

토양 코어 및 미니라이조트론을 이용한 소나무 임분의 세근 바이오매스 연구

한승현¹ · 윤태경¹ · 한새롬¹ · 윤순진¹ · 이선정² · 김성준¹ · 장한나¹ · 손요환^{1*}

¹고려대학교 대학원 환경생태공학과, ²국립산림과학원 기후변화연구센터

Fine Root Biomass in *Pinus densiflora* Stands using Soil Core Sampling and Minirrhizotrons

Seung Hyun Han¹, Tae Kyung Yoon¹, Saerom Han¹, Soon Jin Yun¹, Sun Jeoung Lee²,
Seoungjun Kim¹, Hanna Chang¹ and Yowhan Son^{1*}

¹Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School,
Korea University, Seoul 136-713, Korea

²Center for Forest and Climate Change, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

요약: 본 연구는 소나무 임분을 대상으로 토양 코어 샘플링과 미니라이조트론 방법을 이용하여 세근의 분포를 파악하고, 미니라이조트론 자료를 세근 바이오매스로 환산할 수 있는 변환계수와 회귀식을 개발하는 목적으로 수행되었다. 토양 코어 샘플링은 2012년 10월부터 2013년 9월까지 겨울을 제외하고 매월 1회씩 총 9회 실시하여 세근 바이오매스를 측정하였고, 미니라이조트론을 이용하여 2013년 5월부터 8월까지 매월 1회씩 총 4회 세근 표면적을 측정하였다. 0-30 cm 토양 깊이에서 세근 바이오매스와 표면적은 지표에 가까울수록 유의하게 높았으며, 계절별 바이오매스(kg·ha⁻¹)는 여름(3,762.4)과 봄(3,398.0)에 가을(2,551.6)보다 유의하게 높은 값을 보였다. 이와 같은 토양 깊이별 분포는 토양의 양분, 용적밀도 그리고 온도 등의 차이 때문으로 사료되며, 계절적 경향은 대기 온도 및 토양 온도 변화에 의해 나타나는 것으로 보인다. 또한 토양 깊이별 세근 표면적과 바이오매스 사이의 변환계수를 구하고, 이를 통하여 미니라이조트론 자료를 환산한 세근 바이오매스와 토양 코어 샘플링 자료인 실측값 사이의 선형회귀식($y = 79.7 + 0.93x$, $R^2 = 0.81$)을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 변환계수 및 회귀식은 추후 국내 소나무림의 장기적인 세근 동태를 추정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: Fine root distribution was investigated in *Pinus densiflora* stands using soil core sampling and minirrhizotrons, and conversion factors and regression equations were developed for converting minirrhizotron data into fine root biomass. Fine root biomass was measured by soil core sampling from October, 2012 to September, 2013 once a month except for the winter, and surface area of fine roots was estimated by minirrhizotrons from May to August, 2013 once a month. Fine root biomass and surface area were significantly higher in the upper soil layers than in the lower soil layers. Fine root biomass showed seasonal patterns; the mean fine root biomass (kg·ha⁻¹) in summer (3,762.4) and spring (3,398.0) was significantly higher than that in autumn (2,551.6). Vertical and seasonal patterns of fine root biomass might be related to the soil bulk density, nutrient content and temperature with soil depth, and seasonal changes of soil and air temperature. Conversion factors (CF) between fine root surface area from minirrhizotron data and fine root biomass from soil core sampling were developed for the three soil depths. Then a linear regression equation was developed between the predicted fine root biomass using CF and the measured fine root biomass ($y = 79.7 + 0.93x$, $R^2 = 0.81$). We expect to estimate the long-term dynamics of fine roots using CF and regression equation for *P. densiflora* forests in Korea.

Key words : biomass, conversion factor, distribution, fine root, minirrhizotron, regression equation, seasonal pattern, soil core sampling

*Corresponding author
E-mail: yson@korea.ac.kr

서 론

세균은 일반적으로 직경이 2 mm 보다 작은 크기의 뿌리를 말하며, 식물 전체 생물량에서 극히 일부분을 차지하지만 그 중요성은 크다(Cairns et al., 1997). 즉 세균은 뿌리로 분배되는 전체 탄소량 중 약 1/3을 차지하며, 비교적 수명이 짧고 환경에 민감하여 빠른 전환율을 보이기 때문에 육상생태계의 탄소와 양분 순환에 중요한 역할을 한다(Nadelhoffer and Raich, 1992; Norby and Jackson, 2000). 따라서 산림의 기능과 탄소 및 양분 순환을 이해하기 위해서는 세균 동태를 정량화하고 파악하는 것이 필요하다(Strand et al., 2008).

