

적외선등을 이용한 실외 실험적 온난화 처리가 소나무 묘목의 생장과 생리적 특성에 미치는 영향

이선정 · 한새롬 · 윤태경 · 한승현 · 정예지 · 윤순진 · 손요환*
고려대학교 환경생태공학과

Growth and Physiological Characteristics of *Pinus densiflora* Seedlings in Response to Open-field Experimental Warming using the Infrared Lamp

Sun Jeoung Lee, Saerom Han, Tae Kyung Yoon, Seung Hyun Han,
Yejee Jung, Soon Jin Yun and Yowhan Son*

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

요 약: 기후변화는 수목의 생장과 생리적 특성에 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다. 본 연구는 인위적 온난화에 의한 소나무 묘목의 생장과 생리적 반응을 알아보기 위한 목적으로 수행되었다. 이를 위하여 2010년 4월 고려대학교 구내 묘포장에 1년생 소나무 묘목을 식재하고 당해 11월부터 적외선등을 이용하여 3°C 온도를 증가시키는 온난화 처리를 하였으며, 2011년부터 3월부터 2013년 3월까지 묘고 및 근원경, 지상부 및 지하부 생물량, 잎의 엽록소 함량 및 질소 농도 등을 측정하였다. 묘고와 근원경의 경우 2012년 6월에 측정한 근원경을 제외하고 온난화 처리구와 대조구간 유의한 차이를 보이지 않았다. 그러나 2013년 묘목 개체당 잎의 생물량은 온난화 처리구(23.94±2.10 g)에서 대조구(26.08±1.72 g)보다 낮게 나타났으며, 줄기와 뿌리의 생물량 비율(S/R율)은 2013년에 온난화 처리구(1.09±0.07)에서 대조구(1.31±0.10)보다 낮게 나타났다. 한편 잎의 엽록소 함량 및 질소 농도는 2011년 잎의 질소 농도를 제외하고 온난화 처리와 대조구간 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 그리고 잎의 C/N율은 2012년에 온난화 처리구에서 대조구보다 높게 나타났다. 온난화 처리에 따른 소나무 묘목의 일부 생장 및 S/R을 감소는 온도 및 수분 스트레스와 관련이 있을 것으로 추정된다. 본 연구결과 향후 온난화가 지속되면 국내 소나무는 온도 및 수분 스트레스로 인해 지하부로의 탄소 분배를 확대시킬 가능성이 있는 것으로 사료된다.

Abstract: Climate change will affect the physiological traits and growth of forest trees. This study was conducted to investigate the effects of an experimental warming on growth and physiological characteristics of *Pinus densiflora* S. et Z. seedlings. One-year-old *P. densiflora* seedlings were planted in control and warmed plots in April 2010. The air temperature of warmed plots was increased by 3°C using infrared lamps from November 2010. We measured shoot height, root collar diameter, above and below ground biomass, chlorophyll contents and leaf nitrogen concentration from March 2011 to March 2013. Seedling height and root collar diameter showed no significant difference between warmed and control plots except for root collar diameter measured in June 2012. Seedling leaf biomass was lower in the warmed (23.94±2.10 g) than in the control (26.08±1.72 g) plots in 2013. Shoot to root ratio (S/R ratio) was lower in the warmed (1.09±0.07) than in the control (1.31±0.10) plots in 2013. Leaf nitrogen concentrations and chlorophyll contents were not significantly different between warmed and control plots except for leaf nitrogen concentration in 2011. Leaf C/N ratio was increased in 2012 under the warming treatment. Low growth and S/R ratio in warmed plots might be related to the higher temperature and water stress. In the future, the below-ground carbon allocation of *P. densiflora* might be increased by global warming due to temperature and water stress.

Key words : biomass, carbon allocation, global warming, height, leaf chlorophyll contents, pine, root collar diameter

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

서 론

산림은 우리나라 국토 면적의 약 64%를 차지하며 탄소 순환과 생태계 기능에 큰 역할을 하고 있다(Korea Forest Research Institute, 2012). 최근 기후변화로 인한 기온과 강수량 변화에 따라 산림생태계 내 수종 구성, 식생대, 생산성 등의 구조와 기능이 변화될 것으로 예측되고 있기 때문에 기후변화에 의한 산림생태계 변화를 연구하는 것이 필요하다(Rustad et al., 2001; Wu et al., 2011). 한편 전 세계적으로 기후변화에 대한 생태계 반응을 연구하기 위해 실외 실험적 연구와 모델 혹은 메타분석 등을 이용한 연구가 이루어지고 있다(Arend et al., 2011; Euskirchen et al., 2006; Rustad et al., 2001).

특히 온도는 식물의 성장과 생리적 특성에 영향을 미치기 때문에 온도 상승에 따른 식물의 성장 및 생리적 반응에 대한 연구는 많이 이루어져 왔다. 온도 상승에 대한 실험적 연구와 모델 모의에 따르면 온난화에 의한 식물의 생장은 수종에 따라 증가하거나(Danby and Hik, 2007), 오히려 감소하거나(Barber et al., 2000) 변화가 없는(Volder et al., 2004) 등 다양하게 나타나고 있다. 한편 온난화는 기온 상승 이외에도 토양 수분 함량에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며(De Boeck et al., 2007; Rustad et al., 2001), 온난화에 대한 식물 성장 반응이 수분 및 건조 스트레스에 영향을 받기도 한다(Barber et al., 2000; Yin et al., 2008).

