

실외 인위적 온난화 처리가 굴참나무 묘목의 엽록소 함량 및 순광합성률에 미치는 영향

조우용¹ · 손요환^{1*} · 정혜근² · 노남진¹ · 윤태경¹ · 한새롬¹
· 이선정¹ · 이수경³ · 이 궁¹ · Lixia Jin¹

¹고려대학교 환경생태공학부, ²건국대학교 환경공학과, ³산림청 산림정책과

Effect of Artificial Warming on Chlorophyll Contents and Net Photosynthetic Rate of *Quercus variabilis* Seedlings in an Open-field Experiment

Wooyong Jo¹, Yowhan Son^{1*}, Haegun Chung², Nam Jin Noh¹, Tae Kyung Yoon¹, Saerom Han¹, Sun Jeoung Lee¹, Sue Kyoung Lee³, Koong Yi¹ and Lixia Jin¹

¹Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

²Department of Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

³Forest Policy Division, Korea Forest Service, Daejeon 302-701, Korea

요 약: 실외 인위적 온난화 처리가 2년생 굴참나무(*Quercus variabilis*) 묘목의 엽록소 함량 및 순광합성률에 미치는 영향을 연구하였다. 4개씩의 1m×1m 크기 처리구와 대조구에 굴참나무 묘목 64본을 식재하고, 적외선등을 이용하여 처리구의 대기온도를 대조구보다 3°C 높였다. 엽록소 함량 및 순광합성률을 2011년 5월, 7월, 8월, 9월, 10월에 각각 측정하였는데, 5월, 9월, 10월에는 처리구에서 대조구보다 높은 경향을 보였으며, 7월과 8월에는 처리구와 대조구 간에 차이가 없었다. 5월에는 처리구에서 일찍 발달한 잎의 엽록소 함량이 높아 순광합성률이 증가된 것으로 보이며, 7월과 8월에는 엽록소 함량의 포화로 인해 순광합성률이 대조구와 유의적인 차이를 나타내지 않은 것으로 보인다. 그러나 9월과 10월은 온난화 처리에 의해 엽록소 합성이 촉진되고 이로 인하여 순광합성률이 증가된 것으로 판단된다.

Abstract: We investigated the effect of artificial warming on chlorophyll contents and net photosynthetic rates of 2-year-old *Quercus variabilis* seedlings in a nursery open-field experiment site. 64 seedlings were each planted in 1 m×1 m plots (n = 4) and warmed with infrared lamps. The air temperature in warmed plots was 3°C higher than that of control plots. Chlorophyll contents and net photosynthetic rates were measured in May, July, August, September and October, 2011. In May, September and October chlorophyll contents and net photosynthetic rates were significantly higher in warmed plots than in control plots. However, there were no significant differences in chlorophyll contents and net photosynthetic rates between warmed plots and control plots in July and August. It seemed that early developed leaves of warmed plots in May with higher chlorophyll contents could lead to higher net photosynthetic rates whereas there was no difference in net photosynthetic rates due to saturation of chlorophyll contents in July and August. Increased biosynthesis of chlorophyll due to warming might increase net photosynthetic rates in September and October.

Key words : chlorophyll contents, climate change, net photosynthetic rates, *Quercus variabilis*, warming experiment

서 론

지구의 대기온도는 지난 세기동안 0.6°C 정도 상승하였으며, 21세기는 1.0-3.5°C 정도 상승할 것으로 예측되며, 지구 온난화는 식물 분포와 생장을 변화시켜 생태계의 구

조 및 기능을 바꿀 것으로 예상되고 있다(Bell *et al.*, 2010; Berry and Björkman, 1980; IPCC, 2007). 지구 온난화는 개엽시기와 낙엽시기를 변화시켜, 유럽의 경우 1960년 이후로 6일 정도 봄의 개엽시기가 빨라지고, 5일 정도 가을의 낙엽시기가 늦어졌다는 보고도 있으며(Menzel and Fabian, 1999), 온난화 처리에 따른 많은 연구들이 개엽시기가 빨라지고 있음을 뒷받침하고 있다(Morin *et al.*,

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

2010; Norby *et al.*, 2003).

