

## 차나무, 동백나무, 귤나무 앞에서 엽록소 형광 및 CO<sub>2</sub> 흡수능의 비교 분석

오순자 · 이진호<sup>1</sup> · 고광섭<sup>1</sup> · 고석찬<sup>2,\*</sup>

(사)제주생태교육연구소, <sup>1</sup>(주)장원 실록차연구소, <sup>2</sup>제주대학교 생물학과

## Chlorophyll Fluorescence and CO<sub>2</sub> Fixation Capacity in Leaves of *Camellia sinensis*, *Camellia japonica*, and *Citrus unshiu*

Soonja Oh, Jin-ho Lee<sup>1</sup>, Kwang-Sup Ko<sup>1</sup> and Seok Chan Koh<sup>2,\*</sup>

Environmental Research and Education Institute, Jeju 690-150, Korea

<sup>1</sup>Sulloc Cha Institute of Jangwon Co. Ltd., Jeju 697-922, Korea

<sup>2</sup>Department of Biology, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

**Abstract** - The chlorophyll fluorescence and photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation capacity of leaves from three major crop trees found on Jeju Island, *Camellia sinensis* L., *Camellia japonica* L., and *Citrus unshiu* M., were analyzed. The photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation rate of *C. sinensis* was similar to that of *C. unshiu*, and much higher than that of *C. japonica* which belongs to the same genus. Stomatal conductance in the three species was high at dawn and low during daytime. The intercellular CO<sub>2</sub> concentration of the three species was also high at dawn and decreased at midday. The transpiration rate showed an opposite trend from the intercellular CO<sub>2</sub> concentration. The photochemical efficiencies of PSII (Fv/Fm) in *C. sinensis* were slightly lower at midday compared to the level at dawn and/or dusk. The decline in Fv/Fm of *C. sinensis* at midday was much smaller than that of *C. japonica*. These results indicate that *C. sinensis* is better acclimated to high levels of radiation under natural conditions in late summer, although its PSII reaction center was inhibited by strong radiation. Of the chlorophyll fluorescence parameters in the species, the RC/CS decreased significantly while the ABS/RC, TRo/RC, ETo/RC, and DIO/RC increased significantly at midday in late summer. However, *C. unshiu* did not show significant changes in these values depending on the time of day. Among the three species, the daily CO<sub>2</sub> fixation rate in *C. sinensis* (320.1 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) was the highest, followed by that of *C. unshiu* (292.5 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) and *C. japonica* (244.8 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Thus, *C. sinensis* may be a valuable crop tree in terms of the uptake of CO<sub>2</sub> under natural field conditions.

**Key words** : *Camellia sinensis*, *Camellia japonica*, *Citrus unshiu*, photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation rate, photochemical efficiency of PSII

\* Corresponding author: Seok Chan Koh, Tel. 064-754-3528,  
Fax. 064-756-3541, E-mail. sckoh@jejunu.ac.kr

## 서 론

산업혁명 이후 화석연료 사용의 증가, 삼림의 훼손 및 전용 등으로 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도는 계속 증가하였다. 대기 중 CO<sub>2</sub>의 함량은 1850년에 약 280 ppm이었으나 지속적으로 증가하고 있으며 우리나라에서는 현재 394.5 ppm에 이르는 것으로 조사되고 있다(2010년 기상청 안면도 지구대기 감시센터 자료). 앞으로도 인구증가와 경제활동의 가속화로 인해 CO<sub>2</sub> 방출량은 지속적으로 증가할 것으로 보인다(IPCC 2007). 지구온난화의 원인이 되는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 수소불화탄소(HFCs), 육불화황(SF<sub>6</sub>) 등은 산업활동이나 일상생활과 밀접하게 연관되어 대기 중으로 배출되고 있다(Ramanathan 1989).

농업 활동은 비료, 농약 등의 사용으로 인해 지구온난화를 야기하기도 하지만, 수질정화, 수자원 함양, 토양침식 방지, 공기정화 등과 같은 환경을 보호하는 다원적 기능을 가지고 있다(임 2007). 그리고, 광합성에 의한 생체량의 증가는 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 생물체 내의 현존량으로 고정하는 수단임과 동시에 유용하게 이용할 수 있는 자원이라 할 수 있다. 따라서 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도 조절 기능으로서 농업 활동을 재검토할 필요가 있으며, 그 일환으로서 주요 과수, 조경수나 농작물들을 대상으로 식물의 광합성 특성을 살펴볼 필요가 있다. 특히, 일년생 작물과는 다르게 과수나 조경수 등의 수목은 다년생으로 산림과 일정 부분 유사한 생태적 특성을 갖고 있다. 하지만 현재 재배수목에 대한 CO<sub>2</sub> 고정 능력에 대한 평가는 거의 없는 실정이다. 이들 수목에 대한 CO<sub>2</sub> 고정 능력이 평가될 경우 CO<sub>2</sub> 배출원으로 인식되고 있는 수목재배의 부정적 이미지 개선에 기여하고 수목재배가 지구온난화 억제에 기여한다는 친환경적 이미지를 부여할 수 있을 것이다(김 등 2007; 임 2007). 하지만, 환경요인의 변화에 따른 광합성, 호흡, 증산, 기공전도도를 포함한 식물의 생리적 반응이나 내성, 생산성 등에 대한 연구는 미미하다.

