

기후변화 영향 모의를 위한 실외 실험적 온난화 및 강수 조절 시스템 설계 연구

윤순진¹ · 한새롬¹ · 한승현¹ · 이선정² · 정예지¹ · 김성준¹ · 손요환^{1*}

¹고려대학교 대학원 환경생태공학과, ²국립산림과학원 기후변화연구센터

Open-field Experimental Warming and Precipitation Manipulation System Design to Simulate Climate Change Impact

Soon Jin Yun¹, Saerom Han¹, Seung Hyun Han¹, Sun Jeoung Lee²,
Yejee Jung¹, Seoungjun Kim¹ 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: 소나무 묘목을 대상으로 한반도 기후변화 시나리오에 근거한 50년 후 온도 3°C 증가와 강수량 30% 변화의 영향을 모의하고자 실외에서 온난화 처리와 강수 조절을 수행할 수 있는 시스템을 설계하였다. 이를 위하여 2013년 4월에 묘포장을 조성하고 2년생 소나무 묘목을 식재한 다음 5월부터 적외선등을 이용하여 온난화 처리구(W)의 대기 온도를 대조구(C)에 비하여 3.0°C 높게 설정하여 가열하였으며, 강수 대조구(P⁰)와 강수 차단 덮개를 이용한 강수 감소(대조구 대비 -30%; P⁻) 조절, 그리고 펌프와 점적관수를 통한 강수 증가(대조구 대비 +30%; P⁺) 조절을 실행하였다. 온난화 처리구의 대기 온도는 초기에 대조구에 비하여 평균 2.2°C 높았으나 이후 점차 목표치에 근접한 3.0°C로 유지되었다. 또한 온난화 처리에 따른 평균 토양 온도는 온난화 처리구에서 대조구보다 평균 3.1°C 높게 나타났다. 강수 증가 및 감소 조절에 따른 평균 토양 수분 함량은 온난화 처리구에서 P⁰W에 비하여 P⁺W는 13.9% 증가하고, P⁻W는 10.0% 감소하였으며, 온난화 대조구 중에서 P⁺C는 23.7% 증가하고, P⁻C는 7.6% 감소하였다. 환경요인의 모니터링을 통하여 실외 실험적 온난화와 강수 조절 시스템이 적절하게 설계되고 가동됨을 확인할 수 있었다.

Abstract: The objective of this study was to establish an open-field experimental warming treatment and precipitation manipulation system to simulate climate change impact for *Pinus densiflora* seedlings based on a climate change scenario in Korea. Two-year-old seedlings were planted in a nursery in April, 2013. The air temperature of warmed plots (W) was set to increase by 3.0°C compared to control plots (C) using infrared lamps from May, 2013. The three precipitation manipulation consisted of precipitation decrease using transparent panel (-30%; P⁻), precipitation increase using pump and drip-irrigation (+30%; P⁺) and precipitation control (0%; P⁰). Initially, the air temperature was 2.2°C higher in warmed plots than in control plots and later air temperature was maintained close to the target temperature of 3.0°C. The average soil temperature was 3.1°C higher in warmed plots than in control plots. Also the average soil moisture content after the precipitation manipulation increased by 13.9% in P⁺W and decreased by 10.0% in P⁻W compared to P⁰W, and increased by 23.7% in P⁺C and decreased by 7.6% in P⁻C compared to P⁰C. It was confirmed that the open-field experimental warming and precipitation manipulation system was properly designed and operating.

Key words: air temperature, climate change, *Pinus densiflora*, precipitation, soil moisture content, soil temperature, warming

서론

기후변화의 영향으로 21세기 지구 평균 온도는 100년 간 약 1.0-3.5°C 상승하고(IPCC, 2007), 강수는 지역에 따

라 양과 패턴이 변화될 것으로 예측된다(Fay et al., 2008). 온도와 강수는 생태계 내 다양한 기작에 영향을 미치는 주요 인자이므로(Zhou et al., 2013), 기후변화로 인한 온도와 강수 변화에 따라 생태계의 구조와 기능도 변화될 것으로 예상된다(Rustad, 2008).

