

인위적 온난화 및 강수 조절에 따른 소나무 묘목 세근 생산량과 고사율의 계절적 변화

한승현 · 장한나 · 손요환^{ID*}

고려대학교 환경생태공학과

Short-term Effects of Warming and Precipitation Manipulation on Seasonal Changes in Fine Root Production and Mortality for *Pinus densiflora* Seedlings

Seung Hyun Han, Hanna Chang and Yowhan Son^{ID*}

Department of Environmental Science and Ecological Engineering,
Korea University, Seoul 02841, Korea

요약: 본 연구에서 33개월생 소나무 묘목을 대상으로 인위적 온난화 처리와 강수 조절에 의한 계절별 세근 생산량과 세근 고사율의 변화를 2년에 걸쳐 분석하였다. 온난화 처리는 적외선등을 이용하여 대조구 대비 대기온도가 3.0°C 높게 유지되도록 설정하였고, 강수 조절은 투명 판넬과 펌프를 이용하여 대조구(PC) 대비 30% 감소(PD) 또는 30% 증가(PI) 되도록 설정하였다. 온난화 처리는 세근 생산량 및 고사율에 통계적으로 유의한 영향을 주지 못하였고, 강수 조절은 세근 생산량($\text{mm mm}^{-2} \text{ day}^{-1}$)에만 유의한 영향을 주었다(PC: 3.57, PD: 4.59, PI: 3.02). 한편 온난화 처리 및 강수 조절과 계절 간의 상호작용은 세근 생산량 및 고사율에 영향을 주지 못하였다. 그러나 온난화 처리 여부에 따라 토양 온도와 토양 수분이 각각 세근 생산량과 세근 고사율에 미치는 영향이 다르게 나타났다. 온난화 처리구는 세근 생산량의 계절적 변화가 주로 토양 온도에 영향(양의 상관관계)을 받았고, 세근 고사율은 주로 토양 수분의 영향(음의 상관관계)을 받았다. 반면에 온도 대조구에서는 세근 생산량은 주로 토양 수분의 영향(양의 상관관계)을 받았고, 세근 고사율은 토양 온도 및 수분과 유의한 관계가 나타나지 않았다. 이는 온난화가 진행됨에 따라 세근 생산량과 세근 고사율에 영향을 주는 기후인자가 달라질 수 있음을 시사한다.

Abstract: This study was conducted to investigate the effects of warming and precipitation manipulation on seasonal changes in fine root production (FRP) and fine root mortality (FRM) of 33-month-old *Pinus densiflora* seedlings for two years. The seedlings in warmed plots were warmed with 3.0°C higher using infrared heaters. The air temperature of warmed (TW) plots was set to increase by 3°C compared to temperature control (TC) plots, and the three precipitation manipulation consisted of precipitation decrease (-30%; PD), precipitation increase (+30%; PI) and precipitation control (0%; PC). FRP ($\text{mm mm}^{-2} \text{ day}^{-1}$) was significantly altered by only precipitation manipulation (PC: 3.57, PD: 4.59, PI: 3.02), while warming had no significant effect on the FRP and FRM. Meanwhile, interactions between warming and precipitation manipulation and seasonal changes had no significant effects on FRP and FRM. However, the influences of seasonal changes in soil temperature and soil moisture on FRP and FRM were different according to warming. In TW plots, FRP showed a positive relationship with soil temperature, and FRM showed a negative relationship with soil moisture. On the other hand, in the TC plots, FRP showed a positive relationship with soil moisture, and there were no relationships between FRM and soil temperature and moisture. These results indicate that the climate factors that affect FRP and FRM might vary as the warming progresses.

