

## 실외 인위적 온난화 및 강수 조절이 소나무 묘목의 생리적 특성과 생장에 미치는 영향

박민지 · 윤순진 · 윤현민 · 장한나 · 한승현 · 안지애 · 손요환<sup>†</sup>

고려대학교 대학원 환경생태공학과

### Effects of Open-field Artificial Warming and Precipitation Manipulation on Physiological Characteristics and Growth of *Pinus densiflora* Seedlings

Park, Min Ji, Yun, Soon Jin, Yun, Hyeon Min, Chang, Hanna, Han, Seung Hyun,  
An, Jiae and Son, Yowhan<sup>†</sup>

Dept. of Environmental Science of Ecological Engineering, Graduate School, Korea University, Seoul, Korea

#### ABSTRACT

Climate change affects plant responses on physiological characteristics and growth, and *Pinus densiflora*, one of the major tree species in Korea, are expected to be particularly vulnerable to rising temperature and increased precipitation. This study was conducted to investigate the effects of an open-field warming and precipitation manipulation on physiological characteristics and growth of *P. densiflora* seedlings. Seedlings of 2-year-old *P. densiflora* were planted in April, 2013, in open-field nursery located at Korea University. The air temperature of warmed plots had been set to be 3°C higher than the control plots using infrared lamps. Precipitation was manipulated to be 30% lower or higher than the control, using transparent panels and drip irrigation. Net photosynthetic rate, total chlorophyll content, seedling height, root collar diameter and biomass were measured from April, 2014 to April, 2015. The increase in new shoot biomass from warming was statistically significant, with the biomass in warmed plots about 2-fold higher than in the control plots in 2014 and 2015. This result might be related to advanced bud burst and increased occurrence of abnormal new shoots in warmed plots. Meanwhile, the results of net photosynthetic rate, total chlorophyll content, seedling height, root collar diameter and total biomass from warming and precipitation manipulation were not statistically significant, but tendencies of lower net photosynthetic rate and higher seedling height and biomass in warmed plots compared to the control were shown. Such might be speculated as results of the extended growth period. When root to shoot (R/S) ratio was calculated from the biomass data obtained in April 2014 and April 2015, increased R/S ratio was observed regardless of the treatments applied. Drought tolerance of *P. densiflora* and particularly low annual precipitation observed in 2014 were suggested as the possible reasons.

*Key words:* Climate Change, Experimental Warming, Net Photosynthetic Rate, *Pinus densiflora*, Precipitation Manipulation, Seedling Growth

#### 1. 서 론

21세기 말에는 지구의 평균 표면 온도가 0.3~4.8°C 증가할 것으로 예측되며, 강수량은 지역에 따라 증가하거나 감소하고, 극한 강수 현상의 빈도 및 강도가 증가할 것으로 보고된 바 있다(IPCC, 2013). 온도와 강수는 산림 생태계의 탄소 순

환에 관련된 기작들을 조절하고, 산림의 구성 요소 및 구조 등을 변화시키는 중요한 인자이므로 온난화 및 강수 변화에 따른 식물의 반응을 연구하는 것이 필요하다(Allen *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2011).

기후변화에 의한 생태계의 반응을 파악하기 위하여 기후변화를 모의한 실험적 연구와 모델 연구가 다양하게 진행되고

<sup>†</sup> Corresponding author : yson@korea.ac.kr

Received November 20, 2015 / Revised December 14, 2015 / Accepted December 30, 2015

있으며, 그 중 실외 인위적 실험은 환경 제어가 어려우나, 실제에 가까운 반응을 예측할 수 있다는 장점을 지닌다(Rustad, 2008; Wu *et al.*, 2011). 실외 인위적 기후변화 연구는 온도, 강수량 및 이산화탄소 중의 하나의 요인만을 조절하는 것이 시스템을 유지하기 쉽고 경제적이기 때문에 널리 실행된다(Luo *et al.*, 2008). 그러나 기후변화의 영향은 복합적인 요인에 의해 나타나기 때문에, 가능한 여러 인자를 대상으로 하는 연구가 필요하다(Rustad, 2008).

특히 온도와 강수는 식물의 생리적 특성과 생장에 영향을 미치고, 이와 관련된 다수의 실외 인위적 기후변화 연구가 진행되고 있으며, 그 결과는 수종, 연령, 환경, 처리기간 등에 따라 다양하게 보고되고 있다(Kirschbaum, 2004; Rustad, 2008; Allen *et al.*, 2010; Chung *et al.*, 2013). 순광합성률은 온난화 처리에 의해 증가(Lee *et al.*, 2013a), 감소(Zhao and Liu, 2009)하거나 차이가 없는(Ultra *et al.*, 2012) 것으로 보고되고 있다. 그리고 식물의 생장은 온난화에 의해 증가(Lee *et al.*, 2012), 감소(Wertin *et al.*, 2011)하거나 차이가 없었다(Volder *et al.*, 2004). 또한 식생 생장이 강수 증가 처리에 의해 증가하거나(Dukes *et al.*, 2005), 강수 감소 처리에 의해 감소하는(Idrees *et al.*, 2011) 등 온난화 및 강수 조절 처리에 의한 다양한 결과가 나타난다. 한편, 묘목 단계는 수목 생장에서 중요한 시기이며(Danby and Hik, 2007), 크기가 작아 실외 인위적 기후변화 조절 환경을 조성하기에 용이하기 때문에 묘목을 대상으로 한 연구가 많다(Chung *et al.*, 2013).

