한국농림기상학회지, 제16권 제1호(2014) (pISSN 1229-5671, eISSN 2288-1859)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 16, No. 1, (2014), pp. 22~28
DOI: 10.5532/KJAFM.2014.16.1.22
ⓒ Author(s) 2014. CC Attribution 3.0 License.

CO_2 농도 및 기온 상승에 대한 현사시나무의 광합성 반응

이솔지[1] · 오창영[2] · 한심희[2] · 김기우[1] · 김판기[1]*
[1]경북대학교 생태환경시스템학부, [2]국립산림과학원 산림유전자원부
(2014년 2월 20일 접수; 2014년 3월 4일 수정; 2014년 3월 4일 수락)

Photosynthetic Responses of *Populus alba×glandulosa* to Elevated CO_2 Concentration and Air Temperature

Solji Lee[1], Chang-Young Oh[2], Sim-Hee Han[2], Ki Woo Kim[1] and Pan-Gi Kim[1]*
[1]*School of Ecology and Environmental System, Kyungpook National University, Sangju 742-711, Korea*
[2]*Department of Forest Genetic Resources, Korea Forest Research Institute, Suwon 441-350, Korea*
(Received February 20, 2014; Revised March 4, 2014; Accepted March 4, 2014)

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the photosynthetic characters of *Populus alba×glandulosa* cuttings in response to elevated CO_2 concentration and air temperature for selecting tree species adaptive to climate change. The cuttings were grown in environment controlled growth chambers with two combinations of CO_2 concentration and air temperature conditions: (i) 22°C + CO_2 380 μmol mol^{-1} (control) and (ii) 27°C + CO_2 770 μmol mol^{-1} (elevated) for almost three months. The cuttings under the elevated treatment showed reduced tree height and photosynthetic pigment contents such as chlorophyll and carotenoid. In particular, the elevated treatment resulted in a marked reduction in the chlorophyll a closely associated with CO_2 fixative reaction system. Different levels of reduction in photosynthetic characters were found under the elevated treatment. A decrease was noted in photochemical reaction system parameters: net apparent quantum yield (7%) and photosynthetic electron transport rate (14%). Moreover, a significant reduction was obvious in CO_2 fixative reaction system parameters: carboxylation efficiency (52%) and ribulose-1,5-bisphosphate(RuBP) regeneration rate (24%). These results suggest that the low level of photosynthetic capacity may be attributed to the decreased CO_2 fixative reaction system rather than photochemical reaction system.

Key words*: Elevated carbon dioxide, Elevated air temperature, Global warming, Photosynthesis, *Populus alba* × *glandulosa

I. 서 론

기후변화의 주된 요인인 대기 중 CO_2농도는 2012년 393.1μmol mol^{-1}로 산업혁명 이전 278μmol mol^{-1} 수준보다 141% 증가하였다(IPCC, 2013; WMO, 2013). 우리나라에서도 2012년도에 대기 중 CO_2농도가 400.2μmol mol^{-1}로 관측사상 가장 높은 값을 기록하였다(KMA, 2013). CO_2농도 증가와 더불어 지난 133년간 전 지구의 평균기온은 0.85±0.20°C 상승하였으며, 우리나라의 평균기온도 1.8°C 상승한 것으로 나타났다. 이와 같은 대기 중 CO_2농도 상승은 지구적 차원의 큰 문제로 대두되고 있다.

