한국농림기상학회지, 제13권 제3호(2011)
*Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology,* Vol. 13, No. 3, (2011), pp. 115~122
DOI: 10.5532/KJAFM.2011.13.3.115
ⓒ Author(s) 2011. CC Attribution 3.0 License.

# 온도와 $CO_2$ 농도 증가에 따른 다릅나무와 백당나무의 생장, 광합성 및 광색소 함량 변화

**한심희* · 김두현 · 김길남 · 이재천**
국립산림과학원 산림유전자원부
(2011년 8월 15일 접수; 2011년 9월 14일 수정; 2011년 9월 20일 수락)

# Changes on Growth, Photosynthesis and Pigment contents of the *Maackia amurensis* and *Viburnum opulus* var. *calvescens* under Enhanced Temperature and $CO_2$ Concentration

**Sim-Hee Han*, Du-Hyun Kim, Gil Nam Kim and Jae-Cheon Lee**
*Department of Forest Genetic Resources, Korea Forest Research Institute, Suwon 441-847, Korea*
(Received August 15, 2011; Revised September 14, 2011; Accepted September 20, 2011)

**ABSTRACT**

**The impacts of elevated temperature and $CO_2$ were studied on the seedlings of *Maackia amurensis* and *Viburnum opulus* var. *calvescens*. The seedlings were grown in controlled-environment growth chambers with four combinations of temperature and $CO_2$ treatments: 25°C + ambient $CO_2$ (400 ppm), 25°C + elevated $CO_2$ (800 ppm), 30°C + ambient $CO_2$ (400 ppm), and 30°C + elevated $CO_2$ (800 ppm). Under elevated temperature and $CO_2$ concentration, the dry weight decreased in seedlings of *M. amurensis*, but increased in seedlings of *V. opulus* var. *calvescens*. In addition, the shoot to root (S/R) ratio in *M. amurensis* reduced but that of *V. opulus* var. *calvescens* increased under elevated $CO_2$ concentration. The S/R ratios of two tree species increased under higher temperature. *M. amurensis* represented lower carboxylation efficiency under higher temperature and $CO_2$ concentration and that of *V. opulus* var. *calvescens* showed lower values under the only higher temperature. Photosynthetic pigment content of in the leaves of *M. amurensis* was lower under higher $CO_2$ concentration and higher under the increase of temperature, but that of *V. V. opulus* var. *calvescens* decreased according to the increase of temperature. Chlorophyll a/b ratios of *M. amurensis* and *V. V. opulus* var. *calvescens* decreased obviously with the increase of $CO_2$ concentration and temperature, respectively. In conclusion, the growth and physiological responses under the environmental changes such as temperature and $CO_2$ concentration depend on the tree species. Therefore, more studies are needed to predict the response of each tree species against the climate changes.**

***Key words*** **: *Maackia amurensis*, *Viburnum opulus* var. *calvescens*, Elevated temperature, $CO_2$ Concentration, growth, Photosynthesis**

## I. 서 론

최근 지구온난화에 따른 많은 문제점 중에 $CO_2$농도와 온도의 증가가 가장 큰 문제로 대두되고 있는데, 대기 중 $CO_2$농도 증가와 지구 평균 온도 상승의 주된 원인은 바로 인간에 의한 것이며, 이러한 현상은 생태계 내 식물의 생장과 탄소 순환의 균형에 영향을 미친다(Luomala *et al.*, 2003). 전세계는 19세기부터

* Corresponding Author : Sim-Hee Han
(simhee02@forest.go.kr)

화석연료의 무분별한 소비와 산림을 벌채함으로써, 대기 중 $CO_2$ 농도가 280ppm에서 현재 389ppm으로 약 110ppm이 증가하였다(Ghannoum *et al*., 2010). 21세기에 대기 중 $CO_2$ 농도는 550ppm을 초과할 것으로 예측하고 있으며, 지구의 평균 표면온도가 1.9~4.4°C 증가할 것으로 예측하고 있다(IPCC, 2007). 한국은 1990년 이후 대기 중 $CO_2$ 농도가 증가하여, 2008년에는 370.7~391.4ppm 이었으며, 1912년부터 2009년 사이에 연 평균 온도는 1.7°C씩 증가하였다. 이것은 세계 평균인 0.75°C의 2배에 달하는 수치이다(Kim and You, 2010).

대기 중 $CO_2$ 농도와 온도 증가는 식물의 광합성 반응에 영향을 미치며, 식물이 생장하는데 매우 중요한 인자들이다(Stirling *et al*., 1998; Morison and Lawlor, 1999; Lewis *et al*., 2001). 지금까지 대기 중 $CO_2$ 농도와 온도 증가가 식물과 생태계에 어떤 영향을 미치는지에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다(Tjoelker *et al*., 1998; Norby and Luo, 2004). 이 연구 결과들에 따르면, 온도와 $CO_2$ 농도 증가는 식물들에서 광합성 활성과 생장을 촉진하는 것으로 보고되었다(Eamus and Berryman, 1995; Morison and Lawlor, 1999). 그러나 온도와 $CO_2$ 농도 증가가 수목의 광합성을 증가시킨다는 여러 연구와는 달리 그 반대의 연구 결과들도 많다(Koike *et al*., 1996; Teskey, 1997).

