

ORIGINAL ARTICLE

## 제주지역 주요 활엽수의 대기 중 CO<sub>2</sub> 흡수율과 수분이용효율의 계절적 변화

오순자 · 김현철<sup>1)</sup> · 강희석<sup>2)</sup> · 신창훈<sup>2)</sup> · 고석찬<sup>3)</sup>\*

농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소, <sup>1)</sup>제주특별자치도 한라생태숲, <sup>2)</sup>제주특별자치도 세계유산본부 한라수목원, <sup>3)</sup>제주대학교 생물학과

## Seasonal Change in the CO<sub>2</sub> Fixation Rate and Water-Use Efficiency of Broad-leaved Tree Species on Jeju Island

Soonja Oh, Hyoun-Chol Kim<sup>1)</sup>, Hee-Suk Kang<sup>2)</sup>, Chang-Hoon Shin<sup>2)</sup>, Seok Chan Koh<sup>3)</sup>\*

Research Institute of Climate Change and Agriculture, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Jeju 63240, Korea

<sup>1)</sup>Halla Eco-forest, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju 63312, Korea

<sup>2)</sup>Halla Arboretum, World Heritage Office, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju 63341, Korea

<sup>3)</sup>Department of Biology, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

### Abstract

Seasonal changes in the CO<sub>2</sub> fixation rate and water-use efficiency in the leaves of six evergreen and two deciduous broad-leaved tree species on Jeju Island, Korea, were measured using a portable photosynthesis analyzer, to identify which species are most efficient in taking up CO<sub>2</sub> from the air. The CO<sub>2</sub> fixation rate was high in the deciduous species in spring and summer and decreased in fall, whereas it was high in the evergreen species in summer and fall and decreased in winter. The rate remained high in the deciduous tree *Prunus yedoensis* from spring to fall (> 7.1 μmol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/s) and in two evergreen trees, *Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* and *Cinnamomum camphora*, in summer and fall (7.0 - 9.9 μmol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/s). Therefore, these tree species fix atmospheric CO<sub>2</sub> effectively. The water-use efficiency was higher in evergreen species than in deciduous species regardless of the season. Exceptionally, it was high in the deciduous species *Zelkova serrata* in spring and summer (> 100 μmol CO<sub>2</sub>/mol H<sub>2</sub>O), suggesting that *Z. serrata* is a useful tree for dry conditions due to its tolerance of water stress. The regressions of the CO<sub>2</sub> fixation rate versus the evaporation rate and stomatal conductance were linear and non-linear, respectively. This suggests that the stomatal activity of leaves plays an important part in CO<sub>2</sub> fixation of plants. In conclusion, *C. cuspidata* var. *sieboldii*, *C. camphora*, and *P. yedoensis* should be planted along roads or in urban spaces for the greening of cities and mitigation of CO<sub>2</sub> concentrations in the air.

**Key words** : *Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii*, CO<sub>2</sub> fixation rate, *Prunus yedoensis*, Water-use efficiency, *Zelkova serrata*

Received 25 November, 2019; Revised 16 January, 2020;

Accepted 16 January, 2020

\*Corresponding author: Seok Chan Koh, Department of Biology, Jeju National University, Jeju 63241, Korea  
Phone : +82-64-754-3528  
E-mail : skkoh@jejunu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

산업혁명 이후 화석연료 사용의 증가, 삼림의 훼손 및 전용에 따른 손실 등 다양한 산업활동의 영향으로 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 비롯한 온실가스들의 대기 중 농도는 꾸준히 증가하였다. 대기 중 CO<sub>2</sub>의 농도는 1850년에 약 280 ppm이었으나 산업혁명 이후 계속 증가하여 현재는 412.2 ppm(2017년 기상청 안면도 지구대기감시센터, <https://data.kma.go.kr/data/gaw>)이며, 앞으로도 인구증가와 경제활동의 가속화로 인해 CO<sub>2</sub> 방출량이 지속적으로 증가하고, 지구의 평균 표면온도도 1.6~6.4℃ 증가할 것으로 예측되고 있다(IPCC, 2007). 더군다나 최근 30년(1981-2010) 동안 우리나라의 연평균 온도가 0.7℃ 상승하였고, 앞으로도 지속적으로 상승할 것으로 예측된다(KMA, 2011).

지구온난화 또는 온실효과의 약 60%가 대기 중 CO<sub>2</sub> 증가로부터 기인한 것임을 고려하였을 때, 탄소저장원인 산림의 훼손이나 전용은 지구온난화를 가중하는 주요 요인이라고 할 수 있다(Ciborowski, 1989; Rodhe, 1990). 국가마다 정도의 차이는 있으나 CO<sub>2</sub>의 배출량을 줄이기 위해 엄청난 연구비를 투자하여 온실가스 배출의 감축 및 흡수원에 의한 저감 대책을 추진하고 있으며 이를 위해 국가차원의 대응체제를 구축하고 있다. 특히 선진국에서는 온실효과를 유발하는 주요 원인인 CO<sub>2</sub>의 배출을 감축하는 기술뿐만 아니라 산림, 토양 등 CO<sub>2</sub> 흡수원에 대하여 많은 연구를 수행하고 있다. 따라서 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도를 효율적으로 조절할 수 있는 대책이 필요하며, 식물의 광합성 작용을 이용한 CO<sub>2</sub> 저감은 가장 근본적인 대책 중에 하나이다(Yu et al., 2016; Su et al., 2017). 수목에 의한 CO<sub>2</sub> 흡수 및 탄소고정은 대기 중 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 효과적인 수단 중의 하나로 인정되고 있으며(Laclau, 2003; Biswas et al., 2014), 증산속도, 기공전도도, 수분이용효율 등도 함께 측정이 가능하여 식물의 생리생태적인 측면과 더불어 효율적인 종 보전, 적지적수 판단의 기준자료로도 활용할 수 있어 그 의미는 크다고 할 수 있다. 현재 우리나라에서도 온실가스 흡수증진을 위한 산림관리기법, 목질계 바이오매스 에너지 이용 등과 같이 산림 탄소흡수원의 관리와 활용을 통한 온실가스 흡수 증진과 관련된 연구가 진행되고 있다(Jo, 2002; Lee et al., 2009). 또한 수목과 산림의 탄소저감