대기 중 CO_2농도 상승은 대기와 식물의 동화기관과의 CO_2분압을 증대시켜 대기에서 광합성기관까지의

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

CO_2확산과 루비스코(rubisco)의 탄소고정반응을 촉진시켜, 광합성능력과 생장을 증대시킨다(Kim and Lee, 2001c). 그러나 식물이 CO_2농도가 상승된 조건에 장기간 노출되면, 광합성 능력이 저하되는 생리적 반응과 다양한 생화학적, 형태적 변화가 나타난다(Kim *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2013). 이러한 광합성능력의 저하는 잉여 광합성산물이 전분립의 형태로 엽록체에 축적되어 막구조를 파괴하거나 CO_2확산을 방해하여 광합성이 억제되기 때문이다(Kim and Lee, 2001c; Ro *et al.*, 2001). 이러한 CO_2농도 상승에 의한 광합성능력의 저하는 광합성산물을 전분의 형태로 저장하는 식물이 당의 형태로 저장하는 식물에 비하여 현저하게 나타난다(Makino and Mae, 1999). 그러나 일부 식물에서는 높은 CO_2농도에서 장기간 생육시켜도 광합성 억제현상이 전혀 나타나지 않는 경우도 보고되고 있다(Sage *et al.*, 1989; Usuda and Simogawara, 1998; Lee *et al.*, 2013).

저자들은 이러한 연구결과에 착안하여 예견되는 기후변화조건에서도 정상적인 생장을 나타내는 조림수종을 탐색하기 위해서, CO_2농도 및 기온 상승이 수목의 생리적 특성에 미치는 연구를 수행하고 있다. 그리고 이 연구의 일환으로 CO_2농도 및 기온 상승이 백합나무(*Liriodendron tulipifera* L.)에 미치는 영향을 연구하였다(Lee *et al.*, 2013). 그 결과, 광합성과 관련된 색소의 함량, 광합성능력, 광화학계 및 탄소고정계의 활성 등의 생리적 특성 변화가 나타나지 않았고, 동화기관을 비롯한 모든 영양기관의 생장이 촉진되었다.

본 연구에서는 선행연구와 동일한 방법으로, CO_2농도 및 기온 상승이 바이오매스(biomass)림 조성에 적합한 수종으로 알려진 현사시나무(*Populus alba* × *glandulosa*)의 광합성생리 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 공시재료 및 시험처리

공시재료는 국립산림과학원 산림유전자원부(경기도 수원시 권선구 온정로 39)에서 제공받은 현사시나무의 휴면지(休眠枝)를 삽목 증식한 묘목이다. 삽목은 산림양묘전용 상토(파워믹스, (사)한국상토제조협회)로 채워진 직경 10cm, 높이 9cm의 화분에 시행하였다. 공시재료를 삽목한 화분을 CO_2농도, 기온 등이 제어되는 식물생육상(DLH-350S, 두영엔시스) 2대에 5개체씩 균등 상치하여, 일장 길이 15시간, 광도 300μmol m^{-2} s^{-1}, 상대습도 RH 75%의 조건에서 육성하였다. 공시재료를 육성하는 동안 수분부족이 일어나지 않도록 1주일에 3회 관수 하였다.

Fig. 1. Cuttings of *P. alba*×*glandulosa* under the ambient condition (control) (left) and the elevated CO_2 concentration and air temperature condition (right).

그리고 2대의 식물생육상 중 1대는 기온을 주간 22°C, 야간 17°C로 설정하고, CO_2농도를 주간 380μmol mol^{-1}, 야간 400μmol mol^{-1}으로 설정하여 대조구로 하였다. 나머지 1대는 대조구보다 기온을 5°C 상승시켜, 주간 27°C, 야간 22°C로 설정하고, CO_2농도는 주간 770μmol mol^{-1}, 야간 790μmol mol^{-1}으로 설정하여, 처리구로 하였다. 이러한 조건에서의 시험처리는 82일간 수행하였으며, 광합성색소의 함량, 광합성특성 등의 시험에는 80일간 양성한 재료를 공시하였다(Fig. 1).