세균 동태 연구는 다양한 산림생태계를 대상으로 진행되고 있으나, 전지구적 산림생태계 내 세균의 양분 순환을 이해하기에는 연구 자료가 부족한 것으로 보고되었다(Finér et al., 2011). 특히 동일한 산림생태계 내에서도 세균의 분포가 토양 깊이에 따른 토양 용적밀도, 점토 함유량, 수분 및 양분 함량, 토양 pH 등의 차이에 민감하고(Büttner and Leuschner, 1994; Joslin et al., 2006; Pietola and Alakukku, 2005), 계절별 대기 온도와 토양 온도 및 수분 함량(Block et al., 2006; Zhang et al., 2012) 등에 따라 차이를 보이기 때문에 토양 깊이와 계절에 따른 세균의 분포 및 동태 연구가 필요하다.

세균 연구 방법은 1) 직접 측정하는 코어 샘플링, 인그로스 방법(Ingrowth method), 동위원소 방법, 미니라이조트론 등과 2) 간접적으로 추정하는 질소 순환, 탄소 플럭스, 회귀모델 등이 있다(Milchunas, 2009). 이러한 방법 중 가장 일반적으로 사용되는 토양 코어 샘플링 방법은 깊이별 세균의 바이오매스와 월별 변화량 등을 관찰할 수 있으나 뿌리를 채취하는 파괴적인 방법이므로 동일한 뿌리를 대상으로 지속적으로 관찰하기 어렵다는 단점이 있다(Majdi, 1996). 이에 비해 미니라이조트론 방법은 뿌리를 채취하지 않고 일정한 토양 깊이까지 투명한 튜브를 설치하고, 스캐너와 캠코더를 이용하여 튜브 내부표면을 따라 토양과 뿌리를 360° 스캔 및 촬영하는 방법이다. 이 방법은 세균을 직접 측정하는 비파괴적인 방법으로(Hendrick and Pregitzer, 1992; López et al., 2001; Noguchi et al., 2005) 같은 뿌리를 지속적으로 관찰할 수 있으며, 측정과 분석 시간도 다른 방법에 비해 적게 소요된다. 또한 이 방법을 이용하여 세균의 생산량과 고사율을 동시에 측정할 수 있고, 뿌리의 수명과 구조 등 다양한 세균 연구가 가능하다(Johnson et al., 2001; Noguchi et al., 2005).

그러나 미니라이조트론 방법에서는 세균의 바이오매스를 추정하기 어렵고, 생산량 및 고사율도 튜브 당 길이나 면적으로 표현되는 한계가 있다(Johnson et al., 2001;

Majdi, 1996; Noh et al., 2012). 따라서 미니라이조트론과 토양 코어 샘플링 자료 사이의 변환계수(Brown et al., 2009; Noguchi et al., 2004)와 회귀식(Box and Ramseur, 1993; Jose et al., 2001)을 개발할 필요가 있다. 국외에서는 1990년부터 다양한 생태계를 대상으로 미니라이조트론을 이용한 뿌리 동태 연구가 진행되고 있으며, 총설 논문도 다수 발표되었으나(Block et al., 2006; Hendrick and Pregitzer, 1996a; Johnson et al., 2001; Jose et al., 2001; Majdi, 1996), 국내에서는 Noh et al.(2012)의 선행연구 외에 관련된 연구 사례가 없고 국내 생태계를 대상으로 미니라이조트론 자료를 이용하여 세균 바이오매스를 추정하는 연구는 시도된 바가 없다.