효과를 계량화하고자 하는 연구들이 활발히 시도되고 있으며(Yoon et al., 2013; Kim and Lee, 2016; Park et al., 2018), 탄소 흡수 능력을 높이기 위한 조경수목의 가로식재 가이드라인을 제시하고 있다(Kim, 2013)

본 연구에서는 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 효율적으로 저감시킬 수 있는 수종을 선별하고자 제주지역에 널리 분포하며 가로수로 활용되고 있는 활엽교목 8종(상록성 교목 6종과 낙엽성 교목 2종)을 대상으로 계절별 광합성에 의한 CO<sub>2</sub> 흡수율과 수분이용효율을 측정하고 비교하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 식물재료

본 연구에서는 한라수목원(N33°28' E126°29', 168.7 m, Jeju, Korea) 내에 조성되어 있는 활엽교목 중에 반경 25 m 이내에 식재된 상록성 교목 6종과 낙엽성 교목 2종을 대상으로 하였으며, 각각의 수종별로 균일하게 자란 4개체를 선정하여 측정하였다(Table 1). 상록성 수종으로 구실잣밤나무(*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai), 녹나무(*Cinnamomum camphora* Sieb.), 담팔수(*Elaeocarpus sylvestris* var. *ellipticus* Hara), 먼나무(*Ilex rotunda* Thunb.), 후박나무(*Machilus thunbergii* S. et Z.), 후피향나무(*Ternstroemia japonica* Thunb.)를, 낙엽성 수종으로 왕벚나무(*Prunus yedoensis* Matsumura), 느티나무(*Zelkova serrata* Makino)를 선정하였다. 실험에 사용한 잎은 1.5 m 높이의 수관에 달려 있고 자연광에 노출되고 완전히 전개된 잎 중에서 색깔이 비슷하고 균일한 상태의 잎을 개체당 3개씩 선정하여 실험재료로 사용하였다.

### 2.2. 기상환경

온도, 상대습도, 강수량 및 일사량은 제주기상청에서 조사기간(2011년 4월~2012년 2월) 동안 측정된 자료를 사용하였다.

### 2.3. CO<sub>2</sub> 흡수율과 수분이용효율의 측정

CO<sub>2</sub> 흡수율(Photosynthetic rate)은 LED 광원이 부착된 LCpro<sup>+</sup> Portable Photosynthesis System(ADC Bio Scientific Ltd., Hoddesdon, UK)을 이용하여 2011년 4월부터 2012년 2월까지 봄철(4월 하순~6월 중순), 여름철(7월 중순~9월 초순), 가을철(10월 초순~11월

**Table 1.** Description of 8 broad-leaved tree species investigated in this study

Leaf habit	Scientific Name	Korean Name	DBH(cm)	Family Name
Evergreen plant	<i>Castanopsis cuspidata</i> var. <i>sieboldii</i> Nakai	구실잣밤나무	40.3±6.5*	Fagaceae
	<i>Cinnamomum camphora</i> Sieb.	녹나무	12.4±0.5	Lauraceae
	<i>Elaeocarpus sylvestris</i> var. <i>ellipticus</i> Hara	담팔수	11.3±0.4	Elaeocarpaceae
	<i>Ilex rotunda</i> Thunb.	먼나무	9.5±0.3	Aquifoliaceae
	<i>Machilus thunbergii</i> S. et Z.	후박나무	30.8±3.7	Lauraceae
	<i>Ternstroemia japonica</i> Thunb.	후피향나무	11.8±2.6	Theaceae
Deciduous plant	<i>Prunus yedoensis</i> Matsumura	왕벚나무	14.9±2.4	Rosaceae
	<i>Zelkova serrata</i> Makino	느티나무	14.6±6.0	Ulmaceae

\*Each value represents the mean ± SE measured from four independent plants.

초순), 겨울철(12월 하순~이듬해 2월 하순)의 맑은 날 오전 9시부터 13시 사이에 측정하였다. 계절별로 3-4회에 걸쳐 수종당 4개체씩 선정하여 개체당 3개의 잎을 대상으로 하여 총 36-48 반복으로 측정하였다. 잎 챔버로 유입되는 공기는 4 m 높이의 대기 유입안테나를 사용하여 220 mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>의 유속으로 공급하였으며, 잎 챔버 내 CO<sub>2</sub> 농도가 대기의 CO<sub>2</sub> 농도와 비슷해지면 식물 잎을 잎 챔버에 물렸다. 챔버 속의 잎은 10분간 500 μmole/m<sup>2</sup>/s의 광으로 적응시킨 후 1,600 μmole/m<sup>2</sup>/s의 포화광을 5분간 조사하여 엽면적당 CO<sub>2</sub> 흡수율을 측정하였다. 아울러 증산률(Transpiration rate), 기공전도도(Stomatal conductance) 등도 함께 측정하였다. 수분이용효율(Water-use efficiency)은 CO<sub>2</sub> 흡수율을 기공전도도로 나누어 산출하였다.