기후변화에 대한 생태계의 반응을 연구하기 위한 방법

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

의 하나로 기후변화 실외 실험적 연구가 있다. 기후변화 실외 실험적 연구는 기후변화 양상과 유사한 환경을 조성하여 실제에 가까운 생태계 반응을 예측할 수 있는 장점을 가진다(Rustad et al., 2001). 기후변화 실외 실험적 연구는 온도나 강수량 등의 한 가지 요인을 조절하는 것이 기술적으로 용이하고 비용도 적게 들기 때문에 한 가지 요인만을 포함하는 경우가 대부분이다(Luo et al., 2008). 그러나 기후변화의 영향은 한 가지 요인에 대한 실험 결과만으로 예측하기 어려워 여러 가지 환경 인자를 포함하는 연구가 필요하다(Bardgett et al., 2008; Rustad, 2008). 국외에서 두 가지 이상의 요인을 포함하는 기후변화 실외 실험이 증가하고 연구 결과도 다수 보고되고 있다(Wu et al., 2011). 그러나 두 가지 이상의 요인을 포함하는 실험은 복잡한 상호작용이 존재할 수 있고, 보통 한 가지 요인만을 포함하는 실험보다 실험 대상에 미치는 영향이 더 적은 것으로 보고되었다(Luo et al., 2008; Wu et al., 2011). 국내에서는 온난화 처리를 이용한 기후변화 실외 실험적 연구 사례가 있으나(Jo et al., 2011; Lee et al., 2012; 2013; Chung et al., 2013), 온난화 처리와 강수 조절 등 두 가지 요인을 동시에 조절하는 실외 실험은 수행된 바가 없다.

한편, 소나무는 우리나라의 대표적인 조림 및 자생 수종으로 전체 산림 면적의 약 23%를 차지한다(Korea Forest Service, 2011). 그리고 우리나라 기후변화 시나리오에 따른 소나무 성장 변화를 모형을 이용해 예측한 연구 결과에 의하면 소나무는 기온 상승에 취약하며, 60년 후부터는 소나무림이 점차 줄어들 것으로 예측되었다(Byun et al., 2010). 이와 같은 모형에 의한 예측 결과를 검증하고, 실제 기후변화에 따른 소나무의 반응과 그 변화 기작을 관찰하기 위해서는 성장과 관련된 인자에 대하여 실험적으로 연구할 필요가 있다. 따라서 본 연구의 목적은 소나무 묘목을 대상으로 기후변화의 영향을 모의하기 위하여 실외에서 온난화 처리와 강수 조절을 수행할 수 있는 시스템을 설계하고, 이에 따른 대기 온도, 토양 온도 및 토양 수분 함량 등의 환경요인 변화를 모니터링하여 검증하는 것이다.

재료 및 방법

2013년 4월, 서울특별시 성북구 안암동 고려대학교 녹지캠퍼스 내 환경생태수목원(37° 35' 36" N, 127° 1' 31" E)에 실외 묘포장을 조성하였다. 이 지역의 30년간 연평균 온도는 12.2°C이고 강수량은 1,344 mm이다. 묘포장 내 초기 토양 성질을 조사하기 위해 임의의 6개 지점에서 토양 시료를 채취하여 풍건한 다음, 2 mm체(US standard NO. 10)로 석력을 제거한 토양의 성질을 분석하였다. 토양 입

경의 평균 비율(%)은 모래, 미사, 점토가 각각 80, 14, 6 등이며 토성은 양질사토이고, 산도(pH)는 6.52, 총 탄소 농도는 0.22%, 총 질소 농도는 0.05%, 양이온 치환 용량은 3.67 cmol/kg 등으로 나타났다.