2.2. 광합성관련 색소의 함량 조사

CO_2농도 및 기온 상승이 광합성관련 색소의 함량에 미치는 영향을 조사기 위해 각 시험구의 모든 개체에서 성숙엽을 채취하여 시험에 사용하였다. 현사시나무의 성숙엽을 채취하여 콜크보러(cork borer)로 중앙엽맥을 중심으로 양쪽에서 절편을 채취한 다음, 즉시 생중량을 측정하였다. 그리고 이 절편을 10ml의 dimethyl sulfoxide가 들어 있는 시료병에 넣고 Hiscox and Israelstam(1978)의 방법을 따라 추출하였다. 그리고 추출용액에 함유된 색소의 함량은 Wellburn(1994)의 방법에 따라서 분광광도계(UV-2550, Shimadzu,

Tokyo Japan)로 흡광도를 측정한 다음 잎의 생중량 당 엽록소 a, b, 카로티노이드(carotenoid)의 함량 (mg F.W.g^{-1})을 산출하였다.

2.3. 광합성특성 조사

CO_2농도 및 기온 상승이 광합성특성에 미치는 영향을 조사하기 위해서 각 시험구의 평균적 생장을 나타내는 개체를 3본씩 선발하고, 엽령(leaf age)이 유사한 잎을 측정에 사용하였다. 측정 도중에 일어나기 쉬운 수분스트레스에 의한 광합성 저하를 방지하기 위해서, 측정 전일 암기가 시작되기 전에 충분한 관수를 하였으며, 수체 내의 수분조건이 양호한 시간대, 즉 명기(明期) 시작한 직후부터 4시간까지만 측정을 수행하였다.

측정방법은 Lee *et al.*(2013)과 동일한 방법으로 휴대용 광합성 측정기(Li-6400, Li Cor Inc.)를 사용하여 광도를 조절하면서 각 광량에 따른 광합성 속도를 측정한 다음, 이 측정값을 이용하여 광-광합성곡선(light curve)을 작성하였다. 이 결과를 토대로 암호흡속도, 광보상점, 광포화점, 순양자수율을 산출하였다. 그리고 측정 잎에 공급되는 공기의 CO_2농도를 서로 달리하여 광합성속도를 측정한 다음, 엽육내 CO_2농도를 Farquhar and Sharky(1982)의 방법으로 산출하여 *A-Ci*곡선(*A-Ci* curve)을 작성하였다. 이 결과를 토대로 CO_2보상점, 최대광합성속도, 탄소고정효율, 광호흡속도를 산출하였다. 광-광합성곡선과 *A-Ci*곡선의 해석은 Kim and Lee(2001a)의 방법에 준하였다.

III. 결 과

3.1. 줄기 생장량의 변화

CO_2농도 및 기온 상승이 생장에 미치는 영향을 검토하기 위해서 대조구(control)와 처리구(elevated)로 설정된 식물생육상에서 생장한 개체의 줄기길이의 변화를 Fig. 2에, 처리를 마친 개체의 기관별 건물중 등을 Table 1에 나타냈다.

시험처리를 시작하고 20일이 경과하면서 동아로부터의 줄기발생이 대조구 및 처리구에 상관없이 동일하게 관찰되었다. 그러나 CO_2농도 및 기온을 상승시킨 처리구는 줄기의 길이생장이 대조구에 비하여 완만하게 이루어졌다. 처리 후 30일경에는 처리구의 줄기 생장량이 대조구에 비하여 2.5(±0.3)cm 낮은 값을 나타냈다. 이러한 두 시험구 간의 줄기 생장량 차이는 처리

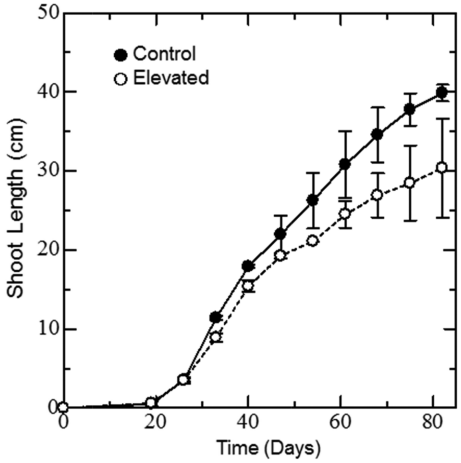

Fig. 2. Temporal progress of shoot length growth of *P. alba* × *glandulosa* cuttings under different CO_2 concentration and air temperature conditions for 82 days.