차나무(*Camellia sinensis* L.)는 차나무과(Theaceae)에 속하는 아열대성의 목본성 상록식물로 아시아를 중심으로 아프리카, 남아메리카 등 30여 개국 이상에서 재배되고 있다. 우리나라에서는 전라도, 경상남도, 제주도 등에서 재배하고 있으며, 최근 건강음료에 대한 선호와 웰빙 붐을 타고 음료로서 뿐만 아니라 건강식품, 다이어트식품, 화장품 등에도 이용되고 있어 시장규모가 증가할 것으로 보인다. 차나무에 대한 연구는 주로 성분분석, 효능 등이 주를 이루고 있으며, 재배조건이나 가공방법에 따

른 성분변화, 형질전환, 육종연구를 위한 기초로서의 유연관계 분석, 품종개량을 위한 연구 등도 이루어지고 있다(오와 고 2005; 제 등 2005; 임 등 2008). 차나무와 동일한 속에 해당하는 동백나무(*C. japonica* L.)는 아시아 원산으로 일본으로부터 중국 남부에 걸쳐서 분포하고 있으며, 우리나라에서는 주로 전남과 제주 지역에 자생하거나 식재되어 있다. 차나무가 없는 지역에서는 예로부터 동백나무 어린잎을 차의 재료로 사용하였다는 기록이 있으며(Hwang *et al.* 2004), 성분 및 여러 약리학적 효과에 대해서도 보고되고 있다. 귤나무(*Citrus unshiu* M.)는 운향과(Rutaceae)에 속하는 제주지역의 주요 과수작물로서 이에 대한 연구는 주로 재배법과 병충해 방제, 기능성 등에 중점을 두어 이루어지고 있으며 환경요인의 변화에 따른 광합성적 반응에 대한 연구는 거의 없다.

식물은 성장과정에서 광합성을 통해 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 흡수·저장하여 대기중 CO<sub>2</sub> 농도를 저감하는 역할을 한다. 특히 수목에 의한 CO<sub>2</sub> 흡수 및 고정은 대기 중 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 효과적인 수단 중의 하나로 인정되고 있다(Laclau 2003). 수목의 탄소 흡수 및 저장량은 수고, 흉고직경, 생체량, 건중량 등을 토대로 추정하고 있다(조와 안 2000; Prakash and Lodhiyal 2009). 그러나 이러한 기존의 방법은 나무를 벌채하여 분석하여야 하는 어려움이 있고 많은 인력과 비용을 요구한다. 반면에, 식물의 광합성 특성을 활용한 CO<sub>2</sub> 흡수능의 측정은 비파괴적이고 인력과 비용을 많이 필요로 하지 않는다는 측면에서 유리하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구는 자연조건 하에서 차나무(*Camellia sinensis* L.), 같은과의 동백나무(*C. japonica* L.), 그리고 제주지역의 주요 과수작물인 귤나무(*Citrus unshiu* M.)를 대상으로 잎의 엽록소형광과 CO<sub>2</sub> 고정능 등을 측정하고 비교 분석하여, 이를 토대로 차나무의 탄소흡수원으로서의 가치를 살펴보고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 식물재료

본 실험에 사용된 재료는 제주도 도순 장원산업의 차나무 농원 내에 있는 차나무(*Camellia sinensis* L.; 근원직경 62.6±11.3 cm, 수고 0.9±0.01 m), 인접한 감귤 농원의 귤나무(*Citrus unshiu* M.; 근원직경 84.7±3.3 cm, 수고 2.3±0.04 m), 그리고 차나무 농원 내에 조경수로 식재되어 있는 동백나무(*C. japonica* L.; 근원직경 90.9±3.2 cm, 수고 1.9±0.1 m)의 잎을 사용하였다. 실험에 사

용한 잎은 수관의 상단부 또는 남쪽면의 자연광을 받는 봄 잎 중에서 엽색이 비슷하고 엽록소계 (SPAD-502, Minolta Co. Ltd., Japan)를 이용하여 측정된 값이 70~85의 범위에 해당하는 비교적 균일한 잎을 사용하였다. 모든 조사는 2009년 9월 6~13일 사이에 수행하였다.

## 2. 환경요인 분석

환경요인으로는 온도, 상대습도, 광량을 조사하였으며, 온도와 상대습도는 TR-72 Thermo Recorder (T&D Co. Ltd., Japan)를, 광량은 휴대용 CO<sub>2</sub> 분석장치(LCpro+ Portable Photosynthesis System, ADC, BioScientific Ltd., UK)를 이용하여 측정하였다. 환경요인은 조사기간 동안 일출 시간대인 새벽 6시부터 일몰 시간대인 20시까지 측정하였으며, 이들 조사용 센서는 측정 대상 식물체의 높이에 설치하여 10회 반복하여 측정하였다.

## 3. 엽록소형광 분석

엽록소형광은 Plant Efficiency Analyzer (PEA; Hansatech Instrument Ltd., UK)를 사용하여 일출 시간대인 새벽 6시부터 일몰 시간대인 20시까지 2시간 간격으로 측정하였다. 식물의 잎을 15분간 광을 차단하여 암적응시키고 1,500  $\mu\text{mole m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광량을 5초 동안 조사하여 Fo, Fm, Fv/Fm 등의 기본 형광변수를 측정하였다(오 등 2001). 또한 RC/CS(엽면적당 활성상태의 반응중심의 상대적 밀도), ABS/RC(반응중심 광계II 활성), TRo/RC(들뜬 광자를 포획하는 능력), ETo/RC(전자전달 능력), DIo/RC(비광화학적 에너지 소실) 등을 산출하여 제시하였다(Table 1).

## 4. 광합성 특성 조사

광합성은 휴대용 CO<sub>2</sub> 분석장치를 사용하여 수관의 상단부 또는 남쪽면의 빛을 잘 받는 잎을 대상으로 일출 시간대인 새벽 6시부터 일몰 시간대인 20시까지 2시간 간격으로 측정하였다. CO<sub>2</sub>의 공급은 4m 높이의 대기 유

입안테나를 사용하여 220  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 유속으로 공기를 공급하는 것으로 대신하였다. 잎 챔버 내 CO<sub>2</sub> 농도가 대기의 CO<sub>2</sub> 농도와 비슷해지면 식물 잎을 잎 챔버에 물리고 잎은 2분간 안정화시킨 후 자연광 하에서 CO<sub>2</sub> 고정율(A), 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도(Ci), 기공전도도(g<sub>s</sub>), 증산율(E) 등의 광합성 특성을 조사하였다(de Souza *et al.* 2005).

