

염화칼슘 처리가 산딸나무 잎의 광합성 기구, 기공전도도 및 형광이미지 특성에 미치는 영향

성주한* · 제선미 · 김선희 · 김영걸
국립산림학원 산림보전부

(2009년 11월 17일 접수; 2009년 12월 4일 수정; 2009년 12월 4일 수락)

Effect of Calcium Chloride (CaCl₂) on the Characteristics of Photosynthetic Apparatus, Stomatal Conductance, and Fluorescence Image of the Leaves of *Cornus kousa*

Joo Han Sung*, Sun Mi Je, Sun-Hee Kim and Young-Kul Kim

Department of Forest Conservation, Korea Forest Research Institute, Seoul, 130-712, Korea

(Received November 17, 2009; Revised December 4, 2009; Accepted December 4, 2009)

ABSTRACT

Deicing salt is used to melt snow and ice on the road for traffic safety during the winter season, which accumulates in the roadside vegetation and induces visible injuries. The damage may accelerate particularly when it coincides with early spring leaf out. In order to better understand the response mechanisms, *C. kousa* (3-year-old) was irrigated twice prior to leaf bud in a rhizosphere with solutions of 0.5, 1.0, and 3.0% calcium chloride (CaCl₂) concentration, that were made by using an industrial CaCl₂ reagent practical deicing material in Seoul. Physiological traits of the mature leaves were progressively reduced by CaCl₂ treatment, resulting in reductions of total chlorophyll contents, chlorophyll a:b, photosynthetic rate, quantum yield, stomatal conductance, F_v/F_M, and NPQ. On the contrary, light compensation point and dark respiration were increased at high CaCl₂ concentration. A decrease in intercellular CO₂ concentration by stomatal closure first resulted in a reduced photosynthetic rate and then was accompanied by low substance metabolic rates and photochemical damage. Based on the reduction of physiological activities at all treatments (CaCl₂ 0.5%, 1.0%, and 3.0%), *C. kousa* was determined as one of the sensitive species to CaCl₂.

Key words : *Cornus kousa*, Calcium chloride, Photosynthetic rate, Chlorophyll content, Fluorescence image

I. 서 론

산딸나무(*Cornus kousa*)는 층층나무과(Cornaceae) 낙엽활엽교목으로 우리나라가 원산지이다. 중부 이남의 산야에서 자생하고 중국이나 일본에도 분포한다. 토심이 깊고 토양이 비옥 적윤한 곳에서 생장이 좋으며 반음수이지만 양지에서도 잘 자란다. 공중습도가 건조하면 잎 끝이 마르며, 건조에 약한 특성이 있지만,

대기오염에 강하기 때문에 가정의 정원이나 가로수, 공원에 이용될 수 있다(<http://www.nature.go.kr>).

2008년 산림청 가로수조성현황을 보면 전체 식재본 4, 527천본 중 벚나무, 은행나무, 플라타너스, 느티나무가 전체의 75%를 차지하는 반면 산딸나무는 식재본 수가 미비하여 기타수종으로 분류되어 있다(Korea Forest Service, 2009). 그러나 관상적 가치 및 용재적 가치가 있는 산딸나무의 가로수종으로의 잠

* Corresponding Author : Joo Han Sung (jhs033@forest.go.kr)

재적인 수요와 식재 종의 다양성을 도모하기 위하여 식재지 생육환경의 적정한 관리를 위한 산딸나무의 생리적 특성 연구는 중요한 의미를 가진다.

본 연구는, 이른 봄 겨울철 제설제 이용으로 인한 산딸나무의 광합성기구와 광화학계 그리고 기공전도도의 특성변화를 통하여 산딸나무의 염분에 대한 생리적 반응을 연구하고자 한다. 제설제의 종류는 크게 염화칼슘(CaCl_2), 소금(NaCl), 비염화물계 용설제등이 있으며, 주로 우리나라에서는 CaCl_2 을 사용하고 있다 (Ministry of Construction and Transportation, 2003). 제설제로 인한 염류의 영향은 도로변으로부터 액체형태로 분무되어 수목의 줄기나 잎에 접촉하여 직접적 피해를 가져오거나 액체상태로 토양에 유입 집적되어 수목의 뿌리로 흡수되어 토양 내 이온 또는 수분이동의 불균형을 초래할 수 있다. 고농도의 염분조건으로 인한 뿌리의 삼투포텐셜의 감소와 고농도 이온의 식물 내 축적은 이온 항상성의 교란과 독성의 원인이 되어 (Greenway and Munns, 1980; Hagemann and Murata, 2003) 식물의 성장과 생산성을 저해하는 주요한 환경요인 중 하나이다.