Key words: climate change, fine root mortality, fine root production, seasonal change, soil moisture, soil temperature

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

ORCID

Yowhan Son ^{ID} https://orcid.org/0000-0001-5621-9894

서론

IPCC (2013)에 따르면 21세기말까지 전지구 연평균기온이 1.1°C~4.8°C 상승하며, 연강수량은 50% 감소하거나 50% 증가하는 등 강수 패턴이 달라질 것으로 보고되었다. 기후변화에 따른 연평균기온과 강수량 변화는 토양의 양분 및 미생물, 식물의 생리와 성장 등 생태계 전반에 영향을 준다(Chung et al., 2013; Park et al., 2016; An et al., 2017; Li et al., 2017; Han et al., 2018). 특히 기후변화로 인한 잠재적인 식생 뿌리의 변화는 양분 및 수분 흡수뿐만 아니라 생태계 양분 및 탄소 순환에 변화를 가져온다(Norby and Jackson, 2000).

세근(보통 직경 2mm 미만 뿌리)은 주로 양분과 수분을 흡수하는 역할을 하며, 주근(보통 직경 2 mm 이상 뿌리)에 비해 토양 환경 변화에 민감하다(Wells and Eissenstat, 2003). 토양 미기후 변화는 세근에 직접적인 영향을 미치고, 이는 식물의 생리·생태적 반응으로 이어질 것이다(Yun et al., 2016; Han et al., 2018). 이에 따라 인위적 기후인자 조절(대기 온난화, 토양 온난화, 강수 관수, 강수 차단 등)이 세근의 바이오매스, 생산량, 고사율 등에 미치는 영향을 분석한 연구들이 진행되어 왔으며, 다수의 총설 논문이 발표되었다(Saxe et al., 2001; Wu et al., 2011). 이러한 결과, 인위적 기후인자 조절이 세근 동태에 미치는 영향은 기후대 및 토양 양분 상태 등 초기 환경 인자에 따라 다르게 나타날 수 있는 것으로 보고되었다(Bai et al., 2010; Liu et al., 2017).

한편, 세근의 생산량과 고사율은 계절에 따른 변화를 보이는데(Quan et al., 2010; Noh et al., 2012; Han et al., 2016), 이러한 변화는 기온과 강수량에 직접적인 영향을 받는 토양 온도와 토양 수분과 밀접한 관련이 있다(Yuan and Chen, 2010). 따라서 인위적인 토양 온도와 토양 수분의 변화는 계절에 따른 세근의 생산량과 고사율의 변화에 영향을 미칠 수 있다(Majdi and Öhrvik, 2004). 또한 세근의 생산량과 고사율의 계절적 변화는 임목의 개엽 및 낙엽(또는 잎의 노화) 시기와 관련이 있는 것으로 보고된바 있다(Satomura et al., 2006). 본 연구지에서도 인위적 온난화 처리에 의해 개엽이 빨라졌으며, 잎의 노화가 지연되는 현상이 나타났다(Change et al., unpublished data). 이에 따라 온난화에 따른 세근 생산량과 고사율의 계절적 변화도 달라질 것으로 예상된다. 그러나 인위적 기후인자 조절에 따른 세근 동태의 계절적 변화를 분석한 연구는 거의 없으며, 이러한 변화를 관찰하는 것은 기후변화에 따른 시계열적 지하부 탄소 순환을 모의하는데 있어서 기초 자료로 활용될 수 있다.

이에 본 연구에서는 인위적 온난화와 강수 조절에 따

라서 우리나라 침엽수 대표 수종인 소나무 묘목의 세근 생산량 및 고사율의 계절적 변화를 분석하고자 하였다. 인위적 온난화와 강수 조절에 따라 세근 생산량 및 고사율의 계절적 변화가 다르게 나타날 것이라 예상하며, 두 처리에 따른 토양 온도와 토양 수분 변화가 세근 생산량 및 고사율의 계절적 변화에 직접적으로 영향을 미칠 것으로 가정하였다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지 및 실험 설계

2013년 4월, 고려대학교 환경생태수목원 내 묘포장(37°35'36" N, 127°1'31" E)에 인위적 온난화 및 강수 조절 시스템을 설치하였다. 여기에 1.5 m×1.5 m 크기의 18개(6개 처리×3개 반복) 조사구를 배치하였으며, 각각의 조사구에는 45분의 2년생 소나무 묘목을 식재하였다. 묘포장의 2014년과 2015년의 연평균기온과 연강수량은 각각 12.9°C와 13.4°C, 704.0 mm와 683.5 mm이다. 토양은 양질사토에 해당되며(모래 80%, 미사 14%, 점토 6%), 토양 pH는 6.52이다(Yun et al., 2014).