## 5. 통계 분석

CO<sub>2</sub> 고정율(A)과 환경 요인(광량, 온도, 상대습도) 또는 광합성 변수(Ci, g<sub>s</sub>, E 등)와의 관계는 SPSS 통계 package (SPSS Inc., Release 7.5)를 이용하여 Pearson 상관분석을 수행하였다.

## 결 과

### 1. 환경요인의 일변화

차나무 재배 지역의 환경요인으로 조사기간 동안의 광량, 온도, 상대습도의 일변화를 살펴보았다(Fig. 1). 광

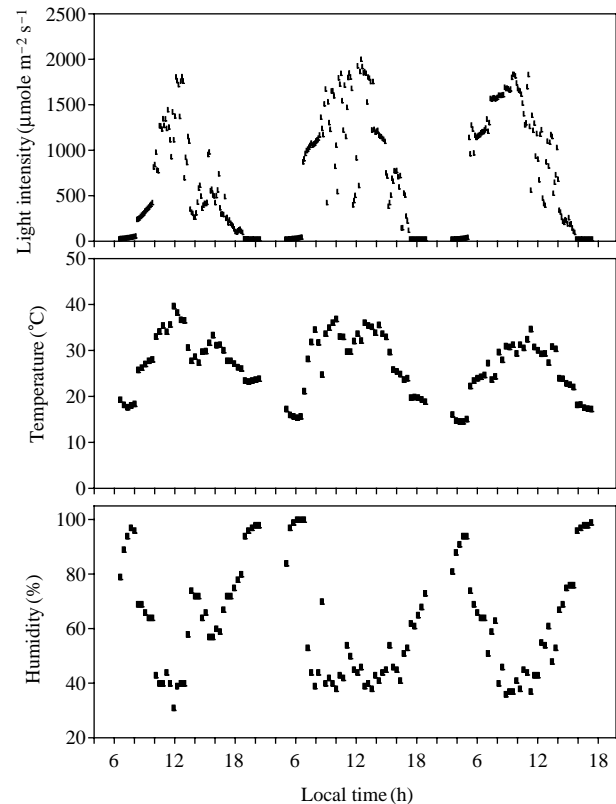
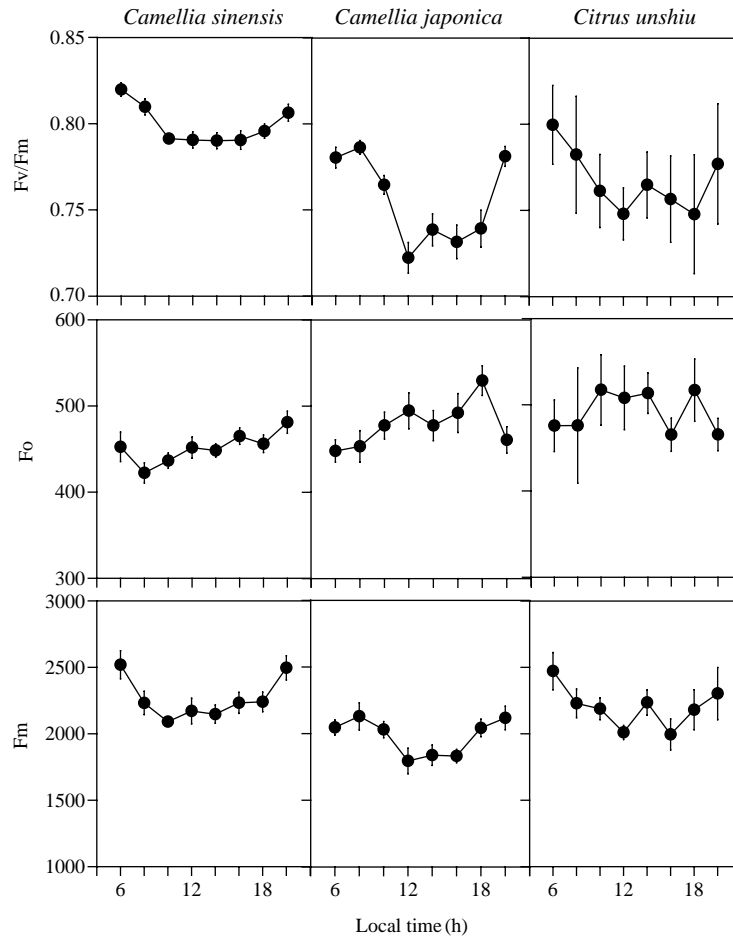


Fig. 1. Daily changes of environmental factors (light intensity, air temperature and relative humidity) in the field of *Camellia sinensis* in late summer.

Table 1. Short description of chlorophyll fluorescence parameters used in the study

Abbreviation	Description
Fo	Initial fluorescence in dark adapted tissue
Fm	Maximum fluorescence in dark adapted tissue
Fv/Fm	Photochemical efficiencies of PS II
ABS/RC	Absorption flux of photons per active reaction center
TRo/RC	Trapping of electrons per active reaction center
ETo/RC	Electron flux per active reaction center beyond Q <sub>A</sub> <sup>-</sup>
DIo/RC	Dissipation of electrons per active reaction center
RC/CS	Active reaction center per cross section



**Fig. 2.** Daily change of chlorophyll fluorescence parameters (Fv/Fm, Fo and Fm) in leaves of *Camellia sinensis*, *C. japonica* and *Citrus unshiu* under the field conditions in late summer.

량은 오전 7시를 전후하여 점차 증가하여 12시에 대략  $2,000 \mu\text{mole m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 18시 이후에는  $500 \mu\text{mole m}^{-2} \text{s}^{-1}$  이하로 점차 감소하였다. 그리고 온도는 새벽과 저녁에  $20^\circ\text{C}$  이하로 낮았으며, 광량이 많은 낮 시간(12:00)에는 대략  $35 \sim 40^\circ\text{C}$ 로 높았다. 새벽과 밤의 기온은 낮 시간의 최고온도보다 대략  $15 \sim 20^\circ\text{C}$  정도 하강하여 밤과 낮의 일교차가 높게 나타났다. 상대습도는 광량과 온도가 높은 낮에 40% 이하로 낮았으며 새벽과 저녁에는 80% 이상으로 높았다.