소나무는 동아시아 지역에 널리 분포하며, 특히 국내 대표적인 조림 및 자생 수종으로 생태적, 사회경제적으로 중요하다. 그러나 우리나라 기후변화 시나리오에 따라 모형을 이용하여 소나무의 성장 변화를 예측한 결과, 소나무는 온도와 강수량 상승에 취약하여 생장이 감소할 것으로 예상되며, 60년 후부터는 소나무림이 점차 감소할 것으로 보고된 바 있다(Byun *et al.*, 2010). 이러한 기후변화 모델의 결과를 검증하고, 실제 기후변화에 따른 소나무의 반응을 구명하기 위해서는 온난화 및 강수 변화에 대한 소나무의 생리적인 특성 및 성장 반응을 연구할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 소나무 묘목을 대상으로 실외 인위적 온난화 및 강수 조절 처리에 따른 순광합성률, 엽록소 함량, 묘고 및 근원경 성장, 생물량에 미치는 영향을 파악하고자 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구 대상지

연구 대상지는 서울시 성북구 안암동 고려대학교 녹지캠퍼스 내 환경생태수목원으로 수목원(37°35'36"N, 127°1'31"E) 내 실외 묘포장에서 연구를 수행하였다. 이 지역의 30년간(1981~2010년) 연평균 온도는 12.5°C이고, 연평균 강수량은 1,450.5 mm이며(Korea Meteorological Administration, 2015), 본 연구가 진행된 2014년의 평균 온도는 12.9°C, 연강수량은 704.0 mm이었다. 묘포장의 초기 토양의 pH는 6.52, 총 탄소 농도는 0.22%, 총 질소 농도는 0.05%, 양이온 치환 용량은 3.67 cmol/kg 등이며, 토양 입경의 평균 비율(%)은 모래, 미사, 점토가 각각 80, 14, 6 등으로 USDA 기준 토성은 양질사토이다(Yun *et al.*, 2014).

### 2.2 온난화 및 강수 조절 처리

Representative Concentration Pathway(RCP) 8.5 시나리오에 기초한 50년 후의 국내 대기 온도는 3°C 증가할 것으로 예상되며, 강수량은 -30%부터 +30% 범위에서 변화할 것으로 예측된다. 이와 같은 기후변화 환경을 조성하기 위하여 2013년 4월에 2개 온도 조건[대조구(C), 대조구 대비 3°C 증가(W)]과 3개 강수 조건[대조구(P<sup>0</sup>), 대조구 대비 30% 감소(P<sup>-</sup>) 및 증가(P<sup>+</sup>)]을 처리한 실험구를 3개 반복하여 총 18개의 1.5 m × 1.5 m 실험구를 실외 묘포장에 설치하였다. 적외선등(FTE-1000, Mor Electric Heating Association Inc., USA)을 평균 묘고의 60 cm 위 높이에 설치하고, 데이터로거와 릴레이 등을 이용하여 온난화 처리구의 대기 온도를 대조구에 비해 3°C 높게 유지하도록 시스템을 설정하였다. 또한 광투과성 패널을 이용하여 강수 차단 덮개를 설치하여 일정 강수량을 차단시키고, 펌프를 이용하여 차단된 강수를 자동으로 강수 증가구에 점적 관수하였다(Yun *et al.*, 2014). 한편, 겨울철 적설로 인해 강수 차단 덮개가 붕괴할 가능성이 있어 1월과 2월에는 이를 제거하였다. 2013년 4월에 2년생 소나무 묘목을 실험구 당 45본씩 식재하였고, 2014년 4월에 솟아내기를 실행하고, 묘목 간 거리를 일정하게 만들기 위하여 전체 묘목을 굴취 후 재이식하여 실험구 당 21~25본의 묘목이 식재되어 있다.

### 2.3 순광합성률 및 엽록소 함량 측정

순광합성률은 각 조사구에서 생장이 평균적인 묘목을 3본씩 선정하여 2014년 5월, 7월, 9월, 11월에 묘목 당 6개의 잎을 휴대용 광합성 측정 장비(CIRAS-2, PP Systems, USA)의 챔버에 넣어 측정하였다. 챔버 내의 환경은 CO<sub>2</sub> 400 ppm, 온도 25°C, PAR는 1,000~1,100 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>로 유지하였다. 순광합성률을 측정한 잎 부분은 채취하여 스캐너(Perfection 4990,

EPSON, Japan)와 엽면적 분석 프로그램(WinSEEDLE, Regent, Canada)을 이용하여 엽면적을 측정하였고, 단위 엽면적 당 순광합성률을 산출하였다.

채취한 잎 시료는 2 mm 이내로 잘게 자르고, 20 mg을 정량하였다. DMSO (dimethyl sulfoxide) 용액 5 mL에 정량한 시료를 넣고 65°C로 1시간 증탕하여 엽록소를 추출하였다. 그리고 분광광도계(U-1100, Hitachi, Japan)를 이용하여 648 nm와 665 nm의 파장에서 추출액의 흡광도를 측정 후 총 엽록소 함량을 산출하였다(Barnes *et al.*, 1992).

## 2.4 생장 측정

각 조사구의 모든 묘목을 대상으로 2014년 및 2015년 4월에 묘고와 근원경을 측정하였다. 묘고는 가장 긴 가지의 길이를 측정하였고, 근원경은 지상으로부터 2 cm 위 부분에 표시를 하고, 디지털 캘리퍼(3418 Traceable° Digital Calipers, Control Company, USA)를 이용하여 측정하였다.

묘목의 생물량을 측정하기 위해 각 조사구마다 2014년 4월에 5본, 2015년 4월에 3본을 각각 굴취하였다. 묘목을 뿌리, 줄기, 잎, 신초로 분리하여 65°C에서 건조 후 생물량을 측정하였다. 이를 이용하여 지상부 대비 뿌리 중량 비율(root weight to shoot weight ratio, R/S)을 계산하였다.

## 2.5 통계분석

온난화 및 강수 조절 처리에 의한 순광합성률, 엽록소 함량, 묘고 및 근원경 생장, 생물량 차이의 유의성은 일원분산분석을 이용하였고, Duncan의 다중비교법으로 사후검정하였다. 그리고 온난화 처리와 강수 조절 처리에 의한 효과와 상호작용 여부를 이원분산분석을 이용하여 검정하였다. 모든 통계분석에 SAS 9.3 software를 사용하였다(SAS Institute INC, USA).