Table 1. Change in the photosynthetic pigment contents under different CO_2 concentration and air temperature conditions

	Control condition	Elevated condition
Chlorophyll a (mg F.W.g^{-1})	1.75 (±0.60)	1.11 (±0.28)
Chlorophyll b (mg F.W.g^{-1})	0.60 (±0.02)	0.46 (±0.09)
Chlorophyll a+b (mg F.W.g^{-1})	2.35 (±0.12)	1.57 (±0.37)
Chlorophyll a/b (mg mg^{-1} F.W.g^{-1})	2.91 (±0.04)	2.37 (±0.17)
Carotenoid (mg F.W.g^{-1})	0.39 (±0.02)	0.30 (±0.04)

기간이 길어짐에 따라서 크게 나타나 시험처리를 종료한 82일째에는 처리구의 줄기길이가 30.4(±6.2)cm로 대조구의 39.9(±1.1)cm에 비하여 현저하게 낮은 줄기 생장량을 나타냈다. 이러한 결과로 CO_2농도 및 기온 상승에 의하여 현사시나무의 줄기 생장이 억제됨을 알 수 있었다.

3.2. 광합성 관련 색소 함량의 변화

CO_2농도 및 기온 상승이 잎의 질소함량 및 광합성 능력의 지표(Terashima and Evans, 1988; Hikosaka and Terashima, 1995)가 되는 광합성 관련 색소의 함량에 미치는 영향을 조사하기 위해서, 엽록소(a, b, a+b, a/b), 카로티노이드의 함량을 조사하였다(Table 1).

그 결과, CO_2농도 및 기온을 상승시킨 처리구는 대조구에 비하여 광합성 주색소인 엽록소(a+b)의 함량이 낮은 값을 나타냈다. 특히 처리구의 엽록소a는 대조구의 63.4%로 엽록소b의 76.6%에 비하여 현저하게 낮

은 값을 나타냈다. 그리고 광합성 보조색소인 카로티노이드는 엽록소와 마찬가지로 처리구가 대조구에 비하여 낮은 값을 나타냈으나, 그 차이는 매우 작았다. 이러한 결과는 CO_2농도 및 기온 상승에 의하여 현사시나무의 엽내 질소함량이 감소하고 광합성 능력이 저하되었음을 시사하고 있다.

한편 광합성의 광화학계와 탄소고정계에 대한 질소 및 단백질의 배분 지표(Evans, 1989; Terashima and Hikosaka, 1995)가 되는 엽록소a/b는 처리구가 대조구에 비하여 낮은 값을 나타낸다. 이것은 CO_2농도 및 기온 상승에 의하여 엽록소a가 엽록소b에 비하여 현저하게 감소되었음을 의미한다. 또한 탄소고정계에 대한 질소 및 단백질의 배분이 광화학계에 비하여 현저하게 감소되었음을 시사한다.

3.3. 광합성계의 활성 변화

CO_2농도 및 기온 상승이 현사시나무의 광합성에 미치는 영향을 구명하기 위해서 광도 및 CO_2농도 변화에 대한 광합성 반응을 조사하고, 이를 광화학계와 탄소고정계로 구분하여 분석하였다.

3.3.1. 광도변화에 대한 광합성 반응

잎에 조사(照射)되는 광도를 서로 달리하여 측정한 광합성속도를 광-광합성곡선(light curve)으로 나타내고(Fig. 3), 이를 토대로 순양자수율(apparent quantum yield), 암호흡속도(dark respiration), 광보상점(light compensation point), 광포화점(light saturation point), 광합성능력(photosynthetic capacity)를 산출하여 분석하였다(Table 2).