엽록소는 식물의 생리적 과정을 조절하며, 광합성을 결정하는 중요한 인자이다(Ollinger and Smith, 2005). 광합성은 식물의 생장에 관여되는 기본적인 대사 작용이며, 온도의 영향을 받는다(Gunderson *et al.*, 2000). 따라서 온도 상승에 의한 광합성 변화는 식물 생장에 영향을 주고 생태계 탄소 순환을 바꾸기도 한다(Rustad *et al.*, 2001). 식물은 종에 따라 광합성에 차이가 있으며, 온도 상승으로 인한 광합성 반응의 민감도가 달라 생장이 다르게 나타난다(Niu *et al.*, 2008).

온난화 실험은 크게 실내 온난화 실험과 실외 인위적 온난화 실험으로 나눌 수 있다. 실내 온난화 실험은 온실 내에서 대기 혹은 토양온도를 증가시켜 식물의 반응 등을 연구하는 것이며(Ambebe *et al.*, 2009; Idso and Kimball, 1991), 실외 인위적 온난화 실험은 실외에서 적외선등, 열선, 야외챔버 등을 이용하여 대기 혹은 토양온도를 인위적으로 증가시켜 온도를 제외한 다른 환경인자는 실제 생태계에서와 유사하게 유지하며 식물의 반응 등을 관찰하는 것이다.

국외에서, 초지생태계와 툰드라생태계 등을 대상으로 한 엽록소 함량 및 순광합성률에 관한 연구가 진행 중이며, 주요 결과로 온도의 상승은 초지 생태계의 광합성을 증가시키고(Gratani *et al.*, 2011), 툰드라생태계는 종에 따라 온도 상승에 대한 광합성률의 반응이 차이를 보인다고 보고된 바 있으나(Loik *et al.*, 2000), 수목을 대상으로 한 연구는 많지 않다. 특히, 국내에서는 수종과 광도에 따른 엽록소 함량 및 순광합성률을 비교 연구한 사례가 있으나(권기원 등, 2003; 김선희 등, 2008; 조민석 등, 2008), 실외 온난화에 의한 이들의 영향은 보고된 바가 전혀 없다. 따라서 본 연구는 굴참나무(*Quercus variabilis*) 묘목을 대상으로 실외 인위적 온난화 처리가 엽록소 함량 및 순광합성률에 미치는 영향을 알아보고자 수행되었다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지

2010년 4월 서울시 성북구 안암동 고려대학교 녹지캠퍼스 내 환경생태수목원(N 37° 35' 36", E 127° 1' 31")에 실외 묘포장을 조성하고 초기 토양성질을 분석하였다. 묘포장의 토양 특성은 산도(pH)는 6.85, 총 탄소 농도는 2.18%, 총 질소 농도는 0.16%, 양이온 치환 용량은 5.12 cmol/kg였으며, 토양 입경의 평균 비율(%)은 모래, 미사, 점토가 각각 82.29, 11.71, 6.0이며 토성은 사양토로 나타났다.

1 m×1 m 크기 처리구와 대조구를 각각 4개씩 설치하고 일정한 간격으로 1년생 굴참나무 묘목 64본을 식재하였

다. 2010년 11월부터 12월 31일까지 적외선등(FTE-1000, Mor Electric Heating Association Inc., USA)을 작동시켜 온난화 처리를 하고 온도 제어가 적절히 되는지 모니터링 하였다. 이러한 예비실험을 거쳐 2011년 1월부터 처리구의 대기온도를 3°C 높게 가열하는 본 실험을 시작하였는데, 한반도 기후변화 시나리오에 근거하여 처리구와 대조구의 온도차이가 3°C 유지되도록 적외선 온도계(SI-111, Campbell Scientific Inc., USA)를 데이터로거(CR3000, Campbell Scientific Inc., USA)에 연결하여 대기온도를 30분 간격으로 모니터링하였으며, 이를 바탕으로 적외선등의 전원 공급을 제어하였다. 2011년 4월에는 각 조사구 묘목 본수의 50%를 솎아내어 32본을 남겼으며, 2011년 7월부터는 굴참나무 묘목의 생장에 따라 적외선등 높이를 각 조사구의 평균 묘고로부터 60 cm 높이로 수시로 조절하였다.