# 3. 결과 및 고찰

## 3.1 순광합성률 및 엽록소 함량

2014년의 연평균 순광합성률( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )은 처리별로 P<sup>0</sup>C(7.73±1.36), P<sup>0</sup>W(6.10±1.64), P<sup>-</sup>C(7.87±1.38), P<sup>-</sup>W(5.69±2.22), P<sup>+</sup>C(7.06±1.91), P<sup>+</sup>W(6.89±1.94) 등으로 동일 강수 조절 처리구에서 온난화 처리에 의해 낮은 경향을 보였으나, 온난화 및 강수 조절 처리의 유의성은 나타나지 않았다(Fig. 1). 일반적으로 온도 증가에 의해 효소 기능이 활성화 되기 때문에 광합성도 증가하는 것으로 알려져 있으나, 온난화에 관한 연구를 메타 분석한 결과에 의하면 수종과 연구지에 따라 순

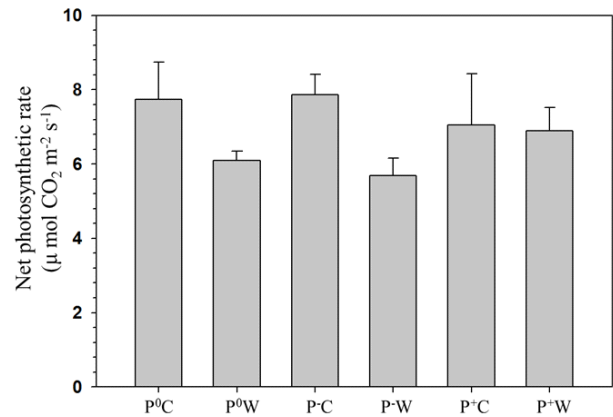


Fig. 1. Mean net photosynthetic rate for *P. densiflora* seedlings with warming and precipitation manipulation in 2014. P<sup>0</sup>C (precipitation control and temperature control plots), P<sup>0</sup>W (precipitation control and warmed plots), P<sup>-</sup>C (precipitation decreased and temperature control plots), P<sup>-</sup>W (precipitation decreased and warmed plots), P<sup>+</sup>C (precipitation increased and temperature control plots) and P<sup>+</sup>W (precipitation increased and warmed plots). Error bars indicate the standard errors of the mean.

광합성률이 감소하거나, 차이가 없는 등 다양한 결과가 보고되고 있다(Way and Oren, 2010). 소나무를 대상으로 온실에서 진행된 온난화 연구에서 온난화 처리에 의한 소나무의 순광합성률의 차이가 없는 것으로 나타났는데, 이는 온난화 처리에 의해 증가한 기공전도도 및 증산률과 온난화 처리에 의해 감소한 루비스코 활성이 복합적으로 작용한 결과로 보고된 바 있다(Ultra *et al.*, 2012). 또한 적정온도에서는 온도 증가에 의해 순광합성률의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않으며, 온도 외의 광조건 및 CO<sub>2</sub> 농도 변화에 더 민감한 것으로 알려져 있다(Saxe *et al.*, 2001; Wertin *et al.*, 2010). 한편, 동일한 연구지에서 진행된 온난화 및 강수 조절 처리 연구에서 보고된 2013년의 평균 순광합성률(Yun, 2014)에 비해 2014년의 평균 순광합성률이 모든 처리구에서 41~55% 감소한 것으로 나타났다. 이는 2014년의 가뭄(연평균 강수량: 1,450.5 mm, 2013년: 1,403.8 mm, 2014년: 704.0 mm)으로 인한 수분 스트레스와 관련이 있는 것으로 판단된다. Yordanov *et al.*(2000)은 수분 스트레스로 인하여 잎의 기공이 차단되며, 이로 인해 광합성률이 감소한다고 하였다. Wu *et al.*(2008)도 수분 스트레스에 의해 *Sophora davidii*의 순광합성률이 감소하는 것으로 보고하였으며, 상대적으로 약한 수분 스트레스는 기공을 폐쇄하여 순광합성률을 감소시키고, 강한 수분 스트레스에 의해서는 카

르복실화 효율 감소와 같은 기공 외의 인자가 광합성을 제한한다고 보고하였다.

한편, 연평균 엽록소 함량( $\text{mg g}^{-1}$ )은 처리별로  $P^0C(1.31 \pm 0.30)$ ,  $P^0W(1.43 \pm 0.26)$ ,  $P^-C(1.35 \pm 0.28)$ ,  $P^-W(1.39 \pm 0.26)$ ,  $P^+C(1.29 \pm 0.32)$ ,  $P^+W(1.24 \pm 0.29)$  등으로 온난화 및 강수 조절 처리에 의한 일정한 경향을 보이지 않았다(Fig. 2). 선행 연구에서 온난화 및 강수 조절 처리에 따른 엽록소 함량의 반응은 다양하게 보고되고 있다. Lee *et al.*(2013a)은 *Quercus variabilis*를 대상으로 한 연구에서 엽록소 함량이 생장 기간의 증가로 인해 온난화 처리구에서 대조구보다 증가한다고 보고하였고, Zhao and Liu(2009)는 온난화 처리로 인해 생육 적정 온도에 도달하여 광합성 색소 함량이 증가한다고 보고하였다. 그러나 온난화 처리로 인해 온도 및 수분스트레스가 증가하여 엽록소 함량이 감소하거나(Han *et al.*, 2012), 온난화 처리 효과가 나타나지 않는 결과도 보고되고 있다(Lee *et al.*, 2013b). 한편, 오픈탑챔버와 온실에서 진행된 강수 감소 연구에서는 *Pinus halepensis*의 엽록소 함량이 수분 스트레스의 영향으로 감소하는 것으로 보고된 바 있다(Le thiec and Manninen, 2003; Baquedano and Castillo, 2006).