처리는 2개 수준의 온도 조절[온도 대조구(TC), 온난화 처리구(TW)]과 3개 수준의 강수 조절[강수 대조구(PC), 강수 감소구(PD), 강수 증가구(PI)]로 구성되었다(Yun et al., 2014). 즉, 온도 대조구와 강수 대조구(TC*PC), 온도 대조구와 강수 감소구(TC*PD), 온도 대조구와 강수 증가구(TC*PI), 온난화 처리구와 강수 대조구(TW*PC), 온난화 처리구와 강수 감소구(TW*PD), 온난화 처리구와 강수 증가구(TW*PI) 등 총 6개 처리를 실현하였다. 온난화 처리구는 적외선 등(FTE-1000, Mor Electric Heating Instrument Inc., USA)을 이용하여 온도 대조구 대비 3°C를 상승시켰다. 강수 감소구는 폴리카보네이트 재질의 투명한 판넬로 조사구 면적의 30%를 피복하여 강수를 차단시켰다. 강수 증가구는 강수 감소구에서 차단된 강수를 물탱크에 수집한 후, 수위 감지 센서와 펌프를 이용하여 자동으로 점적 관수되도록 하였다. 또한 모든 조사구에 토양 온도 센서(107-L34, Campbell Scientific, USA)와 토양 수분 센서(CS616, Campbell Scientific, USA)를 설치하여 30분 간격으로 자료를 수집하였다.

2. 세근 동태 분석

2013년 7월에 세근 생산량과 세근 고사율을 측정하기 위하여 각 조사구 내에 하나의 투명 아크릴 튜브(내경 7 cm×길이 80 cm)를 지표와 45° 각도로 토양 깊이 15 cm 까지 매설하였다. 미니라이조트론(CI-600, CID, USA)을 이용하여 튜브 설치 후 6개월이 지난 2014년 1월 27일부

터 총 9회(2014년 4월 29일, 7월 31일, 11월 9일, 2015년 1월 26일, 4월 26일, 7월 17일, 10월 12일, 12월 29일) 뿌리를 스캔하였다. 세근 스캔 범위는 토양 0~15 cm 깊이 이고, 영상 크기는 19.56×14.14 cm이다. 스캔된 영상을 이미지 분석 프로그램인 WinRHIZO Tron MF (Regent, Canada)로 분석하여 세근의 길이를 측정하였다. 세근 길이 생산량(Fine root length production; FRP)은 각각의 측정 기간 사이에 새로 발견되거나 기존에 관찰되던 세근의 늘어난 길이를 합하여 계산하였다. 세근 길이 고사율(Fine root length mortality; FRM)은 각각의 측정 기간 사이에 사라지거나 줄어드는 세근의 길이를 합하여 계산하였다.

3. 통계 분석

반복측정 분산분석(Repeated Measures ANOVA)을 이용하여 토양 온도, 토양 수분, FRP, FRM 등에 미치는 계절별 온난화 처리와 강수 조절 효과를 분석하였다. 2014과 2015년 평균 FRP와 FRM의 처리별 경향을 분석하기 위해 최소유치차 검정의 Fisher's LSD 분석을 사용하였다. 토양 온도 및 수분과 FRP 및 FRM의 관계를 분석하기 위

하여 다중회귀분석(Multiple regression analysis)을 하였다. 모든 통계분석에는 SAS 9.4 software (SAS Institute Inc., USA)를 사용하였다.