## 2. 엽록소형광의 일변화

차나무, 동백나무, 귤나무 잎의 엽록소형광의 일변화를 측정하였다(Fig. 2). 광계II의 광화학적 효율, 즉 Fv/Fm의 변화를 살펴보면, 차나무는 새벽(06:00)에 0.82로 안정된 값을 보이고 낮 시간(12:00)에는 0.79로 다소 낮아졌다가 저녁에 다시 증가하는 양상을 보였다. 동백나무도

Fv/Fm값이 낮 시간에 감소하고 이후에 증가하는 양상을 보였으나 일변화의 폭이 차나무에 비하여 훨씬 컸다. 귤나무도 Fv/Fm값이 낮 시간에 다소 낮아지나 통계학적인 유의성은 없었다. 그리고, 3종 모두 낮 시간에 Fo의 미약한 증가와 Fm의 감소를 동반하였다. 여러 형광변수들 중에 RC/CS는 3종 모두 낮 시간에 감소하였으며, 저녁에 다시 증가하였다(Table 2). 그리고 ABS/RC, TRo/RC, ETo/RC와 DIo/RC는 차나무와 동백나무에서 낮 시간에 증가하였다. 귤나무에서도 이들 변수들이 낮 시간에 다소 증가하였으나 5% 수준에서 통계학적인 유의성은 없는 것으로 나타났다.

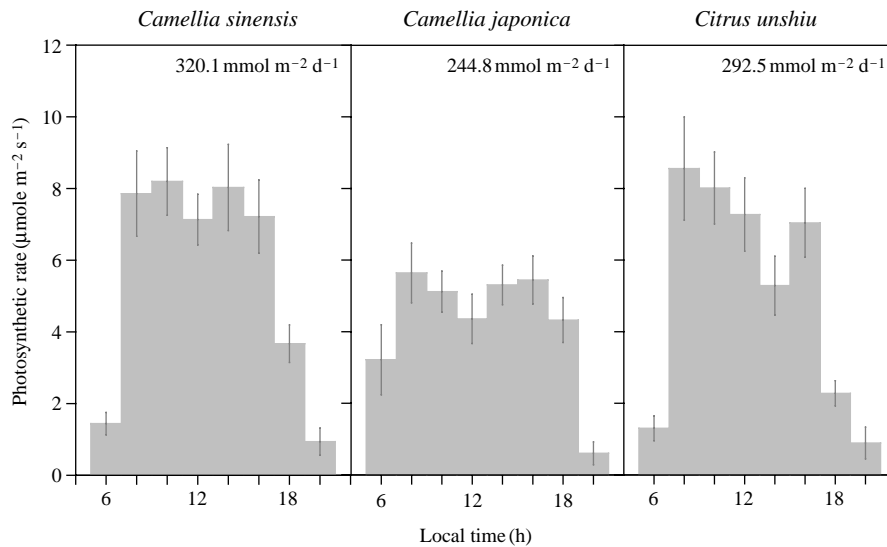
## 3. CO<sub>2</sub> 고정율, 기공전도도, 증산률 및 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도의 일변화

CO<sub>2</sub> 고정율의 일변화 양상은 3종 모두 2개의 peak를 갖는 곡선으로 나타났으나, 최대 CO<sub>2</sub> 고정율이 종간에

**Table 2.** Daily changes of chlorophyll fluorescence parameters of PSII from leaves of *Camellia sinensis*, *C. japonica* and *Citrus unshiu* under the field conditions in late summer

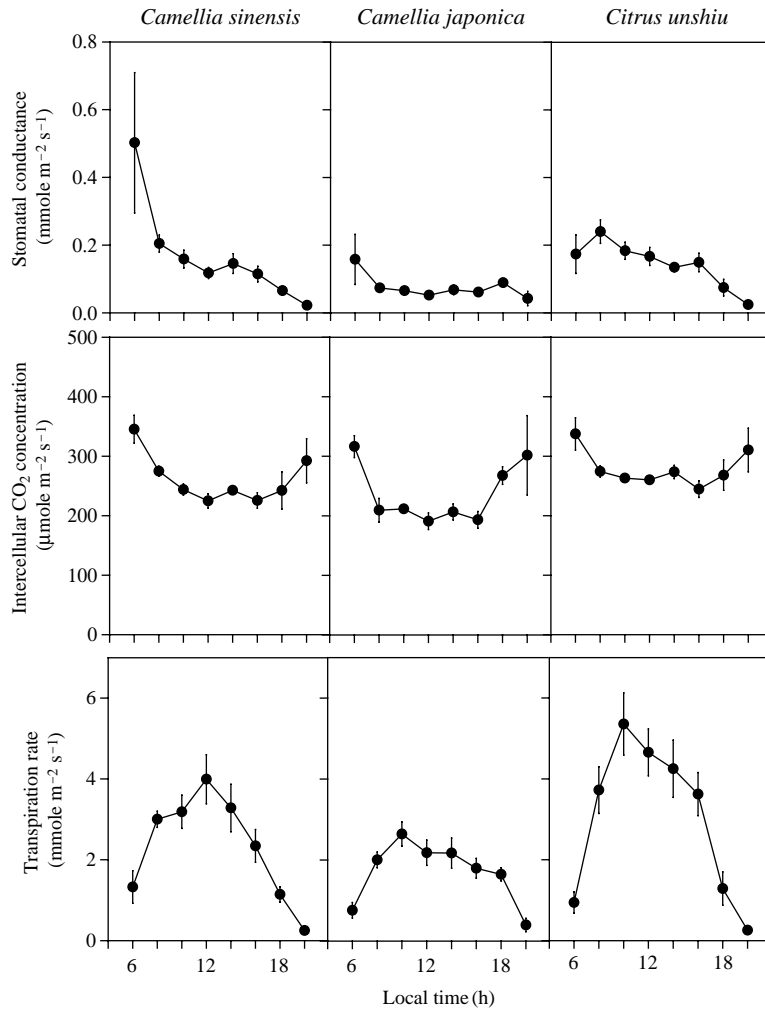
Species		RC/CS	ABS/RC	TRo/RC	ETo/RC	DIo/RC
<i>Camellia sinensis</i> L.	Dawn	541.0 <sup>b</sup>	0.88 <sup>a</sup>	0.72 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>	0.17 <sup>a</sup>
	Midday	415.7 <sup>a</sup>	1.12 <sup>b</sup>	0.88 <sup>b</sup>	0.63 <sup>b</sup>	0.24 <sup>b</sup>
	Dusk	548.5 <sup>b</sup>	0.92 <sup>a</sup>	0.74 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>	0.19 <sup>a</sup>
<i>Camellia japonica</i> L.	Dawn	372.6 <sup>b</sup>	1.28 <sup>a</sup>	0.98 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	0.30 <sup>a</sup>
	Midday	307.6 <sup>a</sup>	1.65 <sup>b</sup>	1.18 <sup>b</sup>	0.87 <sup>b</sup>	0.47 <sup>b</sup>
	Dusk	417.8 <sup>c</sup>	1.16 <sup>a</sup>	0.89 <sup>a</sup>	0.56 <sup>a</sup>	0.27 <sup>a</sup>
<i>Citrus unshiu</i> M.	Dawn	555.8 <sup>b</sup>	0.97 <sup>a</sup>	0.74 <sup>a</sup>	0.43 <sup>a</sup>	0.23 <sup>a</sup>
	Midday	407.5 <sup>a</sup>	1.32 <sup>a</sup>	0.96 <sup>a</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.36 <sup>a</sup>
	Dusk	520.9 <sup>b</sup>	1.07 <sup>a</sup>	0.77 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>	0.30 <sup>a</sup>