주로 염분 스트레스에 대한 반응은 NaCl 에 관한 연구들이 다수를 이루고 있는데, 염분에 대한 가시적 피해현상으로 염화칼슘의 감소, 잎의 황화현상 등의 발생 (Parida *et al.*, 2004), 수분이동의 불균형으로 인해 수분스트레스 현상이 나타나는 경우가 많이 보고되고 있다. 고농도 염분에 의해 기공전도도, 증산율, 수분이용효율이 감소할 수 있는데 (Gulzar *et al.*, 2003; Ripullone *et al.*, 2007), 낮은 기공전도도는 엽육세포 내 CO_2 농도의 감소를 가져와 광합성율의 감소로 이어지며 결국 물질대사량의 감소로 식물의 발육장해를 가져올 수 있다 (Hernandez *et al.*, 1995; Takemura *et al.*, 2000).

CaCl_2 처리에 따른 식물의 반응 연구는 NaCl 처리에 비해 매우 드물지만, NaCl 의 염내 이온의 축적과 관련해 CaCl_2 의 식물에 대한 독성을 유추해 볼 수 있다. 앞내의 NaCl 의 축적에 관해서는 잎의 Na^+ 농도를 증가시키거나 아닐 수도 있으며, Na^+ 의 앞내 농도 차이가 나타나지 않음에도 불구하고 Cl^- 의 농도의 증가로 인해 건조스트레스와 함께 잎면적의 감소를 가져오거나 (Walker *et al.*, 1982), 잎의 팽압이 감소하였다 고 보고한다 (Syvertsen *et al.*, 1988). 또한 Grattan and Maas (1988)의 NaCl 과 CaCl_2 를 혼합하여 처리하

였을 때 NaCl 을 단독으로 사용하였을 때보다 증가한 Cl^- 의 함량으로 인하여 피해가 가중되는 것으로 보아 CaCl_2 처리시 Cl^- 의 독성을 유추해 볼 수 있다.

외생적 스트레스(abiotic stress)에 대한 반응은 식물의 생장조건을 포함하여, 수종의 특성(종별, 연령, 건강성)에 따라 다양하게 나타날 수 있으므로 본 실험에서는 식물의 물질대사 능력에 중요한 역할을 하는 광합성기구의 변화를 광반응 곡선을 통해 산출되는 광합성 변수들(양자수율, 광보상점, 암호흡, 최대 광합성율)의 변화를 통하여 알아보고, 주로 광계II에서 방출되는 붉은 빛인 형광을 이용하여 카우츠키의 유도곡선에 의한 광계II의 광화학반응의 변화를 연구하고자 한다. 또한 기공의 움직임 연구하여, 염화칼슘의 서로 다른 농도처리에 따른 산딸나무의 염분스트레스에 대한 식물의 반응 기작을 알고자 한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 공시수종 및 염화칼슘(CaCl_2) 처리