본 연구의 목적은 국내 주요 수종 중 하나인 소나무 임분을 대상으로 1) 토양 코어 샘플링 및 미니라이조트론 방법을 이용하여 토양 깊이와 계절별 세균의 분포를 파악하고, 2) 미니라이조트론 자료를 세균 바이오매스로 환산할 수 있는 변환계수와 회귀식을 개발하는 것 등이다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지

본 연구는 경기도 광릉 시험림(북위 37°47'001", 동경 127°10'037") 내 위치한 65-75년생 소나무림에 2,400 m² 크기의 조사구를 설치하여 수행되었다. 조사구의 1977년부터 2008년까지 연평균 기온과 강수량은 각각 11.3°C와 1,518 mm이며(국립산림과학원), 방위는 서사면(SW250-260°)이고, 임분의 주요 특징은 Noh et al.(2013)에 제시되어 있다. 하층식생으로는 참나무속(*Quercus species*), 서어나무(*Carpinus laxiflora*), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*), 쪽동백나무(*Styrax obassia*) 등 활엽수종이 주로 출현한다(Noh et al., 2013).

2. 토양 코어 샘플링

2012년 10월부터 2013년 9월까지 겨울철(2012년 12월-2013년 2월)을 제외하고 매월 1회씩, 총 9회에 걸쳐 간이 토양시료채취기(직경 7.2 cm, 길이 10 cm)를 사용하여 0-10, 10-20, 20-30 cm 깊이의 토양 시료를 채취하였다. 2012년 10월과 11월에는 조사구 내 임의의 15개와 9개 지점에서 시료를 채취하였고, 2013년 3월부터 9월까지는 임의의 10개 지점에서 시료를 채취하였다. 채취한 토양 시료를 풍건한 다음 시료 안에 있는 세균을 선별하였는데, 직경 2 mm 이하 소나무와 소나무 이외 수종을 산 세균과 고사한 세균 구분 없이 분류하였다. 선별된 세균은 세척 후 65°C에서 48시간 이상 건조하여 항량에 도달한 후 무게를 측정하였고, 세균 바이오매스는 단위 면적(ha) 당 무게(kg)로 환산하였다.

3. 미니라이조트론

미니라이조트론을 이용하여 세균을 관찰하기 위하여 2010년 5월에 조사구 내 임의의 4개 지점과 2012년 11월에 2개 지점을 선정하여 총 6개 지점에 투명한 아크릴 튜브(내경 7 cm × 길이 80 cm)를 지표와 45° 각도로 설치하였다. 튜브의 지상부로 노출된 부분은 광선을 차단하기 위하여 검은색 아크릴지와 알루미늄 호일로 감쌌다. 튜브 내 이미지 측정은 튜브 설치로 인하여 교란된 뿌리 밀도와 토양 환경이 안정화되기까지 6개월 이상의 충분한 시간이 지난 2013년 5월에 시작하였다. 2013년 5월부터 8월까지 매월 1회씩 총 4회에 걸쳐 토양 코어 샘플링 시기와 같은 날(5월 29일, 6월 25일, 7월 30일, 8월 28일)에 미니라이조트론 측정 장비인 뿌리 스캔 시스템(CI-600 Growth Monitoring System, CID, USA)을 사용하여 이미지를 측정하였다. 0-30 cm 토양 깊이의 측정이미지(폭 19.56 cm, 높이 21.59 cm)를 10 cm 토양 깊이 단위로 구분하고, 뿌리 이미지 분석 프로그램인 WinRHIZO Tron MF (Regent, Quebec, Canada)를 사용하여 세균 표면적을 분석하였다. 세균은 이미지 단위 면적 당 표면적(mm²·cm⁻²)으로 환산하여 제시하였다.

4. 변환계수

변환계수(g·m⁻²)는 토양 코어 샘플링 방법으로 구한 세균 바이오매스(kg·ha⁻¹)를 기준으로 뿌리 측정 이미지에서 구한 세균 표면적(mm²·cm⁻²)의 비율로 계산하였다. 또한 변환계수는 0-30 cm 전체 토양 깊이를 대상으로 한 식(Equation 1)과 0-10, 10-20, 20-30 cm 등 토양 깊이별로 구분한 식(Equation 2)을 이용하여 각각 계산하였다. 변환

계수 계산에는 2013년 5월부터 8월까지 측정한 세균 표면적과 세균 바이오매스 자료가 이용되었다. 그리고 세균 표면적에 변환계수(Equation 1, Equation 2)를 곱하여 미니라이조트론의 세균 바이오매스 예측값을 계산하였다.

$$\text{Equation 1} = \frac{\text{전체토양깊이(0-30 cm)의 세균표면적}}{\text{전체토양깊이(0-30 cm)의 세균바이오매스}}$$

$$\text{Equation 2} = \frac{\text{해당토양깊이(0-30 cm, 10-20 cm, 20-30 cm)의 세균표면적}}{\text{해당토양깊이(0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm)의 세균바이오매스}}$$

5. 통계분석

각 채취시기별 세균의 바이오매스와 표면적의 토양 깊이에 따른 유의성 검정은 분산분석과 Duncan의 다중비교로 실시하였다($P < 0.05$). 미니라이조트론의 예측값과 세균 바이오매스 실측값 사이의 관계를 선형회귀분석하였고, 회귀식의 유의성 검정도 실시하였다($P < 0.05$). 모든 통계분석에는 SAS 9.2 software를 사용하였다(SAS Institute Inc., USA).