#### 2.4. 통계분석

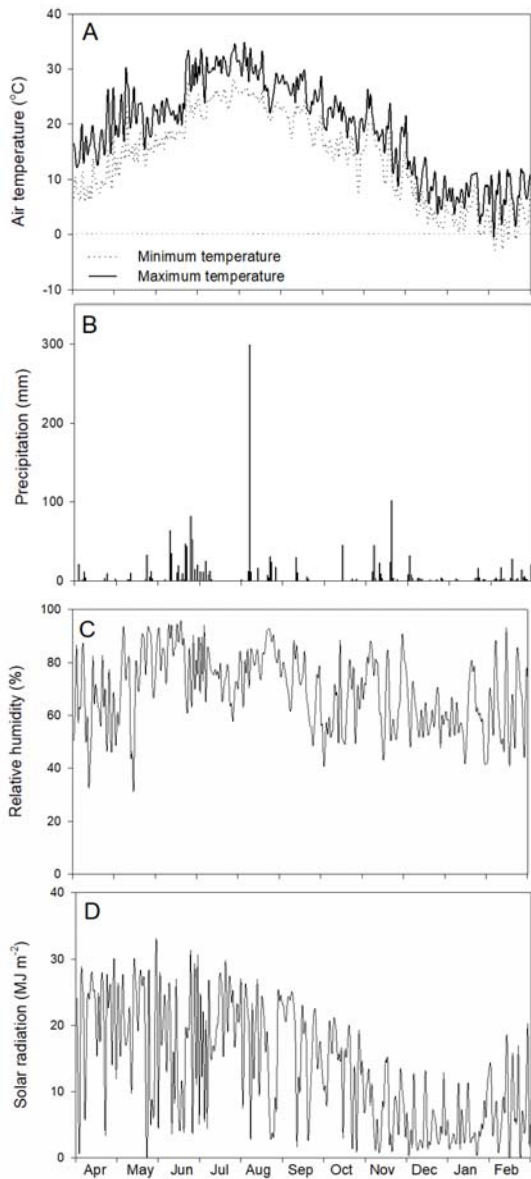
CO<sub>2</sub> 흡수율과 증산률 또는 기공전도도 간에는 Pearson 상관분석을 수행하고, 선형 및 비선형 회귀분석을 시도하여 가장 적합한 회귀식을 결정하였다. 모든 통계분석은 SPSS 통계 패키지 18.0(SPSS, Chicago, IL, USA)을 이용하였으며, ANOVA에 이은 Duncan의 다중검정(p<0.05)으로 평균치 간의 차이에 대한 유의성을 검정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 기상 요인의 계절적 변화

본 연구를 수행하는 기간 동안의 제주지역 기상자료를 분석해 보면(Fig. 1), 기온은 6월부터 9월까지는 월평

균 온도가 21℃를 상회하였으며, 7월에 월평균 온도가 27.3℃ (최저온도 24.5℃, 최고온도 30.7℃)로 가장 높았다. 10월 초순부터 기온이 20℃ 이하로 점차 낮아지면서 12월부터는 월평균 온도가 10℃ 이하로 현저히 낮아졌으며, 10℃ 이하인 기간이 4개월(12월, 1~3월)이나 되었다. 특히, 2월에 월평균 온도가 4.8℃ (최저온도 2.3℃, 최고온도 7.4℃)로 가장 낮았다(Fig. 1A). 강수량은 여름철에 높고 강우의 빈도도 6~8월에 집중되어 있다. 이에 반해 4~5월과 9~10월, 12~1월의 6개월간은 강우의 빈도도 낮고 극히 적은 양의 강수량만을 기록하고 있다(Fig. 1B). 상대습도는 계절에 관계없이 대부분이 60% 이상을 유지하였으나 늦은 봄철(5~6월)과 여름철(7~9월)에는 기온상승에도 불구하고 집중적인 강우로 인해 월평균 70% 이상의 비교적 높은 상대습도를 유지하였다. 반면, 12월에서 이듬 해 1월까지의 강우량이 적어서 60% 이하의 낮은 상대습도를 나타내었다(Fig. 1C). 일일직사일사량은 기복이 심하였으며, 4~8월까지의 25 MJ/m<sup>2</sup>를 상회하였으나 9월부터 점차 감소하여 12월에서 이듬 해 2월까지의 10 MJ/m<sup>2</sup> 이하로 낮아졌다(Fig. 1D). 일사량의 기복이 심하게 나타난 것은 흐리거나 비 또는 눈이 내린 날이 많았음을 나타내고 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 기상요인 중에 온도가 겨울철에 변화 폭이 크며 뚜렷하게 낮아지고 있고, 10℃ 이하의 온도를 보이는 기간이 많을 뿐만 아니라 일평균기온은 대부분 0℃ 이상이지만 영하의 기온을 나타낼 때도 간혹 있어, 저온이 스트레스 요인으로 작용할 가능성을 보여주고 있다. 그리고, 강수량이 적어 저온 스트레스와 더불어 수분 스트레스가 발생할 우려가 있다.



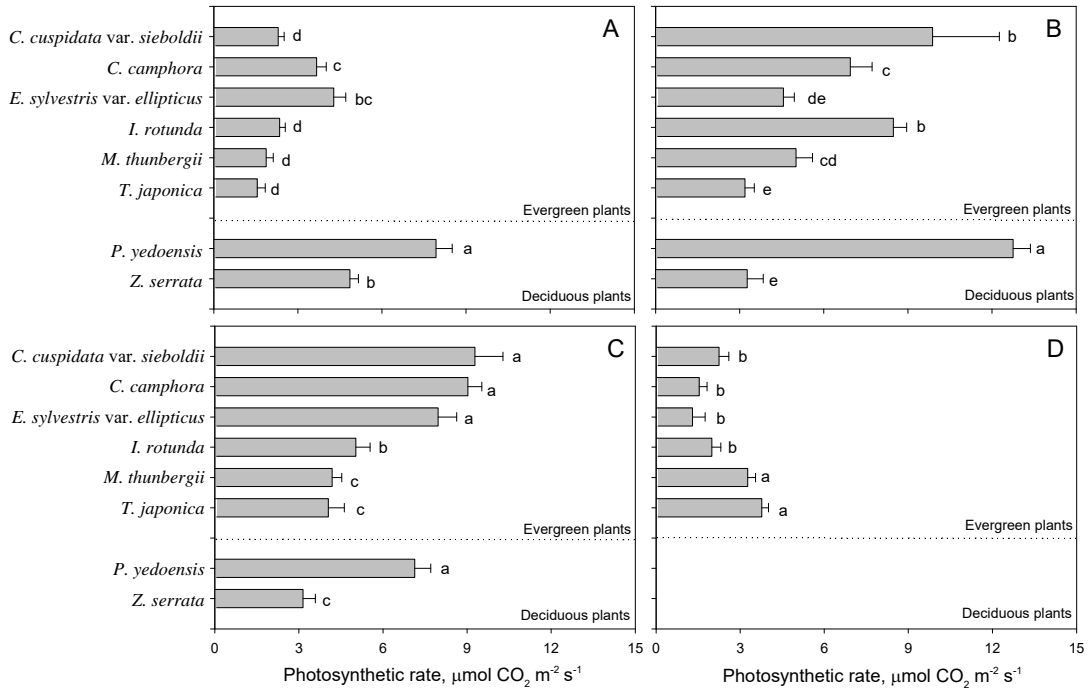
**Fig. 1.** Seasonal changes of air temperature (A), precipitation (B), relative humidity (C), and solar radiation (D) determined in the Jeju meteorological station during the experimental period (April 2011-February 2012). Data were represented as the daily averages. Solid and dotted lines in A represent maximum and minimum temperatures, respectively.