소나무는 우리나라의 대표적인 조림 및 자생 수종으로 기후변화에 의한 소나무의 성장 및 생리적 변화는 생태적인 측면에서 뿐 아니라 사회경제적 측면에서도 중요하다(Byun et al., 2010). 이와 관련하여 국내에서 소나무림의 탄소 저장량(Noh et al., 2010b), 탄소 순환(Noh et al., 2010a), 고사목 동태(Yoon et al., 2011), 산림사업에 따른 탄소 순환(Kim et al., 2008; Kim et al., 2009), 토양 탄소 모형 개발 및 적용(Yi et al., 2013) 등의 연구 결과가 보고되었으며, 소나무림의 기초적인 탄소 순환 연구도 일부 진행된 상태이다. 그러나 기후변화, 특히 온도 증가에 따른 소나무림의 성장 및 생리적 반응에 대한 연구는 부족한 실정이다. 한편 국내에서 모형을 이용한 선행 연구에 의하면 기후변화에 따라 소나무림의 면적이 점차 줄어들 것으로 예측되고 있으며, 참나무류에 비해 소나무림이 온도 상승에 대해 취약한 것으로 보고된 바 있다(Byun et al., 2010). 그런데 이와 같은 모형에 의한 결과를 검증하고 실제 기후변화에 따른 소나무의 반응과 그 변화 기작을 구명하기 위해서는 실험적으로 기후변화에 따른 소나무의 성장 반응을 연구할 필요가 있다.

기후변화 실험적 연구는 실외 실험과 실내 실험으로 나눌 수 있고, 실외 실험은 실내 실험에 비해 실제 기후변화

와 유사한 환경을 조성할 수 있기 때문에 생태계 반응을 보다 정확하게 예측할 수 있다는 장점을 가진다(Jo et al., 2011; Lee et al., 2012). 실외 실험에는 오픈탑챔버, 토양 열선, 적외선등을 이용한 온난화 방법 등이 있으며, 이 가운데 적외선등을 이용한 온난화 방법이 자연 생태계와 가장 유사한 조건을 모의할 수 있는 것으로 알려져 있다(Kimball et al., 2008). 한편 실외에서 성목을 대상으로 온난화 처리를 하는 것은 기술적으로 매우 어렵기 때문에 묘목을 대상으로 연구하는 것이 현실적인 방법이다(Cavender-Bares and Bazzaz, 2000). 따라서 본 연구는 소나무를 대상으로 적외선등을 이용한 실외 실험적 온난화 처리가 묘목의 성장과 생리적 특성에 미치는 영향을 알아보고자 수행되었다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지 및 온난화 처리

2010년 4월에 서울시 성북구 안암동 고려대학교 녹지캠퍼스 내(N 37° 35' 36", E 127° 1' 31")에 실외 묘포장을 조성하였다. 묘포장의 초기 토양성질은 산도(pH)는 6.85, 양이온 치환 용량은 5.12 cmol kg⁻¹, 탄소 농도는 2.18%, 질소 농도는 0.16% 등이었으며, 토양 입경의 평균 비율(%)은 모래, 미사, 점토가 각각 82.3, 11.7, 6.0 이고 토성은 사양토이다(Jo et al., 2011). 온난화 처리구와 대조구(n=4)의 묘상(1 m×1 m)을 난괴법으로 배치하고 1년생 소나무 묘목을 Lee et al.(2009)에 따라 90분씩 정방형으로 식재하였다. 2010년 11월부터 적외선등(FTE-1000, Mor Electric Heating Association Inc., USA)을 작동시켰다. IPCC SRES 국내 시나리오를 바탕으로 본 연구 시점 기준 약 50년 후의 예측 온도 값을 참고하여 온난화 처리구의 대기 온도를 설정하였으며(<http://www.climate.go.kr>), 온

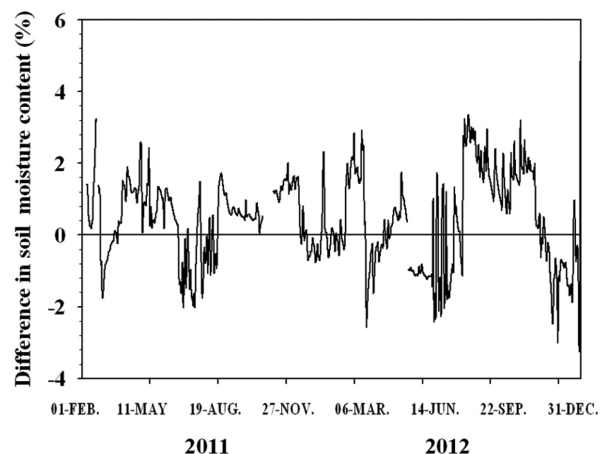


Figure 1. Differences in soil moisture content between control and warmed plots for *Pinus densiflora* seedlings.

도는 적외선 온도 센서(SI-111, Campbell Inc., USA), 데이터 로거(CR-3000, Campbell Inc., USA), 릴레이를 이용하여 자동으로 조절할 수 있도록 설계하였다. 온난화 처리구의 온도를 대조구에 비해 3°C 높게 처리하였을 때 일 평균 온난화 처리구의 대기 온도는 대조구보다 약 2-3°C 높게 유지되었으며(Lee et al., 2012), 토양 수분 함량은 측정시기에 따라 다르지만 생육기에 해당하는 5월에서 10월까지의 대체로 온난화 처리구에서 대조구보다 낮은 경향을 보였다(Figure 1). 적외선등은 Kimball et al.(2008) 방법에 따라 조사구의 평균 묘고로부터 60 cm 높이로 조절하였다. 2011년과 2012년 3월 두 차례에 걸쳐 각 조사구 묘목 본수의 약 50%씩을 솟아내었다. 이때 조사구 내의 평균적인 묘목의 크기보다 크거나 작은 것을 선정하여 골취하였고, 남은 묘목간의 거리가 일정하게 유지되도록 하였다.

