

CO₂농도 및 온도 상승이 백합나무의 생리적 특성에 미치는 영향

이하수¹ · 이솔지¹ · 이재천² · 김기우¹ · 김판기^{1*}

¹경북대학교 생태환경시스템학부, ²국립산림과학원

(2013년 9월 2일 접수; 2013년 9월 5일 수정; 2013년 9월 9일 수락)

Effects of Elevated CO₂ Concentration and Temperature on Physiological Characters of *Liriodendron tulipifera*

Ha-Soo Lee¹, Solji Lee¹, Jae-Cheon Lee², Ki Woo Kim¹ and Pan-Gi Kim^{1*}

¹School of Ecology and Environmental System, Kyungpook National University, Sangju 742-711, Korea

²Korea Forest Research Institute, Suwon 441-350, Korea

(Received September 2, 2013; Revised September 5, 2013; Accepted September 9, 2013)

ABSTRACT

This study aimed to investigate the growth and physiological characters of *Liriodendron tulipifera* seedlings in responses to two different levels of elevated air temperature and CO₂ concentration. The seedlings were grown in environment-controlled growth chambers with two combinations of air temperature and CO₂ conditions: (1) 22°C + ambient CO₂ 380 μmol mol⁻¹ and (2) 27°C + 770 μmol mol⁻¹. Physiological characters such as growth, photosynthesis, and water use efficiency, were monitored for 85 days. The seedlings under the elevated treatment showed a greater amount of growth in tree height, compared with those under the control. Regarding the characteristics of assimilatory organs, the elevated treatment resulted in a greater amount of total leaf area, leaf unfolding, and dry weight per leaf area. No significant differences were found in photosynthesis capacity between the two treatments. The increase in water use efficiency with increased intercellular CO₂ partial pressure appeared overall lower in the seedling under the elevated treatment, compared with those under the control. The total leaf area of the seedlings under the elevated treatment was larger than that under the control, indicating a higher amount of photosynthesis. In addition, an increase of root growth was noted under the elevated treatment. A resistance mechanism of water stress may be attributed to a higher amount of organ growth as well as the tree height under the elevated treatment than the control.

Key words: Carbon dioxide enrichment, Photosynthesis, Water use efficiency, Global warming

I. 서 론

지구온난화의 주된 원인이 되고 있는 CO₂ 농도의 상승은 대기와 식물의 동화기관과의 CO₂ 분압을 증대시킨다. 이로 인하여 대기에서 광합성기관까지의 CO₂ 확산과 rubisco의 탄소고정반응이 촉진되어 광합성속도

가 상승한다(Kim and Lee, 2001a). 그러나 식물을 CO₂ 농도가 상승된 조건에 장기간 노출시키면 광합성 능력(photosynthetic capacity)이 저하되어, 일반 대기의 CO₂농도 조건에서 생육한 개체보다 낮은 광합성속도를 나타내기도 한다(Campbell *et al.*, 1988; Spencer and Bowes, 1986). 이것은 높은 CO₂ 농도에서 식물



* Corresponding Author : Pan-Gi Kim
(pgkim@knu.ac.kr)

이 생육하면서 광합성기관과 여기에 관여되는 여러 가지 요소가 변화되었음을 시사한다.

높은 CO₂농도에 장기간 노출됨으로써 나타나는 광합성 저하는 높은 CO₂농도로 광합성이 촉진되면서 생장활동에 필요한 양보다 많은 광합성산물이 전분립의 형태로 광합성기관과 그 주변에 축적되어 광합성이 억제되는 것으로 알려져 있다(Ro *et al.*, 2001, Kim and Lee, 2001b). 이것은 광합성기관과 그 주변에 축적되는 전분립을 감소시킬 수 있는 조건이 되면 광합성 억제현상이 완화될 수 있음을 의미한다. 그 실험으로 광합성산물을 수용하는 기관의 크기(sink size)나 요구도(sink activity)를 증가시키면 광합성산물의 전류(translocation)가 촉진되어 광합성억제 현상이 완화된다는 연구도 있다(Clough *et al.*, 1981; Peet, 1984). 그리고 생육온도의 상승으로 호흡량이 증가하면 광합성산물의 소비가 커져서 광합성산물의 축적량도 감소하고, 전류도 신속하게 이루어져 광합성 억제현상이 완화된다(Ro *et al.*, 2001).