결과 및 고찰

2014년 1월부터 2015년 12월까지 토양 온도는 온난화 처리에 의해서만 유의하게 증가하였다(Table 1). 토양 온도는 연구기간 동안에 온난화 처리구에서 온도 대조구 대비 2.80°C 증가하였다(Han et al., 2018). 한편 토양 수분은 온난화 처리와 강수 조절의 영향을 받았다(Table 1). 즉 토양 수분은 온난화 처리에 의해 0.90 vol % 감소하였고, 강수 조절에 따라서는 강수 감소구에서 0.33 vol % 감소하였고, 강수 증가구에서 1.32 vol % 증가하였다(Han et al., 2018). 모든 처리의 토양 온도는 계절에 따라서 변화하는 경향을 보인 반면에(Figure 1a), 토양 수분은 강수 환경에 따라서 변화하였다(Figure 1b).

온난화 처리는 FRP와 FRM에 통계적으로 유의한 영향을 미치지 못하였고 강수 조절은 FRP에 유의한 영향을

Table 1. F-ratios of repeated measures ANOVA on the effects of warming (W), precipitation manipulation (P) and season (S) on the soil temperature (ST), soil moisture (SM), fine root length production (FRP), and fine root length mortality (FRM).

	2014				2015			
	ST	SM	FRP	FRM	ST	SM	FRP	FRM
W	200.2***	7.8*	0.1	2.9	13.8**	17.8**	1.0	0.8
P	1.4	10.7**	6.2*	0.6	0.5	5.8*	7.3*	2.5
S	8943.7***	82.4***	5.8**	2.7*	9064.3***	265.1***	6.6**	4.8**
W × S	19.7***	14.0***	1.2	1.1	12.2***	3.0*	0.9	1.3
P × S	2.7*	1.2	0.3	1.0	3.0*	3.5**	2.0	1.2
W × P	1.2	2.9	0.7	0.5	1.0	0.3	0.0	0.6
W × P × S	3.2*	2.1	0.2	1.3	1.2	0.9	0.7	0.7

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, and *** $p < 0.001$

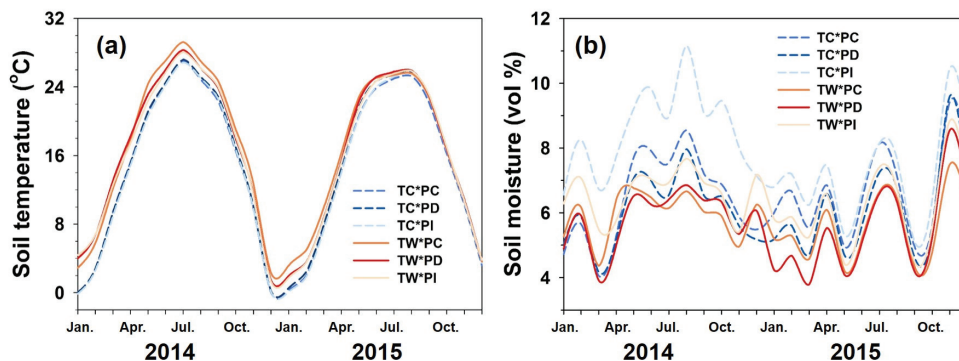


Figure 1. (a) Mean monthly soil temperature and (b) soil moisture content in 2014 and 2015.

TC*PC = temperature control and precipitation control; TC*PD = temperature control and reduced precipitation; TC*PI = temperature control and elevated precipitation; TW*PC = warming and precipitation control; TW*PD = warming and reduced precipitation; TW*PI = warming and elevated precipitation.