Representative Concentration Pathway (RCP) 시나리오에 기초하여 50년 후 예상되는 온도 3°C 증가와 강수량 30% 변동의 국내 기후변화 환경을 조성하기 위해서 해당 온도와 강수 조절 조건을 포함하는 1.5 m × 1.5 m 실험구를 3개 반복으로 총 18개[온도: 대조구(C), 대조구 대비 3°C 증가(W); 강수량: 대조구(P⁰), 대조구 대비 30% 증가(P⁺), 대조구 대비 30% 감소(P⁻)]를 묘포장에 설치하였다. 그리고 토양 내 수분 이동 및 손실을 방지하기 위해 각 실험구에 지표로부터 50 cm 토양 깊이까지 수분 이동 방지판을 설치하였으며, 2년생 소나무 묘목을 실험구당 45본씩 일정한 간격으로 식재하였다.

2013년 4월에 스테인리스 스틸 봉으로 구성된 1.5 m × 1.5 m × 2.0 m 구조물에 적외선등(FTE-1000, Mor Electric Heating Association Inc., USA)을 묘고로부터 60 cm 높이에 설치하고(Kimball et al., 2008), 묘목의 생장에 따라 높이를 조절할 수 있게 하였다. 또한 적외선 온도계(SI-111, Campbell Scientific Inc., USA), 데이터 로거(CR3000, Campbell Scientific Inc., USA)와 릴레이 등을 이용하여 온난화 처리구의 대기 온도를 대조구에 비해 3°C 높게 유지하도록 로거 내 프로그램을 설정하였다.

2013년 4월에 강수 조절을 위해 다음과 같은 장치를 설치하였다(Figure 1). 1) 강수 감소구는 전광 대비 90% 광

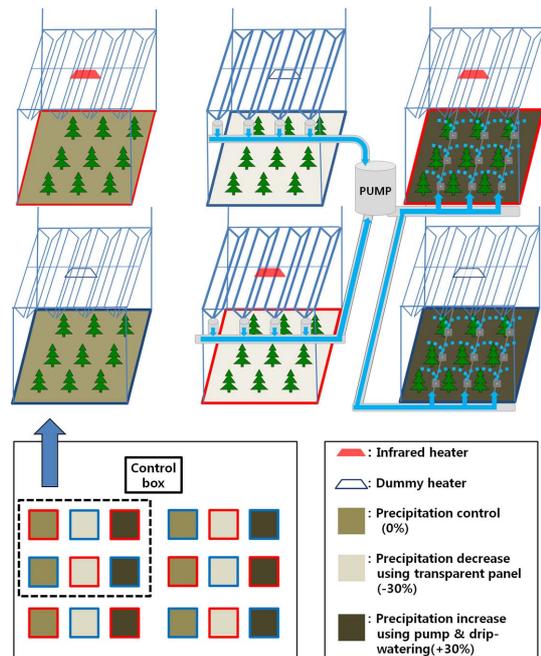


Figure 1. Open-field experimental warming and precipitation manipulation system.

투과성이 있는 폴리카보네이트 패널을 이용한 강수 차단 덮개(0.09 m × 1.5 m)로 실험구 면적의 1/3을 피복하여, 강수량의 30%가 유입되지 않도록 차단하였다. 2) 강수 증가구는 강수 감소구에서 차단된 강수를 PVC 파이프를 통해 물탱크에 수집한 후, 수위 감지 센서와 펌프를 이용하여 자동으로 강수 증가구에 점적 관수되도록 하였다. 3) 강수 대조구는 강수량을 제외한 환경 인자를 강수 감소구 및 증가구와 동일하게 유지하기 위해 패널 사이에 틈이 있어 강수가 차단되지 않는 더미 강수 차단 덮개를 설치하였다.

온난화 처리와 강수 조절에 따른 대기 온도, 토양 온도 및 토양 수분 함량을 모니터링하기 위하여 각 조사구에 적외선 온도계(SI-111, Campbell Scientific Inc., USA), 토양 수분 센서(CS616, Campbell Scientific Inc., USA) 및 토양 온도 센서(107-L34, Campbell Scientific Inc., USA)를 설치하고, 데이터 로거(CR3000, Campbell Scientific Inc., USA)를 이용하여 30분 간격으로 자료를 수집하였다.