한편, 일부 식물에서는 높은 CO₂ 농도에서 장기간 생육시켜도 광합성 억제현상이 전혀 나타나지 않아(Sage *et al.*, 1989; Usuda and Simogawara, 1998), 식물의 종에 따라서 광합성반응이 상이함을 알 수 있다. 대기의 CO₂ 농도가 높은 온천지역에서는 높은 CO₂ 농도조건에 적응된 식물이 자생하고 있었는데, 이들 식물은 광합성에 대한 질소이용효율(photosynthetic nitrogen use efficiency) 및 수분이용효율(photosynthetic water use efficiency)이 높고, 광합성산물의 수송능력이 높았다(Onoda *et al.*, 2009). 그리고 이들 식물은 일반적인 대기농도에서 자생하는 집단과 상이한 유전적 구조를 가지고 있었다(Nakamura *et al.*, 2011). 이것은 동일한 식물종이라 할지라도 유전자의 구성에 따라서 높은 CO₂ 농도에 대한 적응력이 달라질 수 있음을 시사한다.

본 연구는 지구온난화와 같은 기후변화에 높은 적응력을 나타내는 수종 및 품종을 육성하기 위한 연구의 일환으로, CO₂ 농도 및 기온의 상승이 우리나라 주요 조림수종 중의 하나인 백합나무(*Liriodendron tulipifera* L.)의 생리적 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 공시재료 및 시험처리

공시재료인 백합나무의 묘목(실생묘 1-0)은 국립산림

과학원 산림유전자원부(경기도 수원시 권선구 온정로 39)에서 제공받았다. 제공받은 묘목을 직경 10cm, 높이 9cm의 화분에 식재가 가능하도록 단근하여 이식하고, 지상부를 대절하여 맹아지를 유도하였다. 이식에 사용한 배양토는 산림양묘전용 상토(파워믹스, (사)한국상토제조협회)이다.

대절부위로부터 맹아지가 유도된 공시재료를 CO₂ 농도, 기온 등이 제어되는 Growth Chamber (DLH-350S, 두영엔시스) 2대에 5개체씩 균등 상치하여, 일장의 길이 15시간, 광도 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 상대습도 RH 75%의 조건에서 육성하였다. 공시재료를 육성하는 동안 수분부족이 일어나지 않도록 1주일에 3회 관수를 하였다.

그리고 2대의 Growth Chamber 중 1대는 온도를 주간 22°C, 야간 17°C로 설정하고, CO₂농도를 주간 380 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 야간 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 으로 설정하여 대조구(control)로 하였다. 나머지 1대는 온도를 대조구보다 5°C 상승한 주간 27°C, 야간 22°C로 설정하고, CO₂농도를 주간 770 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 야간 790 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 으로 설정하여, 처리구(elevated)로 하였다. 이러한 조건에서 80일간 시험처리·육성한 개체를 광합성색소의 함량, 광합성특성 및 수분이용효율, 수분유지능력 등의 시험에 공시하고, 수확조사에는 85일간 시험처리·육성한 재료를 공시하였다(Fig. 1).

2.2. 생장 및 광합성색소의 함량 조사

CO₂ 농도 및 온도 상승이 생장에 미치는 영향을 조사하기 위하여 두 시험구의 모든 개체에 대해 공시재료의 절단면에서 유도된 신초의 길이를 매주 측정하였



Fig. 1. Seedlings of *L. tulipifera* under the ambient condition (control) (left) and the elevated CO₂ concentration and temperature condition (right).

다. 그리고 85일간의 시험처리를 마친 모든 개체를 기관별로 구분하여 수확한 후, 송풍식 건조기로 105°C에서 30분간, 85°C에서 8시간동안 건조시킨 다음 건물중을 측정하였다. 잎에 대해서는 하나하나의 면적을 엽면적측정기(LI-3100C, Li Cor Inc.)로 측정한 다음 건물중을 측정하여, 잎의 두께와 엽육조직의 치밀도를 반영하고 있는 엽면적당 건물중(specific leaf dry mass)을 산출하였다. 그리고 기관별 건물중의 값을 사용하여 지상부와 지하부의 비(T/R)를 산출하였다.

광합성색소의 함량 조사는 공시한 모든 개체의 가장 넓은 잎을 대상으로 이루어졌으며, 광합성색소의 추출은 Chung *et al.*(2012)와 마찬가지로 Hiscox and Israelstam(1978)의 방법을 따랐다. 그리고 추출용액에 함유된 색소의 함량은 Wellburn(1994)의 방법에 따라서 분광광도계(UV/VIS spectrophotometer-2550, Shimadzu Inc.)로 흡광도를 측정한 다음 엽록소a, 엽록소b, 카로테노이드(carotenoid)의 함량 등을 산출하였다.