본 연구에서 온난화 처리에 의해 순광합성률이 감소하는 경향이 나타났으나, 순광합성률 및 엽록소 함량에 대한 온난화 및 강수 조절 처리의 통계적인 유의성은 나타나지 않았다. 순광합성률은 온난화 처리에 따라 증가하거나 감소하는 등 다양하게 나타나지만(Way and Oren, 2010), 적정온도에서는 처리에 의한 차이가 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 보고되

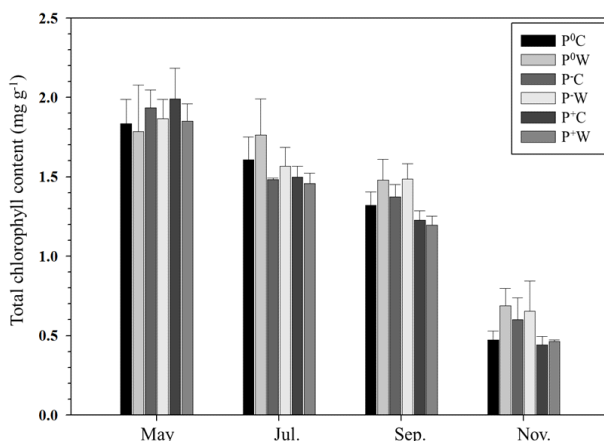


Fig. 2. Total chlorophyll content for *Pinus densiflora* seedlings with warming and precipitation manipulation in 2014. Abbreviations of the treatments are as in Fig. 1. Error bars indicate the standard errors of the mean.

고 있다(Saxe *et al.*, 2001; Wertin *et al.*, 2010). 한편, 강수의 변화는 잎의 효소 함량과 활성, 잎의 구조, 수분 포텐셜 및 증기압 부족 등을 변화시켜 순광합성률과 엽록소 함량에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Mihailović *et al.*, 1997; Yordanov *et al.*, 2000; Baquedano and Castillo, 2006; Wu *et al.*, 2008). 그러나 본 연구에서는 강수 조절 처리에 따른 순광합성률 및 엽록소 함량의 차이가 나타나지 않았다. 이는 2014년의 경우, 적은 강수량으로 인해 강수 조절 처리에 따른 강수 증감 효과가 충분하지 않아 처리 효과가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

### 3.2 생장

2015년 4월의 소나무 묘고(cm)는 처리별로  $P^0C(61.50 \pm 0.45)$ ,  $P^0W(68.09 \pm 1.07)$ ,  $P^-C(58.21 \pm 0.96)$ ,  $P^-W(66.25 \pm 0.98)$ ,  $P^+C(59.27 \pm 2.81)$ ,  $P^+W(63.19 \pm 2.36)$  등으로 나타났(Fig. 3a). 소나무 묘고는 온난화 및 강수 조절 처리에 따라 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았으나, 동일한 강수 처리구에서 온난화 처리에 따라 증가하는 경향이 나타났다. 반면, 소나무 묘목의 근원경(mm)은 처리별로  $P^0C(12.21 \pm 0.50)$ ,  $P^0W(11.97 \pm 0.31)$ ,  $P^-C(10.91 \pm 0.08)$ ,  $P^-W(11.50 \pm 0.26)$ ,  $P^+C(11.49 \pm 0.50)$ ,  $P^+W(11.62 \pm 0.44)$  등으로 온난화 및 강수 조절에 의한 유의한 차이와 경향이 나타나지 않았다(Fig. 3b). 온난화와 강수 조절 처리에 따른 식물의 생장 반응은 연구지와 수종에 따라 다양하게 보고되고 있다. *Pinus* 속에 대한 선행 연구 결과에 의하면 온난화 처리에 의해 *Pinus sylvestris*의 묘고는 증가한 반면, *Pinus nigra*에서는 차이가 나타나지 않았고, 두 수종 모두 강수 감소 처리에 의해 묘고가 감소하는 것으로 나타났다(Thiel *et al.*, 2012; Taeger *et al.*, 2015). 또한 *P. sylvestris*의 근원경은 강수 감소 처리에 의해 감소하였으나, 온난화 처리에 따른 경향은 보이지 않았다(Taeger *et al.*, 2015). 한편, 소나무는 전년도에 생성된 신초를 봄에 신장시키는 고정생장 수종으로 1년에 한 번 신초가 성장하는 것이 일반적이나(Lee, 2011) 본 연구지에서 신초가 한 번 더 성장하는 이상신초의 발생이 관찰되었다. 이상신초는 강수 조절 처리에 상관없이 온난화 처리구에서 높은 비율로 발생하였으며( $P^0C$ : 15%,  $P^0W$ : 48%,  $P^-C$ : 0%,  $P^-W$ : 48%,  $P^+C$ : 3%,  $P^+W$ : 24%; Park, unpublished data), 본 연구에서 나타난 온난화 처리에 의한 묘고 생장 증가 경향은 이러한 이상신초에서 기인한 것으로 판단된다.

2014년 및 2015년 4월에 굴취한 소나무 묘목의 신초 생물량을 이원분산분석한 결과, 온난화 처리가 신초 생물량을 유의하게 증가시켰으나, 강수 조절 처리의 효과 및 상호작용은 나타나지 않았다(Table 1). 줄기, 잎, 지상부, 지하부 및 총 생물량은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으나, 줄기를