실외 실험적 온난화 및 강수 조절에 따른 대기 온도, 토양 온도 그리고 토양 수분 함량의 측정 결과를 비교하기 위해서 먼저 일원분산분석으로 검정하였고, Tukey의 다중비교법으로 사후검정하였다. 다음으로 온난화와 강수 조절 처리의 상호작용 여부를 이원분산분석을 통해 검정하였다. 모든 통계 분석에 SAS 9.2 software(SAS Institute INC, USA)를 사용하였다.

결과 및 고찰

2013년 5월부터 11월까지 평균 대기 온도는 처리구 사이에서 유의한 차이가 나타났다($P < 0.05$). 평균 대기 온도(°C)는 처리구 P⁺W (24.0±0.4), P⁰W (22.4±0.5), P⁺W (22.3±0.5), P⁺C (20.1±0.5), P⁰C (20.0±0.5), P⁺C (20.0±0.5) 등의 순으로 나타나 온난화 처리구에서 온난화 대조구보다 유의하게 증가하였고, 동일한 온난화 처리구 중에서는 강수 감소 조절구에서 가장 크게 증가하였다(Figure 2, Table 1). 또한 월평균 대기 온도의 처리구별 증감 경향도 이와

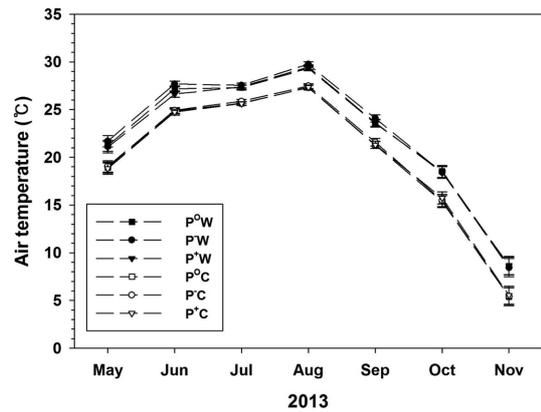


Figure 2. Mean monthly air temperature. P⁰W (precipitation control and warmed plots), PW (precipitation decreased and warmed plots), P⁺W (precipitation increased and warmed plots), P⁰C (precipitation control and temperature control plots), PC (precipitation decreased and temperature control plots), and P⁺C (precipitation increased and temperature control plots).

Table 1. Mean air temperature, soil temperature, and soil moisture content for warming and precipitation manipulation treatments from May to November, 2013.

Treatment	Air temperature (°C)	Soil temperature (°C)	Soil moisture content (%)
P ⁺ W	24.0(0.4)a	24.5(0.5)a	6.9(0.2)e
P ⁰ W	22.4(0.5)b	23.7(0.5)a	7.7(0.2)cd
P ⁺ W	22.3(0.5)b	24.1(0.5)a	8.8(0.2)b
PC	20.1(0.5)c	21.2(0.5)b	7.5(0.2)d
P ⁰ C	20.0(0.5)c	21.0(0.5)b	8.1(0.2)c
P ⁺ C	20.0(0.5)c	21.0(0.5)b	10.1(0.2)a

*Abbreviations of the treatments are as in Figure 2. Values with different letters indicate significant differences among six treatments at $P < 0.05$. The values in parentheses are standard errors.

유사하게 나타났다. 대기 온도에서 온난화 처리와 강수 조절 모두 유의한 주 효과를 가지는 것으로 나타났으며, 이들 간의 상호작용 효과는 나타나지 않았다(Table 2). 한편 온난화 처리구와 대조구 사이의 대기 온도 차이가 약 3.0°C

Table 2. Two-way analysis of variance on the effect of warming and precipitation manipulation on air temperature, soil temperature, and soil moisture content.