2.3. 광합성특성, 수분이용효율 조사

CO₂ 농도 및 온도상승이 광합성특성 및 수분이용효율에 미치는 영향을 조사하기 위해서 각 시험구의 평균적 생장을 나타내는 개체를 3본씩 선발하고, 엽령(leaf age)이 유사한 잎을 측정에 공시하였다. Kim *et al.*(2003)과 동일한 방법으로 휴대용 광합성 측정기(Li-6400, Li Cor)를 사용하여 측정 잎에 조사(照射)되는 빛의 강도를 서로 달리하여 광합성속도를 측정한다. 이 측정값을 이용하여 광-광합성곡선(light curve)을 작성하였다. 그리고 측정 잎에 공급되는 공기의 CO₂ 농도를 서로 달리하여 광합성속도를 측정한다. 다음, 엽육 내 CO₂농도-광합성곡선(A-Ci curve)을 작성하였다. 이때 엽육 내 CO₂ 농도는 Farquhar and Sharkey(1982)의 식을 적용하여 산출하였다. 광-광합성곡선과 엽육 내 CO₂ 농도-광합성곡선의 해석은 Kim and Lee(2001a)의 방법을 토대로 하였다.

수분이용효율(water use efficiency; WUE)은 Kim *et al.*(2002)과 마찬가지로 광합성특성(light curve, A-Ci curve)을 조사할 때 광합성속도(Pn)와 동시에 측정된 증산속도(Tr)의 값을 이용하여 산출하였다(WUE = Pn/Tr).

2.4. 잎의 수분유지능력 조사

잎의 수분손실에 대한 저항력을 나타내는 수분유지

능력을 조사하기 위해서 각 시험구의 평균적 생장을 나타내는 개체를 3본씩 선발하고, 엽령(leaf age)이 유사한 잎을 측정에 공시하였다. 측정은 Kim *et al.*(2002)의 방법에 따라서 공시 잎을 물속에서 엽병을 절단하여 채취한 다음, 어두운 곳에서 절단면을 12시간 침수시켜 잎이 포화수분상태가 되도록 유도하였다. 포화수분상태에 있는 잎의 엽병을 제거하고 생중량을 측정한다. 다음, 이것을 건조제(silica gel)가 들어있는 데시케이터(desiccator)에 넣고 생중량을 5~30분 간격으로 6시간동안 측정하였다. 이렇게 측정된 값을 Kim *et al.*(2002)과 동일한 방법으로 상대함수율(relative water content)로 산출하였다.

III. 결 과

3.1. 생장량의 변화

CO₂ 농도 및 온도가 상승이 생장에 미치는 영향을 검토하기 위해서 대조구(control)와 처리구(elevated)로 설정된 growth chamber에서 성장한 개체의 줄기길이(shoot length)의 변화를 Fig. 2에, 처리를 마친 개체의 기관별 건물중 등을 Table 1에 나타낸다.

시험처리 후 처음으로 줄기의 길이를 측정한 7일째부터 처리구가 대조구보다 높은 값을 나타냈다. 처리기간이 길어짐에 따라서 두 시험구 모두 줄기의 생장이 이루어졌으나, 처리구의 줄기생장이 대조구에 비하여 빠르게 진행되어 두 시험구간의 차이가 커지는 경

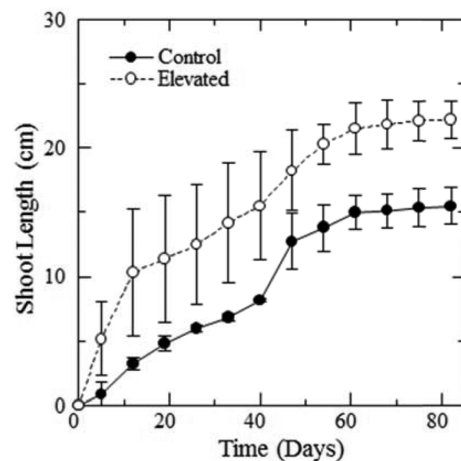


Fig. 2. Temporal progress of shoot length growth of *L. tulipifera* seedlings under different temperature and CO₂ concentration.