우선 빛에너지를 화학에너지로 변환시키는 효율을 나타내는 순양자수율을 살펴보면, 처리구가 40.43(±1.84) mmol mol^{-1}로 대조구의 37.61(±1.04)mmol mol^{-1}에 비하여 7%정도의 낮은 값을 나타내, CO_2농도 및 기온 상승에 의하여 광화학계의 활성이 다소 저하되었음을 알 수 있었다. 그러나 광보상점은 처리구와 대조구의 차이가 매우 작아, 그 차이를 인정할 수 없었다. 광합성량 및 개체중과 양(+)의 상관관계에 있는 것으로 알려진 암호흡속도(McCree, 1970)는 처리구가 대조구에 비하여 낮은 값을 나타내, 줄기의 생장량(Fig. 2)과 일치된 결과를 나타냈다.

광-광합성곡선에서 광포화점과 광합성능력은 탄소고정계 활성의 지표가 되는데(Kim and Lee, 2001a), 본 연구에서는 처리구의 광포화점이 대조구보다 85.49μmol m^{-2} s^{-1} 낮은 광도에서 나타난다. 그리고 광합성능력은 대조구의 54%에 불과한 값을 나타내, CO_2농도 및 기온 상승에 의하여 광화학계의 활성저하뿐만 아니라 탄소고정계의 활성도 동시에 저하되었음을 시사한다. 이와 같은 현상은 엽내 질소부족에 기인하는 경우로 알려졌는데(Kim and Lee, 2001b), 이것은 엽록소(a+b)함량의 결과(Table 1)와 일치한다.

3.3.2. 엽육내 CO_2농도 변화에 대한 광합성 반응

측정 잎에 공급되는 공기의 CO_2농도를 달리하여 측정한 광합성속도를 *A-Ci*곡선으로 나타내고(Fig. 4), 이를 토대로 탄소고정효율(carboxylation efficiency), 광호흡속도(photo-respiration rate), CO_2보상점(CO_2 compensation point), CO_2포화점(CO_2 saturation point), 최대광합성속도(maximum photosynthesis rate)를 산출하였다(Table 3).

엽록체의 스트로마(stroma)에 도달한 CO_2가 루비스코에 의해서 RuBP(ribulose-1,5-bisphosphate)에 고정되는 효율은 루비스코의 함량에 의하여 결정된다(Farquhar and Sharky, 1982). 이것의 지표가 되는 탄소고정효율을 살펴보면(Kim and Lee, 2001a), 처리구가 16.22(±1.06)μmol mol^{-1}로 대조구의 33.75(±4.02) μmol mol^{-1}의 48%에 불과한 값을 나타내, CO_2농도 및 기온 상승에 의하여 루비스코의 함량이 현저하게 감소되었을 알 수 있다. 그러나 CO_2보상점은 처리구와 대조구의 차이가 매우 작아, 그 차이를 인정할 수 없었다. 루비스코의 탄소고정과 길항적으로 작용하는 광호흡은 처리구가 대조구에 비하여 현저하게 낮은 값을 나타냈다. 이것은 CO_2농도 및 기온 상승에 의하여 루비스코의 함량이 현저하게 감소하였기 때문으로 추측된다.

*A-Ci*곡선에서 대기의 CO_2농도부터 CO_2포화점까지의 *Ci*의 값은 광계II와 광계I에서 일어나는 전자전달의 속도에 의하여 광합성속도가 결정되는 영역이다(Kim and Lee, 2001a). CO_2농도 및 기온 상승이 전자전달속도에 미치는 영향을 검토하기 위해서, CO_2포화점에서의 광합성속도를 산출해보면, 처리구가 8.68μmol m^{-2} s^{-1}로 대조구의 10.06μmol m^{-2} s^{-1}에 비하여 낮은 값을 나타낸다. 이러한 결과로 CO_2농도 및 기온 상승에 의해서 전자전달속도가 14%정도 감소됨이 시사되었다. 그리고 탄소고정계의 재인산화속도

를 나타내는 최대광합성속도를 살펴보면, 처리구가 8.83(±1.12)μmol m^{-2} s^{-1}로 대조구의 11.65(±0.87)μmol m^{-2} s^{-1}에 비하여 현저하게 낮은 값을 나타내, CO_2농도 및 기온 상승에 의해서 재인산화속도가 감소되었음이 시사되었다.