Means with different letters are significantly different at the level of  $P=0.05$  by Duncan's multiple range test.

**Fig. 3.** Daily change of photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation rate in leaves of *Camellia sinensis*, *C. japonica* and *Citrus unshiu* under the field conditions in late summer.

다소의 차이를 보였다 (Fig. 3). 차나무와 귤나무의 CO<sub>2</sub> 고정율은 동백나무보다 높았으며, 차나무는 오전과 오후 유사한 CO<sub>2</sub> 고정율을, 귤나무는 오전에 높은 양상을 보였다. 특히, 차나무와 귤나무 잎의 CO<sub>2</sub> 고정율은 08:00~16:00 사이에 각각 7.13~8.19  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 와 5.29~8.55  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 동백나무 (4.35~5.63  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )보다 훨씬 높았다. 그렇지만 차나무와 동백나무는 정오(12:00)에 CO<sub>2</sub> 고정의 일시적인 감소를 보이는 데 반해, 귤나무는 늦은 낮 시간(14:00)에 감소하는 양상을 보였다. 일동화율은 차나무가 320.1  $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 귤나무와 동백나무는 각각 292.5  $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 와 244.8  $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다. 기공전도도( $g_s$ )는 3종 모두 새벽에는 높고 이후 저녁 시간까지 계속하여 감소하는 경향을 나타내었다 (Fig. 4A). 특히 차나무에서 새벽에 기공전도도가 높게 나타났다. 그리고, 동백나무는 차

나무나 귤나무와는 달리 전반적으로 낮은 양상으로 보였다. 잎의 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도( $C_i$ )는 차나무, 동백나무, 귤나무 모두에서 아침에 높고 낮 시간에 감소하였다가 저녁에 다시 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 4B). 특히, 동백나무와 차나무는 낮 시간에 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도가 급격히 낮아져 각각 190.9~211.6  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 와 224.8~242.7  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 낮게 유지되었다. 귤나무도 낮 시간에 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도가 감소하였지만 244.6~273.4  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 차나무와 동백나무와는 달리 다소 높게 유지되었다. 잎의 증산율(E)은 일출 직후부터 급격히 증가하여 낮 시간에 높아졌다가 저녁에 다시 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 4C). 특히, 귤나무 잎은 광량과 온도가 높은 낮 시간에 증산율이 4.24~5.36  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 차나무 잎도 낮 시간에 3.19~3.99  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 비교적 높게 나타났다.



**Fig. 4.** Daily change of stomatal conductance ( $g_s$ ), intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ) and transpiration rate ( $E$ ) in leaves of *Camellia sinensis*, *C. japonica* and *Citrus unshiu* under the field conditions in late summer.

## 고찰

식물체의 성장과 발달에는 최적의 환경 조건이 필요하며, 이 범위를 벗어나면 식물체에 스트레스로 작용하게 된다. 차나무의 생육적온은 22°C 전후로 신초의 수량이 22°C에서 최고에 달하고, 22°C 이상이 되거나 이하에서는 감소하는 것으로 보고되었다(Wijeratne *et al.* 2007). 또한 차나무의 최대 광합성율은 포화광 하에서 엽온이 25~30°C 범위에서 나타나며, 35°C 이상에서는 점차 감소하여 40°C 이상에서는 완전히 정지되는 것으로 보고된 바 있다(Hadfield 1975). 동백나무도 15~25°C에서 최대 광합성율을 보이고, 그 이상의 온도에서는 점차 감소하는 것으로 보고되었다(Liu *et al.* 2003). 제주도는 한반도의 최남단에 위치하며 일반적인 기후분류상 아열대

기후대에서 온대기후대로의 전이지대에 위치하고 있다. 최근 5년간 차나무가 재배되고 있는 제주도 서귀포시 지역의 8월 최고기온을 살펴보면 30~35°C 전후를 보여 낮 시간의 온도가 차나무나 동백나무 등에 스트레스로 작용할 수 있을 것으로 보이며, 이는 Fig. 2에서 살펴본 바와 같이 Fv/Fm의 감소로 확인할 수 있다.