결과 및 고찰

1. 세균 바이오매스 및 표면적

0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm 등 토양 깊이별 세균 바이오매스(kg·ha⁻¹)는 각각 1,635.7, 930.5, 671.2의 값을 보이며 토양 깊이가 깊어질수록 유의하게 줄어드는 경향을 보였다(Table 1, $P < 0.05$). 토양 깊이별 평균 세균 표면적(mm²·cm⁻²)도 0-10 cm 토양 깊이에서 5.86로 가장 높았으며, 10-20 cm 깊이에서는 4.38, 20-30 cm 깊이에서는

Table 1. Fine root biomass (kg·ha⁻¹) and surface area (mm²·cm⁻²) at different soil depths in *Pinus densiflora* stands using soil core sampling and minirhizotrons.

	Soil depth (cm)	2012				2013					Mean
		Oct.	Nov.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	
Biomass	0-10	1,331.1 (123.6)a	1,278.6 (298.9)a	1,546.0 (100.8)a	1,761.9 (197.9)a	1,715.7 (176.4)a	1,827.1 (164.9)a	2,164.6 (155.6)a	1,893.4 (89.6)a	1,202.5 (94.9)a	1,635.7A
	10-20	574.5 (89.0)b	780.4 (91.6)b	1,175.1 (109.7)b	956.8 (155.5)b	949.4 (99.1)b	991.6 (116.1)b	1,068.4 (118.8)b	1,122.8 (93.6)b	755.5 (105.5)b	930.5B
	20-30	511.7 (68.2)b	609.4 (90.0)b	752.4 (85.8)c	601.9 (66.6)b	735.0 (81.0)b	861.3 (61.7)b	622.4 (53.2)c	735.6 (107.5)c	611.2 (99.8)b	671.2C
	Total	2,417.3 (183.2)	2,668.4 (391.1)	3,473.4 (142.2)	3,320.6 (329.7)	3,400.1 (284.0)	3,680.0 (134.3)	3,855.4 (263.7)	3,751.8 (247.3)	2,569.2 (217.2)	3,237.4
Surface area	0-10	-	-	-	-	4.89 (0.86)a	5.42 (0.80)a	6.80 (1.17)a	6.34 (0.62)a	-	5.86A
	10-20	-	-	-	-	3.59 (0.66)a	4.40 (0.59)a	4.78 (0.81)ab	4.74 (0.60)a	-	4.38B
	20-30	-	-	-	-	3.10 (0.47)a	3.34 (0.60)a	3.02 (0.56)b	2.88 (0.38)b	-	3.09C
	Total	-	-	-	-	11.58 (1.53)	13.16 (1.79)	14.59 (1.97)	13.95 (1.19)	-	13.33

Values with different letters indicate significant differences among three depths at $P < 0.05$. Standard errors of the mean are in parentheses.

3.09 등의 값을 보이며 토양 깊이가 깊어질수록 유의하게 줄어드는 경향을 보였다(Table 1, $P < 0.05$). 특히 0-10 cm 토양 깊이에서의 세근 바이오매스와 표면적은 각각 0-30 cm 전체 토양 깊이 세근 바이오매스와 표면적의 51%와 44%를 차지하였다. Hwang et al.(2007)은 국내 *P. rigida* 임분과 *Larix leptolepis* 임분에서 세근 바이오매스가 0-30 cm 전체 토양 깊이 중 0-10 cm 깊이에 약 75%와 60% 정도 분포한다고 보고한 바 있다. 본 연구에서 나타난 토양 깊이별 세근 바이오매스와 표면적의 변화 경향은 토양 깊이별 양분과 용적밀도 등의 차이에 따라 지표에 가까울수록 세근의 분포가 증가한다는 이전의 연구(Hendrick and Pregitzer, 1996b; Joslin et al., 2006)와 세근의 분포가 토양온도와 밀접한 관계가 있으므로 토양온도가 높은 지표층에 세근이 집중 분포한다는 연구결과(Steele et al., 1997)와 같았다. 한편 동일한 조사구에서 보고된 전체 지하부 바이오매스는 약 $38.8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Noh et al., 2013)로, 본 연구 결과 나타난 0-30 cm 토양 깊이의 평균 세근 바이오매스($3,237.4 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)는 전체 지하부 바이오매스의 약 8.3%에 해당되는 것으로 나타났다.