Table 1. Changes in the dry weight of assimilatory organs under different temperature and CO₂ concentration for 85 days

Organ	Dry Weight (g tree ⁻¹)		
	Control	Elevated	
Terrestrial (T)	Leaf	1.25 (±0.17)	2.31 (±0.27)
	Petiole	0.21 (±0.04)	0.46 (±0.11)
	Stem	0.53 (±0.05)	1.10 (±0.12)
	Stock	0.60 (±0.08)	1.25 (±0.16)
	Total	2.59 (±0.23)	5.12 (±0.36)
Root (R)	Taproot	1.73 (±0.42)	2.18 (±0.20)
	Lateral root	1.15 (±0.09)	2.92 (±0.46)
	Total	2.88 (±0.42)	5.10 (±0.37)
T+R	5.47 (±0.34)	10.22 (±0.11)	
T/R	0.90 (±0.21)	1.00 (±0.15)	

향을 나타냈다. 이러한 결과로 CO₂ 농도 및 기온의 상승이 줄기의 성장을 촉진시킬 수 있다.

두 시험구의 건조량은 모든 기관이 처리구가 대조구에 비하여 평균 약 1.9배의 높은 값을 나타내 처리구의 건조량 증가를 확인할 수 있었다. 처리구의 건조량 증가를 지상부(terrestrial)와 지하부(root)로 구분하여 살펴보면, 지상부가 대조구의 2.0배로 지하부의 1.8배보다 높은 값을 나타낸다. 이 결과는 지상부와 지하부의 비율(T/R)에도 반영되어 처리구의 값이 대조구에 비하여 낮은 값을 나타낸다. 그러나 뿌리의 수분흡수 기능을 고려하여 주근(taproot)을 제외한 세근(lateral root)만을 비교해 보면, 처리구가 대조구의 2.5배로 모든 기관 중에서 가장 높은 증가율을 나타낸다. 세근과 지상부의 비율(T/lateral root)을 산출하여도 처리구가 1.4로 대조구의 1.7에 비하여 현저하게 낮은 값을 나타낸다. 이와 같이 뿌리의 수분흡수기능을 고려하여 분석하면 CO₂ 농도 및 기온의 상승으로 지하부의 발달이 촉진되었음을 알 수 있다.

3.2. 동화기관의 특성 및 광색소의 함량 변화

CO₂ 농도 및 기온의 상승이 동화기관의 발달에 미치는 영향을 조사하기 위해서, 잎의 전개된 개수(No. of leaves)와 면적(leaf area), 잎의 면적당 건조량(specific dry mass), 광합성색소(photosynthetic pigments)의 함량을 조사하여 Table 2에 나타낸다.

시험기간 동안에 전개된 잎의 수는 처리구가 대조구에 비하여 높게 나타났으며, 낙엽은 두시험구 모두 없

Table 2. Changes in the leaf characters and photosynthetic pigment contents in the leaves of *L. tulipifera* under different temperature and CO₂ concentration

		Control	Elevated
No. of leaves (ea tree ⁻¹)		7.3 (±0.5)	8.7 (±0.9)
Leaf area	(cm ² tree ⁻¹)	500 (±30)	657 (±99)
	(cm ² leaf ⁻¹)	68 (±4)	77 (±16)
Specific dry mass (DW mg cm ⁻²)		2.5 (±0.2)	3.5 (±0.1)
Photosynthetic pigments (mg FW.g ⁻¹)	Chl. a	1.54 (±0.23)	1.59 (±0.09)
	Chl. b	0.67 (±0.07)	0.72 (±0.02)
	Chl. a+b	2.21 (±0.30)	2.32 (±0.06)
	Chl. a/b	2.27 (±0.10)	2.22 (±0.19)
	Carotenoid	0.45 (±0.03)	0.44 (±0.02)

었다. 잎의 전개수가 많았던 처리구는 개엽의 엽면적 또한 높게 나타나, 엽면적의 증가를 확인할 수 있으며, 이것은 개체당의 엽면적에서도 알 수 있다. 이러한 결과로 CO₂ 농도 및 기온의 상승에 의해서 동화기관의 양적증가가 있었음을 알 수 있었다. 그리고 처리구는 엽면적당 건조량의 값이 대조구에 비하여 높은 값을 나타내, 잎이 두껍고 엽육조직이 치밀해지는 형태적 변화가 시사되었다. 그러나 엽내의 질소함량, 광합성능력 등과의 상관성이 높은 광합성색소(Terashima and Evans, 1988; Hikosaka and Terashima, 1995)는 두 처리구 모두 유사한 값을 나타내, 처리구 간의 차이점을 찾을 수 없었다.

3.3. 광합성특성의 변화

광도와 CO₂ 농도를 서로 달리하여 측정된 광합성속도를 광-광합성곡선(light curve)과 엽육 내 CO₂ 농도-광합성곡선(A-Ci curve)으로 나타낸다(Fig. 3).