Parameter	Source	df	SS	F	P
Air temperature	Warming (W)	1	1600.6299	31.34	<0.0001
	Precipitation (P)	2	451.0142	4.42	0.0123
	W × P	2	94.6604	0.93	0.3961
Soil temperature	Warming (W)	1	2945.5886	63.47	<0.0001
	Precipitation (P)	2	46.1815	0.50	0.6082
	W × P	2	19.2388	0.21	0.8128
Soil moisture content	Warming (W)	1	191.8117	25.67	<0.0001
	Precipitation (P)	2	1073.8330	71.86	<0.0001
	W × P	2	45.1901	3.02	0.0489

유지되도록 설정하였으나, 2013년 5월부터 9월까지 2.2°C로 나타났다. 이는 가열을 위한 적외선등의 작동에 시차가 발생하면서 기인한 것으로 보인다. 또한 장마로 인한 많은 강수 일수와 강수량 등의 기상조건 때문에 온난화 처리 효과가 감소된 데에도 원인이 있는 것으로 사료된다(Kimball and Conley, 2009). Tharayil et al.(2011)도 적외선등을 이용한 실외 온난화 실험에서 목표 온도차(4.0°C)보다 낮은 온도차(평균 3.0°C)가 유지되었는데 이는 높은 수분(강수) 조건에 의한 것으로 보고한 바 있다. 따라서 10월부터 데이터 로저에 입력되는 프로그램 내의 적외선등 온도 조절 설정을 변경하였고 이후 평균 대기 온도는 온난화 처리구가 약 3.0°C 높게 유지되었다($P<0.05$). 본 연구 결과, 기상조건 등으로 온난화 처리에 효과가 충분히 나타나지 않을 수 있기 때문에 지속적으로 온도를 모니터링하고 이에 따라 가열온도를 조절할 필요가 있는 것으로 사료된다.

2013년 5월부터 11월까지의 평균 토양 온도도 처리구 간에서 유의한 차이를 보였다($P<0.05$). 평균 토양 온도(°C)는 처리구 P⁰W (24.5±0.5), P¹W (24.1±0.5), P⁰C (23.7±0.5), P¹C (21.2±0.5), P⁰C (21.0±0.5), P¹C (21.0±0.5) 등의 순으로 나타났고, 대기 온도 결과와 유사하게 온난화 처리구에서 온난화 대조구보다 유의하게 증가하였다(Figure 3, Table 1). 또한 월평균 토양 온도의 처리구별 변화 경향도 이와 유사하게 나타났다. 토양 온도에 대한 처리 효과는 온난화 처리에서만 유의하게 나타났으며, 강수 조절 및 온난화와 강수 조절의 상호 작용 효과는 나타나지 않았다(Table 2). 한편 온난화 처리구와 대조구의 토양 온도(°C) 차이는 5월과 6월에 각각 3.7과 3.5이었으나 7월, 8월, 9월에는 각각 2.4, 2.5, 2.8 등으로 감소하다가 다시 10월과 11월에는 3.4와 3.1 등으로 증가하였다. 이러한 여름철에 나타나는 온난화 처리구와 대조구 간 토양 온도 차이의 감소는 소나무 묘목의 생장에 따라 식생피복의 범위가 증

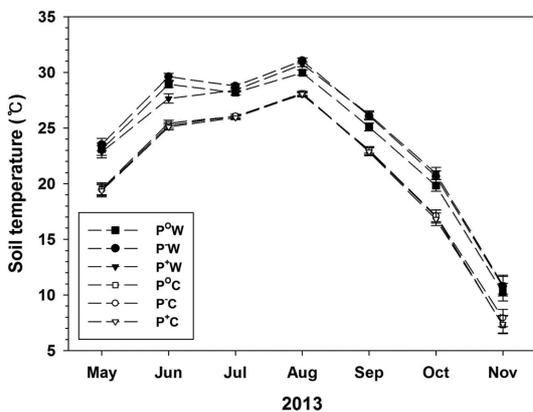


Figure 3. Mean monthly soil temperature. Abbreviations of the treatments are as in Figure 2.