0-30 cm 토양 깊이까지의 계절별 세근 바이오매스($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)는 봄부터 여름까지 증가하다가 가을에 감소하는 변화를 보였으며(Vanninen and Makela, 1999), 통계적으로는 여름(6-8월, 3,680-3,855)과 봄(3-5월, 3,321-3,473)에 가을(9-11월, 2,417-2,668)보다 유의하게 높았다(Table 1, $P < 0.05$). 특히, 0-10 cm 토양 깊이의 세근 바이오매스($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)는 여름(1,827-2,165), 봄(1,546-1,762), 가을(1,203-1,331) 순으로 유의한 차이를 보이며(Table 1, $P < 0.05$) 다른 토양 깊이의 세근 바이오매스에 비해 뚜렷한 계절적 경향을 보였다. 이러한 세근 바이오매스의 계절적 경향은 대기온도와 토양온도 변화에 의해 나타난 것으로 사료된다(Steele et al., 1997; Zhang et al., 2012). 또한 0-30 cm 토양 깊이까지의 월별 세근 표면적($\text{mm}^2\cdot\text{cm}^{-2}$)도 월평균 기온이 가장 높은 7월과 8월에 각각 14.29와 13.95로 5월(11.58)과 6월(13.16)보다 높은 값을 보였다(Table 1). 그러나 본 연구의 세근 표면적 측정 기간은 늦은 봄부터(5월) 여름(6월-8월)에 제한되었기 때문에 계절별 세근 표면적의 변화 경향을 관찰하기 위해서는 보다 지속적인 측정이 필요한 것으로 사료된다.

2. 변환계수 및 회귀식

Table 2에서는 세근 표면적과 세근 바이오매스 사이의 변환계수를 나타내었으며, 이를 바탕으로 환산한 미니라 이조트론의 예측값과 토양 코어 샘플링 자료인 실측값 사이의 회귀식을 산출하여 Figure 1에 나타내었다. 이 때 전체 깊이를 대상으로 구한 Equation 1 변환계수를 사용할 경우, 회귀식($y = 515.4 + 0.57x$)의 결정계수(R^2)는 0.64이

다(Figure 1a). 이는 전체 토양 깊이를 대상으로 세근의 직경별 바이오매스를 구한 후 회귀분석을 수행한 Noguchi et al.(2004)의 회귀식 결정계수($R^2 = 0.52$)와 세근 표면적과 실측값 사이의 회귀분석을 수행한 Jose et al.(2001)의 회귀식 결정계수($R^2 = 0.67-0.87$)와 유사한 결과이다. 그러나 이 회귀식의 예측값은 실측값에 비해 0-10 cm 토양 깊이에서는 과소 추정되고, 10-20 cm와 20-30 cm 토양 깊이에서는 과대 추정되는 결과를 보였다. 이러한 현상은 세근이 토양 상층부에 대부분 분포하기 때문에 전체 토양 깊이를 대상으로 회귀식을 산출할 경우 생기는 측정오차

Table 2. Conversion factors (CF) ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) between fine root surface area ($\text{mm}^2\cdot\text{cm}^{-2}$) from minirhizotron data and fine root biomass ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) from soil core sampling.