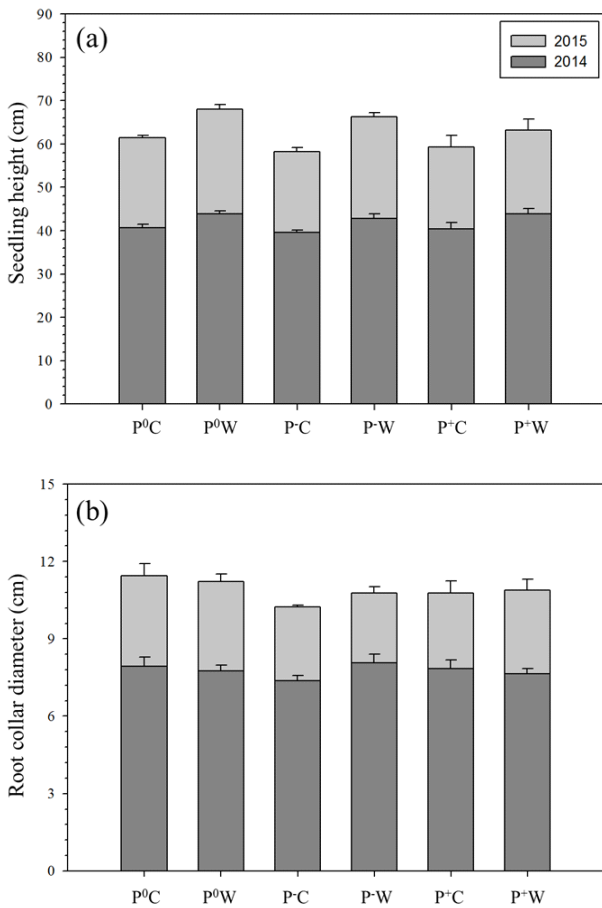


Fig. 3. Seedling height (a) and root collar diameter (b) of *Pinus densiflora* seedlings in April, 2014 and 2015. Abbreviations of the treatments are as in Fig. 1. Error bars indicate the standard errors of the mean.

제외한 기관의 생물량은 대체로 온난화 처리에 의해 증가하는 경향을 보였다(Table 2). 온난화 처리에 관한 연구를 메타 분

석한 결과에 따르면 온난화 처리가 지상부 생물량을 평균적으로 27% 증가시키며(Wu *et al.*, 2011), 생물량 증가의 원인은 양분이용효율, 성장 기간의 증가 등으로 보고되고 있다(Wu *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2012; Chung *et al.*, 2013). 본 연구에서 나타난 신초의 생물량 증가는 온도에 대한 눈의 반응 결과로 나타난 성장 기간 증가와 관련이 있을 것으로 사료된다. 즉, 눈의 형성과 개아는 온도에 민감하게 반응하며(Slaney *et al.*, 2007; Lee, 2011), 온난화 처리에 의해 개아 시기가 앞당겨지는 것이 보고되고 있다(Chung *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2014). 본 연구에서 2015년 4월에 굴취한 묘목의 신초 개수는 강수 조절 처리에 상관없이 온난화 처리구에서 더 많은 경향을 보였으며(P<sup>0</sup>C: 27.11±5.95, P<sup>0</sup>W: 32.67±2.17, P<sup>+</sup>C: 25.56±2.39, P<sup>+</sup>W: 28.67±1.35, P<sup>+</sup>C: 30.56±4.12, P<sup>+</sup>W: 32.22±3.37), 모든 강수 조절 처리에서 온난화 처리에 의해 개아 및 개엽 시기가 평균적으로 약 10일 앞당겨지는 것이 관찰되었다(Park, unpublished data). 신초 생물량의 증가는 온난화 처리에 의해 증가한 눈의 개수와 이상신초 발생률, 개아 및 개엽 시기가 앞당겨짐으로 인한 성장 기간 증가 등의 영향 때문인 것으로 사료되며, 이와 같은 경향은 *P. sylvestris*와 *P. nigra*를 대상으로 한 다른 연구에서도 보고된 바 있다(Thiel *et al.*, 2012; Taeger *et al.*, 2015).

한편, R/S율에 대한 온난화 및 강수 조절 처리의 유의성은 2014년과 2015년 모두 나타나지 않았으나, 모든 강수 조절 처리에서 온난화 처리에 따라 감소하는 경향을 보였다(Table 2). 온난화 처리에 따라 소나무 묘목의 R/S율이 감소한 것은 지상부 생물량 증가와 관련이 있는 것으로 판단된다. 이전 연구에서도 침엽수종은 온난화 처리에 의해 잎의 생물량이 증가하여 R/S율이 감소하며(Way and Oren, 2010), 이와 같이 온난화 처리에 의한 지상부 성장 증가는 양분 이용 효율의 증가에 기인한 것으로 보고된 바 있다(Yin *et al.*, 2007). 한편 2014년과 2015년의 R/S율을 비교한 결과, 1년간 모든 처리구에서

Table 1. Two-way analysis of variance on the effect of warming and precipitation manipulation on new shoot biomass in April, 2014 and 2015

Parameter	Source	df	SS	F	P
New shoot biomass in April, 2014	Warming (W)	1	5.0053	21.93	0.0005
	Precipitation (P)	2	0.2534	0.56	0.5880
	W × P	2	0.0166	0.04	0.9644
New shoot biomass in April, 2015	Warming (W)	1	24.7964	20.22	0.0007
	Precipitation (P)	2	1.1101	0.45	0.6464
	W × P	2	0.0623	0.03	0.9750

Table 2. Biomass and root to shoot ratio (R/S) of *P. densiflora* seedlings with warming and precipitation manipulation in April 2014 and 2015