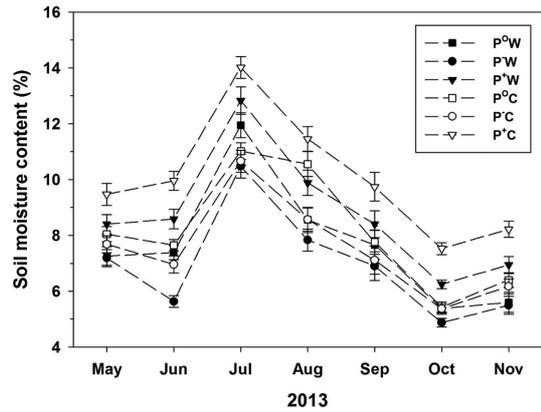


Figure 4. Mean monthly soil moisture content. Abbreviations of the treatments are as in Figure 2.

가하여 발생하는 그림자 효과때문에 적외선등에서 토양으로의 열전달이 감소하고(Harte et al., 1995; Xia et al., 2010), 고온조건에서 온난화 처리 효과가 낮으며, 많은 강수 일수와 강수량에 따라 토양 수분 함량이 증가함에 따른 복합적 원인에 의한 것으로 판단된다.

2013년 5월부터 11월까지 평균 토양 수분 함량 또한 각 처리구 사이에 유의한 차이를 나타냈다($P<0.05$). 평균 토양 수분 함량(%)은 처리구 P¹C (10.1±0.2), P¹W (8.8±0.2), P⁰C (8.1±0.2), P⁰W (7.7±0.2), P¹C (7.5±0.2), P¹W (6.9±0.2) 등의 순으로 나타났으며, 처리구별 증감 경향은 대기 온도 및 토양 온도 결과와 상이하였다(Figure 4, Table 1). 그리고 강수 조절에 따른 평균 토양 수분 함량은 온난화 처리구에서는 P⁰W에 비하여 P¹W는 13.9% 증가하였고, P¹W는 10.0% 감소하였다($P<0.05$). 반면에 온난화 대조구에서는 P⁰C에 비하여 P¹C는 23.7% 증가하였고, P¹C는 7.6% 감소하였다($P<0.05$). 한편 토양 수분 함량에서는 온난화, 강수 조절 그리고 이들 간의 상호작용 모두 유의한 효과를 가지는 것으로 나타났다(Table 2). Liu et al. (2009)의 선행 연구 결과도 이와 유사하게 온난화와 강수 증가 실험에서 토양 수분 함량에서만 상호작용 효과가 나타난 것으로 보고된 바 있다.

결론

본 연구는 소나무 묘목을 대상으로 기후변화의 영향을 모의하기 위하여 실외 실험적 온난화 및 강수 조절 시스템을 설치하였고, 대기 온도, 토양 온도 및 토양 수분 함량 등의 환경인자 모니터링을 통해서 시스템이 적절하게 설계되었고 가동되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 온난화와 강수 조절 효과는 환경 요인에 따라서 다르게 나타났으며, 온난화와 강수 조절에 따른 유의적인 상호작용 효과는 토양 수분 함량에서만 나타났다. 그리고 온난화 처

리의 경우 대기 온도를 대조구에 비해서 일정하게 높게 유지하려면 기상조건으로 인한 가열 효과 감소를 고려하여 가열온도를 조절하는 것이 필요한 것으로 판단된다. 한편 여름철에는 온난화 처리구와 대조구의 토양 온도 차이가 낮아지는 것으로 나타났는데, 이것은 소나무 묘목의 발달된 잎과 가지로 인한 그림자 효과로 적외선등에서 토양으로 전달되는 열이 감소하고, 고온조건에서는 온난화 처리 효과가 낮으며, 강우로 인한 토양 수분 함량이 증가하는데 따른 복합적인 원인에 의한 것으로 보인다. 앞으로 기후변화에 따른 소나무 묘목의 반응을 연구하는데 본 시스템이 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 한국연구재단 일반연구지원사업(과제번호 : 2013R1A1A2012242)의 지원에 의한 연구 결과의 일부입니다.