2. 묘목의 생장 및 생물량 측정

지상부 생장으로 묘고와 근원경은 각 조사구 내 16-22 본의 묘목을 대상으로 2011년 3월, 그리고 2012년 6월과 11월에 각각 측정하였다. 묘고는 지상으로부터 가장 긴 줄기의 길이를 1 mm 단위까지 측정하였으며, 근원경은 지표로부터 2 cm 위 묘목 부위에 표지를 하여 고정된 위치의 직경을 디지털 캘리퍼(500-101, Mitutoyo, Japan)를 이용하여 0.1 mm 단위까지 측정하였다.

지하부 뿌리 생장은 미니라이조트론(CI-600, CID Bio-Science, USA)을 이용하여 측정하였다. 이를 위하여 2011년 4월에 각 조사구별로 한 개씩 투명 아크릴 튜브(길이 30 cm × 지름 7 cm)를 45° 각도로 15 cm 깊이까지의 토양에 매설하고, 튜브의 지상부로 노출된 부분은 검은색 테이프 및 마개를 이용하여 햇빛과 수분 유입을 차단하였다. 뿌리 영상은 2012년 3월 20일, 5월 9일, 6월 5일, 7월 3일, 8월 14일, 그리고 10월 25일에 각각 측정하였고, WinRHIZO Tron MF(Regent, Canada) 프로그램을 이용하여 뿌리의 길이를 분석하였다.

지상부 및 지하부의 생물량은 2011년과 2012년 3월에는 조사구 당 10본, 2013년 3월에는 조사구당 5본의 묘목을 골취하여 측정하였다. 골취한 묘목 시료를 뿌리, 줄기, 잎 등으로 분리하고, 뿌리는 흐르는 물에 씻어 토양을 제거한 다음 65°C에서 건조시켜 0.01 g 단위까지 무게를 측정하였다. 또한 줄기 생물량을 뿌리 생물량으로 나누어 S/R율(shoot to root ratio)을 계산하였다.

3. 잎의 엽록소 함량 및 질소 농도 측정

각 조사구에서 3본씩의 묘목을 선정하여 2011년에 발달한 잎을 대상으로 2012년 5월, 7월, 8월, 9월, 10월에 각각 엽록소 함량을 측정하였다. 채취한 시료는 2 mm 이내

로 잘게 자르고 20 mg을 정량하여 DMSO(dimethyl sulfoxide) 5 mL에 침전시켰다. 이후 증탕기에서 65°C로 1시간 증탕한 뒤 분광광도계(U-1100, Hitachi, Japan)를 이용하여 648 nm와 665 nm의 파장에서 흡광도를 측정하고, 엽록소 a와 b 그리고 총 엽록소 함량을 구하였다(Barnes et al., 1992).

잎의 질소 농도는 2011년 3월에는 조사구 당 5본, 2012년과 2013년 3월에는 조사구 당 3본씩의 묘목에서 잎 시료를 채취하여 측정하였다. 시료는 65°C에서 건조시킨 후 분쇄하여 원소 분석기(Vario Macro CHN, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany)로 분석하였다.

3. 통계분석

실외 실험적 온난화 처리에 의한 소나무 묘목의 생장 및 엽록소 함량과 질소 농도 차이의 유의성은 분산분석을 이용하여 검정하였다. 모든 분석에 SAS 9.2 software를 사용하였다(SAS Institute Inc., USA).

결과 및 고찰

1. 묘목의 생장 및 생물량

소나무의 묘고와 근원경(mm)은 2012년 6월의 근원경(대조구: 9.9±0.3, 온난화 처리구: 9.5±0.3)을 제외하고 온난화 처리구와 대조구 간 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Figure 2). 그리고 2011년 3월부터 2012년 11월까지의 소나무 묘목 묘고(cm)와 근원경(mm)의 생장량은 온난화 처리구(57.4±3.9, 8.9±0.7)에서 대조구(59.8±2.8, 9.0±0.3)보다 낮은 경향을 보였으나, 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 온난화에 의한 생장 반응은 온난화 처리 기간, 부위, 수종, 연구지 등에 따라 다양하게 나타나는 것으로 보고되고 있다(Arend et al., 2011; Barber et al., 2000; Bronson et al., 2009; Kellomäki and Wang, 2001). 온난화에 따른 *Pinus sylvestris*의 생장 반응을 관찰한 연구에 의하면 1-4°C 온도 상승 시 북위 57° 이상 지역 유럽의 경우 수고 생장이 증가한 반면, 북위 54° 미만 지역 유럽에서는 수고 생장이 감소되는 것으로 보고되었다(Reich and Oleksyn, 2008). 이와 같이 북유럽과는 반대로 중앙 및 남부 유럽에서 나타나는 생장 감소 현상은 온난화에 따른 온도 및 수분 스트레스와 관련이 있는 것으로 보고되었다(Kjellström, 2004; Reich and Oleksyn, 2008). 한편 초본을 대상으로 한 다른 연구에도 고온 건조한 토양 조건에서 식물의 생장과 광합성률이 감소되었는데, 이는 높은 온도와 수분 스트레스가 광합성과 관련이 있는 생리적 기작을 제한하기 때문으로 보고된 바 있다(Xu and Zhou, 2006). 한편 본 연구지의 굴참나무를 대상으로 한 온난화 연구에서 온난화 처리 후 묘목의 생장이 촉진되었