기온과 습도를 외부 환경조건과 동일하게 하기 위해 국립산림과학원 본원(서울)의 온실 옆 야외에 비가림막 구조물 설치(4m×4m)를 하여 3년생 산딸나무(*C. kousa*) 유묘 중 수고가 비슷한 묘목을 대조구, 염화칼슘 0.5%, 1.0%, 3.0%로 각 처리구당 3본씩 선정하여 배치하였다. 실험기간은 2007년 3월 29일부터 6월 17일까지 80일 동안 가시적인 피해양상 및 생리적인 변화를 모니터링 하였으며, 실험기간 동안의 3월, 4월, 5월, 6월의 월평균 온도는 각각 6.1, 11.4, 18.1, 23.2°C이며, 상대습도는 59.7, 52.9, 62.1, 60.9%로 나타났다 (<http://www.kma.go.kr>). 염화칼슘 수용액의 처리는 실제 제설작업 시 사용하는 공업용 염화칼슘을 이용하여 각 농도에 맞게 완전히 용해하여 제조한 후, 잎이 나기 전인 이른 봄 2007년 3월 29일에 500ml 씩 1차 처리를 하고 일주일 후인 4월 5일에 같은 양을 2차 처리를 하였다. 염화칼슘 처리 후, 수용액의 용탈을 막기 위해 화분에서 넘치지 않을 양만큼 동일하게 300ml씩 적정한 관수를 하여, 실험기간 동안 수분이 부족하지 않게 하였다.

2.2. 잎의 가시적 피해

잎의 전개가 시작되기 전의 염화칼슘처리로 인한 가시적 피해는 각 처리구별로 실험기간 동안 2일 간격

으로 공시목의 모든 잎이 고사할 때까지, 잎의 전개 정도와 잎 가장자리의 마름현상, 엽색의 황변, 낙엽의 비율을 한 개의 잎수준에서와 전체 잎들 수준에서 조사하였다.

2.3. 엽록소 함량

각각의 연화칼슘 처리구당 세 본씩 무작위로 선정하여 전체 수고를 위에서부터 아래로 4그룹을 만들어 동일하게 2번그룹의 위치에서 가지 가장자리 부분의 4~5개의 완전히 확장된 성숙한 잎을 채취한 후, 절편 0.1g을 10ml의 DMSO(Dimethyl Sulfoxide)용액에 넣어 65°C 건조기에서 6시간 30분 동안 추출한 후, 분광광도계(UV/Visible Diode Array, Walden Precision Apparatus Ltd., UK)를 사용하여 파장 663nm와 645nm에서 측정하여 Amon(1949)의 방법으로 산출하였다.

2.4. 광합성기구 측정

각 수준의 광합성속도(Net photosynthesis rate), 기공증산속도(stomatal transpiration rate), 기공전도도(stomatal conductance), 엽육 세포내 CO₂ 농도는(LI-6400 Portable Photosynthesis System Li-cor Inc., USA)을 이용하여 엽록소 측정을 위해 채취하였던 동일한 위치에서 측정하였다. 광반응곡선은 부착된 red-blue LED를 이용하여 PPF(photosynthetic photon flux density) 0, 30, 50, 100, 300, 700, 1,000, 1,500, 2,000 μmol photons m⁻² s⁻¹으로 광도가 높은 곳에서 낮은 곳 순으로 설정하였다. 이때 chamber에 유입되는 공기의 유량은 500 mol s⁻¹이며, chamber 온도는 25°C, CO₂ 농도는 400 μmol mol⁻¹ 습도는 60-70%로 조절하였다. 광합성의 양자수율(φ)은 PPF=100 μmol m⁻² s⁻¹ 이하에서 광도와 광합성율간의 직선 회귀식을 구하여 산출하였으며 직선회귀식 y=a+bx의 x 절편은 광보상점, 광도가 0 일 때, 직선 회귀식과 맞닿는 y 절편인 a는 암호흡으로 하였다(Kim *et al.*, 2001; Timm *et al.*, 2002; Muraoka *et al.*, 2003). 수분이용효율은 광합성능력/증산량(Ashraf *et al.*, 2002)으로 PPF=1000 μmol m⁻² s⁻¹ 광도에서 계산하였다.