References

- Bardgett, R.D., Freeman, C., and Ostle, N.J. 2008. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *International Society for Microbial Ecology* 2(8): 805-814.
- 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).
- Chung, H., Muraoka, H., Nakamura, M., Han, S., Muller, O., and Son, Y. 2013. Experimental warming studies on tree species and forest ecosystems. *Journal of Plant Research* 126(4): 447-460.
- Fay, P.A., Kaufman, D.M., Nippert, J.B., Carlisle, J.D., and Harper, C.W. 2008. Changes in grassland ecosystem function due to extreme rainfall events: implications for responses to climate change. *Global Change Biology* 14(7): 1600-1608.
- Harte, J., Torn, M.S., Chang, F.R., Feifarek, B., Kinzig, A.P., Shaw, R., and Shen, K. 1995. Global warming and soil microclimate: results from a meadow-warming experiment. *Ecological Applications* 5(1): 132-150.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Summary for policymakers, in climate change 2001: The scientific basis. contribution of the working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge Univ. Press, New York.
- 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).
- Kimball, B.A. and Conley, M.M. 2009. Infrared heater arrays for warming field plots scaled up to 5-m diameter. *Agricultural and Forest Meteorology* 149(3-4): 721-724.
- 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.
- Korea Forest Service. 2011. Statistical yearbook of forestry. Korea Forest Service, Daejeon (in Korean), pp. 32.
- 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).
- Liu, W., Zhang, Z., and Wan, S. 2009. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland. *Global Change Biology* 15(1): 184-195.
- Luo, Y., Gerten, D., Le Maire, G., Parton, W.J., Weng, E., Zhou, X., Keough, C., Beier, C., Ciais, P., Cramer, W., Dukes, J.S., Emmett, B., Hanson, P.J., Knapp, A., Linder, S., Nepsstad, D., and Rustad, L. 2008. Modeled interactive effects of precipitation, temperature, and CO₂ on ecosystem carbon and water dynamics in different climatic zones. *Global Change Biology* 14(9): 1986-1999.
- Rustad, L.E. 2008. The response of terrestrial ecosystems to global climate change: towards an integrated approach. *Science of the Total Environment* 404(2-3): 222-235.
- 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 above-ground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126(4): 543-562.
- SAS Institute Inc. 2009. SAS/STAT® 9.2 User's Guide. SAS Institute Inc., Cary.
- Sherman, C., Stenberg, M., and Steinberger, Y. 2012. Effects of climate change on soil respiration and carbon processing in mediterranean and semi-arid regions: an experimental approach. *European Journal of Soil Biology* 52: 48-58.
- Tharayil, N., Suseela, V., Triebwasser, D.J., Preston, C.D., Gerard, P.D., and Dukes, J.S. 2011. Changes in the structural composition and reactivity of *Acer rubrum* leaf litter tannins exposed to warming and altered precipitation: climatic stress-induced tannins are more reactive. *New*

- Phytologist 191(1): 132-145.
- 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.
- Xia, Y., Chen, S., and Wan, S. 2010. Impacts of day versus night warming on soil microclimate: Results from a semi-arid temperate steppe. *Science of the Total Environment* 408(14): 2807-2816.
- Zhou, X., Chen, C., Wang, Y., Xu, Z., Han, H., Li, L., and Wan, S. 2013. Warming and increased precipitation have differential effects on soil extracellular enzyme activities in a temperate grassland. *Science of the Total Environment* 444(1): 552-558.
-
- (2014년 1월 21일 접수; 2014년 4월 23일 채택)