본 연구는 최근 전 지구적으로 문제시 되고 있는 기후변화와 관련하여, 우리나라에서의 대기 중 $CO_2$ 농도 증가와 지구 평균 온도 상승에 따른 수목의 생장 및 생리 반응 변화를 예측하고자 실시되었다. 이를 위해서 우리나라 전국 어디에서나 분포하며, 비교적 환경 변화에 민감하지 않은 다릅나무와 아고산 지역에 널리 분포하고 있어 향후 기온 상승 등 환경 변화로 생육에 영향을 받을 것으로 예상되는 백당나무를 대상으로 온도와 $CO_2$ 농도 증가에 따른 생장 및 생리적 특성 변화를 조사 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료 및 생육 환경

공시 재료는 우리 나라 주요 조림 수종 중 하나이며, 특용수로 많이 이용되고 있는 다릅나무(*Maackia amurensis*)와 우리나라 아고산 지역에 널리 분포하고 있는 백당나무(*Viburnum opulus* var. *calvescens*)를 대상으로 하였다. 다릅나무와 백당나무 종자는 온실에서 2월에 파종하여 묘목을 얻었다. 처리 1주일 전에 생장이 균일하고 활력이 있는 묘목을 수종별로 20개체씩을 선발하여 환경제어실의 인공광 온실 내에서 적응시켰다. 인공광 온실의 평균 광량은 400μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$, 온도는 25±1/day, 상대 습도는 RH 68±10%로 기록되었다. 인광광 온실에서 1 주일간 적응시킨 20개의 묘목은 5개체씩 온도와 $CO_2$ 농도 조건이 다른 처리 챔버에 옮겼다.

온도와 $CO_2$ 농도 제어는 국립산림과학원(경기도 수원시 권선구 오목천동 44-3)의 환경제어실 인공 광 챔버를 이용하였다. 처리 온도와 $CO_2$농도는 우리나라 수목의 생육 기간과 IPCC(2007) 보고서에 제시된 시나리오에 근거하여, 현재 생육 기간 평균 온도인 25°C와 100년 후 예상 온도인 30°C을 적용하였으며, $CO_2$ 농도는 현재 우리나라 대기 평균 농도인 400ppm과 100년 후 $CO_2$ 예상 농도인 800ppm을 적용하였다. 실험기간 동안 인공 광 챔버 내에서 측정된 광량은 평균 400μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$, 상대습도(RH)는 68±10%였다. 온도와 $CO_2$ 처리는 우리 나라의 수목 생장 기간인 4월부터 9월까지 총 6개월간 실시하였다.

### 2.2. 생장특성

모든 처리가 끝난 후, 잎, 줄기, 뿌리를 각각 구분하여 건중량을 측정하였으며, 이를 이용하여 두 수종의 지상부와 지하부의 비(S/R)를 구하였다. 모든 측정은 다섯 번 반복 측정하여 평균치를 구하였다.

### 2.3. 광합성 특성 측정

광합성 변수들은 LI-6400 휴대용 광합성 측정기(LI-COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 광합성 변수 측정 시 잎 챔버는 25°C, 상대습도는 60%로 유지하였으며, 줄기 끝에서 4~6번 잎을 측정에 이용하였다.

$CO_2$ 농도에 대한 광합성 반응(*A-CI*)은 엽육 내 $CO_2$ 농도 변화에 따른 광합성속도 변화를 이용하여 측정하였다. 광도 1,100μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$에서 잎 챔버에 공급되는 공기의 $CO_2$ 농도를 0, 50, 100, 200, 300, 360, 400, 500μmol $CO_2$ mol$^{-1}$ air로 조절하면서 광합성을 측정하였으며, 엽육 내부의 $CO_2$ 농도는 Caemmerer and Farquhar(1981)의 식을 적용하여 산출하였다. 광합성 측정기의 잎 챔버에 공급되는 $CO_2$

농도를 변화시켜 측정한 광합성 속도의 결과를 사용하여, 엽육 내 $CO_2$ 농도($C_i$)와 광합성(A)의 관계를 나타내는 A-$C_i$ curve를 작성하고, 이 결과에서 탄소고정효율(carboxylation efficiency), 광호흡 속도를 산출하였다. 탄소고정효율은 C*i*에 따른 광합성의 증가가 직선적으로 이루어지는 C*i* 150μmol $CO_2$ $mmol^{-1}$이하에서의 회귀직선(y = a + bx)의 기울기(b)이다. 이 값은 광합성에서 탄소고정계의 활성, 즉 rubisco의 활성에 관한 정보를 반영하고 있다(Farquhar *et al*., 1980). 또한 이 회귀직선에서 y 절편인 a, 즉 C*i*의 값이 0Pa일 때의 탄소교환 속도를 광호흡속도(photorespiration)로 하였다.