### 3.2. CO<sub>2</sub> 흡수율의 중간 비교

제주지역에 분포하고 있으면서 가로수로 널리 식재되

고 있는 활엽교목 8종을 대상으로 계절별 엽면적당 CO<sub>2</sub> 흡수율을  $p < 0.05$ 에서 비교하였다(Fig. 2). 봄철에는 낙엽성 교목이 상록성 교목보다 높은 CO<sub>2</sub> 흡수율을 보였다. 특히 왕벚나무는  $7.93 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ 로 가장 높았으며, 느티나무( $4.86 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ )도 상록성 수종들에 비하여 높았다(Fig. 2A). 여름철에도 왕벚나무는  $12.75 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ 로 가장 높았다. 그러나 낙엽성 교목인 느티나무( $3.27 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ )는 봄철과는 달리 상록성 교목들 보다도 더 낮았다. 상록성 교목 간에는 여름철에 종에 따라 차이를 보였으며, 구실잣밤나무와 먼나무가  $8.5 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  이상의 흡수율을 보여 다른 수종에 비해 2-3배 높게 나타났다. 그리고 녹나무와 후박나무도 여름철에  $5.0 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  이상으로 비교적 높은 흡수율을 보였다(Fig. 2B). 가을철에는 대체로 여름철과 유사하였으나 왕벚나무의 CO<sub>2</sub> 흡수율이  $7.13 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ 로 여름철보다 크게 낮았다. 그리고 구실잣밤나무, 녹나무와 담팔수가  $8.0\text{-}9.3 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ 로 비교적 높은 흡수율을 보였다(Fig. 2C). 겨울철에는 상록성 교목 모두  $4.0 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  이하의 낮은 흡수율을 보였으며, 낙엽성 교목들은 잎이 완전히 노화되거나 낙엽이 되어서 측정할 수 없었다(Fig. 2D).

식물 앞의 CO<sub>2</sub> 흡수율은 광합성 수준을 직접적으로 반영한다고 할 수 있으며, 식물의 광합성능을 평가하는 지표로 중요하다. 식물에 의한 CO<sub>2</sub> 흡수량은 빛의 강도와 여러 기상요소의 영향으로 시시각각 변하며, 생물계절, 상록수 및 활엽수와 같은 식물의 유형, 동일 종내에서도 개체의 연령, 생육환경 등에 의해서도 크게 영향을 받는다(Oh et al., 2012b; Oh et al., 2013a; Oh et al., 2013b; Koh et al., 2014). 대만 생태계 프로세스 모델(Taiwan Ecosystem Process Model, TEPM)에 의해 예측된 대만의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량의 경우도 계절적으로는 여름철(7~9월)에 연간 총량의 44.3%로 높고 겨울철(1~3월)에 16.4%로 낮은 것으로 보고되고 있다(Yu et al., 2016). 그리고 대만 남부의 물푸레나무(*Fraxinus griffithii* C. B. Clarke)에서도 여름철과 가을철에 CO<sub>2</sub> 흡수율이 높고, 겨울철과 봄철에는 현저하게 낮았다(Chen et al., 2016). 본 연구에서도 대만의 경우와 유사하게 여름철에 높은 CO<sub>2</sub> 흡수율을 보이고 겨울철에 낮아지고 있음을 알 수 있으며, 이는 Fig. 1에서 살펴본 바와 같이 여름철에 일조량이 많아 광합성 효율을 높일 수



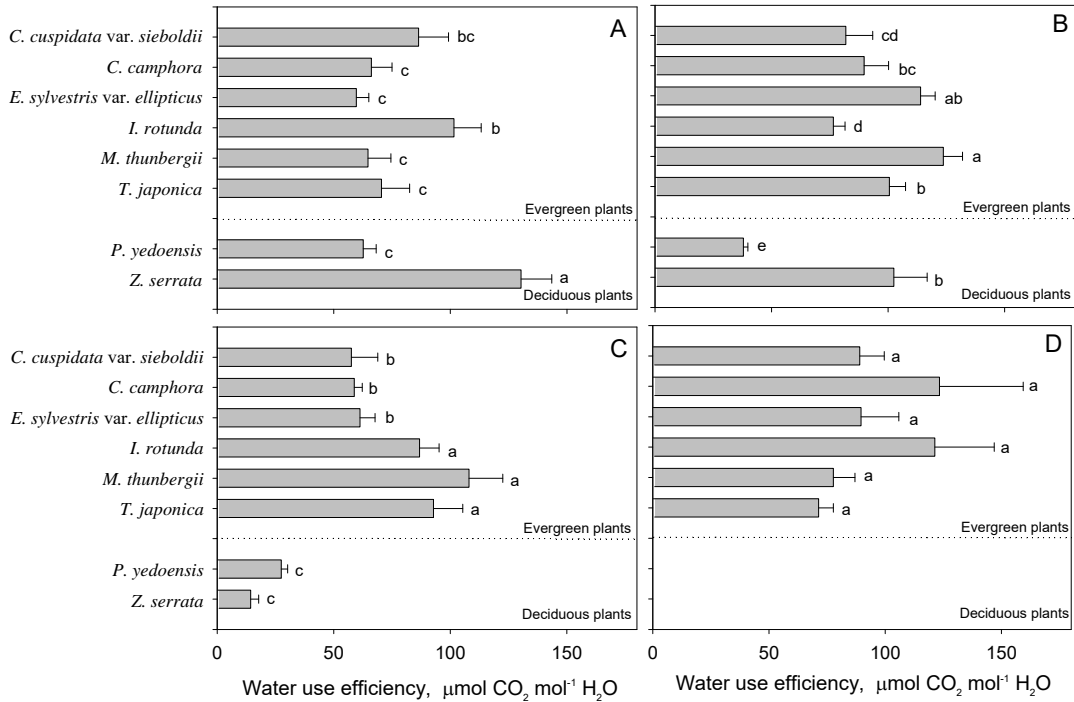
**Fig. 2.** The seasonal changes of CO<sub>2</sub> fixation rate in the leaves of 6 evergreen and 2 deciduous broad-leaved plant species growing on Jeju island (A, spring; B, summer; C, fall; D, winter). Each bar represents the mean ± SE obtained from 3 leaves per plant on 4 plants 3-4 times per season. For each season, significant differences between species are indicated by the different letters at the right of each bar ( $p < 0.05$ ).