Equation	Soil depth (cm)	Fine root surface area (a)	Fine root biomass (b)	CF (b/a)
Equation 1	0-30	13.322	3,671.8	275.6
Equation 2	0-10	5.862	1,900.2	324.2
	10-20	4.376	1,033.0	236.1
	20-30	3.084	738.6	239.5

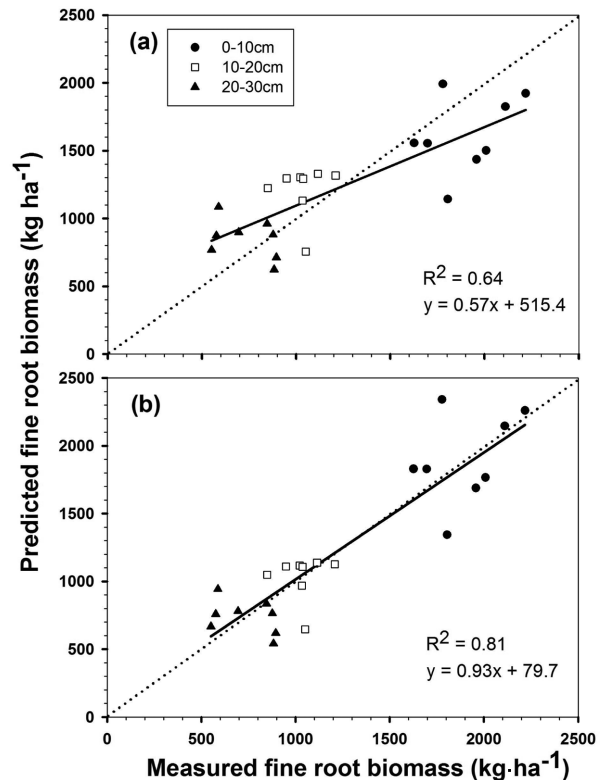


Figure 1. Linear regression between the measured fine root biomass from soil core sampling and the predicted fine root biomass from minirhizotron data. Fine root biomass were predicted using a single conversion factor for 0-30 cm soil depth (a) and different conversion factors for each soil depth (0-10, 10-20, and 20-30 cm soil depth) (b). Each point represents the mean fine root biomass at each soil depth and the dashed line is the 1:1 index line.

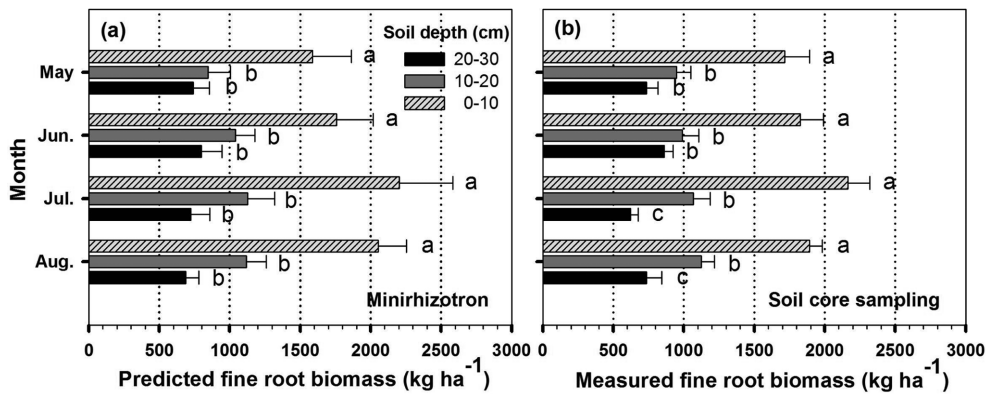


Figure 2. Comparison of fine root biomass distribution in *Pinus densiflora* stands obtained from minirhizotrons (a) and soil core sampling (b) from May to August, 2012. Values with different letters indicate significant differences among three depths on each sampling date at $P < 0.05$. Horizontal bar indicates one standard error ($n=6, 10$).

인 것으로 사료된다(Bragg et al., 1983; Gregory, 1979; Jose et al., 2001; Samson and Sinclair, 1994). 이러한 측정오차를 보완하기 위해 세 개의 토양 깊이별(0-10, 10-20, 20-30 cm) 변환계수인 Equation 2를 구하였고(Table 2), 이를 사용할 경우 회귀식($y = 79.7 + 0.93x$)의 결정계수는 Equation 1 변환계수를 사용하였을 때보다 높은 0.81로 나타났다(Figure 1b). 따라서 미니라이조트론 자료의 변환계수와 회귀식을 개발할 때, 토양 깊이별로 하는 것이 실측값에 가까운 예측값을 구할 수 있으며, 이는 Noguchi et al.(2004)의 연구 결과와도 일치하는 것이다.