그러나 본 연구에서 이들 3종의 식물에서 낮시간의 Fv/Fm의 감소는 그 정도가 작고 저녁에 회복되는 것으로 보아 자연 상태에서 또는 최적의 환경 조건에서 자라고 있는 식물에서도 널리 볼 수 있는 현상이다(Ögren and Evans 1992). 일반적으로 Fv/Fm값이 0.8보다 낮을 때는 광계II의 반응중심이 손상을 입은 상태이거나 불활성 상태에 처해있다고 할 수 있다(Bolhàr-Nordenkamp *et al.* 1989). 본 연구에서 이들 3종의 식물에서 낮시간의 Fv/Fm 감소는 광계II 반응중심의 손상이라기보다 불활성

화에 기인한 일시적인 광역제인 것으로 보인다. 이는 Fig. 2의 Fo와 Fm값의 변화로도 확인할 수 있는데 3종 모두 낮 시간에 Fo의 미약한 증가와 더불어 Fm의 감소를 수반하고 있다. 암적응된 상태에서 관찰되는 Fo는 초기 전자수용체인 plastoquinone Q<sub>A</sub>(Q<sub>A</sub>)가 산화상태에 있을 때의 형광값으로 여기된 에너지가 광계II 반응중심으로 이동하기 전 광계II 안테나의 여기된 엽록소분자들이 방출하는 값이다 (Bolhàr-Nordenkamp and Öquist 1993). 식물이 스트레스를 받으면 일반적으로 Fo가 증가하는데, 이는 광계II 반응중심에 불활성 상태의 엽록소분자들이 증가한 결과라고 해석될 수 있다. Fm은 Q<sub>A</sub>가 완전히 환원된 상태의 형광이며, 스트레스를 받은 식물에서는 보통 Fm의 감소가 나타난다. 본 연구에서 3종 모두 낮 시간에 Fm이 큰 폭으로 감소하여 낮 시간의 고휘도와 고온에 의해 이들 3종의 식물체가 스트레스를 받고 있음을 의미하며, 잎 단위면적당 광계II 안테나에 산화상태의 엽록소분자들이 적어서 나타나는 결과로 해석할 수 있다. 이러한 Fm의 감소와 Fo의 증가로부터 광수확복합체와 광계II 엽록소의 에너지 분배가 낮 시간의 고휘도에 의해 영향을 받고 있으며, 반응중심을 포함한 모든 엽록소분자들의 빛 흡수용량 역시 감소되고 있음을 알 수 있다 (Flagella *et al.* 1994). Table 2에서 RC/CS가 3종 모두 낮 시간에 감소하여 엽면적당 활성상태의 반응중심의 상대적 밀도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 광계II 반응중심의 불활성화는 Fig. 2에서 살펴본 바와 같이 Fo의 증가와 Fm의 감소에 의한 Fv/Fm의 감소를 야기한다. 또한 ABS/RC, TRo/RC, ETo/RC와 DIo/RC 모두가 차나무와 동백나무에서 낮 시간에 증가하여 활성상태의 반응중심당 광흡수량과 전자포획활성이 증가하며, 활성상태의 반응중심당 흡수된 에너지의 대부분이 전자전달에 이용될 뿐만 아니라 비광화합적으로 버려지는 에너지 또한 많음을 보여주고 있다. 굴나무에서도 이들 변수들이 낮 시간에 다소 증가하였으나 통계적 유의성은 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 토대로 낮 시간의 환경조건이 3종의 식물에 스트레스로 작용하고 있으며, 이는 불활성상태의 반응중심이 많아진 결과라고 할 수

있다.

식물 잎의 CO<sub>2</sub> 고정율은 식물의 광합성능을 평가하는 지표로 중요하며, 광합성 수준과 변화를 직접적으로 반영한다고 할 수 있다. CO<sub>2</sub> 고정율의 일변화는 일반적으로 단일 peak를 갖는 곡선과 이중 peak를 갖는 곡선으로 구분할 수 있다 (Zhang *et al.* 2006; Ding *et al.* 2011). Fig. 3에서 살펴본 바와 같이 본 연구에서는 3종 모두 2개의 peak를 갖는 곡선으로 나타났다. 2개의 peak 사이에 생기는 낮 시간의 광합성을 저하는 Fig. 1과 Fig. 2에서 살펴본 바와 같이 낮 시간의 고휘도와 고온으로 인한 광역제의 결과라고 할 수 있다. 이러한 낮 시간에 광합성율의 저하는 고휘도 조건에서 과도하게 여기된 에너지 때문이며, 자연 조건에서 자라는 자몽 (*Citrus paradisi*)에서도 본 연구와 유사한 결과를 볼 수 있다 (Jifon and Syvertsen 2003).

차나무의 광합성에 미치는 환경 요소는 광량, 온도, 습도 이외에도 토양의 물리·화학적 변화, 식물체내의 질소 및 인산을 비롯한 성분의 변화 등에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Mohotti and Lawlor 2002). 또한 계절적인 환경 변화는 차나무 신초의 생장에도 영향을 미치는 바, 계절별 환경요소의 변화에 따른 차나무의 생리적 변화를 다각도로 살펴볼 필요가 있다. CO<sub>2</sub> 고정율 (A)과 기상요인 (광량, 온도, 상대습도)의 관계를 살펴보면, 광량과 온도는 3종 모두에서 CO<sub>2</sub> 고정율과 1% 수준에서 정의 상관관계를, 상대습도는 1% 수준에서 유의성이 있는 음의 상관관계를 보여 이들 기상요인이 광합성과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 그리고, 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도 (C<sub>i</sub>)와 증산율 (E)은 3종 모두에서 CO<sub>2</sub> 고정율 (A)과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다 (Table 3). 특히, 증산율은 3종 모두에서 1% 수준에서 고도의 유의성이 인정되었으며, 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도는 차나무와 동백나무 잎은 1% 수준에서, 굴나무에서는 5% 수준에서 유의성이 인정되었다. 잎의 증산율은 차나무, 동백나무, 굴나무 모두 일출 직후부터 급격히 증가하여 낮 시간에 높은 증산율을 보여 Fig. 3의 CO<sub>2</sub> 고정율 패턴과 유사하였다. 특이한 것은 차나무의 낮 시간의 증산

**Table 3.** Correlation of photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation rate (A) to environmental factors (light, air temperature and relative humidity) and photosynthetic parameters (g<sub>s</sub>, C<sub>i</sub> and E) measured under the field conditions in late summer

Species	Environmental factors			Photosynthetic parameters		
	Light intensity	Temperature	Relative humidity	g <sub>s</sub>	C <sub>i</sub>	E
<i>Camellia sinensis</i> L.	0.550**	0.522**	-0.444**	0.052	-0.329**	0.766**
<i>Camellia japonica</i> L.	0.326**	0.419**	-0.383**	0.114	-0.429**	0.582**
<i>Citrus unshiu</i> M.	0.656**	0.587**	-0.597**	0.591**	-0.303*	0.621**

\*The data showed significant correlation at  $P=0.05$  level.