2. 엽록소 함량 및 순광합성률 측정

엽록소 함량 및 순광합성률을 측정하기 위해 각 조사구에서 생육상태가 건전한 3본의 묘목을 선정하고 묘목 당 3개의 잎을 지정하였다. 2011년 5월, 7월, 8월, 9월, 10월에 엽록소 함량은 휴대용 엽록소 측정기(SPAD-502, Minolta, Japan)를 사용하여 측정하고, 순광합성률은 휴대용 광합성 측정기(CI-340, CID Bio-Science, USA)로 측정하였는데, 순광합성률은 순광합성률이 가장 높은 맑은날 오전 8시부터 11시 사이에 측정하였다(Bassow and Bazzaz, 1998; Mahall *et al.*, 2009).

3. 통계 분석

인위적 온난화 처리에 의한 엽록소 함량과 순광합성률 차이의 유의성은 ANOVA(analysis of variance)를 이용하여 검정하였으며(P=0.05), 모든 분석에 SAS 9.2 software를 사용하였다(SAS Institute Inc., USA).

결과 및 고찰

1. 엽록소 함량

엽록소 함량은 대조구의 경우 5월부터 증가하여 7월과 8월에는 엽록소 포화로 인해 최고치에 도달하고 9월과 10월에는 감소하는 경향을 보였으며, 처리구의 경우는 5월부터 증가하여 9월까지 최고치를 유지하다 10월에 감소하는 경향을 보였다.

5월, 9월, 10월의 엽록소 함량(SPAD 측정치)은 처리구(33.20±0.72; 39.88±0.41; 32.4±0.87)가 대조구(24.15±0.46; 35.92±0.41; 24.7±1.46)보다 높았으나, 7월과 8월은 처리구(39.90±1.11; 40.20±0.83)와 대조구(39.78±0.26; 39.95±0.25) 간에 유의적 차이를 보이지 않았다(Figure 1a). 이전 연구

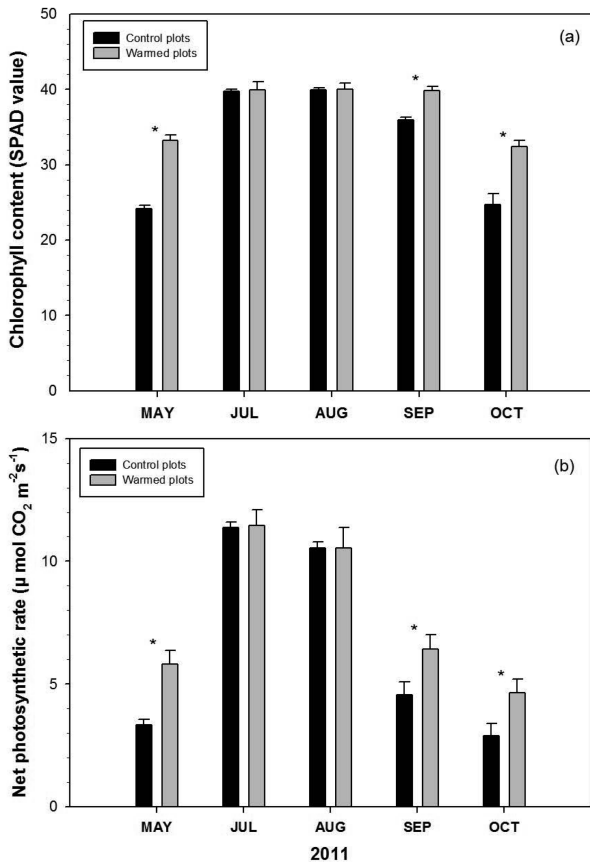


Figure 1. Chlorophyll contents (SPAD value) (a) and net photosynthetic rates ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (b) for 2-year-old *Q. variabilis* seedlings in control and warmed plots. Error bars indicate standard error of the mean. The asterisks denote a significant difference between control and warmed plots at the level of $P=0.05$.