있기 때문에 발생할 수 있다. 제주지역에 가로수로 식재되고 있는 활엽교목 8종의 계절별 CO<sub>2</sub> 흡수율은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 낙엽성 수종에서는 왕벚나무가 봄철과 여름철에 특히 높았다. 이러한 결과는 왕벚나무와 같은 속 식물인 귀룽나무(*P. padus* L.)에서도 6월부터 8월까지 점차적으로 증가하는 양상을 보였으며(Li et al., 2003), 스위트 아몬드(*P. amygdalus* Batsch)의 14 재배 품종에서도 5월에 CO<sub>2</sub> 흡수율이 높고, 10월에 감소하는 것으로 보고되었다(Matoss et al., 2004). 상록성 수종에서는 구실잣밤나무, 녹나무, 먼나무가 여름철과 가을철에 높게 나타났다. 구실잣밤나무는 7월부터 11월까지 엽건체량당 CO<sub>2</sub> 흡수율이 높을 뿐만 아니라 제주도에 자생하는 참나무과 식물 중에 가장 높은 탄소저장 수종으로 보고된 바 있다(Oh et al., 2012a).

### 3.3. 수분이용효율의 종간 비교

활엽교목 8종간의 계절별 수분이용효율을  $p < 0.05$ 에

서 비교해 보면, 봄철에는 낙엽성 수종에서는 느티나무(130.4 μmol CO<sub>2</sub>/mol H<sub>2</sub>O)가 왕벚나무(62.7 μmol CO<sub>2</sub>/mol H<sub>2</sub>O)에 비해 2.1배 이상 높았으며, 상록성 수종에서는 먼나무와 구실잣밤나무가 다른 4종의 식물에 비해 1.2-1.5배 (86.4-101.6 μmol CO<sub>2</sub>/mol H<sub>2</sub>O) 높게 나타났다(Fig. 3A). 여름철에는 느티나무, 후피향나무, 후박나무, 담팔수 등 4종이 100 μmol CO<sub>2</sub>/mol H<sub>2</sub>O 이상의 높은 값을 보였으나, 왕벚나무는 37.9 μmol CO<sub>2</sub>/mol H<sub>2</sub>O로 가장 낮았다(Fig. 3B). 가을철에는 먼나무, 후피향나무와 후박나무가 각각 86.8, 92.7과 108.0 μmol CO<sub>2</sub>/mol H<sub>2</sub>O로 높게 나타났으며, 낙엽성 수종은 상록성 수종에 비해 전체적으로 수분이용효율이 낮았다(Fig. 3C). 그리고 겨울철에는 상록성 수종 모두 여름철에 비해 다소 높거나 유사한 수분이용효율을 보이는데, 여름철에 상대적으로 낮았던 녹나무와 먼나무가 각각 121.3과 123.4 μmol CO<sub>2</sub>/mol H<sub>2</sub>O로 높게 나타났다.



**Fig. 3.** The seasonal changes of water-use efficiency in the leaves of 6 evergreen and 2 deciduous broad-leaved plant species growing on Jeju island (A, spring; B, summer; C, fall; D, winter). Each bar represents the mean  $\pm$  SE obtained from 3 leaves per plant on 4 plants 3-4 times per season. For each season, significant differences between species are indicated by the different letters at the right of each bar ( $p < 0.05$ ).

그러나 종간에 통계학적으로 유의한 차이는 없었다(Fig. 3D).

수분이용효율은 수분손실에 대한 광합성 동화률로서 기공전도도의 감소에 따라 증산률이 감소되고 수분이용효율은 증가될 수 있다(Hamerlynck and Knapp, 1996; Peñuelas et al., 1998). 식물이 스트레스를 받게 되면 기공이 닫혀서 증산률이 크게 낮아지게 되며 이로 인해 일시적으로 수분이용효율이 증가하는 현상을 보일 수 있다. Hamerlynck and Knapp(1996), Peñuelas et al.(1998)은 낮은 기공전도도는 높은 수분이용효율로 연결된다고 보고하였는데, 본 연구에서도 봄철과 여름철에 높은 수분이용효율을 보인 느티나무는 다른 수종들보다 상대적으로 낮은 기공전도도를 나타내었으며(데이터 미제시), 기공 활동의 저하로 인해 증산률 또한 낮아져 결국 광합성이 낮아지는 것으로 보인다(Zhang et al., 2004). 상록성 수종들은 봄철과 가을철에 비해 여름철과 겨울철에

수분이용효율이 증가하는 경향을 보이는데(Fig. 3B와 3D), 이는 Fig. 1A에서 살펴본 바와 같이 여름철에는 고온이나 고광에 의한 광합성량의 증가와, 겨울철에는 저온과 건조에 의한 기공전도도의 감소와 관련이 있을 것으로 보인다.