	P <sup>0</sup> C	P <sup>0</sup> W	P <sup>-</sup> C	P <sup>-</sup> W	P <sup>+</sup> C	P <sup>+</sup> W	
April, 2014	New shoot (g)	1.02 (0.00) <sup>bc</sup>	2.16 (0.54) <sup>a</sup>	0.79 (0.03) <sup>c</sup>	1.80 (0.09) <sup>ab</sup>	0.93 (0.12) <sup>bc</sup>	1.94 (0.38) <sup>a</sup>
	Stem (g)	4.70 (0.30) <sup>a</sup>	5.97 (0.94) <sup>a</sup>	4.64 (0.39) <sup>a</sup>	4.00 (0.34) <sup>a</sup>	5.00 (0.48) <sup>a</sup>	4.71 (0.44) <sup>a</sup>
	Leaf (g)	5.03 (0.57) <sup>a</sup>	6.75 (1.93) <sup>a</sup>	3.38 (0.08) <sup>a</sup>	5.34 (0.47) <sup>a</sup>	4.36 (0.49) <sup>a</sup>	5.52 (0.80) <sup>a</sup>
	Above (g)	10.90 (1.00) <sup>a</sup>	14.88 (3.24) <sup>a</sup>	8.81 (0.35) <sup>a</sup>	11.13 (0.75) <sup>a</sup>	10.33 (0.49) <sup>a</sup>	12.18 (1.50) <sup>a</sup>
	Root (g)	4.53 (0.58) <sup>a</sup>	5.20 (0.95) <sup>a</sup>	3.69 (0.20) <sup>a</sup>	4.43 (0.51) <sup>a</sup>	4.33 (0.35) <sup>a</sup>	4.11 (0.53) <sup>a</sup>
	Total (g)	15.59 (1.73) <sup>a</sup>	20.09 (4.19) <sup>a</sup>	12.54 (0.42) <sup>a</sup>	15.57 (1.09) <sup>a</sup>	14.82 (0.92) <sup>a</sup>	16.28 (2.02) <sup>a</sup>
	R/S	0.43 (0.03) <sup>a</sup>	0.36 (0.02) <sup>a</sup>	0.42 (0.02) <sup>a</sup>	0.41 (0.05) <sup>a</sup>	0.43 (0.03) <sup>a</sup>	0.34 (0.00) <sup>a</sup>
April, 2015	New shoot (g)	2.82 (0.33) <sup>bc</sup>	5.25 (1.15) <sup>a</sup>	2.36 (0.32) <sup>c</sup>	4.54 (0.36) <sup>ab</sup>	2.66 (0.41) <sup>bc</sup>	5.10 (0.80) <sup>a</sup>
	Stem (g)	15.13 (1.82) <sup>a</sup>	14.10 (1.03) <sup>a</sup>	9.38 (1.04) <sup>a</sup>	14.80 (1.11) <sup>a</sup>	11.95 (3.13) <sup>a</sup>	14.82 (2.70) <sup>a</sup>
	Leaf (g)	17.69 (5.50) <sup>a</sup>	17.53 (0.69) <sup>a</sup>	10.50 (1.00) <sup>a</sup>	19.40 (1.57) <sup>a</sup>	14.77 (3.87) <sup>a</sup>	18.67 (4.88) <sup>a</sup>
	Above (g)	34.03 (8.41) <sup>a</sup>	36.87 (2.13) <sup>a</sup>	22.25 (2.21) <sup>a</sup>	38.73 (3.00) <sup>a</sup>	29.38 (7.35) <sup>a</sup>	38.59 (7.98) <sup>a</sup>
	Root (g)	17.85 (6.01) <sup>a</sup>	19.48 (2.57) <sup>a</sup>	12.29 (0.60) <sup>a</sup>	17.51 (0.92) <sup>a</sup>	16.25 (3.80) <sup>a</sup>	17.12 (2.79) <sup>a</sup>
	Total (g)	51.56 (19.12) <sup>a</sup>	55.48 (3.44) <sup>a</sup>	35.02 (2.21) <sup>a</sup>	54.79 (1.40) <sup>a</sup>	45.63 (11.11) <sup>a</sup>	51.64 (6.62) <sup>a</sup>
	R/S	0.67 (0.20) <sup>a</sup>	0.53 (0.06) <sup>a</sup>	0.53 (0.04) <sup>a</sup>	0.47 (0.02) <sup>a</sup>	0.55 (0.02) <sup>a</sup>	0.49 (0.05) <sup>a</sup>

Abbreviations of the treatments are as in Fig. 1. Values with the different letter (<sup>a-c</sup>) indicate significant difference among six treatments ( $P < 0.05$ ). The values in parentheses are standard errors.

R/S율이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 2014년의 가뭄 때문에 지하부로의 양분 분배가 증가된 결과인 것으로 판단된다. 이전 연구에서도 건조한 환경에서 *P. sylvestris* 및 *P. canariensis*의 뿌리 길이와 지하부 생물량이 증가한 것으로 보고된 바 있다(López *et al.*, 2009; Taeger *et al.*, 2015).

온난화 처리에 의해 묘고 및 생물량이 증가하는 경향이 나타났지만, 신초의 생물량을 제외하고 온난화 및 강수 조절 처리의 유의한 효과는 나타나지 않았다. 묘목의 생장에 대한 온

난화 처리의 효과가 뚜렷하게 나타나지 않는 현상은 다른 단기 실험 인위적 기후변화 연구에서도 보고되고 있다(Arend *et al.*, 2011; Thiel *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2013b; Taeger *et al.*, 2015). 한편, 강수 감소는 과도한 증산을 유발하여 식물의 생산성을 감소시키는 것으로 알려져 있으며(Williams *et al.*, 2013), 강수 조절에 관한 연구를 메타 분석한 결과에 의하면 생물량은 강수 증가 처리에 의해 증가하고, 감소 처리에 의해 감소하는 것으로 나타났다(Wu *et al.*, 2011). 그러나 본 연구에서는