광도 변화에 대한 광합성 반응은 LED light source의 광량을 0, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500μmol·$m^{-2}$·$s^{-1}$로 조절하면서 각 광량에 따른 광합성 속도를 측정하고, 광도에 따라서 광합성 속도가 직선적으로 증가하는 PPFD 100μmol·$m^{-2}$·$s^{-1}$ 이하의 값을 이용하여 회귀식(y = a + bx)을 산출하였다(Kim and Lee, 2001). 회귀식에서 y의 절편인 a는 암호흡속도이며, x의 절편인 -a/b는 광보상점(light compensation point)이다. 기울기 b는 흡수한 단위 광양자의 광합성 양을 나타내며, 순양자수율(apparent quantum yield)이라 부른다. 모든 광합성 변수의 측정은 세 번씩 측정하였으며, 평균치를 이용하였다.

### 2.4. 광색소 함량 측정

엽 내 광색소 함량 측정은 dimethyl sulphoxide (DMSO)를 이용하여 추출하는 Hiscox and Israelstam (1979)의 방법을 사용하였다. 0.1g 생엽에 DMSO 10ml를 첨가하고 70°C의 항온 수조에서 2시간 동안 유지하여 색소를 추출하였다. 추출액의 흡광도는 470, 645, 663nm에서 측정하였다. 광색소 함량은 5반복으로 측정 후 평균치를 이용하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 3.1. 생장특성

온도와 $CO_2$ 농도 증가가 수목의 생장에 미치는 영향을 알아보기 위해, 온도와 $CO_2$ 처리가 종료된 두 수종의 잎, 줄기, 뿌리 건중량과 총 건중량을 분석한 결과, 두 수종의 줄기와 뿌리 건중량 및 S/R 율은 뚜렷한 차이를 보였다. 온도 조건이 같을 때, 다릅나무는 $CO_2$ 농도가 높은 처리구에서 총 건중량이 감소하였으며, 백당나무는 $CO_2$ 농도가 높은 처리구에서 총 건중량이 증가하는 경향을 보여, 두 수종이 서로 상반되는 결과를 나타냈다. 또한, 다릅나무는 $CO_2$ 400ppm에서는 온도 증가 시 총 건중량이 감소하였으나, $CO_2$ 800ppm에서는 온도 증가 시 총 건중량이 증가하는 반대의 결과를 보인 반면, 백당나무는 $CO_2$ 농도와 상관없이 온도

**Table 1.** Changes in dry weight and shoot: root ratio (S/R) of two tree species at different temperatures and $CO_2$ concentrations

| Species | Temperature (°C) | $CO_2$ (ppm) | Dry weight(g) | | | | S/R ratio |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Leaf | Stem | Root | Total | |
| Maackia amurensis | 25 | 400 | 4.7 ± 1.7 | 4.5 ± 2.1 | 2.2 ± 1.5 | 11.4 ± 5.3 | 4.8 ± 1.5 |
| | | 800 | 3.1 ± 0.9 | 2.2 ± 0.8 | 1.8 ± 0.9 | 7.0 ± 2.6 | 3.4 ± 1.4 |
| | 30 | 400 | 4.1 ± 1.5 | 3.3 ± 1.0 | 1.2 ± 0.4 | 8.7 ± 2.6 | 6.3 ± 2.0 |
| | | 800 | 2.9 ± 1.8 | 3.2 ± 2.1 | 1.5 ± 0.6 | 7.6 ± 4.3 | 3.9 ± 1.5 |
| *Viburnum opulus* var. *calvescens* | 25 | 400 | 1.0 ± 0.3 | 0.5 ± 0.2 | 3.6 ± 1.6 | 5.1 ± 2.1 | 0.4 ± 0.0 |
| | | 800 | 1.1 ± 0.2 | 0.4 ± 0.1 | 4.4 ± 1.0 | 5.9 ± 1.3 | 0.4 ± 0.0 |
| | 30 | 400 | 5.4 ± 2.7 | 2.4 ± 1.2 | 5.0 ± 2.6 | 12.8 ± 6.2 | 1.6 ± 0.6 |
| | | 800 | 5.6 ± 2.8 | 3.3 ± 1.9 | 4.5 ± 2.2 | 13.4 ± 6.2 | 2.1 ± 1.1 |
| Species (S) | | | ns | *** | *** | ns | *** |
| Temperature (T) | | | ** | * | ns | * | ** |
| $CO_2$ | | | ns | ns | ns | ns | * |
| S × T | | | *** | ** | ns | ** | ns |
| S × $CO_2$ | | | ns | ns | ns | ns | * |
| T × $CO_2$ | | | ns | ns | ns | ns | ns |
| S × T × $CO_2$ | | | ns | ns | ns | ns | ns |

All the values are means of five replicates± SD; *p ≤ 0.05, **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.001, and n.s: non-significance.