#### 3.4. 증산률, 기공전도도의 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수율

CO<sub>2</sub> 흡수율과 증산률, 그리고 CO<sub>2</sub> 흡수율과 기공전도도 간에는 상관관계수가 각각  $r=0.829$ ,  $r=0.763$ 으로 비교적 높은 상관관계를 보였다( $p < 0.01$ ). 그리고 CO<sub>2</sub> 흡수율과 증산률 간에는 1차직선 회귀식( $y=3.5885x+1.0282$ ,  $r^2=0.6865$ )으로 나타낼 수 있어, 증산률이 증가하면 CO<sub>2</sub> 흡수율도 증가하는 경향을 보여 증산률이 CO<sub>2</sub> 흡수율에 크게 관여하고 있음을 알 수 있다(Fig. 4A). 그러나, CO<sub>2</sub> 흡수율과 기공전도도 간에는 2차곡선 회귀식( $y=-33.9624x^2+43.5313x+2.0024$ ,  $r^2=0.6362$ )이 가장 적합한 것으로 나타났다(Fig. 4B). CO<sub>2</sub> 흡수율은 광합성

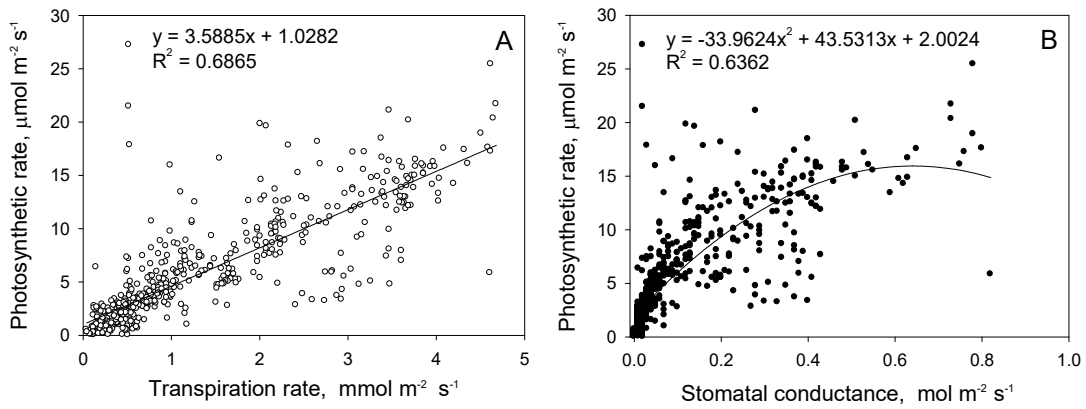


Fig. 4. Regression plot of photosynthetic rate vs. transpiration rate (A) and photosynthetic rate vs. stomatal conductance (B) in the leaves of 8 broad-leaved tree species on Jeju island. Pearson's correlation coefficients ( $r$ ) for transpiration rate and stomatal conductance were 0.829 ( $P < 0.01$ ), and 0.763 ( $P < 0.01$ ), respectively.

유효복사, 온도, 상대습도, CO<sub>2</sub> 농도 등의 환경요인들 뿐만 아니라 기공전도도, 증산률, 기공강 내 CO<sub>2</sub> 농도 등과 관련이 있다(de Santana, 2015). 이로부터 식물체가 스트레스를 받아 수분의 흡수와 증산의 불균형으로 인해 잎의 상대적 수분함량이 감소하고, 이를 극복하기 위한 기작으로 기공을 닫고 증산률을 낮춰 수분손실을 감소시키는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 제주도 자생 참나무과 식물들과 주요 조경수들에서도 보고된 바 있다(Oh et al., 2012a; Koh et al., 2014).

이상의 결과를 토대로 제주지역에 널리 분포하고 있으면서 가로수로 활용되고 있는 활엽교목 8종 중에 상록성 수종에서는 구실잣밤나무가, 낙엽성 수종에서는 왕벚나무가 다른 종에 비해 CO<sub>2</sub> 흡수능이 더 높은 것으로 보이며, 기후변화 대응 차원에서 가치가 있음을 시사한다고 할 수 있다. 구실잣밤나무는 현재 불가시나무 다음으로 많은 면적을 차지하고 있는 난대성 수종으로 제주도, 완도 등에 자생하고 있으며, 제주에 자생하고 있는 참나무과 식물 중에서도 엽건체량당 CO<sub>2</sub> 흡수율이 가장 높은 것으로 보고된 바 있다(Oh et al., 2012a). 그리고, 왕벚나무는 제주에 자생하고 있고, 다양한 형태로 개량되어 우리나라 전역에 가로수로 많이 식재하고 있는 수종으로서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 상록성 수종인 구실잣밤나무 보다도 더 높은 CO<sub>2</sub> 흡수율을 보였다. 또한 다른 수종들이 여름철 또는 가을철에 높은 CO<sub>2</sub> 흡수율을 보

이는 것과는 달리 왕벚나무는 봄철, 여름철, 가을철에 모두 높은 CO<sub>2</sub> 흡수율을 보여 효과적으로 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 고정하는 것으로 나타났다. 산림 녹화와 조림은 온실가스 배출의 상쇄에 중요하게 기여하는 만큼(Miehle et al., 2006), CO<sub>2</sub> 흡수율이 높은 왕벚나무나 구실잣밤나무 등을 조림수, 녹화수 등으로 활용하여 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 효율적으로 저감시킬 수 있도록 할 필요가 있을 것이다. 반면, 수분이용효율은 상록성 수종이 계절에 관계없이 높아서, 건조, 고온이나 고광 등의 스트레스에 더 강한 것으로 사료되는 바, 나출지나 건조한 장소에 식재하는 등 그 특성을 다각적으로 활용할 필요가 있을 것으로 보인다. 일반적으로 가뭄에 강한 식물에서는 민감한 식물과 달리 수분이용효율이 더 높으며, 수분이용효율이 높아지면 식물이 건조한 지역의 물 부족에 적응할 수 있다(Yordanov et al., 2001; Aranda et al., 2007). 낙엽수종 중 CO<sub>2</sub> 흡수율이 높은 왕벚나무는 계절에 관계없이 상록성 수종들에 비해 수분이용효율이 낮아서 건조에 대한 내성이 낮은 것으로 보이며, 이는 같은 속 식물인 산벚나무(*Prunus sargentii* Rehder)와 개벚나무(*P. leveilleana* Koehne)가 내건성이 약한 수종이고(Han, 1991), 벚나무(*P. serrulata* var. *spontanea* (Maxim.) E. H. Wilson)가 염분 스트레스에 의해 수분이용효율이 감소한다는 보고에서도 알 수 있다(Je and Kim, 2016). 반면에 느티나무는 봄철과 여름철에 수분이용효율이 높아서