한편 Box and Ramseur(1993)는 미니라이조트론의 세균 표면적 자료 대신 세균 길이 자료와 세균 바이오매스를 이용하여 회귀식을 산출하였으나 결정계수가 0.48로 관련 연구 중 가장 낮은 값을 보였다. 또한 본 연구에서도 세균 길이 자료를 이용하여 회귀식을 산출하게 되면 결정계수는 0.33을 보여 세균 표면적 자료를 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

깊이별 변환계수(Table 2의 Equation 2)를 이용하여 환산한 0-30 cm 토양 깊이에서 미니라이조트론의 세균 바이오매스 예측값(kg ha^{-1})은 실측값과 유사하게 7월(4,054.4), 8월(3,860.2), 6월(3,596.9), 5월(3,175.7) 등의 순으로 낮은 값을 보였다(Figure 2a). 그러나 다른 월에 비해 5월과 7월의 세균 바이오매스 예측값(kg ha^{-1})은 실측값(5월: 3,400.1, 7월: 3,855.4)에 비해 5월에는 과소 측정되고, 7월은 과대 측정되었다(Figure 2b). 이는 5월에서 8월까지 측정시기에 대해 변환계수를 구했기 때문에 세균 바이오매스가 가장 높은 7월과 가장 낮은 5월에 오차가 발생한 것으로써 추후 계절별 변환계수를 보완한다면 보다 정확한 세균 바이오매스 측정이 가능할 것으로 사료된다. 토양 깊이별 세균 바이오매스 예측값(kg ha^{-1})은 측정된 5월에서 8월까지 모두 0-10 cm 깊이(평균 1,900.2)에서 10-20 cm 깊이(평균 1,033.1)와 20-30 cm 깊이(평균 738.6)보다 유의하게 높은 값을

보였으며, 10-20 cm 깊이와 20-30 cm 깊이는 유의한 차이는 없었으나, 토양 깊이가 깊어질수록 세균 바이오매스가 줄어드는 경향을 보였다(Figure 2a).

결론

토양 코어 샘플링과 미니라이조트론을 이용하여 측정된 세균 바이오매스와 표면적은 지표층에 가까울수록 유의하게 높은 값을 보였다. 또한 계절별 세균 바이오매스는 대기 온도 및 토양온도가 높은 여름과 봄이 가을보다 유의하게 높은 값을 보였다. 한편 미니라이조트론의 세균 표면적 자료와 세균 바이오매스 사이에 변환계수를 구하였고, 이를 이용하여 환산한 예측값과 실측값 사이의 회귀식을 개발하였다. 세균 분포가 토양 깊이별로 차이를 보이기 때문에 이를 반영한 회귀식이 전체 토양 깊이를 대상으로 구한 회귀식보다 더 높은 결정계수 값을 보였으며, 이 회귀식을 이용하여 세균 바이오매스를 추정하면 오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서 소나무를 대상으로 기존에 길이와 면적으로만 표현했던 미니라이조트론 자료를 세균 바이오매스로 환산할 수 있는 변환계수와 회귀식을 개발함으로써 추후 국내 소나무림의 장기적인 세균 동태를 추정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 산림청 산림과학기술개발사업(과제번호: S11112L030100)의 지원에 의한 연구 결과의 일부입니다.

인용문헌

Block, R.M.A., Van Rees, K.C.J., and Knight, J.D. 2006. A review of fine root dynamics in *Populus* plantations.