**Table 2.** Changes in photosynthetic of two tree species at different temperatures and $CO_2$ concentrations

| Species | Temperature (°C) | $CO_2$ (ppm) | Carboxylation efficiency (mmol $CO_2$ $mol^{-1}$) | Photo respiration rate (μmol $CO_2$ $m^{-2}s^{-1}$) | Apparent quantum yield (mmol $CO_2$ $mol^{-1}$) | Dark Respiration rate (μmol $CO_2$ $m^{-2}s^{-1}$) | Light Compensation point (μmol $m^{-2}s^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Maackia amurensis | 25 | 400 | 0.065 ± 0.004 | 2.38 ± 1.65 | 0.046 ± 0.006 | 1.28 ± 1.46 | 26.0 ± 28.6 |
| | | 800 | 0.016 ± 0.014 | 1.41 ± 1.66 | 0.023 ± 0.010 | 2.18 ± 1.21 | 91.8 ± 13.1 |
| | 30 | 400 | 0.057 ± 0.010 | 2.31 ± 1.27 | 0.041 ± 0.016 | 1.91 ± 0.78 | 46.2 ± 1.6 |
| | | 800 | 0.021 ± 0.003 | 1.28 ± 1.06 | 0.034 ± 0.006 | 1.46 ± 1.14 | 40.6 ± 26.7 |
| *Viburnum opulus* var. *calvescens* | 25 | 400 | 0.027 ± 0.015 | 1.52 ± 0.17 | 0.042 ± 0.001 | 2.44 ± 2.74 | 57.2 ± 63.6 |
| | | 800 | 0.028 ± 0.011 | 1.08 ± 1.39 | 0.045 ± 0.001 | 1.12 ± 1.26 | 24.4 ± 27.2 |
| | 30 | 400 | 0.021 ± 0.009 | 1.00 ± 0.37 | 0.029 ± 0.000 | 1.04 ± 0.66 | 36.4 ± 23.4 |
| | | 800 | 0.020 ± 0.003 | 1.31 ± 0.08 | 0.032 ± 0.004 | 0.24 ± 0.15 | 7.4 ± 3.9 |
| Species (S) | | | * | ns | ns | ns | ns |
| Temperature (T) | | | ns | ns | ns | ns | ns |
| $CO_2$ | | | ** | ns | ns | ns | ns |
| S × T | | | ns | ns | ns | ns | ns |
| S × $CO_2$ | | | ** | ns | * | ns | ns |
| T × $CO_2$ | | | ns | ns | ns | ns | ns |
| S × T × $CO_2$ | | | ns | ns | ns | ns | ns |

All the values are means of three replicates± SD; *p ≤ 0.05, **p ≤ 0.01, ***p ≤ 0.001, and n.s: non-significance.

가 높은 처리구에서 총 건중량이 높은 값을 보였다 (Table 1).

지상부와 지하부의 비(S/R)의 경우, 다릅나무는 $CO_2$ 농도가 높은 처리구에서 낮은 값을 보였으며, 백당나무는 $CO_2$ 농도가 높은 처리구에서 높은 값을 보여, S/R율 역시 다릅나무와 백당나무는 서로 상반되는 결과를 나타냈다. 그러나 $CO_2$ 농도가 같은 조건에서 두 수종 모두 온도가 높은 처리구에서 S/R율이 높은 값을 나타냈다.

일반적으로 온도가 증가하거나 $CO_2$ 농도가 증가하면, 식물들의 생장은 증가하는 것으로 보고되었는데 (Ceulemans and Mousseau, 1994; Eamus and Berryman, 1995; Morison and Lawlor, 1999), 본 연구에서 백당나무의 경우, 온도와 $CO_2$ 농도 모두 생장 증가에 기여하였다. 폰데로사소나무를 대상으로 온도와 $CO_2$ 농도에 대한 생장 효과를 비교 분석한 결과, 25°C-350ppm 처리구보다 30°C-650ppm 처리구에서 총 건중량이 높은 값을 보였는데(Callaway *et al*., 1994), 이것은 $CO_2$ 농도 증가에 의해 식물의 광합성량이 증가되면서 생체량이 증가했기 때문인 것으로 보고되었다(Mooney *et al*., 1991). 이와는 달리 본 연구에서는 $CO_2$ 농도 증가 처리구에서 백당나무의 광합성 증가는 확인되지 않았다. 다만, $CO_2$ 농도가 높은 조건에서 암호흡 속도가 크게 감소한 것으로 보아 (Table 2), 백당나무의 생장 증가는 호흡에 의한 에너지 손실이 줄었기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 다릅나무는 온도와 $CO_2$ 농도 증가에 의해 오히려 생장이 감소하는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 시베리아자작나무와 일본자작나무의 연구에서도 제시된바 있는데, 온도와 $CO_2$ 농도가 증가할 경우, 일부 수종에서 생리적 활성과 생장이 감소할 수 있음을 보여준다(Koike *et al*., 1996).