IV. 고 찰

CO_2농도 및 기온이 상승된 조건에 적응력이 높은 식물은 광합성에 대한 질소이용효율 및 수분이용효율이 높고, 광합성산물의 수송능력이 높다(Onoda *et al.*, 2009; Nakamura *et al.*, 2011). 대기의 CO_2농도 및 기온이 상승된 조건에서도 광합성 억제현상이 나타나지 않는다. 그리고 본 연구와 동일한 처리방법으로 실험한 백합나무에서도, CO_2농도 및 기온 상승이 생장량, 광합성 관련 색소의 함량, 광합성능력, 광화학계 및 탄소고정계의 활성에 영향을 미치지 않아, CO_2농도 및 기온 상승에 의한 생리적 장애가 나타나지 않았다(Lee *et al.*, 2013). 그러나 본 연구에서는 CO_2 농도 및 기온 상승에 의하여 현사시나무의 광합성 관련 색소의 함량이 감소하고(Table 1), 광합성계(광화학계 및 탄소고정계)의 활성과 광합성능력이 저하되었으며(Fig. 3, 4, Table 2, 3), 줄기의 생장도 억제되었다(Fig. 2). 이러한 광합성 관련 생리적 활성 저하현상을

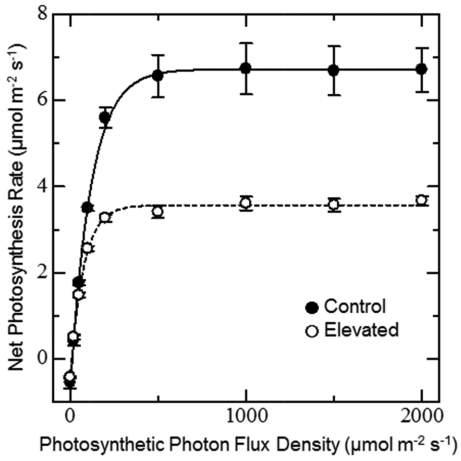

Fig. 3. Light response curves of *P. alba*×*glandulosa* under different CO_2 concentration and air temperature conditions.

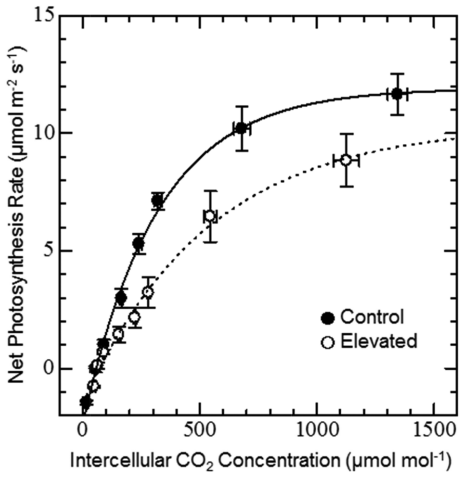

Fig. 4. A-*Ci* curves of *P. alba*×*glandulosa* under different CO_2 concentration and air temperature conditions.

Table 2. Photosynthetic parameters calculated from the light response curves to photosynthesis in Fig. 3.