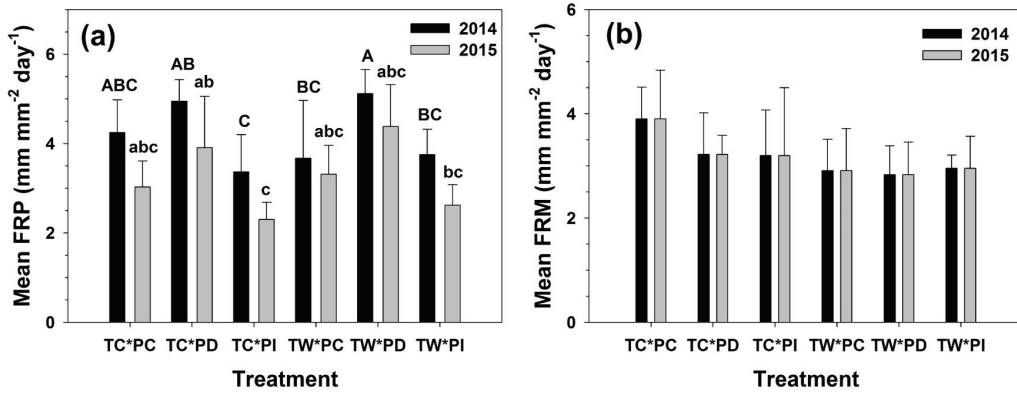


Figure 2. (a) Mean fine root length production (FRP) and (b) mean fine root length mortality (FRM) of *Pinus densiflora* seedlings in 2014 and 2015. Vertical bar indicates one standard error (n=3). Values followed by a different letter are significantly different ($p < 0.05$). The treatment abbreviations are the same as in Figure 1.

미쳤다(Table 1). 2014년과 2015년 평균 FRP($\text{mm mm}^{-2} \text{ day}^{-1}$)는 PD 조사구에서 PC와 PI 조사구에 비하여 높은 값을 보였으며(TC*PC: 3.64, TC*PD: 4.43, TC*PI: 2.84, TW*PC: 3.49, TW*PD: 4.75, TW*PI: 3.19; Figure 2a), 이는 Han et al.(2018)에서 보고한 연간 FRP의 결과와 유사하다. 강수 감소 조절에 따라 FRP가 높은 값을 보인 것은 토양 수분 가용성이 감소한 토양에서 충분한 수분을 확보하기 위해 세근이 수직·수평적으로 더 확장된 결과인 것으로 판단된다(Hertel et al., 2013; Liu et al., 2017). 평균 FRM($\text{mm mm}^{-2} \text{ day}^{-1}$)은 처리별 최소유의차 검정에서 처리별 영향이 나타나지 않았다(TC*PC: 3.51, TC*PD: 2.87, TC*PI: 2.45, TW*PC: 2.61, TW*PD: 2.55, TW*PI: 2.38; Figure 2b).

FRP와 FRM은 연구기간 동안 계절에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보였으나, 온난화 처리 및 강수 조절과 계절적 변화간의 상호작용은 나타나지 않았다(Table 1). 이는 미니라이조트론의 관측 간격이 대략 3개월임을 감안 하였을 때, 온난화 처리와 강수 조절에 따른 토양 온도와 수분의 변화 폭이 이들의 계절에 따른 변화의 폭보다 매우 작았기 때문으로 판단된다.

2014년 온난화 처리구의 FRP는 TW*PI를 제외하고 봄에서 여름(4월~7월) 사이에 증가하는 경향을 보였으며, 온도 대조구는 여름에서 가을(7월~11월) 사이에 증가하는 경향을 보였다(Figure 3a). 2015년의 FRP는 TC*PC를 제외한 모든 처리구에서 봄에서 여름 사이에 증가하는 경향을 보였으며, 특히 TW*PD 조사구에서 $7.8 \text{ mm mm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 가장 높은 값을 보였다. 한편 모든 처리구에서 가을에서 겨울로 넘어가는 2014년 11월~2015년 1월 사이와 2015년 10월~12월 사이에 FRP가 크게 감소하는 경향을 보였다. 이는 Noh et al.(2012)에서 보고된 *P. densiflora* 임분에서의 세근 길이 생산량과 유사한 결과이다. 일반적으로