광-광합성곡선에서 광도가 0μmol·m⁻²·s⁻¹일 때의 광합성속도, 즉 암호흡속도는 두 처리구 모두 유사한 값(약 0.2μmol·m⁻²·s⁻¹)을 나타냈다. 그리고 광화학계의 활성을 반영하고 있는 순양자수율은 두 시험구 모두 약 43mmol·mol⁻¹의 값을 나타내고, 광합성의 능력을 반영하고 있는 최대광합성속도는 두 시험구 모두 4.9μmol·m⁻²·s⁻¹를 나타냈다. 또한 이 곡선으로부터 산출할 수 있는 광보상점 및 광포화점도 두 시험구가 유사한 값을 나타내, CO₂ 농도 및 기온의 상승에 의한 광화학계의 특성변화를 인정할 수 없었다. 엽육 내 CO₂ 농도-광합성곡선에서는 탄소고정효율, 광호흡속도,

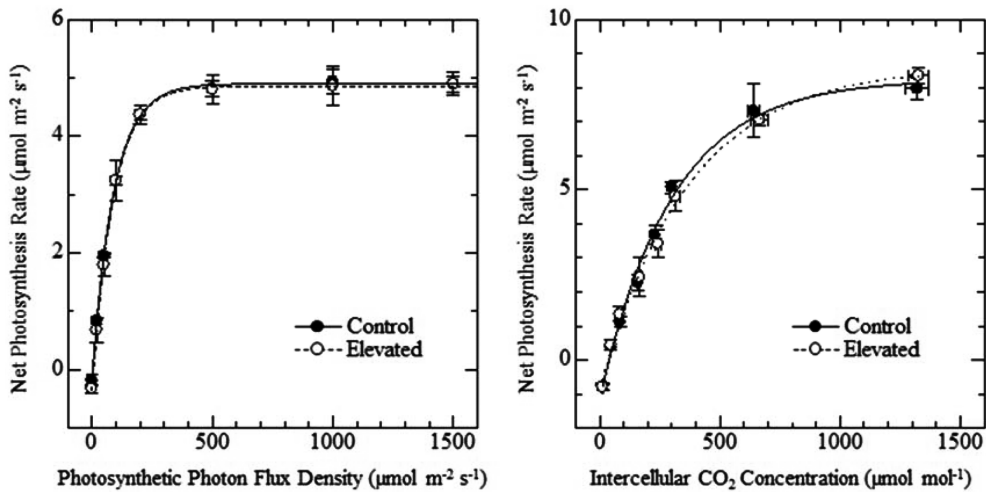


Fig. 3. Light response curves of *L. tulipifera* under (left) and A-Ci curves (right) of *L. tulipifera* under the control and the elevated CO₂ concentration and temperature condition.

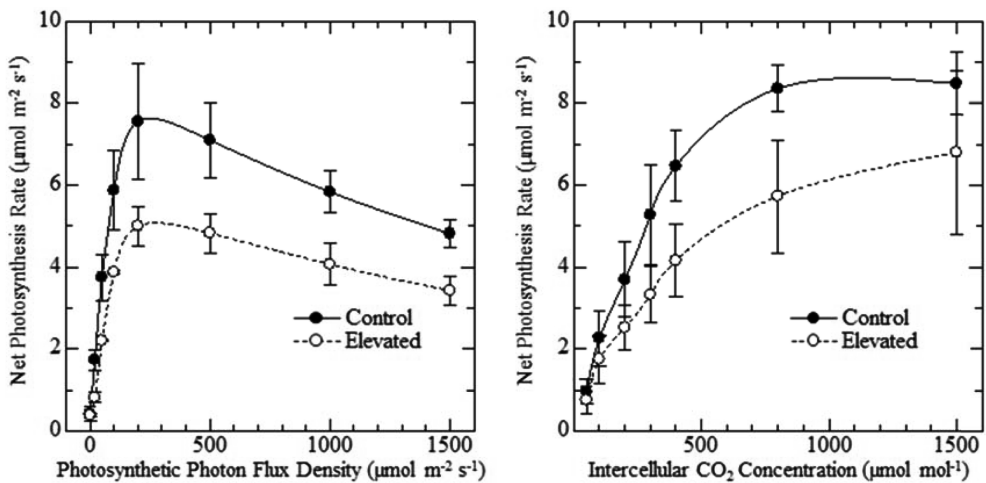


Fig. 4. Change in the water use efficiency by light intensity (left) and intercellular CO₂ pressure (right) under the control and the elevated CO₂ concentration and temperature condition.

CO₂ 보상점 및 포화점 등을 산출할 수 있는데, 광-광합성곡선에서와 마찬가지로 두 시험구 모두가 유사한 값을 나타내, CO₂ 농도 및 기온의 상승에 의한 탄소 고정계의 특성변화를 인정할 수 없었다.