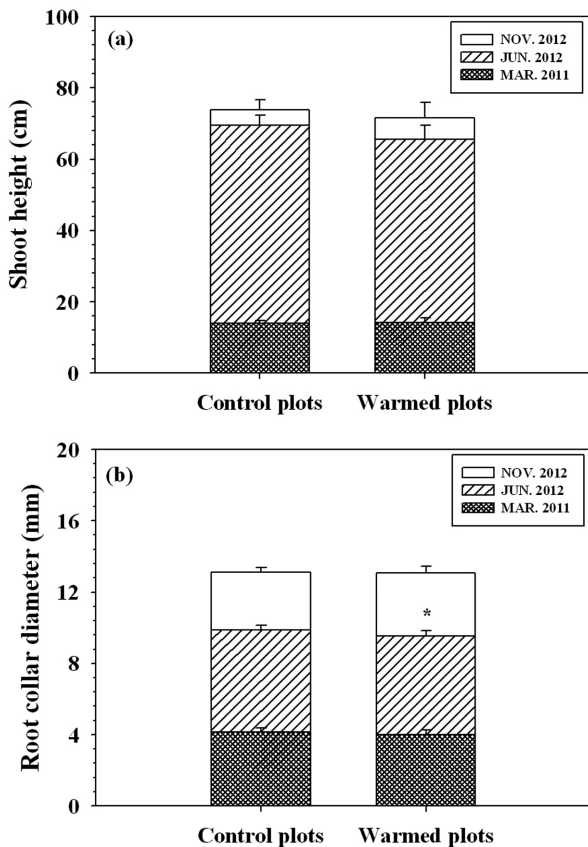


Figure 2. Shoot height (a) and root collar diameter (b) of *Pinus densiflora* seedlings in control and warmed plots. Error bars indicate standard errors of four replicates (n=16-22 per replicate). The asterisk denotes a significant difference between control and warmed plots at the level of P=0.05 by analysis of variance.

고, 이는 온난화 처리에 의해 묘목의 성장기간이 증가하고, 온도 상승에 따라 광합성이 촉진되기 때문으로 보고되었다(Jo et al., 2011; Lee et al., 2012; Lee et al., 2013). 그러나 본 연구에서 통계적으로 유의하지는 않지만 온난화 처리후 묘고와 근원경 성장량이 오히려 감소하는 경향

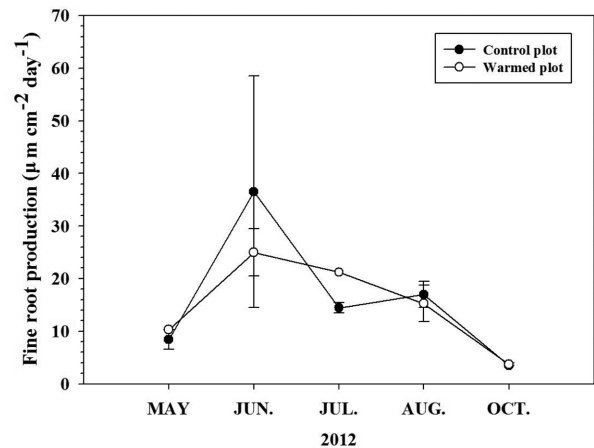


Figure 3. Fine root (≤ 2 mm diameter) production of *Pinus densiflora* seedlings at 0-15 cm soil depth in control and warmed plots from May 2012 to October 2012. Vertical bars indicate the standard errors of means (n=1-11). No error bars reported when the value is within the limits of the symbol.

을 보였는데, 이와 같은 현상은 수종에 따라 생육 적정 온도가 다르기 때문인 것과 관련이 있는 것으로 판단된다(Gunderson et al., 2010; Zhou et al., 2007). 한편 본 연구에서 2012년 6월에 측정된 근원경만 온난화 처리구에서 대조구보다 통계적으로 유의하게 낮게 나타났는데, 이는 온도 증가에 따른 온도 및 토양 수분 스트레스 때문인 것으로 사료된다(Barber et al., 2000; Reich and Oleksyn, 2008).

소나무 묘목의 세근 길이 성장량은 모든 측정시기에서 온난화 처리구와 대조구간 통계적으로 유의적 차이를 보이지 않았다. 한편 세근 길이 성장량($\mu\text{m cm}^{-2} \text{day}^{-1}$)은 대조구와 온난화 처리구 모두 6월에 가장 높은 값인 36.48 ± 21.99 과 24.99 ± 4.50 를 보였고, 10월에 가장 낮은 값인 3.44와 3.70 ± 0.26 을 나타내었다(Figure 3). 다른 연구에서는 온난화 처리에 따라 뿌리 혹은 세근의 길이 생장이 증가하거나(Kellomäki and Wang, 2001) 감소하는(Arend

Table 1. Biomass and shoot to root ratio (S/R) of *Pinus densiflora* seedlings in control and warmed plots. The values in parentheses are standard errors of four replicates (n=10 per replicate in 2011, 2012, n=5 per replicate in 2013).

| Biomass | 2011 | | | 2012 | | | 2013 | | |
|-----------|----------------|----------------|--------|-----------------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|--------|
| | Control | Warmed | P | Control | Warmed | P | Control | Warmed | P |
| Total (g) | 3.71 (0.45) | 2.99 (0.52) | 0.3334 | 22.55 (0.82) | 21.77 (0.75) | 0.5902 | 77.56 (4.78) | 75.51 (4.47) | 0.5111 |
| Root (g) | 1.37 (0.10) | 1.20 (0.17) | 0.3219 | 5.03 (0.19) | 4.18 (0.32) | 0.1689 | 22.89 (1.90) | 24.99 (1.17) | 0.2683 |
| Shoot (g) | 0.64 (0.10) | 0.55 (0.06) | 0.4837 | 5.90 (0.46) | 5.16 (0.36) | 0.2540 | 28.59 (1.73) | 26.59 (1.85) | 0.3004 |
| Leaf (g) | 1.70 (0.28) | 1.24 (0.30) | 0.3369 | 11.61 (0.50) | 12.44 (0.25) | 0.2570 | 26.08 (1.72) | 23.94 (2.10) | 0.0212 |
| S/R | 0.49 (0.06) | 0.50 (0.03) | 0.8860 | 1.20 (0.12) | 1.33 (0.11) | 0.3910 | 1.31 (0.10) | 1.09 (0.07) | 0.0151 |

et al., 2011) 등 상반된 결과가 보고되고 있다. 한편 온난화 처리에 따른 세근 길이 성장량의 차이가 통계적으로 유의하지는 않았지만 여름철에 증가하고, 가을철 이후에는 감소하는 계절적인 경향을 관찰할 수 있었고, 이러한 경향은 국내 소나무림을 대상으로 한 이전 연구에서도 보고된 바 있다(Noh et al., 2012).

