal of Ecology*, 24(3), pp. 141–147.
- Pyo, JH, Kim, SU, Mun, HT (2003). A study on the carbon budget in *Pinus koraiensis* plantation. *Journal of Ecology and Field Biology*, 26, 129–134.
- Santruckova, H and Straskraba, M (1991). On the relationship between specific respiration activity and microbial biomass in soils. *Soil biology and biochemistry*, 23(6), pp. 525–532. [DOI: 10.1016/0038-0717(91)90109-w]
- Son, YH, Lee, G, Hong, JY (1994). Soil carbon dioxide evolution in three deciduous tree plantations. *Korean J. of Soil Science and Fertilizer*, 27(4), pp. 290–295.
- Son, YH and Kim, HW (1996). Soil respiration in *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* plantation. *J. of Korean Forest Society*, 85, 496–505.

- Valentini R, Matteucci, G, Dolman, AJ, Schulze, ED, Reibmann, C, Moors, EJ, Granier, A, Gross, P, Jensen, NO, Pilegaard, K, Lindroth, A, Grelle, A, Bernhofer, C, Grunwald, T, Aubinet, M, Ceulemans, R, Kowalski, AS, Vesala, T, Rannik, U, Beribier, P, Loustau, D, Gudmundsson, J, Thorgeirsson, H, Ibrom, A, Morgenstern, K, Clement, R, Moncrieff, J, Montagnani, L, Minerbi, S and Jarvis, PG (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European Forest. *Nature*, 404, pp. 861–865. [DOI: [10.1038/35009084](https://doi.org/10.1038/35009084)]
- Vanninen, P and Makela, A (1999). Fine root biomass of Scots pine stands differing in age and soil fertility in southern Finland. *Tree Physiology*, 19(12), PP. 823–830. [DOI: [10.1093/treephys/19.12.823](https://doi.org/10.1093/treephys/19.12.823)]
- Wang, B, Jiang, Y, Wei, X, Zhao, G, Guo, H and Bai, X (2011). Effects of forest type, stand age, altitude on soil respiration in subtropical forests of China. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2011(26), pp. 40–47. [DOI: [10.1080/02827581.2010.538082](https://doi.org/10.1080/02827581.2010.538082)]
- Wei, W, Weile, C, Shaopeng, W (2010). Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: Global patterns and responses to temperature and precipitation. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(8), pp. 1236–1244. [DOI: [10.1016/j.soilbio.2010.04.013](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.013)]
- Wiseman, PE and Seilor, JR (2004). Soil CO₂ efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. *Forest Ecology and Management*, 192(2), pp. 297–311. [DOI: [10.1016/j.foreco.2004.01.017](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.017)]
- Yuste, JC, Janssens, IA, Carrara, A, Meiresonne, L and Ceulemans, R (2004). The interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiology*, 23(18), pp. 1263–1270. [DOI: [10.1093/treephys/23.18.1263](https://doi.org/10.1093/treephys/23.18.1263)]