- Agroforestry Systems 67(1): 73-84.
- Box, J.E. and Ramsuer, E.L. 1993. Minirhizotron wheat root data: Comparisons to soil core root data. *Agronomy Journal* 85(5): 1058-1060.
- Bragg, P.L., Govi, G., and Cannell, R.Q. 1983. A comparison of methods, including angled and vertical minirhizotrons, for studying root growth and distribution in a spring oat crop. *Plant and Soil* 73(3): 435-440.
- Brown, A.L.P., Day, F.P., and Stover, D.B. 2009. Fine root biomass estimates from minirhizotron imagery in a shrub ecosystem exposed to elevated CO₂. *Plant and Soil* 317(1-2): 145-153.
- Büttner, V. and Leuschner, C. 1994. Spatial and temporal patterns of fine root abundance in a mixed oak-beech forest. *Forest Ecology and Management* 70(1-3): 11-21.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H., and Baumgardner, G.A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111(1): 1-11.
- Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., and Hirano, Y. 2011. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecology and Management* 262(11): 2008-2023.
- Gregory, P.J. 1979. A periscope method for observing root growth and distribution in field soil. *Journal of Experimental Botany* 30(1): 205-214.
- Hendrick, R.L. and Pregitzer, K.S. 1992. The demography of fine roots in a northern hardwood forest. *Journal of Ecology* 73(3): 1094-1104.
- Hendrick, R.L. and Pregitzer, K.S. 1996a. Applications of minirhizotrons to understand root function in forests and other natural ecosystems. *Plant and Soil* 185(2): 293-304.
- Hendrick, R.L. and Pregitzer, K.S. 1996b. Temporal and depth-related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forests. *Journal of Ecology* 84(2): 167-176.
- Hwang, J., Son, Y., Kim, C., Yi, M.-J., Kim, Z.-S., Lee, W.K., and Hong, S.-K. 2007. Fine root dynamics in thinned and limed pitch pine and Japanese larch plantations. *Journal of Plant Nutrition* 30(11): 1821-1839.
- Johnson, M.G., Tingey, D.T., Phillips, D.L., and Storm, M.J. 2001. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany* 45(3): 263-289.
- Jose, S., Gillespie, A.R., Seifert, J.R., and Pope, P.E. 2001. Comparison of minirhizotron and soil core methods for quantifying root biomass in a temperate alley cropping system. *Agroforestry Systems* 52(2): 161-168.
- Joslin, J.D., Gaudinski, J.B., Torn, M.S., Riley, W.J., and Hanson, P.J. 2006. Fine-root turnover patterns and their relationship to root diameter and soil depth in a ¹⁴C-labeled hardwood forest. *New Phytologist* 172(3): 523-535.
- López, B., Sabaté, S., and Gracia, C.A. 2001. Annual and seasonal changes in fine root biomass of a *Quercus ilex* L. forest. *Plant and Soil* 230(1): 125-134.
- Majdi, H. 1996. Root sampling methods - applications and limitations of the minirhizotron technique. *Plant and Soil* 185(2): 255-258.
- Milchunas, D.G. 2009. Estimating root production: comparison of 11 methods in shortgrass steppe and review of biases. *Ecosystems* 12(8): 1381-1401.
- Nadelhoffer, K.J. and Raich, J.W. 1992. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Journal of Ecology* 73(4): 1139-1147.
- Noguchi, K., Sakata, T., Mizoguchi, T., and Takahashi, M. 2004. Estimation of the fine root biomass in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation using minirhizotrons. *Journal of Forest Research* 9(3): 261-264.
- Noguchi, K., Takahashi, M., Mizoguchi, T., and Takahashi, M. 2005. Estimating the production and mortality of fine roots in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation using a minirhizotron technique. *Journal of Forest Research* 10(6): 435-441.
- Noh, N.J., Kim, C., Bae, S.W., Lee, W.K., Yoon, T.K., Muraoka, H., and Son, Y. 2013. Carbon and nitrogen dynamics in a *Pinus densiflora* forest with low and high stand densities. *Journal of Plant Ecology* 6(5): 368-379.
- Noh, N.J., Son, Y., Jo, W., Yi, K., Park, C.W., and Han, S. 2012. Preliminary study on estimating fine root growth in a natural *Pinus densiflora* forest using a minirhizotron technique. *Forest Science and Technology* 8(1): 47-50.
- Norby, R.J. and Jackson, R.B. 2000. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist* 147(1): 3-12.
- Pietola, L. and Alakukku, L. 2005. Root growth dynamics and biomass input by Nordic annual field crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 108(2): 135-144.
- Samson, B.K. and Sinclair, T.R. 1994. Soil core and minirhizotron comparison for the determination of root length density. *Plant and Soil* 161(2): 225-232.
- SAS Institute Inc., 2009. SAS/STAT 9.2 user's guide. SAS institute Inc., Cary.
- Steele, S.J., Gower, S.T., Vogel, J.G., and Norman, J.M. 1997. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiology* 17(8-9): 577-587.
- Strand, A.E., Pritchard, S.G., McCormack, M.L., Davis, M.A., and Oren, R. 2008. Irreconcilable differences: fine-root life spans and soil carbon persistence. *Science* 319(5862): 456-458.
- 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): 823-830.
- Zhang, F., Chen, J., and Wang, M. 2012. The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young *Caragana korshinskii* plantation. *Acta Ecologica Sinica* 32(17): 5484-5493.