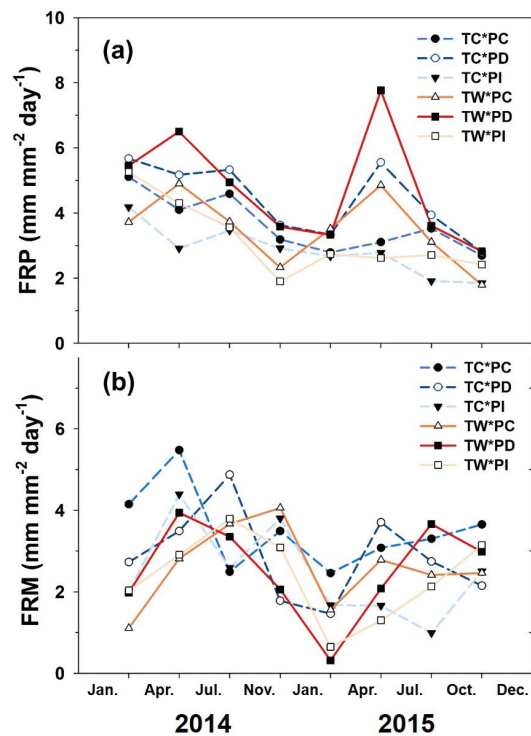


Figure 3. Seasonal changes in (a) fine root length production (FRP) and (b) fine root length mortality (FRM) of *Pinus densiflora* seedlings in 2014 and 2015. The treatment abbreviations are the same as in Figure 1.

온대림에서는 임목의 생장기간인 봄에서 여름으로 갈수록 기온이 상승하면서 지상부 생장뿐만 아니라 세근의 생산량도 증가하며, 낙엽이 지는 가을부터 겨울에 이르기까지 세근 생산량이 감소한다(Quan et al., 2010). FRM은 모든 처리구에서 2014년과 2015년 모두 4월~7월 사이에 증가하는 경향을, 1월~4월 사이에 감소하는 경향을 보였다(Figure 3b). 일반적으로 세근의 고사는 세근의 생장과 유사하게 봄에 기온이 올라가는 시기에 증가하기 시작하며,

Table 2. Results of multiple regression analysis of fine root length production and fine root length mortality of *Pinus densiflora* seedlings as function of soil temperature (ST) and soil moisture (SM) in temperature treatment.

Treatment	Models	Partial r^2	Model r^2	p Value
	Fine root length production			
TW	0.0919 ST + 2.2840	0.2502	0.2502	0.0128
	0.0958 ST - 0.6307 SM + 5.9623	0.1047	0.3549	0.0100
TC	-0.3413 SM + 6.0200	0.1812	0.1812	0.0381
	0.0450 ST - 0.3990 SM + 5.7423	0.1042	0.2854	0.0294
	Fine root length mortality			
TW	0.7969 SM - 2.0190	0.2627	0.2628	0.0104
	0.0418 ST + 0.7680 SM - 2.5423	0.0808	0.3435	0.0121
TC	0.0513 ST + 2.2445	0.0894	0.0894	0.1558

TW, temperature warmed; TC, temperature control.

가을까지 지속적으로 증가하거나(Han et al., 2016), 기온이 떨어지는 가을에 감소한다(Quan et al., 2010).

한편, 토양 온도와 토양 수분은 온난화 처리와 계절 변화간 상호작용의 영향을 받았다(Table 1). 온난화 처리와 계절에 따른 토양 온도와 토양 수분은 각각 FRP와 FRM과 밀접한 관계를 보였다(Table 2). 즉 토양 온도와 토양 수분이 FRP와 FRM에 미치는 영향은 온난화 처리 여부에 따라서 다르게 나타났다. 온도 대조구에서의 FRP는 계절에 따른 토양 수분 변화가 주요인으로 작용하였으나, 온난화 처리구에서는 토양 온도가 토양 수분보다 FRP와 더 밀접한 관계를 보였다(Table 2). 이는 온도의 상승에 따라 세근의 생장이 토양 온도와 밀접한 관계를 보인다는 선행 연구 결과와 유사하다(Wan et al., 2007). 세근 생산량과 토양 미기후와의 관계를 메타분석한 선행 연구에서는 침엽수림에서 토양 온도와 토양 수분이 증가할수록 세근 생산량도 증가한다고 보고하였다(Yuan and Chen, 2010). 본 연구결과에서 토양 온도에 따른 FRP 경향은 메타분석 결과와 동일하나, 토양 수분에 따른 경향은 상이하다. Bai et al.(2010)는 기후대별 강수 조건에 의한 토양 수분의 변화에 따라 세근의 생산량이 다르게 반응을 보인다고 하며, 토양 수분이 충족한 환경에서는 일시적인 가뭄이나 토양 수분의 감소 현상은 세근 생산량의 증가로 이어질 수 있다고 보고하였다. 본 연구 대상지는 온대 기후대에 해당되며 건조지에 비해 충분한 강수량을 보이므로, 본 연구 대상지에서의 강수 감소 조절은 묘목에게 일시적인 토양 수분의 감소 현상으로 작용한 것으로 추정된다.