2.5. 형광 이미지 측정

엽록소형광반응 유도는 공시목을 암적응 후, 690 nm에 가까운 붉은색의 엽록소 형광방출을 CCD(Charge-Coupled Device) 카메라와 비디오보드를 엽록소 형광

측정에 적용한 Portable HandyCam(Fluor Cam, Photon System Instruments Ltd., Brno, Czech Republic)를 이용하여 이미지화 하였다. 렌즈와 잎 표면과의 사이의 거리는 70mm로 모든 측정에서 동일하게 유지하였다. 15분간의 암적응 후 Fluor Cam 소프트웨어를 이용하여 quenching analysis 측정을 위한 프로토콜 템플릿을 이용하여(10s pulses intensity, ~0.003 μmol m⁻² s⁻¹) 낮은 광에서 최초 측정되는 값을 F₀, 그 후, 지속적인 actinic saturating light(~2,000 μmol photons m⁻² s⁻¹)로 측정되는 최고 형광 값 F_M을 측정하였다. 최소형광 F₀는 광계II에 있는 엽록소 a 분자가 들뜬 후 에너지가 반응중심으로 이동하기 이전에 나오는 형광을 말하며, 최대형광 F_M에서 F₀를 빼준 값을 F_V(=F_M-F₀)라고 한다. F_V/F_M는 광계II의 활성을 나타내주는 지표이며, 들뜬 에너지 포획능력을 나타낸다. 엽록소 형광의 비광화학 소멸(non-photochemical quenching, NPQ)은 (F_M/F_{M'})-1로 계산하였다(Lawson *et al.*, 2008).

III. 결과 및 고찰

3.1. 잎의 가시적 피해

개엽 전의 고농도의 CaCl₂ 처리는 잎눈을 쇠퇴시키거나 잎눈의 발달을 지연시키며, 잎 전개 및 확장율을 감소시켰다. 특히, CaCl₂ 3.0% 처리구의 경우 잎눈의 50% 정도가 잎눈상태에서 마르기 시작하여 고사 또는 개엽을 하더라도 잎의 전개를 하지 못하였다. 처리 후 30일 후에 잎면적의 30% 정도 잎의 가장자리에서부터 갈변현상이 나타났다. 이와 마찬가지로 현상은 처리 후 50일의 CaCl₂ 1.0% 처리구에서도 나타났으며 처리 후 80일 경 CaCl₂ 처리 0.5% 처리구에서 잎의 마름 현상이 나타났다.

3.2. 엽록소 함량

CaCl₂ 처리 후 80일째의 엽록소 함량의 분석결과 CaCl₂ 처리농도가 높아질수록 총 엽록소함량과 엽록소 함량 a, b, 엽록소 a와 b의 함량이 감소하였다. 특히, 총엽록소 함량의 경우 CaCl₂ 0.5% 처리구와 1.0% 처리구 각각 대조구에 비해 71%, 41%씩 감소하였다(Table 1). NaCl 처리시, 잎의 총 엽록소 함량의 감소와 엽록소 a의 감소는 보고되며(Hernandez *et al.*, 1995; Gadallah, 1999; Agastian *et al.*, 2000), 산딸나

Table 1. Total chlorophyll contents and Chlorophyll a:b ratio in the leaves of *C. Kousa* after 80 days CaCl_2 treatment. ANOVA had been conducted and compared the means by Duncan multiple range test. A different letter indicates significant difference at $P \leq 0.05$. Unit: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ F.W

Treatment	Chl.a	Chl.b	Chl. T	Chl.a : Chl.b
Control	1.02 a (± 0.09)*	0.51 a (± 0.06)	1.53 a (± 0.15)	2.01 a (± 0.08)
0.5%	0.65 b (± 0.01)	0.43 a (± 0.03)	1.08 b (± 0.04)	1.49 b (± 0.07)
1.0%	0.36 c (± 0.07)	0.26 b (± 0.03)	0.62 c (± 0.10)	1.36 b (± 0.11)
3.0%	-.**	-	-	-

*: Mean \pm SD, **: Death

무의 CaCl_2 처리에서도 같은 결과가 나타났다. 엽록소 a:b의 경우 대조구에 비해 0.5% 처리구에서 28% 감소하였고, 처리 농도가 높아짐에 따라 a:b의 비율이 더욱 낮아지는 경향을 보였다. 이것은 대조구와 비교하여 CaCl_2 처리에 따른 엽록소 a의 감소폭이 엽록소 b의 감소폭에 비해 크게 나타났기 때문으로, 이러한 결과는 식물의 생장조건이 좋지 못한 경우 혹은 잎의 노화가 진행될 때 주로 나타날 수 있으며, 이것은 스트레스를 감지할 수 있는 좋은 지표로 이용될 수 있다(Ryang *et al.*, 2007; Abreu and Munné-Bosch, 2008).