건조에 대한 내성이 높을 것으로 보이는데, 느티나무가 자작나무(*Betula platyphylla* var. *japonica* Hara)와 백합나무(*Liriodendron tulipifera* L.)보다 내건성에 강하다는 Park(2006)의 보고에서도 알 수 있다. 최근 한반도를 포함한 전 지구적인 기후변화 현상으로 이상 고온, 가뭄, 홍수 등이 발생하여 자연 생태계와 인간에게 심각한 영향을 미치고 있으며, 생태계를 구성하는 식물종들도 이상 고온이나 겨울철 저온과 같은 온도의 계절적 변화에 의해서 영향을 받을 수 밖에 없다. 본 연구에서는 잎의 단위면적당 광합성률의 계절별 수종간 차이를 살펴보는 데 의미를 두었으며, 차후에는 균일하게 자란 식물체를 대상으로 개체 수준에서의 CO<sub>2</sub> 흡수량을 측정하여 수종별 탄소저장량과 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 산정할 필요가 있다. 또한 수분스트레스에 대한 이들 수종들의 적응 특성을 알기 위해서는 수분관계 지표들의 계절적 변화와 함께 심도있는 생리적인 연구가 필요할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구는 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 효율적으로 저감시킬 수 있는 수종을 선별하고자 제주지역에 널리 분포하고 있는 활엽교목 중에 가로수로 식재되는 상록성 교목 6종과 낙엽성 교목 2종을 대상으로 계절별 CO<sub>2</sub> 흡수율과 수분이용효율을 측정하였다. 엽면적당 CO<sub>2</sub> 흡수율은 낙엽성 수종인 왕벚나무에서는 봄철과 여름철에 높고 가을철에 감소하는데 반해, 상록성 수종에서는 여름철과 가을철에 높고 겨울철에 감소하였다. 특히, 낙엽성 수종에서 왕벚나무가 봄철, 여름철, 가을철에 7.1  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  이상의, 상록성 수종에서는 구실잣밤나무와 녹나무가 여름철과 가을철에 7.0-9.9  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ 의 높은 흡수율을 보여, 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 효과적으로 흡수하고 있었다. 수분이용효율은 상록성 수종들은 계절에 관계없이 낙엽성 수종들보다 높았다. 하지만, 예외적으로 낙엽성 수종인 느티나무가 봄철과 여름철에 100  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$  이상으로 월등히 높아 다른 수종에 비해 상대적으로 내건성이 강한 것으로 보인다. 그리고 CO<sub>2</sub> 흡수율과 증산률 간에는 1차곡선 회귀식으로, CO<sub>2</sub> 흡수율과 기공전도도 간에는 2차곡선 회귀식으로 나타나 증산률이나 기공전도도와 같은 기공활동이 CO<sub>2</sub> 고정에 중요하게 작용하는 것으로 보인다. 따라서 구실잣밤나무, 녹나무, 왕벚나

무 등을 가로수, 조경수 등으로 식재하여 도시공간을 녹화하고 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 저감에 저감하는데 이용할 필요가 있을 것으로 보인다.

#### 감사의 글

이 논문은 2019학년도 제주대학교 교원성과 지원사업에 의하여 연구되었음.

#### REFERENCES

- Aranda, I., Pardos, M., Puértolas, J., Jiménez, M. D., Pardos, J. A., 2007, Water-use efficiency in cork oak (*Quercus suber*) is modified by the interaction of water and light availabilities. *Tree Physiol.*, 27, 671-677.
- Biswas, S., Bala, S., Mazumdar, A., 2014, Diurnal and seasonal carbon sequestration potential of seven broadleaved species in a mixed deciduous forest in India. *Atmosph. Environ.*, 89, 827-834.
- Chen, C. I., Wang, Y. N., Lih, H. W., Yu, J. C., 2016, Three-year study on diurnal and seasonal CO<sub>2</sub> sequestration of a young *Fraxinus griffithii* plantation in southern Taiwan. *Forests*, 7(10), 230.
- Ciborowski, P., 1989, Sources, sinks, trends, and opportunities, in: Abrahamson, D. E. (ed.), *The Challenge of Global Warming*, Island Press, Washington, D.C., 213-230.
- de Santana, T. A., Oliveira, P. S., Silva, L. D., Laviola, B. G., de Almeida, A. A. F., Gomes, F. P., 2015, Water use efficiency and consumption in different Brazilian genotypes of *Jatropha curcas* L. subjected to soil water deficit. *Biomass Bioenergy*, 75, 119-125.
- Hamerlynck, E., Knapp, A., 1996, Photosynthetic and stomatal responses to high temperature and light in two oaks at the western limit of their range, *Tree Physiol.*, 16, 557-565.
- Han, S. S., 1991, Ecophysiological interpretations on the water relations parameters of trees (VI). Diagnosis of drought tolerance by the P-V curves of twenty broad-leaved species, *Jour. Korean For. Soc.*, 80(2), 210-219.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007, *Climate change 2007: Mitigation of climate change, contribution of working group III contribution to the fourth assessment report of the intergovern*