소나무 묘목의 지상부 및 지하부 생물량(g)은 2013년 잎의 생물량에서만 온난화 처리구(23.94±2.10)에서 대조구(26.08±1.72)보다 낮게 나타났으며(P<0.05), 다른 연도와 부위에서는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 1). 잎 생물량이 감소된 것은 온도 상승에 따른 눈(芽)의 반응과 관련이 있을 것으로 사료된다. 즉 침엽수의 성장과 발달은 눈과 밀접한 관련이 있으며, 눈의 형성과 개아는 온도에 민감하게 반응한다(Lee, 1997; Slaney et al., 2007). 한편 다른 연구에서도 온도 상승에 따라 비정상적인 눈의 발달 혹은 조기 개아로 봄철 서리 피해를 입어 잎의 생물량이 감소되거나, 나무의 구조가 변화한 것으로 보고된 바 있어(Apple et al., 1998; Olszyk et al., 1998; Olszyk et al., 2003), 본 연구 결과도 이와 유사한 영향을 받은 것으로 판단된다. 이외에도 식물은 수분 결핍시 잎의 탈리와 엽면적의 감소 등과 같은 적응 기작을 나타내는 것으로 보고되어(Lincoln and Eduardo, 2010), 본 연구에서의 잎 생물량 감소 결과도 이와 관련이 있을 것으로 추정된다.

한편 소나무 묘목의 S/R율은 2013년에 온난화 처리구(1.09±0.07)에서 대조구(1.31±0.10)보다 낮게 나타났으며(P<0.05; Table 1). 온난화 처리에 따라 소나무 묘목의 S/R율이 감소한 것은 수분 스트레스와 관련이 있는 것으로 보인다. 특히 본 연구의 2012년 여름철과 가을철 토양 수분 함량은 대체로 온난화 처리구에서 대조구보다 낮은 것으로 관찰되었다(Figure 1). 이전 연구에도 온난화 처리에 따라 *Picea asperate*의 S/R율이 낮아졌고, 이는 초기 묘목 발달시기에 일어나는 수분 스트레스와 관련이 있는 것으로 보고된 바 있다(Yin et al., 2008). 특히 뿌리는 토양 수분 결핍 조건에서 수분 조건이 양호한 토양 쪽으로 뿌리의 발달이 일어나기 위해 근단으로 양분이 분배되는 것으로 알려져 있어(Lincoln and Eduardo, 2010), 본 연구에서 온난화 처리에 따른 소나무 묘목의 S/R율 감소는 토양 수분 결핍에 따른 뿌리의 적응 기작과 관련이 있을 것으로 사료된다.

2. 잎의 엽록소 함량 및 질소 농도

소나무 묘목의 생리적 특성으로 엽록소 함량은 온난화 처리에 따라 뚜렷한 차이를 보이지 않았다(Table 2). 또한 총 엽록소 함량은 온난화 처리구와 대조구 모두에서 생육 기인 5월에서 7월까지의 증가하다가 가을철인 10월에는

Table 2. Leaf chlorophyll contents of *Pinus densiflora* seedlings in control and warmed plots. The values in parentheses are standard errors of four replicates (n=3 per replicate).

| Month | Treatment | Chlorophyll content (mg g ⁻¹) | | | Chlorophyll a/b |
|-------|-----------|---|----------------|----------------|-----------------|
| | | a | b | Total | |
| MAY | Control | 1.93 (0.26) | 0.74 (0.13) | 2.67 (0.38) | 2.70 (0.24) |
| | Warmed | 1.45 (0.15) | 0.47 (0.06) | 1.92 (0.17) | 3.34 (0.44) |
| JUL. | Control | 2.47 (0.36) | 0.77 (0.14) | 3.24 (0.48) | 3.31 (0.38) |
| | Warmed | 2.00 (0.35) | 0.71 (0.12) | 2.71 (0.47) | 3.03 (0.21) |
| AUG. | Control | 1.39 (0.08) | 0.41 (0.04) | 1.80 (0.13) | 3.51 (0.24) |
| | Warmed | 1.41 (0.17) | 0.42 (0.06) | 1.82 (0.22) | 3.48 (0.27) |
| SEP. | Control | 1.36 (0.12) | 0.42 (0.05) | 1.78 (0.16) | 3.41 (0.25) |
| | Warmed | 1.44 (0.18) | 0.46 (0.04) | 1.91 (0.22) | 3.15 (0.21) |
| OCT. | Control | 1.37 (0.13) | 0.52 (0.17) | 1.89 (0.23) | 3.50 (0.70) |
| | Warmed | 1.33 (0.10) | 0.40 (0.04) | 1.73 (0.14) | 3.53 (0.34) |

감소하는 계절적 경향을 보였다. 엽록소 함량은 온난화 처리에 따라 증가하거나(Jo et al., 2011; Lee et al., 2013; Zhao and Liu, 2009) 감소하는(Han et al., 2012) 등 다양하게 나타나고 있으며, 이는 수종에 따라 온도에 대한 생리적 반응이 다르기 때문으로 보고되고 있다.