에서 온난화 처리에 의하여 엽록소의 함량이 증가하나 (Ormrod *et al.*, 1999), 종에 따라 엽록소 함량이 증가하지 않는 경우도 보고되고 있다(Michelsen *et al.*, 1996).

본 연구에서 5월에 처리구의 엽록소 함량이 대조구에 비해 높은 것으로 나타났는데 이는 처리구에서 개엽에 필요한 특정온도 이상 유지기간이 충족되어(Hunter and Lechowicz, 1992), 개엽시기가 4-8일 앞당겨짐에 따라 처리구 잎의 발달이 먼저 일어났기 때문으로 보인다(한새롬 등, unpublished data). 그러나 7월과 8월에는 성숙된 잎의 엽록소 함량이 최대치가 되어 온난화 처리가 엽록소 함량에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다(Demarez *et al.*, 1999). 한편, 9월과 10월은 처리구가 대조구에 비해 엽록소 함량이 높는데 이는 온난화 처리로 인해 엽록소 합성이 촉진되었기 때문으로 보인다(Ormrod *et al.*, 1999).

엽록소 함량의 계절적 변화에 관한 연구로서, Demarez *et al.*(1999)은 참나무류(*Quercus petraea* and *Q. rubra*)의 엽록소 함량이 4월에서 6월까지 증가하고 잎의 생육이 좋은 7월에서 8월에 최대값을 보이며 9월부터 10월 사이는

감소한다고 보고하였으며, 조민석 등(2008)은 개벚나무(*Prunus levilleana*)와 박달나무(*Betula schmidtii*)를 대상으로 6월에서 9월까지 점차 증가하는 경향을 보인다고 보고한 바 있다.

2. 순광합성률

실의 인위적 온난화에 의한 굴참나무의 묘목의 순광합성률($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)은 측정시기에 따라 처리구와 대조구의 차이가 다르게 나타났다. 5월, 9월, 10월의 경우 처리구의 순광합성률(5.80 ± 0.58 ; 6.4 ± 0.57 ; 4.65 ± 0.54)이 대조구(3.33 ± 0.23 ; 4.55 ± 0.53 ; 2.88 ± 0.52)에 비해 높게 나타난($P < 0.05$) 반면, 7월과 8월은 처리구(11.45 ± 0.66 ; 10.55 ± 0.83)와 대조구(11.38 ± 0.23 ; 10.53 ± 0.25)간에 차이가 나타나지 않았다(Figure 1b).

한편, Mebrahtu and Hanover(1991)는 온실에서 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*)를 대상으로 순광합성률을 측정 한 결과 잎의 온도를 높게 처리한 처리구일수록 순광합성률이 낮아진다고 보고하였으며, Gunderson *et al.*(2000)은 3년동안 Growth 챔버 방법으로 설탕단풍나무(*A. saccharum*)를 온난화시켜 처리구와 대조구간의 순광합성률은 측정시기에 따라 다른 경향을 보인다고 보고하였다.

실의 온난화에 의한 순광합성률 변화는 연구에 따라 상반된 결과가 보고되고 있다. 활엽수류(*B. alleghaniensis*, *Liquidambar styraciflua*, *Populus grandidentata*, *Q. robur*)를 대상으로 5월과 6월에 순광합성률을 측정한 연구에서는 처리구와 대조구 간에 유의적 차이를 보이지 않았으며, 야외챔버 내의 잎의 순광합성률을 측정한 결과 잎의 온도와 측정시기에 따라 다르게 나타났다(Gunderson *et al.*, 2010). 또한 He *et al.*(2003)은 버드나무류(*Salix matsudana*)를 대상으로 연구하여 대조구에서 처리구에서보다 순광합성률이 높으며 온도를 높게 처리한 처리구일수록 순광합성률이 낮아진다고 보고한 바 있다. 반면, Xu *et al.*(2011)은 자작나무류(*B. utilis*)를 이용한 연구에서 7월과 8월에 순광합성률이 처리구에서 대조구보다 높고, 온도를 높게 처리한 처리구일수록 순광합성률이 높다고 보고한 바 있다(Niu *et al.*, 2008). 한편 처리구와 대조구간 순광합성률의 차이가 종에 따라 다른 경향을 나타내기도 하는데, 이는 종들이 온도에 대한 생리적인 민감도가 다른데서 기인하는 것으로 보인다(Morison and Lawlor, 1999; Xu *et al.*, 2011).