3.4. 수분이용효율의 변화

광도와 CO₂ 농도를 서로 달리하여 측정한 광합성속도의 값과 동시에 측정된 증산속도의 값을 사용하여 수분이용효율을 산출하고, 이것을 토대로 광도와 엽육 내 CO₂ 농도에 따른 수분이용효율의 변화를 Fig. 4에

나타낸다.

광도에 대한 수분이용효율의 변화를 살펴보면, 두 시험구 모두 광합성속도가 양(+)의 값으로 전환되는 광보상점 부근에서 가장 낮은 수분이용효율을 나타냈으나, 광도가 상승함에 따라서 수분이용효율이 증가하였다. 이때 처리구의 수분이용효율 증가속도가 대조구보다 완만하게 이루어져, 대조구보다 낮은 수분이용효율을 나타냈다. 이러한 경향은 광포화점의 광도까지 지속되었으며, 최대의 수분이용효율을 나타내는 광포화점에서 두 시험구간의 차이가 가장 크게 나타났다.

광포화점보다 높은 광도영역에서는 두 시험구 모두 광도의 상승에 따라서 수분이용효율이 완만하게 저하하였다. 이 광도영역에서의 수분이용효율 저하는 처리구가 대조구에 비하여 완만하게 이루어졌으나, 그 값은 처리구는 대조구에 비하여 낮았다.

엽육 내 CO₂ 농도에 따른 수분이용효율의 변화에서도 엽육 내 CO₂ 농도가 낮은 영역에서는 수분이용효율이 낮은 값을 나타내고, 엽육 내 CO₂ 농도가 증가함에 따라서 수분이용효율도 증가한다. 그리고 처리구의 수분이용효율 증가속도도 대조구에 비하여 완만하게 이루어져 대조구보다 낮은 수분이용효율을 나타낸다. 또한 엽육 내 CO₂ 포화점의 영역을 지나면서 두 시험구 모두 수분이용효율의 증가속도가 감소하였는데, 대조구가 처리구에 비하여 감소가 현저하게 나타났다.

3.5. 수분유지능력의 변화

두 시험구의 건조공기에 대한 잎의 수분손실 저항능력을 검토하기 위해서, 포화수분상태에 있는 절단엽(detached leaf)을 건조공기에 노출시킨 후, 상대습수율의 변화를 조사하였다(Fig. 5).

포화수분상태에 있는 절단엽이 건조공기에 노출되면서 수분손실이 이루어지기 시작하고 노출시간이 경과할수록 절단엽의 상대습수율은 감소하였다. 그러나 처리구는 대조구에 비하여 상대습수율의 감소가 완만하게 이루어져, CO₂ 농도 및 기온의 상승에 의해서 잎의 수분손실에 대한 저항능력, 즉 수분유지능력이 높

아짐을 알 수 있었다.

IV. 고찰 및 결론

대기의 CO₂ 농도 및 기온이 상승하면 일반적으로 식물의 광합성속도가 상승하나, 이 조건이 장기화되면 광합성능력 그 자체가 저하되어, 일반 대기의 CO₂ 농도 조건에서 생육한 개체보다 낮은 광합성속도를 나타낸다(Kim and Lee, 2001b). 그러나 다양한 생리기작에 의해서 CO₂ 농도 및 기온이 상승된 조건에 대한 적응력이 높은 식물종이나(Sage *et al.*, 1989; Usuda and Simogawara, 1998), 유전적으로 적응력이 높은 식물(Nakamura *et al.*, 2011)은 높은 CO₂ 농도에서 장기간 생육시켜도 광합성 억제현상이 전혀 나타나지 않는다. 이러한 식물은 광합성에 대한 질소이용효율 및 수분이용효율이 높고, 광합성산물의 수송능력이 높은 것으로 알려져 있다(Onoda *et al.*, 2009; Nakamura *et al.*, 2011). 이러한 지견을 토대로 백합나무의 CO₂ 농도 및 기온에 대한 반응을 살펴보고자 한다.