FRM은 온도 대조구에서 토양 온도 및 토양 수분과의 관계를 나타내지 않았으나, 온난화 처리구에서는 토양 온도와 토양 수분과 유의한 관계를 보였다(Table 2). 온난화 처리구에서의 계절별 FRM은 토양 온도보다 토양 수분이

더 밀접한 관계를 보였다. 토양 수분과 음의 상관관계를 보인 FRP와는 반대로, FRM은 토양 수분과 양의 상관관계를 보였다(Bai et al., 2018). 이는 토양 수분이 감소할수록 세근 생장이 촉진되고 세근 고사는 지연되어 많은 양의 세근을 확보한 결과 때문인 것으로 추정된다(Han et al., 2018). 한편 본 연구에서는 세근을 직경 2 mm 이하의 뿌리로 구분하였으나, 토양 수분 조건에 따른 세근 동태를 보다 명확히 분석하기 위해서는 세근을 기능별로 분류하여 분석할 필요가 있다(Guo et al., 2008; McCormack et al., 2015).

결론

본 연구는 실외 인위적 온난화 처리와 강수 조절에 대한 소나무 묘목의 FRP와 FRM의 계절적 변화를 분석하였다. FRP와 FRM에 미치는 온난화 처리 및 강수 조절과 계절 변화간의 상호작용은 유의하게 나타나지 않았다. 그러나 온난화 처리 여부에 따라 토양 온도와 토양 수분이 각각 FRP와 FRM에 미치는 영향이 다르게 나타났다. 이는 온난화가 진행됨에 따라 영향을 주는 기후인자가 달라질 수 있음을 시사한다. 그러나 본 연구 결과들은 처리 후 초기 2년의 자료들로서 변화된 토양 환경에 따라 식물이 일시적으로 반응한 것일 수 있으므로, 지속적으로 관찰할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 산림청(2017058A00-1719-AB01) 및 연구재단(NRF-2013R1A1A2012242)의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에 도움을 준 김성준, 윤순진, 이관립 연구원에게 감사를 드립니다.