이같이 인위적 온난화 처리에 의한 순광합성률이 시간, 종간에 따라 처리구와 대조구간에 동일한 경향을 보이지 않는데, 이는 온난화 처리기간과 다양한 처리방법에 의해 순광합성률이 영향을 받기 때문이며, 본 연구 결과도 이 같은 영향을 받는 것으로 보인다(Arft *et al.*, 1999).

결 론

실외 인위적 온난화 처리에 의한 굴참나무 묘목의 엽록소 함량 및 순광합성률을 비교한 결과 측정시기별로 반응의 차이가 다르게 나타났다. 처리구의 경우 대조구에 비해 5월에 엽록소 함량과 순광합성률이 높았는데, 이는 처리구에서 일찍 발달한 잎의 엽록소 함량이 높기 때문인 것으로 보인다. 그러나 7월과 8월은 엽록소 함량과 순광합성률이 유의적인 차이를 보이지 않았는데, 이것은 생육기 엽록소 함량의 포화로 인한 것으로 추정된다. 또한 9월과 10월은 온난화 처리에 의해 엽록소 함성이 촉진되어 높아진 엽록소 함량이 순광합성률을 증가시킨 것으로 판단된다. 본 연구는 실험적 온난화에 의한 단기간의 연구 결과이므로 실외 온난화에 의한 식물의 생리적 반응을 보다 명확하게 이해하기 위하여 가열 후 장기간 엽록소 함량 및 순광합성률의 일 변이와 계절 변이를 비교할 필요가 있는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 한국연구재단 중견연구지원사업(과제번호: 2010-0014620)의 지원에 의한 연구결과의 일부입니다.