\*\*The data indicated significant correlation at  $P=0.01$  level.

율이 굴나무에 비하여 훨씬 낮은 데 반하여 동백나무보다 높았다. 잎에서의 증산은 세포의 수분 포텐셜을 감소시켜 식물에 수분 스트레스를 발생시키며, 그로 인해 생장의 정지, 기공폐쇄, 광합성 저하 등이 발생하여 식물에 여러 가지 영향을 미치게 된다. 그러므로 여름철의 낮시간에 심한 수분 스트레스를 받을 수 있으며, 굴나무는 차나무와 동백나무보다 낮시간에 수분 스트레스를 받기 쉬운 것으로 보인다. Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 3종 모두에서 낮 시간에 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도가 낮은 것은 낮 시간에 광합성에 의해 엽육 내 CO<sub>2</sub>를 활발하게 이용한 반면에 기공전도도가 낮아진 때문으로 보이며, 새벽이나 저녁 시간의 엽육세포간극의 CO<sub>2</sub> 농도의 증가는 낮은 광도로 인하여 대기 중 CO<sub>2</sub> 이용효율의 낮고 기공전도도가 증가한 결과로 해석할 수 있다. 기공의 개폐는 주위의 환경 즉, 광합성유효복사, 온도, 습도, 이산화탄소 농도 등의 영향을 받으며, 기공전도도(g<sub>s</sub>)는 기공개도의 대소를 판별할 수 있는 지표인 동시에 광합성과 증산작용에 밀접하게 관여하는 인자로 알려져 있다(Allen 1990). Fig. 4A에서 살펴본 바와 같이 차나무를 포함한 3종 모두 이른 오전시간에 기공전도도가 높고 이후에 점차 감소하는 패턴을 보였으나, Table 3에서 제시한 바와 같이 굴나무 잎에서만 CO<sub>2</sub> 고정율과 유의성이 인정되었다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 차나무와 굴나무는 동백나무에 비하여 일동화율이 높지만 증산율에 있어서는 굴나무가 차나무보다 훨씬 높았다. 이러한 사실로 미루어 보아 굴나무는 차나무에 비해서 수분요구량(water requirement)이 높고 수분이용효율(water use efficiency)은 낮은 것으로 보인다. 반면에 차나무는 일동화율이 높을 뿐만 아니라 굴나무보다 수분요구량은 낮고 수분이용효율은 높아 건조한 조건에서도 생산성이 상대적으로 높을 것으로 생각된다(Jones 1993). 식물의 수분 스트레스로 인한 농업생산력 저하, 식물분포의 제한 등은 열대지방의 건조 또는 반건조 지역을 중심으로 발생되고 있다. 더군다나 농작물을 포함하는 야외식물의 수분 스트레스는 단독으로 발생하기보다 고온이나 고광 등의 스트레스와 함께 복합적으로 발생하는 것이 일반적이다. 따라서 차나무는 제주도 주요 작물인 굴나무보다도 일동화율이 높을 뿐만 아니라 수분이용효율 또한 높아 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도를 줄일 수 있는 작물수종으로 중요한 의미를 갖는다고 볼 수 있다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 차나무는 같은 과의 동백나무나 제주지역의 주요 과수작물인 굴나무보다 일동화율 및 수분이용효율이 높을 뿐만 아니라 낮 시간의 광역제 정도도 낮아 대기 중의 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 유용한 작물수종으로 보인다. 그러나 차나무 재배에 있어서 신

초의 채취, 전지 및 전정 등의 관리행위에 의하여 흡수한 CO<sub>2</sub>의 상당량이 손실되고 있다. 따라서 실제 차나무 농원에서의 관리 실태를 파악하고 인위적 관리 하에서 개체 수준 또는 재배면적 수준에서 CO<sub>2</sub> 흡수원으로서의 가치를 다각적으로 검토할 필요가 있다고 사료된다.

## 적 요

본 연구는 차나무(*Camellia sinensis* L.)와 동백나무(*C. japonica* L.), 제주지역의 주요 과수작물인 굴나무(*Citrus unshiu* M.) 잎을 대상으로 엽록소형광과 CO<sub>2</sub> 흡수능을 비교 분석하여 탄소흡수원으로서의 가치를 평가하고자 하였다. 차나무의 CO<sub>2</sub> 고정율은 같은 과의 동백나무보다 높고 과수작물인 굴나무와 유사하였다. 기공전도도(g<sub>s</sub>)는 3종 모두 새벽에는 높고 이후 저녁 시간까지 계속하여 감소하였다. 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도(C<sub>i</sub>)는 3종 모두 새벽(06:00)에 높고 낮에 감소하였다가 저녁에 다시 증가하는 경향을 보였으며, 잎의 증산율(E)은 낮 시간에 높아졌다가 저녁에 감소하였다. 차나무에서 광계II의 광화학적 효율(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)은 낮시간에 다소 낮아졌다가 저녁에 다시 증가하는 양상을 보였다. 이러한 낮시간의 F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> 감소는 광역제의 결과로 보이며 그 감소폭이 동백나무보다 적어 빛이나 고온 등에 내성을 가지고 있음을 알 수 있다. 엽면적당 활성상태의 반응중심의 상대적 밀도를 의미하는 RC/CS는 3종 모두 낮시간에 감소하였다. ABS/RC, TRo/RC, ET<sub>o</sub>/RC와 DI<sub>o</sub>/RC는 차나무와 동백나무에서 낮시간에 증가하였으며, 굴나무에서도 낮시간에 증가하였으나 유의성이 없는 것으로 나타났다. 일동화율은 차나무가 320.1 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>로 가장 높았으며, 굴나무와 동백나무는 각각 292.5 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>와 244.8 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>로 나타났다. 이상의 결과를 토대로 차나무는 광합성율이 높고 낮 시간의 광역제도 낮을 뿐만 아니라, 굴나무보다 수분요구량이 낮고 수분이용효율은 높아 탄소흡수원으로서 유용한 작물수종인 것으로 보인다.