References

- An, J., Han, S., Chang, H., Park, M.J., Kim, S., Hwang, J., Cho, M.S., Chung, H. and Son, Y. 2017. Physiological and growth responses to experimental warming in first-year seedlings of deciduous tree species. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 41: 175-182.
- Bai, W., Wan, S., Niu, S., Liu, W., Chen, Q., Wang, Q., Zhang, W., Han, X. and Li, L. 2010. Increased temperature and precipitation interact to affect root production, mortality, and turnover in a temperate steppe: Implications for ecosystem C cycling. *Global Change Biology* 16(4): 1306-1316.
- Chung, H., Muraoka, H., Nakamura, M., Han, S., Muller, O. and Son, Y. 2013. Experimental warming studies on tree species and forest ecosystems: a literature review. *Journal of Plant Research* 126(4): 447-460.
- Guo, D., Xia, M., Wei, X., Chang, W., Liu, Y. and Wang, Z. 2008. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species. *New Phytologist* 180(3): 673-683.
- Han, S.H., Yun, S.J., Lee, J., Kim, S., Chang, H. and Son, Y. 2016. Estimating the production and mortality of fine roots using minirhizotrons in a *Pinus densiflora* forest in Gwangneung, Korea. *Journal of Forestry Research* 27(5): 1029-1035.
- Han, S.H., Kim, S., Li, G., Chang, H., Yun, S.J., An, J. and Son, Y. 2018. Effects of warming and precipitation manipulation on fine root dynamics of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. seedlings. *Forests* 9(1): 14.
- Hertel, D., Strecker, T., Muller-Haubold, H. and Leuschner, C. 2013. Fine root biomass and dynamics in beech forests across a precipitation gradient—Is optimal resource partitioning theory applicable to water-limited mature trees? *Journal of Ecology* 101(5): 1183-1200.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. *Climate change 2013: The physical science basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. USA.
- Li, G., Kim, S., Park, M.J. and Son, Y. 2017. Short-term effects of experimental warming and precipitation manipulation on soil microbial biomass C and N, community substrate utilization patterns and community composition. *Pedosphere* 27(4): 714-724.
- Liu, Y., Liu, S., Wan, S., Wang, J., Wang, H. and Liu, K. 2017. Effects of experimental throughfall reduction and soil warming on fine root biomass and its decomposition in a warm temperate oak forest. *Science of the Total Environment* 574: 1448-1455.
- Majdi, H. and Öhrvik, J. 2004. Interactive effects of soil warming and fertilization on root production, mortality, and longevity in a Norway spruce stand in Northern Sweden. *Global Change Biology* 10(2): 182-188.
- McCormack, et al. 2015. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist* 207(3): 505-518.
- 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.
- Park, M.J., Yun, S.J., Yun, H.M., Chang, H., Han, S.H., An, J. and Son, Y. 2016. Effects of open-field artificial warming and precipitation manipulation on physiological characteristics and growth of *Pinus densiflora* seedlings. *Journal of Climate Change Research* 7(1): 9-17. (In Korean with English abstract)
- Quan, X., Wang, C., Zhang, Q., Wang, X., Luo, Y. and Bond-Lamberty, B. 2010. Dynamics of fine roots in five Chinese temperate forests. *Journal of Plant Research* 123(4): 497-507.
- Satomura, T., Hashimoto, Y., Koizumi, H., Nakane, K. and Hirikoshi, T. 2006. Seasonal patterns of fine root demography in a cool temperate deciduous forest in central Japan. *Ecological Research* 21(5): 741 - 753.
- Saxe, H., Cannell, M.G., Johnson, Ø., Ryan, M.G. and Vourlitis, G. 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist* 149(3): 369-399.
- Wan, S., Norby, R.J., Ledford, J. and Weltzin, J.F. 2007. Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. *Global Change Biology* 13(11): 2411-2424.
- Wells, C.E. and Eissenstat, D.M. 2003. Beyond the roots of young seedlings: the influence of age and order on fine root physiology. *Journal of Plant Growth Regulation* 21: 324-334.
- Wu, Z., Dijkstra, P., Koch, G.W., Peñuelas, J. and Hungate, B.A. 2011. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology* 17(2): 927-942.
- Yuan, Z.Y. and Chen, H.Y.H. 2010. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: literature review and meta-analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences* 29(4): 204-221.

Yun, S.J., Han, S., Han, S.H., Lee, S.J., Jung, Y., Kim, S. and Son, Y. 2014. Open-field experimental warming and precipitation manipulation system design to simulate climate change impact. *Journal of Korean Forest Society* 103(2): 159-164. (In Korean with English abstract)

Yun, S.J., Han, S., Han, S.H., Kim, S., Li, G., Park, M. and

Son, Y. 2016. Short-term effects of warming treatment and precipitation manipulation on the ecophysiological responses of *Pinus densiflora* seedlings. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 40: 621-630.

(Received: February 2, 2018; Accepted: March 5, 2018)