우선 CO₂ 농도 및 기온의 상승이 광합성능력에 미친 영향을 검토하기 위해서, 광-광합성곡선이나 엽육 내 CO₂ 농도-광합성곡선에서 추정할 수 있는 광합성능력, 광화학적 및 탄소고정계의 활성 변화 등을 살펴보면(Kim and Lee, 2001a), 두 시험구간의 차이점이 인정되지 않는다(Fig. 3). 뿐만 아니라 엽내 질소함량, 광합성능력 등과 정(正)의 상관관계에 있는 광합성색소의 함량(Terashima and Evans, 1988; Hikosaka and Terashima, 1995)도 유사한 값을 나타낸다(Table 2). 그리고 CO₂ 농도 및 기온의 상승에 의해서 줄기생장의 생장이 촉진되고, 기관별 건중량이 증가하였다. 이러한 결과는 잉여 광합성산물의 축적 등의 원인(Kim and Lee, 2001b)에 의한 광합성능력 및 광합성속도의 저하가 없었음을 시사한다.

본 연구에서는 광합성에 대한 질소이용효율을 조사하지는 않아 다른 연구 또는 식물종과의 비교는 불가능하다. 그러나 CO₂ 농도 및 기온 상승으로 개체당 잎의 면적 및 건중량이 증가하였음에도 불구하고, 엽록소 함량과 광합성 활성이 두 시험구 모두 유사한 값을 나타내 광합성에 대한 질소이용효율의 변화가 없었음을 시사한다. 한편 광합성에 대한 수분이용효율은 처리구가 대조구에 비해서 낮은 경향을 나타내(Fig. 4), CO₂ 농도 및 기온 상승으로 수분이용효율이 저하

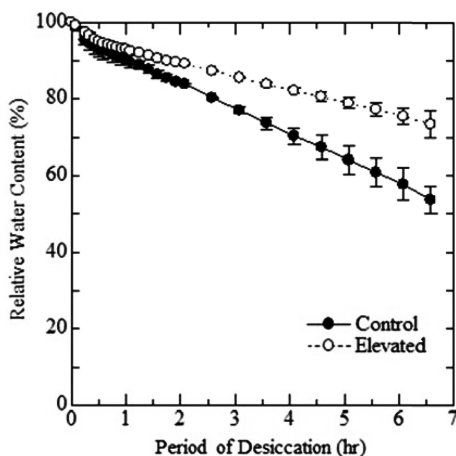


Fig. 5. Water content of a detached leaf of *L. tulipifera* under the control and the elevated CO₂ concentration and temperature condition.

된 결과를 얻었다. 그러나 CO₂ 농도 및 기온 상승으로 잎보다 뿌리발달이 촉진되고, 동화기관의 수분 손실에 대한 저항능력이 상승한 점(Fig. 5)을 고려하면, 반드시 수분이용효율이 저하되었다고 판단할 수는 없다. 더욱이 시험처리 기간 중에 수분스트레스가 발생하지 않도록 충분한 관수를 시행한 점까지 고려하면, CO₂ 농도 및 기온이 상승하여도 충분한 수분이 공급되므로 수분이용효율을 상승시키는 적응 반응의 필요성이 없었다고 추측된다. 마지막으로 광합성산물의 수송능력을 살펴보면, CO₂ 농도 및 기온 상승으로 잎의 전개수가 많아지고 비동화기관의 생장이 촉진되어, 광합성산물을 수송하는 기관의 크기나 요구도가 높아져 광합성산물의 수송능력이 증가하였음을 시사한다.

이상의 결과로 우리나라의 주요 조림수종 중의 하나인 백합나무가 지구온난화와 같은 기후변화가 나타날 경우, 부적응적인 생리적 반응보다는 적응적인 생리반응이 강하게 나타났다. 그러나 실제 조림지의 입지환경은 매우 다양하고 그것의 변화도 역동적으로 이루어지고 있으므로 생리적 반응만을 가지고 지구온난화에 대한 적응력을 판단하는 것은 매우 곤란하다.