## 사 사

이 논문은 2009년도 (주)아모레퍼시픽의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 진심으로 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

김춘식, 안현철, 조현서, 추갑철. 2007. 묘포지내 토양개량제



- 처리가 토양 이산화탄소 방출에 미치는 영향. 농업기술 연구소집. 20:57-63.
- 오순자, 고석찬. 2005. 차나무 잎의 캘러스 배양을 통한 카테킨류의 생산성 개선. 한국자원식물학회지. 18:351-358.
- 오순자, 고정근, 김응식, 오문유, 고석찬. 2001. 한라산 구상나무 잎의 엽록소형광의 일변화와 계절적 변화. 한국환경생물학회지. 19:43-48.
- 임창숙, 최창현, 박용구. 2008. 내한성 유전자를 이용한 차나무의 형질전환. 한국차학회지. 14:105-122.
- 임형백. 2007. 환경교육에서의 농업의 다원적 기능. 한국환경교육학회지. 20:36-53.
- 제순자, 오주성, 전은희, 이용호, 정영수, 정대수. 2005. 남부지방 수집종 차나무 (*Camellia sinensis* L.) 유연관계 분석. 한국차학회지. 11:79-95.
- 조현길, 안태원. 2000. 자연생태계 수목의 생장에 따른 탄소 저장 및 흡수량 지표. 한국환경생태학회지. 14:175-182.
- Allen LH. 1990. Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants. J. Environ. Qual. 19:15-34.
- Bolh ar-Nordenkampf HR and G  quist. 1993. Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. pp. 193-206. In Photosynthesis and Production in a Changing Environment: A Field and Laboratory Manual (Hall DO, JMO Scurlock, HR Bolh ar-Nordenkampf, RC Leegood and SP Long eds.). Chapman and Hall. London.
- Bolh ar-Nordenkampf HR, SP Long, NR Baker, G  quist, U Schreiber and EG Lechner. 1989. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation. Functional Ecol. 3:497-514.
- de Souza RP, RV Ribeiro, EC Machado, RF de Oliveira and JAG da Silveira. 2005. Photosynthetic responses of young cashew plants to varying environmental conditions. Pesq. Agropec. Bras. 40:735-744.
- Ding YF, CY Wang, CM Neo, XX Zhang, LL Shi, YW Zhang, FY Yang and YJ Liu. 2011. Diurnal changes in net photosynthetic rate of *Pueraria lobata* and its impact factors. For. Stud. China 13:57-63.
- Flagella Z, D Pastore, RG Campanile and N Di Fonzo. 1994. Photochemical quenching of chlorophyll fluorescence and drought tolerance in different durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars. J. Agric. Sc. Cambridge 122:183-192.
- Hadfield W. 1975. The effect of high temperatures on some aspects of the physiology and cultivation of the tea bush, *Camellia sinensis*, in Northeast India. pp. 477-495. In Light as an Ecological Factor II (Evans GC, R Bainbridge and O Rackham eds.). The 16th Symposium of the British Ecological Society. Blackwell Scientific Publications. Oxford.
- Hwang EJ, YJ Cha, MH Park, JW Lee and SY Lee. 2004. Cytotoxicity and chemosensitizing effect of camellia (*Camellia japonica*) tea extracts. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr. 33: 487-493.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: Mitigation of climate change, Contribution working group shos contribution to the fourth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. p. 176. Cambridge University Press. Cambridge New York, USA.
- Jifon JL and JP Syvertsen. 2003. Moderate shade can increase net gas exchange and reduce photoinhibition in citrus leaves. Tree Physiol. 23:119-127.
- Jones HG. 1993. Drought tolerance and water-use efficiency. pp. 193-206. In Water Deficits: Plant Responses from Cell to Community (Smith JAC and H Griffiths eds.). BIOS Scientific Publishers, Oxford.
- Laclau P. 2003. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pion plantations and native cypress forests in northwest patagonia. For. Ecol. Manag. 180:317-333.
- Liu D, S Zhao, Z Zhang and Y Liu. 2003. Photosynthesis of different cultivars of *Camellia japonica* L. in greenhouse. Acta Horticulturae Sinica 30:65-68.
-  gren E and JR Evans. 1992. Photoinhibition of photosynthesis *in situ* in six species of Eucalyptus. Australian J. Plant Physiol. 19:223-232.
- Prakash S and LS Lodhiyal. 2009. Biomass and carbon allocation in 8-year-old poplar (*Populus deltoides* Marsh) plantation in tarai agroforestry systems of central himalaya, India. New York Science J. 2:49-53.
- Ramanathan V. 1989. Observed increases in greenhouse gases and predicted climatic changes. pp. 239-247. In the Challenge of Global Warming (Abrahamson DE ed.). Island Press. Washington DC.
- Wijeratne MA, A Anandacoomaraswamy, MKSLD Amarathunga, J Ratnasiri, BRSB Basnayake and N Kalra. 2007. Assessment of impact of climate change on productivity of tea (*Camellia sinensis* L.) plantations in Sri Lanka. J. Natn. Sci. Foundation Sri Lanka 35:119-126.
- Zhang ZA, F Yang, ZY Chen and KZ Xu. 2006. Relationship between diurnal changes of net photosynthetic rate and environmental factors in leaves of *Zizania latifolia*. Sci. Agr. Sin. 39:502-509.

Received: 26 January 2012

Revised: 21 May 2012

Revision accepted: 22 May 2012