3.3. 광합성기구 및 기공전도도

광합성속도의 경우 40일째 0.5% 처리구를 제외하고

CaCl_2 처리 농도가 높아질수록 광합성속도가 감소하였다(Fig. 1). 대조구와 CaCl_2 처리구간의 광합성 기구는 40일째와 80일째의 양자수율의 경우 대조구에 비해 CaCl_2 의 농도가 높은 처리구일수록 양자수율이 감소하는 경향을 보였으며, 40일째 1.0%, 3.0% 처리구와 80일째 1.0% 처리구에서 유의하게 감소하였다. 광보상점의 경우 40일째와 80일째 모두 CaCl_2 농도가 증가할수록 광보상점도 높아졌다. 또한 40일째의 암호흡속도는 대조구와 비교하여 CaCl_2 0.5%와 1.0% 처리구간의 차이는 나타나지 않았으나 CaCl_2 3.0% 처리구에서 급격한 증가가 나타났다. 80일째도 마찬가지로 CaCl_2 처리 농도가 높을수록 암호흡속도가 증가하였는데, 40일째 처리구에 비해 높은 암호흡속도가 나타나 시일이 지남에 따라 피해가 가중되고 있음을 알 수 있다. 광합성속도의 경우 대조구에 비해 CaCl_2 처리농도가 증가할수록 감소하는 경향이 40일째와 80일째 나타났는데, 비록 대조구와 0.5% 처리는 유의성이 없었지만, 40일째 1.0% 처리구와 3.0% 처리구는 대조구에 비해 28%, 43% 감소하였으며, 80일째 1.0% 처리구는 대조구에 비해 95%의 광합성속도 감소율을 나타냈다(Table 2). 80일째 CaCl_2 3.0% 처리구는 잎이 고사하여 측정 할 수 없었다. 비록 40일째와 80일째 대조구와 0.5% 처리구에서는 광합성속도와 양자수율의 유의성이 나타나지 않았지만, 광보상점의 증가와 암호흡속도의 꾸준한 증가를 통해, CaCl_2 처리 0.5% 처리구에서도 광합성 속도의 감소가 시일이 지나면 나

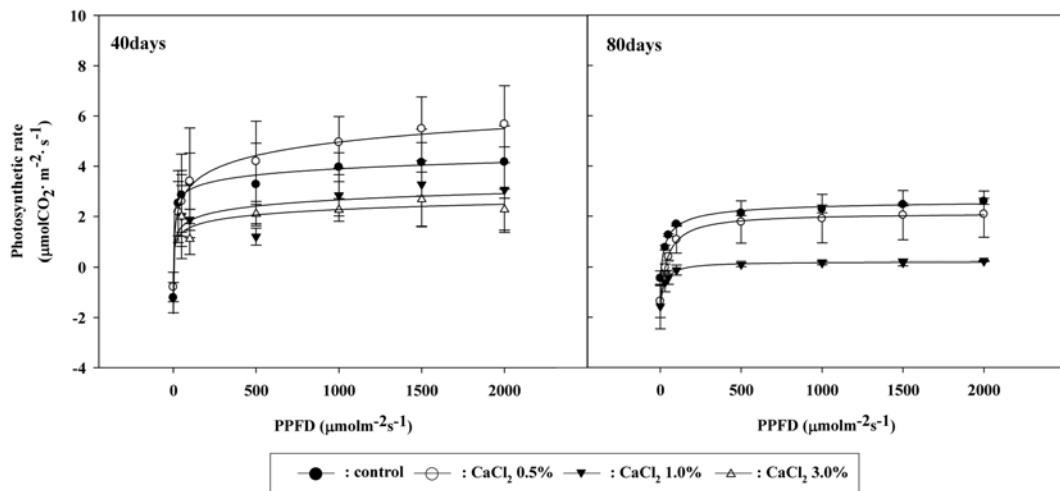


Fig. 1. The light response curve of net photosynthetic rate in the leaves of *C. kousa* at 40day and 80days after treatment of different CaCl_2 concentration. Bars indicate standard deviation (SD).