일반적으로 $CO_2$ 농도가 높을 때, 지상부와 지하부 모두 생장이 증가하지만, 지상부의 생장이 지하부보다 상대적으로 더 많이 증가하여 S/R 율이 증가하는 것으로 보고하고 있다(O'Neill *et al*., 1987). 우리의 연구에서 온도 증가는 다릅나무와 백당나무의 S/R 율을 증가시켰으나, $CO_2$ 농도 증가는 다릅나무의 S/R율을 감소시켰고, 백당나무의 S/R 율은 그대로 유지하거나 증가시켰다. 한편, 다릅나무의 경우, 온도 증가에 의해 S/R율이 증가한 것은 지하부의 생장 감소율이 컸기 때문이며, 이와는 달리 온도 증가 하에서 백당나무의 S/R 율이 증가한 것은 기존의 연구처럼 지상부의 생장 증가가 지하부의 생장 증가보다 컸기 때문이다 (O'Neill *et al*., 1987). 일반적으로 식물의 생장은 탄소동화 속도에 의해 결정되는데, 탄소동화 속도와 탄소 배분의 변화는 생장율의 변화와 관련되지만, 이러한 탄소동화 능력은 환경적인 요인에 의해 영향을 많

이 받는다(Eamus and Berryman, 1995). 또한 식물은 주위 환경 변화로 스트레스를 받으면, 스스로 새로운 환경에 적응하기 위해 다양한 메커니즘을 나타내는데(Mooney *et al.*, 1988), 높은 $CO_2$ 농도에 의해 식물의 지상부와 지하부의 생체량이 재분배되는 것은 식물의 중요한 보상 전략의 하나로 볼 수 있다(Callaway *et al.*, 1994).

### 3.2. 광합성 특성

다릅나무와 백당나무의 잎에서 측정한 광합성 관련 변수들은 온도와 $CO_2$ 변화에 대해 뚜렷한 차이를 보여 주지 않았다. 다만, 탄소고정효율만이 수종간, $CO_2$ 농도 처리간 차이를 뚜렷하게 보였으며, 수종과 $CO_2$ 농도 처리간 상호작용도 존재하였다. 다릅나무의 탄소고정효율은 온도와 $CO_2$ 농도 증가에 의해 뚜렷하게 감소하였으며, 백당나무의 경우, 온도 증가는 탄소고정효율을 감소시킨 반면, $CO_2$ 증가는 뚜렷한 효과를 나타내지 않았다. 본 연구에서 탄소고정효율과 달리, 다른 변수들에서 처리간 뚜렷한 차이를 나타내지 않은 것은 실험 개체들간 온도와 $CO_2$ 농도 변화에 적응하는 능력의 차이가 크기 때문인 것으로 판단되는데, Table 2에서와 같이 두 수종 모두 광합성 변수들의 표준 편차가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 다른 광합성 변수들과는 달리 탄소고정효율은 처리간 차이를 잘 보여 주는데, 기존의 연구에서 알려진 바와 같이, 이 변수는 환경 변화에 매우 민감하게 반응하고 안정적이기 때문인 것으로 판단된다(Lee *et al.*, 2006; Han and Kim, 2009).

일반적으로 $CO_2$ 농도가 증가하면 식물의 광합성은 증가하는 것으로 알려져 있으며(Lewis *et al.*, 2001; Eamus and Berryman, 1995; Ceulemans and Mousseau, 1994), 단기간 처리에서도 $CO_2$ 농도가 증가하면, 수목의 광합성 활성 및 순양자수율이 증가한다(Eamus and Jarvis, 1989; Long, 1991). 이러한 결과와는 달리, 다릅나무는 $CO_2$ 농도 증가에 의해 탄소고정효율이 감소하는 것으로 나타났는데, 이러한 예는 일본자작나무와 시베리안자작나무에서도 찾아볼 수 있다(Koike *et al.*, 1996). 이와 같이 높은 $CO_2$ 농도에서 광합성 속도가 감소하는 이유는 조직 내 질소와 rubisco 함량 감소로 rubisco의 활성이 감소 하였기 때문인 것으로 판단된다(Tissue *et al.*, 1993). 식물의 잎에 함유된 질소의 70% 이상은 광합성과 관련된 단백질이나 효소 등을 구성하고 있기 때문에 식물의 광합성 능력은 잎의 질소 함량과 매우 밀접한 관계에 있다(Hikosaka and Terashima, 1995).