잎의 질소 농도는 2011년을 제외하고 온난화 처리구와 대조구간에 뚜렷한 차이를 보이지 않았다(Table 3). Van Cleve et al.(1990)은 토양 온난화 처리에 따라 *Picea mariana* 잎의 질소 농도가 증가하였으며, 이러한 결과는 온도 상승에 따라 낙엽층의 분해가 촉진되었기 때문이라고 보고하였다. 그러나 다른 연구에 의하면 온난화 처리는 잎의 질소 농도를 감소시켰으며(An et al., 2005), 이는 온난화 처리구에서 토양의 질소 무기화가 감소된 것과 관련이 있을 것으로 보고하였다(Wan et al., 2005). 보통 잎의 질소 농도는 토양 내 이용 가능한 질소 양분과 밀접한 관련이 있는데, 본 연구지 묘포 토양은 질소 농도가 매우 낮으며(Jo et al., 2011) 일반 산림 생태계와는 달리 미생물의 활동이 제한적으로 일어나고 있고 이들이 온난화에 의해 거의 변하지 않고 있기 때문에(Unpublished data) 온난화에 의한 토양 양분 변화 효과는 없는 것으로 보인다. 그러나 질소 무기화가 온난화 처리 1차년에는 증가하고, 2차년에는 감소한 결과도 있어(Wang et al., 2005), 온난화에 의한 토양 양분 변화를 질소 무기화를 측정함으로써 직접 관찰할 필요가 있는 것으로 사료된다.

Table 3. Carbon and nitrogen concentrations and C/N ratios in leaves of *Pinus densiflora* seedlings in control and warmed plots. The value in parentheses are standard errors of four replicates (n=5 per replicate in 2011, n=3 per replication in 2012 and 2013). The asterisk denotes a significant difference between control and warmed plots at the level of P=0.05 by analysis of variance.

| Treatment | 2011 | | | 2012 | | | 2013 | | |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | C (%) | N (%) | C/N | C (%) | N (%) | C/N | C (%) | N (%) | C/N |
| Control | 50.59 (0.15) | 1.49 (0.07) | 35.08 (1.82) | 50.24 (0.22) | 1.46 (0.13) | 36.05 (2.07) | 50.84 (0.28) | 1.32 (0.05) | 38.77 (1.41) |
| Warmed | 48.56 (1.59) | 1.84* (0.05) | 26.84 (1.55) | 50.11 (0.40) | 1.16 (0.04) | 44.01* (1.55) | 51.09 (0.15) | 1.25 (0.06) | 41.44 (2.17) |

한편 잎의 C/N율은 2012년에 온난화 처리구(44.01±1.55)에서 대조구(36.05±2.07)보다 높게 나타났다(P<0.05, Table 3). 이전 연구에서도 온난화 처리에 따라 잎의 C/N율이 증가하는 것으로 관찰된 바 있다(Sardans et al., 2008; Wang et al., 2012). 본 연구에서 잎의 C/N율이 증가한 것은 통계적으로 유의하지는 않지만 잎의 질소 농도가 감소한 데 따른 것으로, 다음과 같은 다양한 요인과 관련이 있는 것으로 보고되었다. 첫째, 높은 온난화 처리에 따라 잎에 질소 함량이 낮고 탄소 함량이 높은 구조물을 만들어 잎 조직을 보호하기 때문이다(Busotti et al., 2000; Sardans et al., 2008). 둘째, 잎의 질소가 건조한 조건에서 다른 목질부로 이동하는 가뭄 회피 기작에 의해 감소하기 때문이다(Sardans et al., 2008). 셋째, 잎의 질소 농도와 밀접한 관련이 있는 토양 내 질소 양분은 질소 무기화에 결정되는데(An et al., 2005; Van Cleve et al., 1990), 일정한 범위 내에서 토양 수분 함량이 감소할수록 질소 무기화도 감소하기 때문이다(Emmett et al., 2004). 본 연구에서도 측정시기에 따라 차이가 있으나 생육기에 해당하는 5월에서 10월까지의 대체로 온난화 처리구에서 토양 수분 함량이 감소하는 것으로 관찰되었고(Figure 1), 일반적으로 온난화 처리에 따라 토양 수분이 감소하는 것으로 보고되고 있다(De Boeck et al., 2007; Rustad et al., 2001). 따라서 온난화 처리에 따른 2012년 잎의 C/N율 증가도 이와 같은 요인들과 관련이 있는 것으로 추측된다(Busotti et al., 2000; Emmett et al., 2004; Sardans et al., 2008).

결론

온난화 처리는 소나무 묘목의 일부 성장을 감소시켰으나, 2011년 잎의 질소 농도와 2012년 잎의 C/N율을 제외하고 생리적 특성에는 뚜렷한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 특히 본 연구에서 온난화 처리에 따라 소나무 묘목의 2012년 6월의 근원경과 2013년 잎의 생물량과 S/R율이 감소하였다. 즉 온난화 처리는 소나무 묘목의 지하부 탄소 분배를 촉진시켰으며, 이는 온난화 처리에 의한 온도 및 수분 스트레스와 관련이 있을 것으로 사료된다.

한편 2011년 잎의 질소 농도는 온난화 처리구에서 대조구보다 높게 나타났는데, 이는 질소 무기화를 측정함으로써 정확한 원인을 구명할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 2012년의 잎의 C/N율이 온난화 처리구에서 높게 나타난 것은 온난화 처리구에서 토양의 수분이 감소하는 것과 관련이 있는 것으로 추측된다. 이와 같이 식물의 성장 반응은 토양 수분 함량과도 밀접한 관련이 있기 때문에 향후 온도 외에 수분조건을 달리하는 기후변화 실험이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 한국연구재단 중견연구자지원사업(과제번호: 2010-0014620)의 지원에 의한 연구 결과의 일부입니다.