강수 조절 처리가 소나무 묘목 생장에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 내건성이 강한 소나무는 수분 민감도가 낮은 특성이 있는데(Lee, 2011), 2014년 가뭄으로 인해 모든 처리구에서 묘목 생장이 부정적인 영향을 받았으며, 아울러 적은 강수량 때문에 강수 증감 효과가 충분하지 않아 강수 처리의 영향이 나타나지 않은 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 기후변화에 의한 소나무 묘목의 반응을 관찰하기 위하여 실외 묘포장에서 인위적 온난화 및 강수 조절 처리를 수행하였다. 온난화 처리에 의해 순광합성률에서는 감소 경향이 있고, 묘고 성장과 생물량은 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났으나, 신초의 생물량을 제외하고 처리의 통계적인 유의성은 나타나지 않았다. 강수 조절 처리에 상관없이 온난화 처리구에서 2014년 이상신초의 발생률이 3배 이상 증가하였으며, 개아 및 개엽 시기가 평균적으로 약 10일 앞당겨져 봄철 성장 기간이 증가하는 것이 관찰되었다. 묘고 및 지상부의 생물량 증가는 이와 같은 이유에서 기인한 것으로 판단된다. 또한 온난화 처리에 의해 소나무 묘목의 순광합성률이 감소하는 경향을 보였지만, 총 생물량은 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 온난화 처리에 의해 증가한 성장 기간의 영향 때문인 것으로 사료된다. 한편, 2014년 4월과 2015년 4월의 R/S율을 비교한 결과에 의하면 모든 처리구에서 R/S율이 증가하였으며, 2014년 순광합성률은 2013년 대비 약 50% 감소하였다. 이것은 2014년의 경우, 가뭄으로 인해 모든 처리구의 묘목이 수분 스트레스를 받는데 원인이 있는 것으로 사료된다. 그러나 연간 경향과는 다르게 강수 조절 처리의 효과는 모든 측정 항목에서 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이러한 결과는 내건성이 강한 소나무의 특성에서 기인한 것으로 보이며, 더불어 2014년의 적은 강수량으로 인해 강수 조절 처리에 의한 강수 증감 효과가 미미한 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서 나타난 온난화 처리에 따른 생물량 증가와 연간 양분 분배 변화는 소나무 묘목의 기후변화 적응 기작의 일부로 판단된다. 그러나 묘목의 반응은 다양한 기작이 복합적으로 작용하여 나타나는 것이기 때문에 순광합성률과 엽록소 함량 외의 기공전도도, 효소 활성 등의 생리적 기작과 성장 기간의 변화를 확인할 수 있는 식물계절 등을 통하여 묘목의 반응을 다각도로 확인하는 것이 중요하다. 한편, 단기 기후변화 모의 연구에서 처리의 영향이 뚜렷하지 않은 경우도 많다. 특히 연구가 진행된 2014년의 자연 강수 조건은 평년과 매우 차이가 커서 소나무 묘목의 반응을 확인하기 어려운 측면이 있

기 때문에, 증산률, 수분이용효율 등 수분과 관련이 있는 생리적 반응을 확인하는 것이 필요하다. 따라서 앞으로 식물계절과 기공전도도, 증산률 등의 생리적 반응을 추가하여 연구를 지속할 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 논문은 한국연구재단 일반연구지원사업 ‘실외 실험적 온난화 및 강수 조절을 통한 기후변화에 대한 소나무 묘목의 생장 및 토양 반응 연구’(과제번호: 2013R1A1A2012242)와 산림청 임업기술연구개발사업 ‘인위적 온난화 처리를 통한 산림의 영향분석 및 기후변화 대응 적응대책 연구’(과제번호: S11115L030100)의 지원에 의한 연구 결과의 일부입니다.

#### REFERENCES

- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears DD, Hogg EH, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim JH, Allard G, Running SW, Semerci A, Cobb N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For Ecol Manag* 259(4):660-684.
- Arend M, Kuster T, Günthardt-Goerg MS, Dobbertin M. 2011. Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*). *Tree Physiol* 31(3): 287-297.
- Baquedano FJ, Castillo FJ. 2006. Comparative ecophysiological effects of drought on seedlings of the Mediterranean water-saver *Pinus halepensis* and water-spenders *Quercus coccifera* and *Quercus ilex*. *Trees* 20(6):689-700.
- Barnes JD, Balaguer L, Manrique E, Elvira S, Davison AW. 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environ Exp Bot* 32(2):85-100.
- Byun JG, Lee WK, Nor DK, Kim SH, Choi JK, Lee YJ. 2010. The relationship between tree radial growth and topographic and climatic factors in red pine and oak in central regions of Korea. *Jour Korean For Soc* 99(6):908-913 (In Korean with English abstract).
- Chung H, Muraoka H, Nakamura M, Han S, Muller O, Son