- mental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, New York, USA.
- Jo, H. K., 2002, Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea, *J. Environ. Manag.*, 64, 115-126.
- Je, S. M., Kim, S. H., 2016, Effects of CaCl<sub>2</sub> on gas exchange and stomatal responses in the leaves of *Prunus serrulata*, *J. Korean For. Soc.*, 105(3), 303-308.
- Kim, H. J., Lee, S. H., 2016, Developing the volume models for 5 major species of street trees in Gwangju metropolitan city of Korea. *Urban For. Urban Green.*, 18, 53-58.
- Kim, J. J., 2013, The species selection and planting guidelines for street tree to reduce road atmospheric carbon dioxide. *J. Kor. Inst. For. Recreation*, 17(1), 131-144.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2011, Automatic weather system (AWS). <http://www.kma.go.kr>
- Koh, S. C., Kang, Y. H., Park, S. M., Oh, S., 2014, Photosystem II activity and CO<sub>2</sub> exchange during summer in the leaves of six ornamental tree species, *J. Basic Sciences, Jeju Nat'l Univ.*, 23(1), 31-44.
- Laclau, P., 2003, Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecol. Manag.*, 180, 317-333.
- Lee, S. K., Sin, Y. H., Noh, N. J., Heo, S. J., Yoon, T. K., Lee, A. R., Abdul, R. S., Lee, W. K., 2009, Carbon storage of natural pine and oak pure and mixed forests in Hoengseong, Kangwon, *J. Kor. Forestry Soc.*, 98(6), 772-779.
- Li, Y. G., Jiang, G. M., Niu, S. L., Liu, M. Z., Peng, Y., Yu, S. L., Gao, L. M., 2003, Gas exchange and water use efficiency of three native tree species in Hunshandak Sandland of China. *Photosynthetica*, 41(2), 227-232.
- Matos, M. C., Rebelo, E., Lauriano, J., Semedo, J., Marques, N., Campos, P. S., Matos, A., Vieira-da-silva, J., 2004, CO<sub>2</sub> assimilation and water relations of almond tree (*Prunus amygdalus* Batsch) cultivars grown under field conditions. *Photosynthetica*, 42(3), 473-476.
- Miehle, P., Livesley, S. J., Feikema, P. M., Lic, C., Arndt, S. K., 2006, Assessing productivity and carbon sequestration capacity of *Eucalyptus globulus* plantations using the process model Forest-DNDC: Calibration and validation. *Ecol. Modell.*, 192, 83-94.
- Oh, S., Adams III, W. W., Demmig-Adams, B., Koh, S. C., 2013b, Seasonal photoprotective responses in needles of Korean fir (*Abies koreana*) over an altitudinal gradient on mount Halla, Jeju Island, Korea. *Arctic, Antarctic, Alpine Res.*, 45(2), 238-248.
- Oh, S., Lee, J. H., Ko, K. S., Koh, S. C., 2012b, Chlorophyll fluorescence and CO<sub>2</sub> fixation capacity in leaves of *Camellia sinensis*, *Camellia japonica*, and *Citrus unshiu*. *Korean J. Environ. Biol.*, 30(2), 98-106.
- Oh, S., Lee, J. H., Ko, K. S., Koh, S. C., 2013a, Chlorophyll fluorescence and CO<sub>2</sub> fixation capacity of the leaves of tea plants (*Camellia sinensis* L.) grown in the field, *J. Kor. Tea Soc.*, 19(1), 34-40.
- Oh, S., Shin, C. H., Kim, C. S., Kang, H. S., Kang, K. M., Yang, Y. H., Koh, S. C., 2012a, Analysis of CO<sub>2</sub> fixation capacity in leaves of ten species in the family Fagaceae. *J. Environ. Sci. Int.*, 21(1), 89-96.
- Park, J. H., Baek, S. G., Kwon, M. Y., Je, S. M., Woo, S. Y., 2018, Volumetric equation development and carbon storage estimation of urban forest in Daejeon, Korea. *Forest Sci. Technol.*, 14(2), 97-104.
- Park, Y. M., 2006, Comparison of tissue water relation parameters in three gardening tree species, *J. Ecol. Field Biol.*, 29(6), 581-584.
- Peñuelas, J., Filella, I., Llusià, J., Siscart, D., Piñol, J., 1998, Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*, *J. Experi. Bot.*, 49, 229-238.
- Rodhe, H., 1990, A Comparison of the contributions of various gases to the greenhouse effect, *Science*, 248, 1217-1219.
- Su, C. M., Hsueh, H. T., Tseng, C. M., Ray, D. T., Shen, Y. H., Chu, H., 2017, Effects of nutrient availability on the biomass production and CO<sub>2</sub> fixation in a flat plate photobioreactor. *Aeros. Air Qual. Res.*, 17, 1887-1897.
- Yoon, T. K., Park, C. W., Lee, S. J., Ko, S., Kim, K. N., Son, Y., Lee, K. H., Oh, S., Lee, W. K., Son, Y., 2013, Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea. *Urban For. Urban Green.*, 12(3),

- 344-349.
- Yordanov, I., Tsonev, T., Velikova, V., Georgieva, K., Ivanov, P., Tsenov, N., Petrova, T., 2001, Changes in CO<sub>2</sub> assimilation, transpiration and stomatal resistance of different wheat cultivars experiencing drought under field conditions. *Bulg. J. Plant Physiol*, 27(3-4), 20-33.
- Yu, J. Y., Chang, K. H., Chen, T. F., 2016, Estimation of CO<sub>2</sub> assimilation and emission flux of vegetation in Subtropical Island-Taiwan. *Aeros. Air Qual. Res.*, 16(12), 3302-3311.
- Zhang, Z. J., Shi, L., Zhang, J. Z., Zhang, C. Y., 2004, Photosynthesis and growth responses of *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch to soil water availability. *Photosynthetica*, 42(1), 87-92.
- 
- Researcher. Soon-Ja Oh  
Research Institute of Climate Change and Agriculture,  
National Institute of Horticultural and Herbal Science  
osoonja@jejunu.ac.kr
  - Researcher. Hyoun-Chol Kim  
Halla Eco-forest, Jeju Special Self-Governing Province  
khc4078@korea.kr
  - Researcher. Hee-Suk Kang  
Halla Arboretum, World Heritage Office, Jeju Special  
Self-Governing Province  
wlgnlqn57@korea.kr
  - Researcher. Chang-Hoon Shin  
Halla Arboretum, World Heritage Office, Jeju Special  
Self-Governing Province  
7129089@korea.kr
  - Professor. Seok-Chan Koh  
Department of Biology, Jeju National University  
sckoh@jejunu.ac.kr