	Control Condition	Elevated Condition
Apparent Quantum Yield (mmol mol^{-1})	40.43 (±1.84)	37.61 (±1.04)
Dark Respiration Rate (μmol m^{-2} s^{-1})	0.54 (±0.14)	0.42 (±0.02)
Light Compensation Point (μmol m^{-2} s^{-1})	10.58 (±2.98)	9.36 (±0.58)
Light Saturation Point (μmol m^{-2} s^{-1})	294.23 (±35.48)	208.74 (±9.63)
Photosynthetic Capacity (μmol m^{-2} s^{-1})	6.71 (±0.56)	3.62 (±0.15)

Table 3. Photosynthetic parameters calculated from the *A-Ci* curves to photosynthesis in Fig. 4.

	Control Condition	Elevated Condition
Carboxylation Efficiency (μmol $mmol^{-1}$)	33.75 (±4.02)	16.22 (±1.06)
Photo-Respiration Rate (μmol m^{-2} s^{-1})	1.96 (±0.30)	0.91 (±0.05)
CO_2 Compensation Point (μmol mol^{-1} air)	58.16 (±5.22)	56.53 (±6.49)
CO_2 Saturation Point (μmol mol^{-1} air)	648.65 (±37.10)	1027.26 (±34.57)
Maximum Photosynthesis Rate (μmol m^{-2} s^{-1})	11.65 (±0.87)	8.83 (±1.12)

광화학계와 탄소고정계의 반응으로 구분하여 살펴보고자 한다.

우선 CO_2농도 및 기온 상승에 의해서 엽록소의 함량이 감소하고, 광합성계의 활성 및 광합성 능력이 저하되는 현상은 식물 체내 영양조건이 악화되었을 때와 유사한 현상이다(Kim and Lee, 2001b). 그러나 영양조건의 악화만으로 광합성계의 활성과 광합성능력이 저하된 경우에는 엽록소a/b는 변화하지 않고 엽록체의 함량만이 감소되는 것으로 알려져 있다(Terashima and Evans, 1988; Hikosaka, 1996). 그러나 본 연구에서는 CO_2농도 및 기온 상승에 의해서 엽록소a가 36.6%, 엽록소b가 23.4% 감소하여, 엽록소a/b의 값이 낮아지는 현상이 확인된다. 따라서 이를 영양조건의 악화만으로 해석하기에는 곤란하다. 엽록소a는 광화학계와 탄소고정계의 다양한 엽록소단백질복합체를 구성하고, 엽록소b의 대부분은 광화학계의 집광성단백질복합체(light harvesting chl-protein complex) 구성에 사용된다는 점을 고려하면(Evans, 1989; Terashima and Hikosaka, 1995), 엽록소a의 현저한 저하는 광화학계보다는 탄소고정계의 활성을 더 저하시켰을 것으로 추측된다.

이를 명확히 구명하기 위해서, 광-광합성곡선과 *A-Ci*곡선에서 광화학계의 활성을 살펴보면, CO_2농도 및 기온 상승에 의해서 빛에너지를 화학에너지로 변화시키는 효율을 나타내는 순양자수율이 7%, 광계II와 광계I에서 이루어지는 전자전달속도가 14% 감소하였다. 탄소고정계에서는 루비스코가 CO_2수용체인 RuBP에 CO_2를 고정시키는 효율을 나타내는 탄소고정효율이 52%, 환원단계를 거친 RuBP가 재인산화되는 속도가 24% 감소하였다. 이러한 결과를 종합해보면, CO_2농도 및 기온 상승에 의한 현사시나무의 광합성능력 저하는 광화학계 및 탄소고정계의 활성저하가 원인이나, 탄소고정계의 활성저하가 더 크게 작용하였음을 알 수 있다.