적 요

지구온난화와 같은 기후변화에 대한 백합나무의 생리적 적응반응을 구명하기 위해서, CO₂ 농도 및 기온 상승이 백합나무의 생리특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 CO₂ 농도 및 기온 상승에 의하여 백합나무의 동화기관을 비롯한 모든 기관의 생장이 촉진되었다. 그러나 광합성능력과 관련된 광합성색소의 함량, 광화학계 및 탄소고정계의 활성 등은 일반 대기조건에서 성장한 개체와 유사한 값을 나타내, 광합성능력의 변화가 없었음이 시사되었다. CO₂ 농도 및 기온 상승에 의한 증산속도의 상승으로 광합성에 대한 수분이용효율이 저하하였다. 그러나 측근 생장이 촉진되어 뿌리에 대한 동화기관의 비율이 낮아지는 반응이 나타나 수분흡수능력이 높아졌음을 확인하였다. 또한 잎이 두꺼워지고 치밀해지는 형태적 변화가 나타나고, 수분 손실에 대한 잎의 저항능력이 증대되었음이 확인되었다. 이러한 결과로 CO₂ 농도 및 기온 상승에 의하여 백합나무의 수분 스트레스에 대한 저항능력이 증대됨을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 산림청 국립산림과학원 “기후변화 적응 및 탄소흡수 증진을 위한 수종육성 연구”의 위탁연구비와 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Campbell, W. J., L. H. Allen, Jr., and G. Bowes, 1988: Effects of CO₂ concentration on rubisco activity, amount, and photosynthesis in soybean leaves. *Plant Physiology* **88**, 1310-1316.
- Chung, M. S., S. H. Han, D. H. Kim, J. C. Lee, and P. G. Kim, 2012: Effects of elevated atmospheric CO₂ and nitrogen fertilization on growth and carbon uptake of yellow poplar seedlings. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**, 108-118. (in Korean with English abstract)
- Clough, J. M., M. M. Peet, and P. J. Kramer, 1981: Effects of high atmospheric CO₂ and sink size on rates of photosynthesis of a soybean cultivar. *Plant Physiology* **67**, 1007-1010.
- Farquhar, G. D., and T. D. Sharkey, 1982: Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review Plant Physiology* **33**, 317-345.
- Hikosaka, J. D., and I. Terashima, 1995: A model of the acclimation of photosynthesis in the leaves of C3 plants to sun and shade with respect to nitrogen use. *Plant Cell Environ.* **18**, 605-618.
- Hiscox, J. D., and G. F. Israelstam, 1978: A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany* **57**, 1332-1334.
- Kim, P. G., and E. J. Lee, 2001a: Ecophysiology of photosynthesis 1: Effects of light intensity and intercellular CO₂ pressure on photosynthesis. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**, 126-133. (in Korean with English abstract)
- Kim, P. G., and E. J. Lee, 2001b: Ecophysiology of photosynthesis 3: Photosynthetic responses to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**, 238-243. (in Korean with English abstract)
- Kim, P. G., S. H. Kim, S. M. Lee, C. H. Lee, and E. J. Lee, 2002: Adaptability to the water relations of *Populus alba* × *P. glandulosa* in 'Kimp'o' waste landfills. *Journal of Korean Forest Society* **91**, 279-286. (in Korean with English abstract)
- Kim, P. G., K. Y. Lee, S. D. Hur, S. H. Kim, and E. J. Lee, 2003: Effects of shading treatment on photosynthetic activity of *Acanthopanax senticosus*. *Korean Journal of Ecology* **26**, 321-326. (in Korean with English abstract)

- Nakamura, I., Y. Onoda, N. Matsushima, J. Yokoyama, M. Kawata, and K. Hikosaka, 2011: Phenotypic and genetic differences in a perennial herb across a natural gradient of CO₂ concentration. *Oecologia* **165**, 809-818.
- Onoda, Y., T. Hirose, and K. Hikosaka, 2009: Does leaf photosynthesis adapt to CO₂-enriched environments? An experiment on plants originating from three natural CO₂ springs. *New Phytologist* **182**, 698-709
- Peet, M. M., 1984: CO₂ enrichment of soybeans. effects of leaf/pod ratio. *Physiologia Plantarum* **60**, 38-42.
- Ro, H. M., P. G. Kim, I. B. Lee, M. S. Yiem, and S. Y. Woo, 2001: Photosynthetic characteristics and growth responses of dwarf apple (*Malus domestica* Borkh. cv. Fuji) saplings after 3 years of exposure to elevated atmospheric carbon dioxide concentration and temperature. *Trees* **15**, 195-203.
- Sage, R. F., T. D. Sharkey, and J. R. Seemann, 1989: Acclimation of photosynthesis to elevated CO₂ in five C₃ Species. *Plant Physiology* **89**, 590-596.
- Spenser, W., and G. Bowes, 1986: Photosynthesis and growth of water hyacinth under CO₂ enrichment. *Plant Physiology* **82**, 528-533.
- Terashima, I., and J. R. Evans, 1988: Effects of light and nitrogen nutrition on the organization of the photosynthetic apparatus in spinach. *Plant Cell Physiol.* **29**, 143-155.
- Usuda, H., and K. Simogawara, 1998: The effects of increased atmospheric carbon dioxide on growth, carbohydrates, and photosynthesis in radish, *Raphanus sativus*. *Plant and Cell Physiology* **39**, 1-7.
- Wellburn, A. R., 1994: The spectral determination of chlorophylls *a* and chlorophyll *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometer of different resolution. *Plant physiology* **144**, 307-313.