### 3.3. 광색소 함량

온도와 $CO_2$ 농도 변화에 따른 다릅나무와 백당나무의 잎 내 광색소 함량은 Table 3에 나타냈다. 광합성 변수들과 달리 광색소 함량은 수종간, 온도간, $CO_2$

**Table 3.** Changes in photosynthetic pigment contents of two tree species at different temperatures and $CO_2$ concentrations

| Species | Temperature (°C) | $CO_2$ (ppm) | Chl a | Chl b | Chl a+b | Car | Chl a/b | Chl/Car |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | mg $g^{-1}$ | | | | | |
| Maackia amurensis | 25 | 400 | 23.92 ± 5.73 | 9.25 ± 1.47 | 33.16 ± 7.20 | 4.87 ± 1.05 | 2.56 ± 0.20 | 6.83 ± 0.51 |
| | | 800 | 11.66 ± 1.68 | 7.34 ± 0.66 | 18.99 ± 2.20 | 3.15 ± 0.95 | 1.59 ± 0.16 | 6.42 ± 1.73 |
| | 30 | 400 | 27.72 ± 3.37 | 9.99 ± 0.82 | 37.71 ± 4.15 | 5.21 ± 0.81 | 2.77 ± 0.15 | 7.29 ± 0.65 |
| | | 800 | 18.06 ± 4.39 | 9.44 ± 1.25 | 27.49 ± 5.58 | 4.84 ± 1.08 | 1.89 ± 0.28 | 5.72 ± 0.66 |
| *Viburnum opulus* var. *calvescens* | 25 | 400 | 35.34 ± 4.72 | 13.55 ± 1.97 | 48.89 ± 6.58 | 7.94 ± 1.35 | 2.62 ± 0.18 | 6.20 ± 0.34 |
| | | 800 | 33.11 ± 8.52 | 13.40 ± 2.41 | 46.49 ± 10.90 | 7.78 ± 1.76 | 2.44 ± 0.22 | 5.97 ± 0.16 |
| | 30 | 400 | 20.58 ± 3.16 | 9.80 ± 0.87 | 30.37 ± 4.00 | 5.18 ± 0.76 | 2.09 ± 0.15 | 5.87 ± 0.21 |
| | | 800 | 21.15 ± 7.06 | 9.92 ± 1.89 | 31.06 ± 8.95 | 5.00 ± 1.41 | 2.08 ± 0.35 | 6.19 ± 0.28 |
| Species (S) | | | *** | *** | *** | *** | ns | * |
| Temperature (T) | | | * | * | * | * | ns | ns |
| $CO_2$ | | | ** | ns | ** | ns | *** | ns |
| S × T | | | *** | *** | *** | *** | *** | ns |
| S × $CO_2$ | | | ** | ns | * | ns | *** | * |
| T × $CO_2$ | | | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| S × T × $CO_2$ | | | ns | ns | ns | ns | ns | ns |

All the values are means of five replicates ± SD; *$p \le 0.05$, **$p \le 0.01$, ***$p \le 0.001$, and n.s: non-significance.

농도간 뚜렷한 차이를 나타냈다. 다릅나무의 경우, $CO_2$ 농도가 증가하면서 엽록소 a, b 및 총 엽록소 함량뿐만 아니라 카로테노이드 함량은 모두 감소하였다. 그러나 백당나무에서 이러한 경향은 뚜렷하지 않았다. 한편 온도 증가는 다릅나무의 잎 내 광색소 함량을 크게 증가 시켰으나, 백당나무는 반대로 온도 증가 하에서 광색소 함량이 모두 감소하였다. 엽록소 a/b 비는 다릅나무의 경우 뚜렷한 변화를 보여 주는데, 특히 $CO_2$ 농도 증가는 엽록소 a/b비를 뚜렷하게 감소시켰으며, 백당나무의 경우 온도 증가로 엽록소 a/b 비가 감소하였다.

광색소 함량은 스트레스를 받으면 감소하는 특징을 가지고 있어(Iglesias *et al*., 2006; Han *et al*., 2007), 스트레스 평가 지표로 널리 이용되고 있으며, 현재에도 많이 이용되는데, 수종 간 반응 차이도 매우 크게 나타나는 인자이다(Han *et al*., 2009; Kim *et al*., 2008). 본 연구에서와 같이 온도와 $CO_2$ 농도 증가가 엽록소 함량을 감소시켰다는 결과는 많은 연구에서 찾아 볼 수 있는데(Hamid *et al*., 2009; Kim and You, 2010), 이러한 결과는 본 연구 결과와 같이 수종간 차이가 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 한편, 온도와 $CO_2$ 농도 증가로 잎 내 질소 함량이 감소한다는 결과도 제시되고 있는데(Kim and You, 2010), 본 연구의 백당나무에서처럼 잎의 엽록소 함량이 온도와 $CO_2$ 농도 증가에 의해 감소한 것은 잎의 질소 함량에 영향을 받은 것으로 생각된다. 특히, 이러한 결과는 제어된 실험 환경과 같이 질소가 제한된 환경에서 많이 나타나는데, 온도와 $CO_2$ 증가로 생장이 증가하면서 토양의 질소가 고갈되어 공급이 제한을 받을 때, 이와 같은 현상이 많이 관찰된다(Long *et al*., 2004). 따라서 제어된 환경에서 온도와 $CO_2$ 변화에 대한 생장 및 생리 연구를 할 경우, 질소 공급이 지속적으로 이루어져야 한다.