적 요

지구온난화와 같은 기후변화에 적응력이 높은 조림수종을 탐색하는 연구의 일환으로 CO_2농도 및 기온 상승이 현사시나무의 광합성생리에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 현사시나무는 CO_2농도 및 기온 상승에 의해서 줄기의 신장생장이 억제되고 광합성 능력이 저하되었다. 그리고 광합성능력과 관련된 색소(엽록소a, b, 카로티노이드)의 함량이 감소하였다. 특히 탄소고정계의 활성과 관련된 엽록소a의 감소가 현저하게 나타났다. 그리고 광-광합성곡선과 *A-Ci*곡선에서 광화학계의 활성을 나타내는 순양자수율이 7%, 전자전달속도가 14% 감소하고, 탄소고정계의 활성을 나타내는 탄소고정효율이 52%, 재인산화속도가 24% 감소하였다. 이러한 결과로 CO_2농도 및 기온 상승에 의한 현사시나무의 광합성능력 저하는 광화학계 및 탄소고정계의 활성저하에 기인하나, 탄소고정계의 활성저하가 더 크게 작용하였음을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 산림청 국립산림과학원 “기후변화 적응 및 탄소흡수 증진을 위한 수종육성 연구”의 위탁연구비와 2013학년도 경북대 학술연구비에 의하여 연구되었다.

REFERENCES

Evans, J. R. 1989: Partitioning of nitrogen between and within leaves grown under different irradiances. *Australian Journal of Plant Physiology* **16**, 533-548.

Farquhar, G. D., and T. D. Sharkey, 1982: Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review Plant Physiology* **33**, 317-345.

Hikosaka, K., 1996: Effects of leaf age, nitrogen nutrition and photon flux density on the organization of the photosynthetic apparatus in leaves of a vine (*Ipomoea tricolor* Cav.) grown horizontally to avoid mutual shading of leaves. *Planta*, **198**, 144-150.

Hikosaka, K., 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 and Environment* **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.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: the Physical Science Basis,* Intergovermental Panel on Climate Change.

Kim, K. W., C. Y. Oh, J. C. Lee, S. Lee, and P. G. Kim, 2013: Alteration of leaf surface structures of poplars under elevated air temperature and carbon dioxide concentration. *Applied Microscopy* **43**, 110-116.

Kim, P. G., and E. J. Lee, 2001a: 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. (in

Korean).

Kim, P. G., and E. J. Lee, 2001b: Ecophysiology of photosynthesis 2: Adaptation of the photosynthetic apparatus to changing environment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**, 171-176. (in Korean)

Kim, P. G., and E. J. Lee, 2001c: Ecophysiology of photosynthesis 3: Photosynthetic responses to elevated atmospheric CO_2 concentration and temperature. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**, 238-243. (in Korean)

KMA, 2013: *Roport of Global Atmosphere Watch 2012,* Korea Meteorological Administration, 25pp.

Lee, H. S., S. Lee, J. C. Lee, K. W. Kim, and P. G. Kim, 2013: Effects of elevated CO_2 concentration and temperature on physiological characters of *Liriodendron tulipifera*. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**, 145-152. (in Korean with English abstract)

Makino, A., and T. Mae, 1999: Photosynthesis and Plant Growth at Elevated Levels of CO_2 *Plant Cell Physiology* **40**, 999-1006.

McCree, K. J., 1970: An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions. *Prediction and measurements of photosynthetic productivity Proc. IBP/PP Tech. Meet.,* I. Setlik (ed), Trebon, **1969**, 221-230.

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 CO_2 concentration. *Oecologia* **165**, 809-818.

Onoda, Y., T. Hirose, and K. Hikosaka, 2009: Does leaf photosynthesis adapt to CO_2-enriched environments? An experiment on plants originating from three natural CO_2 springs. *New Phytologist* **182**, 698-709

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 CO_2 in five C3 Species. *Plant Physiology* **89**, 590-596.

Terashima, I., and J. R. Evans, 1988: Effects of light and nitrogen nutrition on the organization of the photosynthetic apparatus in spinach. *Plant and Cell Physiology* **29**, 143-155.

Terashima, I., and K. Hikosaka, 1995: Comparative ecophysiology of leaf and canopy photosynthesis. *Plant and Cell Physiology* **18**, 1111-1128.

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.

WMO, 2013: *The Global Climate 2001-2010*, World Meteorological Organization.