인용문헌

- 권기원, 최정호, 송호경, 강병식. 2003. 임분내 광환경의 차이에 따른 주요 참나무 수종의 성장과 엽록소 함량 변화에 관한 연구. *임산에너지* 22(3): 20-28.
- 김선희, 성주환, 김영걸, 김판기. 2008. 광환경 변화에 대한 네 참나무 수종의 광합성 반응. *한국농림기상학회지* 10(4): 141-148.
- 조민석, 권기원, 김길남, 우수영. 2008. 광도 변화에 따른 5개 활엽수종의 엽록소 함량과 성장 특성. *한국농림기상학회지* 10(4): 149-157.
- Ambebe, T.F., Dang, Q. and Li, J. 2009. Low soil temperature inhibits the effect of high nutrient supply on photosynthetic response to elevated carbon dioxide concentration in white birch seedling. *Tree Physiology* 30: 234-243.
- Arft, A.M., Walker, M.D., Gurevitch, J., Alatalo, J.M., Bret-Harte, M.S., Dale, M., Diemer, M. and Gugerli, F. 1999. Responses of tundra plants to experimental warming: meta-analysis of the international tundra experiment. *Ecological Monographs* 69: 491-511.
- Bassow, S.L. and Bazzaz, F.A. 1998. How environmental conditions affect canopy leaf-level photosynthesis in four deciduous tree species. *Ecology* 79(8): 2660-2675.
- Bell, J., Sherry, R. and Luo, Y. 2010. Changes in soil water dynamics due to variation in precipitation and temperature: an ecophysiological analysis in a tallgrass prairie. *Water Resources Research* 46: 3523-3534.
- Berry, J. and Björkman, O. 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 31: 491-543.
- Demarez, V., Gasstellu-etchegorry, J.P., Mougi, E., Marty, G. and Proisy, C. 1999. Seasonal variation of leaf chlorophyll content of a temperate forest inversion of the PROSPECT model. *International Journal of Remote Sensing* 5: 879-894.
- Gratani, L., Catoni, R. and Varone, L. 2011. Photosynthetic and leaf respiration activity of *Malcolmia littorea* (L.) R. Br. in response to air temperature. *Photosynthetica* 49(1): 65-74.
- Gunderson, C.A., Campion, 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: 2272-2286.
- Gunderson, C.A., Norby, R.J. and Wullschlegel, S.D. 2000. Acclimation of photosynthesis and respiration to simulated climatic warming in northern and southern populations of *Acer saccharum*: laboratory and field evidence. *Tree Physiology* 20: 87-95.
- He, W.M. and Dong, M. 2003. Plasticity in physiology and growth of *Salix matsudana* in response to simulated atmospheric temperature rise in the Mu Us Sandland. *Photosynthetica* 41: 297-300.
- Hunter, A.F. and Lechowicz, M.J. 1992. Predicting the timing of bud burst in temperate trees. *Journal of Applied Ecology* 29(3): 597-604.
- Idso, S.B. and Kimball, B.A. 1991. Downward regulation of photosynthesis and growth at high CO₂ levels. *Plant Physiology* 30: 234-243.
- 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.
- Loik, M.E., Redar, S.P. and Harte, J. 2000. Photosynthetic responses to a climate-warming manipulation for contrasting meadow species in the Rocky Mountains, Colorado, USA. *Functional Ecology* 14: 166-175.
- Mahall, B.E., Tyler, C.M., Cole, S. and Mata, C. 2009. A comparative study of oak (*Quercus*, Fagaceae) seedling physiology during summer drought in southern California. *American Journal of Botany* 96(4): 751-761.
- Mebrahtu, T. and Hanover, J. 1991. Leaf temperature effects on net photosynthesis, dark respiration, and photorespiration of seedlings of black locust families with contrasting growth rates. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 1161-1162.
- Menzel, A. and Fabian, P. 1999. Growing season extended in Europe. *Nature* 397: 659.

21. Michelsen, A., Jonasson, S., Sleep, D., Havstrom, M. and Callaghan, V. 1996. Shoot biomass, nitrogen and chlorophyll responses of two arctic dwarf shrubs to in situ shading, nutrient application and warming simulating climatic change. *Oecologia* 105: 1-12.
22. Morison, J.I.L. and Lawlor, D.W. 1999. Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant Cell and Environment* 22: 659-682.
23. Morin, X., Roy, J., Sonié, L. and Chuine, I. 2010. Changes in leaf phenology of three European oak species in response to experimental climate change. *New Phytologist* 186: 900-910.
24. Niu, Z., Li, Z., Xia, J., Han, Y., Wu, M. and Wan, S. 2008. Climatic warming changes plant photosynthesis and its temperature dependence in a temperate steppe of northern China. *Environmental and Experimental Botany* 63: 91-101.
25. Norby, R.J., Hartz-Rubin, J.S. and Verbrugge, M.J. 2003. Phenological responses in maple to experimental atmospheric warming and CO₂ enrichment. *Global Change Biology* 9: 1792-1801.
26. Ollinger, S.V. and Smith, M.L. 2005. Net primary production and canopy nitrogen in a temperate forest landscape: an analysis using imaging spectroscopy, modeling and field data. *Ecosystems* 8: 760-778.
27. Ormrod, D.P., Lesser, V.M., Olszyk, D.M. and Tingey, D.T. 1999. Elevated temperature and carbon dioxide affect chlorophylls and carotenoids in douglas-fir seedlings. *International Journal of Plant Sciences* 160: 529-534.
28. Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, R.J., Michell, 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: 543-562.
29. Xu, Z., Hu, T. and Zhang, Y. 2011. Effect of experimental warming on phenology, growth and gas exchange of treeline birch (*Betula utilis*), Eastern Tibetan Plateau, China. *European Journal of Forest Research*. in press.

(2011년 9월 26일 접수; 2011년 10월 31일 채택)