## 적 요

본 연구는 최근 전 지구적으로 문제시 되고 있는 기후변화와 관련하여, 우리나라에서의 대기 중 $CO_2$ 농도 증가와 평균 온도 상승에 따른 수목의 생장 및 생리 반응의 변화를 예측하고자 실시되었다. 온도와 $CO_2$ 농도 증가 하에서 다릅나무의 건중량은 감소하였으나, 백당나무의 건중량은 증가하였다. 또한, $CO_2$ 농도 증가는 다릅나무의 지상부와 지하부의 비(S/R)를 감소시킨 반면, 백당나무의 지상부와 지하부의 비는 증가시켜, 두 수종의 생장 반응은 서로 상반되는 결과를 나타냈다. 그러나 두 수종 모두 온도 증가에 의해 S/R율이 증가하였다. 탄소고정효율은 다릅나무의 경우, 온도와 $CO_2$ 농도 증가에 의해 뚜렷하게 감소하였으나, 백당나무는 온도 증가로 탄소고정효율이 감소한 반면, $CO_2$ 증가는 뚜렷한 효과를 나타내지 않았다. 광색소 함량은 다릅나무의 경우, $CO_2$ 농도가 증가하면서 모든 광색소 함량이 감소하였다. 그러나 백당나무에서는 뚜렷한 변화가 없었다. 한편 온도 증가는 다릅나무의 잎 내 광색소 함량을 크게 증가 시켰으나, 백당나무는 반대로 광색소 함량이 모두 감소하였다. 다릅나무의 엽록소 a/b 비는 $CO_2$ 농도 증가로 뚜렷하게 감소하였으며, 백당나무는 온도 증가로 엽록소 a/b 비가 감소하였다. 결론적으로 온도와 $CO_2$ 농도 변화에 따른 수목의 생장 및 생리적 반응은 처리 농도 또는 기간에 따라 큰 차이를 나타내며, 공시재료의 연령에도 큰 영향을 받는다. 본 연구는 1년생의 어린 묘목을 대상으로 단기간 온도와 $CO_2$ 농도 변화에 대한 반응을 분석한 것이므로, 장기적인 환경 변화에 대한 수목의 적응 특성은 예측하기 어렵다. 따라서 미래의 기후변화에 대한 수목의 반응을 정확한 예측을 위해서는 장기적인 환경 변화 조건하에서 다각적인 연구가 이루어져야 한다. 또한 환경 변화에 따른 반응은 수종에 따라 큰 차이를 나타내므로, 기후변화에 따른 수목의 반응을 예측하기 위해서는 우리나라 주요 수종 및 기후변화에 민감한 수종들을 대상으로 지속적인 연구가 이루어져야 한다.

## REFERENCES

Callaway, R. M., E. H. Delucia, E. M. Thomas, and W. H. Schlesinger, 1994: Compensatory responses of $CO_2$ exchange and biomass allocation and their effects on the relative growth rate of ponderosa pine in different $CO_2$ and temperature regimes. *Oecologia* **98**, 159-166.

Caemmerer, S. von and G. D. Farquhar, 1981: Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchanges of leaves. *Planta* **153**, 376-387.

Ceulemans, R. and M. Mousseau, 1994: Effects of elevated atmospheric $CO_2$ on woody plants. *New Phytologist* **127**, 425-446.

Eamus, D. and P. G. Jarvis, 1989: The direct effects of increase in the global atmospheric $CO_2$ concentration on

natural and commercial temperate trees and forests. *Advances in Ecological Research* **19**, 1-55.

Eamus, G. A. and C. A. Berryman, 1995: Photosynthetic responses to temperature, light flux-density, $CO_2$ concentration and vapour pressure deficit in *Eucalyptus tetrodonta* grown under $CO_2$ enrichment. *Environmental Pollution* **90**, 41-49.

Farquhar, G. D., von S. Caemmerer, and J. A. Berry, 1980: A biochemical model of photosynthetic $CO_2$ assimilation in leaves of $C_3$ species. *Planta* **149**, 78-90.

Ghannoum, O., N. G. Phillips, J. P. Conroy, R. A. Smith, R. D. Attard, R. Woodfield, B. A. Logan, J. D. Lewis, and D. T. Tissue, 2010: Exposure to preindustrial, current and future atmospheric $CO_2$ and temperature differentially affects growth and photosynthesis in Eucalyptus. *Global Change Biology* **16**, 303-319.

Hamid, N., F. Jawaid, and D. Amin, 2009: Effect of short-term exposure to two different carbon dioxide concentrations on growth and some biochemical parameters of edible beans (*Vigna radiate* and *Vigna unguiculata*). *Pakistan Journal of Botany* **41**, 1831-1836.

Han, S. H. and D. H. Kim, 2009: Determination of ozone tolerance on environmental tree species using standard index. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 3-12.

Han, S. H., D. H. Kim, J. C. Lee, and P. G. Kim, 2009: Effects of fertilization on physiological parameters in American sycamore (*Platanus occidentalis*) during ozone stress and recovery phase. *Journal of Ecology and Field Biology* **32**, 149-158.

Han, S. H., D. H. Kim, K. Y. Lee, J. J. Ku, and P. G. Kim, 2007: Physiological damages and biochemical alleviation to ozone toxicity in five species of genus *Acer*. *Journal of Korean Forest Society* **96**, 551-560.