- Y. 2013. Experimental warming studies on tree species and forest ecosystems: A literature review. *J Plan Res* 126(4):447-460.
- Danby RK, Hik DS. 2007. Responses of white spruce (*Picea glauca*) to experimental warming at a subarctic alpine treeline. *Glob Chang Biol* 13(2):437-451.
- Dukes JS, Chiariello NR, Cleland EE, Moore LA, Shaw MR, Thayer S, Tobeck T, Mooney HA, Field CB. 2005. Responses of grassland production to single and multiple global environmental changes. *PLoS Biol* 3(10):1829-1837.
- Han SH, Kim DH, Kim GN, Lee JC, Yun CW. 2012. Changes on initial growth and physiological characteristics of *Larix kaempferi* and *Betula costata* seedlings under elevated temperature. *Korean J Agric Forest Meteorol* 14(2):63-70 (In Korean with English abstract).
- Han S, Chung H, Noh NJ, Lee SJ, Jo W, Yoon TK, Yi K, Park CW, Ko S, Son Y. 2014. Effect of open-field experimental warming on the leaf phenology of oriental oak (*Quercus variabilis*) seedlings. *J Plant Ecol* 7(6):559-566.
- Idrees M, Khan MMA, Naeem M, Aftab T, Hashmi N, Alam M, Moinuddin. 2011. Modulation of defence responses by improving photosynthetic activity, antioxidative metabolism, and vincristine and vinblastine accumulation in *Catharanthus roseus* (L.) G. Don through salicylic acid under water stress. *Russ Agric Sci* 37(6):474-482.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Summary for policymakers. In: climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press 330.
- Kirschbaum MU. 2004. Direct and indirect climate change effects on photosynthesis and transpiration. *Plant Biol* 6(3):242-253.
- Korea Meteorological Administration. 2014 Weather information. Available online: [http://www.kma.go.kr/weather/climate/average\\_30years.jsp](http://www.kma.go.kr/weather/climate/average_30years.jsp) (accessed October 2015).
- Le Thiec D, Manninen S. 2003. Ozone and water deficit reduced growth of Aleppo pine seedlings. *Plan Physiol Biochem* 41(1):55-63.
- Lee KJ. 2011. Tree physiology. 3<sup>rd</sup> edition. Seoul University Press, Seoul (In Korean).
- Lee SJ, Han S, Yoon TK, Chung H, Noh NJ, Jo W, Park CW, Ko S, Han SH, Son Y. 2012. Effects of experimental warming on growth of *Quercus variabilis* seedlings. *Jour Korean For Soc* 101(4):722-728 (In Korean with English abstract).
- Lee SJ, Han S, Yoon TK, Jo W, Han SH, Jung Y, Son Y. 2013a. Change in chlorophyll contents and net photosynthesis rate of 3-year-old *Quercus variabilis* seedlings by experimental warming. *Jour Korean For Soc* 102(1):156-160 (In Korean with English abstract).
- Lee SJ, Han S, Yoon TK, Han SH, Jung Y, Yun SJ, Son Y. 2013b. Growth and physiological characteristics of *Pinus densiflora* seedlings in response to open-field experimental warming using the infrared lamp. *Jour Korean For Soc* 102(4):522-529 (In Korean with English abstract).
- López R, Rodríguez-Calcerrada J, Gil L. 2009. Physiological and morphological response to water deficit in seedlings of five provenances of *Pinus canariensis*: Potential to detect variation in drought-tolerance. *Trees* 23(3):509-519.
- Luo Y, Gerten D, Le Maire G, Parton WJ, Weng E, Zhou X, Keough C, Beier C, Ciais P, Cramer W, Duke JS, Emmett B, Hanson PJ, Knapp A, Linder S, Nepstad D, Rustad L. 2008. Modeled interactive effects of precipitation, temperature, and [CO<sub>2</sub>] on ecosystem carbon and water dynamics in different climatic zones. *Glob Chang Biol* 14(9):1986-1999.
- Mihailović N, Lazarević M, Dželetović Z, Vučković M, Durdević M. 1997. Chlorophyllase activity in wheat, *Triticum aestivum* L. leaves during drought and its dependence on the nitrogen ion form applied. *Plant Sci* 129(2):141-146.
- Rustad LE. 2008. The response of terrestrial ecosystems to global climate change: towards an integrated approach. *Sci Total Environ* 404(2):222-235.
- Saxe H, Cannell MG, Johnsen Ø, Ryan MG, Vourlitis G. 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytol* 149(3):369-399.
- Slaney M, Wallin G, Medhurst J, Linder S. 2007. Impact of elevated carbon dioxide concentration and temperature on bud burst and shoot growth of boreal Norway spruce. *Tree Physiol* 27(2):301-312.
- Taeger S, Sparks TH, Menzel A. 2015. Effects of temperature and drought manipulations on seedlings of Scots



- pine provenances. *Plant Biol* 17(2):361-372.
- Thiel D, Nagy L, Beierkuhnlein C, Huber G, Jentsch A, Konnerth M, Kreyling J. 2012. Uniform drought and warming responses in *Pinus nigra* provenances despite specific overall performances. *For Ecol Manage* 270:200-208.
- Ultra VU, Han SH, Kim DH, Aggangan NS. 2012. Changes in growth, photosynthetic parameters, carbon and nitrogen uptake of *Pinus densiflora* S. et Z. under elevated temperature and CO<sub>2</sub> level. *Asia Life Sci* 21(2):523-536.
- Volder A, Edwards EJ, Evans JR, Robertson BC, Schorremeyer M, Gifford RM. 2004. Does greater night-time, rather than constant, warming alter growth of managed pasture under ambient and elevated atmospheric CO<sub>2</sub>? *New Phytol* 162(2):397-411.
- Way DA, Oren R. 2010. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: A review and synthesis of data. *Tree Physiol* 30(6):669-883.
- Wertin TM, McGuire MA, Teskey RO. 2010. The influence of elevated temperature, elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and water stress on net photosynthesis of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) at northern, central and southern sites in its native range. *Glob Chang Biol* 16(7): 2089-2103.
- Wertin TM, McGuire MA, Teskey RO. 2011. Higher growth temperatures decreased net carbon assimilation and biomass accumulation of northern red oak seedlings near the southern limit of the species range. *Tree Physiol* 31(12): 1277-1288.
- Williams AP, Allen CD, Macalady AK, Griffin D, Woodhouse CA, Meko DM, Swetnam TW, Rauscher SA, Seager R, Grissino-Mayer HD, Dean JS, Cook ER, Gangodagamage C, Cai M, McDowell NG. 2013. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nat Clim Chang* 3(3):292-297.
- Wu FZ, Bao WK, Li FL, Wu N. 2008. Effects of water stress and nitrogen supply on leaf gas exchange and fluorescence parameters of *Sophora davidii* seedlings. *Photosynthetica* 46(1):40-48.
- Wu Z, Dijkstra P, Koch GW, Peñuelas J, Hungate BA. 2011. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation. *Glob Chang Biol* 17(2):927-942.
- Yin HJ, Liu Q, Lai T. 2007. Warming effects on growth and physiology in the seedlings of the two conifers *Picea asperata* and *Abies faxoniana* under two contrasting light conditions. *Ecol Res* 23(2):459-469.
- Yordanov I, Velikova V, Tsonev T. 2000. Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance. *Photosynthetica* 38(1):171-186.
- Yun SJ, Han S, Han SH, Lee SJ, Jung Y, Kim S, Son Y. 2014. Open-field experimental warming and precipitation manipulation system design to simulate climate change impact. *Jour Korean For Soc* 103(2):159-164 (In Korean with English abstract).
- Yun SJ. 2014. Effects of experimental warming and precipitation manipulation on environmental factors and growth, net photosynthetic rate and chlorophyll content of *Pinus densiflora* seedlings. M.S. dissertation, Korea University (In Korean with English abstract).
- Zhao C, Liu Q. 2009. Growth and photosynthetic responses of two coniferous species to experimental warming and nitrogen fertilization. *Can J For Res* 39(1):1-11.