인용문헌

- An, Y., Wan, S., Zhou, X., Subedar, A.A., Wallace, L.L., and Luo, Y. 2005. Plant nitrogen concentration, use efficiency, and contents in a tallgrass prairie ecosystem under experimental warming. *Global Change Biology* 11(10): 1733-1744.
- Apple, M.E., Lucash, M.S., Olszyk, D.M., and Tingey, D.T. 1998. Morphogenesis of Douglas-fir bud is altered at elevated temperature but not at elevated CO₂. *Environmental and Experimental Botany* 40(2): 159-172.
- Arend, M., Kuster, T., Günthardt-Goerg, M.S., Dobbertin, M., and Abrams, M. 2011. Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*). *Tree Physiology* 31(3): 287-297.
- Barber, V.A., Juday, G.P., and Finney, B.P. 2000. Reduced growth Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature* 405: 668-673.
- Barnes, J.D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S., and Davison, A.W. 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental Botany* 32(2): 85-100.

- Bronson, D.R., Gower, S.T., Tanner, M., and Van Herk, I. 2009. Effect of ecosystem warming on boreal black spruce bud burst and shoot growth. *Global Change Biology* 15(6): 1534-1543.
- Bussotti, F., Borghini, F., Celesti, C., Leonzio, C., and Bruschi, P. 2000. Leaf morphology and macronutrients in broadleaved trees in central Italy. *Trees* 14(7): 361-368.
- Byun, J., Lee, W., Nor, D., Kim, S., Choi, J., and Lee, Y. 2010. The relationship between tree radial growth and topographic and climate factors in red pine and oak in central regions of Korea. *Journal of Korean Forest Society* 99(6): 908-913 (in Korean).
- Cavender-Bares, J. and Bazzaz, F.A. 2000. Changes in drought response strategies with ontogeny in *Quercus rubra*: implications for scaling from seedlings to mature trees. *Oecologia* 124(1): 8-18.
- Climate Change Information Center. 2013. SRES South Korea (10 km). <http://www.climate.go.kr> (2013. 09. 09).
- Danby, R.K. and Hik, D.S. 2007. Responses of white spruce (*Picea glauca*) to experimental warming at a subarctic alpine treeline. *Global Change Biology* 13(2): 437-451.
- De Boeck, H.J., Lemmens, C.M.H.M., Gielen, B., Bossuy, H., Malchair, S., Carnol, M., Merckx, R., Ceulemans, R., and Nujs, I. 2007. Combined effects of climate warming and plant diversity loss on above- and below-ground grassland productivity. *Environmental and Experimental Botany* 60(1): 95-104.
- Emmett, B.A., Beier, C., Estiarte, M., Tietema, A., Kristensen, H.L., Williams, D., Peñuelas, J., Schmidt, I. and Sowerby, A. 2004. The response of soil processes to climate change: results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient. *Ecosystems* 7(6): 625-637.
- Euskirchen, E.S., McGuire A.D., Kicklighter, D.W., Zhuang, Q., Klein, J.S., Dargaville, R.J., Dye, D.G., Kimball, J.S., McDonald, K.C., Melillo, J.M., Romanovsky, V.E., and Smith, N.V. 2006. Importance of recent shifts in soil thermal dynamics on growing season length, productivity, and carbon sequestration in terrestrial high-latitude ecosystems. *Global Change Biology* 12(4): 731-750.
- Gunderson, C.A., O'Hara, K.H., Champion, C.M., Walker, A.V., and Edwards, N.T. 2010. Thermal plasticity of photosynthesis: the role of acclimation in forest responses to a warming climate. *Global Change Biology* 16(8): 2272-2286.
- Han, S., Kim, D., Kim, G., Lee, J., and Yun, C. 2012. Changes on initial growth and physiological characteristics of *Larix kaempferi* and *Betula costata* seedlings under elevated temperature. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 14(2): 63-70 (in Korean).
- Jo, W., Son, Y., Chung, H., Noh, N.J., Yoon, T.K., Han, S., Lee, S.J., Lee, S.K., Yi, K., and Jin, L. 2011. Effect of artificial warming on chlorophyll contents and net photosynthetic rate of *Quercus variabilis* seedlings in an open-field experiment. *Journal of Korean Forest Society* 100(4): 733-737 (in Korean).
- Kellomäki, S. and Wang, K.Y. 2001. Growth and resource use of birch seedlings under elevated carbon dioxide and temperature. *Annals of Botany* 87(5): 669-682.
- Kim, C. 2008. Soil CO₂ efflux in clear-cut and uncut red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) stands in Korea. *Forest Ecology and Management* 255(8-9): 3318-3321.
- Kim, C., Son, Y., Lee, W.K., Jeong, J., and Noh, N.J. 2009. Influences of forest tending works on carbon distribution and cycling in a *Pinus densiflora* S. et Z. stand in Korea. *Forest Ecology and Management* 257(5): 1420-1426.
- Kimball, B.A., Conley, M.M., Wang, S., Lin, X., Luo, C., Morgan, J., and Smith, D. 2008. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology* 14(2): 309-320.
- Kjellström, E. 2004. Recent and Future Signatures of Climate Change in Europe. *Ambio* 33(4): 193-198.
- Korea Forest Research Institute. 2012. The forest and human in climate change. Korea Forest Research Institute. Seoul. pp. 360 (in Korean).
- Lee, K.J. 1997. Tree physiology. Seoul National University Press. Seoul. pp 504 (in Korean).
- Lee, S.W., Kim, J.W., Kim, W.K., and Jo, M.S. 2009. The techniques and handling for major seedlings in Korea. Korea Forest Research Institute. Seoul. pp. 51 (in Korean).
- Lee, S.J., Han, S., Yoon, T.K., Chung, H., Noh, N.J., Jo, W., Park, C. Ko, S., Han, S.H., and Son, Y. 2012. Effects of experimental warming on growth of *Quercus variabilis* seedlings. *Journal of Korean Forest Society* 101(4): 722-728 (in Korean).
- Lee, S.J., Han, S., Yoon, T.K., Jo, W., Han, S.H., Jung, Y., and Son, Y. 2013. Changes in chlorophyll contents and net photosynthesis rate of 3-year-old *Quercus variabilis* seedlings by experimental warming. *Journal of Korean Forest Society* 102(1): 156-160 (in Korean).
- Lincoln, T. and Eduardo, Z (translation of Jun, B.O.). 2010. Plant physiology. Life Science. Seoul. pp. 751 (in Korean).
- 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.
- Noh, N.J., Son, Y., Lee, S.K., Yoon, T.K., Seo, K.W., Kim, C., Lee, W.K., Bae, S.W., and Hwang, J. 2010a. Influence of stand density on soil CO₂ efflux for a *Pinus densiflora* forest in Korea. *Journal of Plant Research* 123(4): 411-419.
- Noh, N.J., Son, Y., Lee, S.K., Seo, K.W., Heo, S.J., Yi, M.J., Park, P.S., Kim, R.H., Son, Y.M., and Lee, K.H. 2010b. Carbon and nitrogen storage in an age-sequence of *Pinus densiflora* stand in Korea. *Science China Life Science* 53(7): 822-830.