Hikosaka, K. and I. Terashima, 1995: A model of the acclimation of photosynthesis in the leaves of C3 plant to sun and shade with respect to nitrogen use. *Plant, Cell & Environment* **18,** 605-618.

Hiscox, J. D. and G. F. Israelstam, 1979: A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany* **57,** 1332-1334.

Iglesias, J. D., A. Calatayud, E. Barreno, E. Primo-Millo, and M. Talon, 2006: Responses of citurs plants to ozone: Leaf biochemistry, antioxidant mechanisms and lipid peroxidation. *Plant Physiology and Biochemistry* **44**, 125-131.

IPCC, 2007: Climate change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge.

Kim, D. H., S. H. Han, J. J. Ku, K. Y. Lee, and P. G. Kim, 2008: Physiological and biochemical responses to ozone toxicity in five species of genus *Quercus* seedlings. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**, 47-57.

Kim, H. R. and Y. H. You, 2010: Effects of elevated $CO_2$ concentration and increased temperature on leaf related-physiological responses of *Phytolacca insularis* (native species) and *Phytolacca Americana* (invasive species). *Journal of Ecology and Field Biology* **33**, 195-204.

Kim, P. G. and E. J. Lee, 2001: Ecophysiology of photosynthesis 1: Effects of light intensity and intercellular $CO_2$ pressure on photosynthesis. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**, 126-133.

Koike, T., T. T. Lei, T. C. Maximov, R. Tabuchi, K. Takahashi, and B. I. Ivanov, 1996: Comparison of the photosynthetic capacity of Siberian and Japanese birch seedlings grown in elevated $CO_2$ and temperature. *Tree Physiology* **16**, 381-385.

Lee, J. C., C. Y, Oh, S. H. Han, and P. G. Kim. 2006: Photosynthetic inhibition in leaves of *Ailanthus altissima* under $O_3$ fumigation. *Journal of Ecology and Field Biology* **29**, 41-47.

Lewis, J. D., M. Lucash, D. Olszyk, and D. T. Tingey, 2001: Seasonal patterns of photosynthesis in Douglas fir seedlings during the third and fourth year of exposure to elevated $CO_2$ and temperature. *Plant Cell & Environment* **24**, 539-548.

Long, S. P., 1991: Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric $CO_2$ concentrations: Has its importance been underestimated? *Plant Cell & Environment* **14**, 729-739.

Long, S. P., E. A. Ainsworth, A. Rogers, and D. R. Ort, 2004: Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. *Annual Review of Plant Biology* **55**, 591-628.

Luomala, E. M., K. Laitinen, S. Kellomaki, and E. Vapaavuori, 2003: Variable photosynthetic acclimation in consecutive cohorts of Scots pine needles during 3 years of growth at elevated $CO_2$ and elevated temperature. *Plant Cell & Environment* **26**, 645-660.

Mooney, H. A., M. Kiippers, G. Koch, J. Gorham, C. Chu, and W. E. Winner, 1988: Compensating effects to growth of carbon partitioning changes in response to $SO_2$-induced photosynthetic reduction in radish. Oecologia **75**, 502-506.

Mooney, H. A., B. G. Drake, R. J. Luxmoore, W. C. Oechel, and L. F. Pitelka, 1991: Prediction ecosystem responses to elevated $CO_2$ concentrations. *Bioscience* **41**, 96-104.

Morison, J. I. L. and D. W. Lawlor, 1999: Interactions between increasing $CO_2$ concentration and temperature on plant growth. *Plant Cell & Environment* **22**, 659-682.

Norby, R. and Y. Luo, 2004: Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric $CO_2$ and global warming in a multi-factor world. *New Phytologist* **162**, 281-293.

O'neill, E. G., R. J. Luxmoore, and R. J. Norby, 1987: Elevated atmospheric $CO_2$ effects on seedling growth, nutrient uptake, and rhizosphere bacterial populations of *Liriodendron tulipifera* L. *Plant and Soil* **104**, 3-11.

Stirling, C. M., M. Heddell_Cowie, M. L. Jones, T. W. Ashenden, and T. H. Sparks, 1998: Effects of elevated $CO_2$ and temperature on growth and allometry of five native fast-growing annual species. *New Phytologist* **140**, 343-354.

Teskey, R. O., 1997: Combined effects of elevated $CO_2$ and air temperature on carbon assimilation of *Pinus taeda* trees. *Plant Cell & Environment* **20**, 373-380.

Tissue, D. T., R. B. Thomas, and B. R. Strain, 1993: Long-term effects of elevated $CO_2$ and nutrients on photosynthesis and rubisco in loblolly pine seedlings. *Plant Cell & Environment* **16**, 859-865.

Tjoelker, M. G., J. Oleksyn, and P. B. Reich, 1998: Temperature and ontogeny mediate growth response to elevated $CO_2$ in seedlings of five boreal tree species. *New Phytologist* **140**, 197-210.