- Olszyk, D., Johnson, M.G., Tingey, D.T., Rygielwicz, R.T., Wise, C., VanEss, E., Benson, A., Storm, M.J., and King, R. 2003. Whole-seedling biomass allocation, leaf area, and tissue chemistry for Douglas-fir exposed to elevated CO₂ and temperature for 4 years. *Canadian Journal of Forest Research* 33(2): 269-278.
- Olszyk, D., Wise, C., VanEss, E., and Tingey, D. 1998. Elevated temperature but not elevated CO₂ affects long-term patterns of stem diameter and height of Douglas-fir seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 28(7): 1046-1054.
- Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, R.J., Mitchell, M.J., Hartley, A.E., Cornelissen, J.H.C., Gurevitch, J., and GCTE-NEWS. 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126(4): 543-562.
- Reich, P.B. and Oleksyn, J. 2008. Climate warming will reduce growth and survival of Scots pine except in the far north. *Ecology Letters* 11(6): 588-597.
- Sardans, J., Peñuelas, J., Marc, E., and Patricia, P. 2008. Warming and drought alter C and N concentration, allocation and accumulation in a Mediterranean shrubland. *Global Change Biology* 14(10): 2304-2316.
- SAS Institute Inc., 2009. SAS/STAT® 9.2 user's guide. SAS Institute Inc., Cary.
- Slaney, M., Wallin, G., Medhurst, J., and Linder, S. 2007. Impact of elevated carbon dioxide concentration and temperature on bud burst and shoot growth of boreal Norway spruce. *Tree Physiology* 27(2): 301-312.
- Van Cleve, K., Oechel, W.C., and Hom, J.L. 1990. Response of black spruce (*Picea mariana*) ecosystems to soil temperature modification in interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research* 20(9): 1530-1535.
- Volder, A., Edwards, E.J., Evans, J.R., Robertson, B.C., Schortemeyer, M., and Gifford, R.M. 2004. Does greater nighttime, rather than constant, warming alter growth of managed pasture under ambient and elevated atmospheric CO₂? *New Phytologist* 162(2): 397-411.
- Wan, S., Hui, D., Wallace, L., and Luo, Y. 2005. Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie. *Global Biogeochemical Cycles* 19: GB2014.
- Wang, J., Duan, B., and Zhang, Y. 2012. Effects of experimental warming on growth biomass allocation, and needle chemistry of *Abies faxoniana* in even-aged monospecific stands. *Plant Ecology* 213(1): 47-55.
- 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.
- Xu, Z.Z. and Zhou, G.S. 2006. Combined effects of water stress and high temperature on photosynthesis, nitrogen metabolism and lipid peroxidation of a perennial grass *Leymus chinensis*. *Planta* 224(5): 1080-1090.
- Yi, K., Park, C., Ryu, S., Lee, K., Yi, M., Kim, C., Park, G., Kim, R., and Son, Y. 2013. Simulating the soil carbon dynamic of *Pinus densiflora* forests in central Korea. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28(3): 241-256.
- Yin, H.J., Liu, Q., and Lai, T. 2008. Warming effects on growth and physiology in the seedlings of the two conifers *Picea asperata* and *Abies faxoniana* under two contrasting light conditions. *Ecological Research* 23(2): 459-469.
- Yoon, T.K., Chung, H., Kim, R., Noh, N.J., Seo, K.W., Lee, S.K., Jo, W., and Son, Y. 2011. Coarse woody debris mass dynamics in temperate natural forests of Mt. Jumbong, Korea. *Journal of Ecology and Field Biology* 34(1): 115-125.
- Zhao, C. and Liu, Q. 2009. Growth and photosynthetic responses of two coniferous species to experimental warming and nitrogen fertilization. *Canadian Journal of Forest Research* 39(1): 1-11.
- Zhou, X., Liu, X., Wallace, L.L., and Luo, Y. 2007. Photosynthetic and respiratory acclimation to experimental warming for four species in a tallgrass prairie ecosystem. *Journal of Integrative Plant Biology* 49(3): 270-281.