Table 2. Photosynthetic apparatuses (Φ : Quantum yield, D_{resp} : Dark respiration, P_n : photosynthetic rate at PPFD=1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, L_{comp} : Light compensation point) in the leaves of *C. Kousa* treated different CaCl₂ concentration after treatment 40days and 80days. ANOVA had been conducted and compared the means by Duncan multiple range test. A different letter indicates significant difference at $P \leq 0.05$

Treatment	Φ ($\mu\text{molCO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1}$)		D_{resp} ($\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		P_n ($\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		L_{comp} ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	
	40days	80days	40days	80days	40days	80days	40days	80days
Control	1.91 a (± 0.18)*	0.75 a (± 0.07)	1.05 b (± 0.32)	0.90 b (± 0.35)	3.96 ab (± 0.58)	2.28 a (± 0.15)	0.84 b (± 0.27)	1.30 c (± 0.30)
0.5%	1.48 ab (± 0.08)	0.96 a (± 0.02)	0.95 b (± 0.46)	1.36 ab (± 0.65)	4.95 a (± 1.03)	1.90 a (± 0.97)	1.05 b (± 0.35)	2.45 b (± 0.23)
1.0%	0.90 b (± 0.21)	0.40 b (± 0.14)	0.89 b (± 0.38)	2.07 a (± 0.18)	2.84 bc (± 0.82)	0.16 b (± 0.07)	1.22 ab (± 0.61)	3.84 a (± 0.41)
3.0%	0.99 b (± 0.56)	-**	2.32 a (± 0.25)	-	2.26 c (± 0.45)	-	2.17 a (± 0.08)	-

*: Mean \pm SD, ** : Death

타날 것으로 생각된다. 암호흡은 생합성 과정에 필요한 탄소, 환원력 그리고 ATP를 공급하는 중요한 기작이다. 그러나 CaCl₂ 처리에 따라 광합성속도가 감소하는 것에 비해 증가하는 암호흡속도는 너무 많은 에너지의 소비를 가져와 결국 에너지대사에 문제를 가져올 것이다.

CaCl₂ 처리에 따른 산딸나무의 기공전도도의 변화는 전반적으로 CaCl₂ 처리의 농도가 증가함에 따라 감소하는 광합성속도와 비슷한 경향을 보였다(Fig. 2). 처리 40일째와 80일째 모두 대조구와 CaCl₂ 0.5% 처리구간의 큰 차이는 없었으나, CaCl₂ 1.0%와 3.0% 처리구에서 고농도로 갈수록 대조구에 비해 감소하는 경향을 나타냈다. 식물의 CO₂와 수분교환은 90%이

상이 기공을 통해서 일어난다. 기공을 통해 흡수된 CO₂로 광합성을 하며, 증산을 통해 수분조절을 한다. 식물이 수분스트레스를 받게 되면, 내부의 수분손실을 막기 위해 기공을 닫게 되는데, 식물이 기공을 닫게 되면 엽육 세포내 CO₂ 농도는 낮아지게 되고 이에 따라 광합성속도도 감소하게 된다(Hernandez *et al.*, 1995; Takemura *et al.*, 2000). CaCl₂ 처리구의 기공전도도의 감소를 통해 고농도 이온의 식물체내 축적 및 토양의 집적으로 인한 식물체 내외적으로 수분이 동의를 제한을 받고 있는 것을 알 수 있다.

3.4. 형광반응이미지

Fig. 3의 암적응 후의 최대 형광값과 최소 형광값의 차이에 의한 형광반응이미지 결과를 통해 육안으로는 볼 수 없는 잎 내부의 빛을 이용하는 능력에 대한 건전부분과 피해부분을 구분함으로써 잎의 내부적인 생리적 피해경로를 알 수 있었다. CaCl₂ 농도가 증가함에 따라 잎의 가장자리부터 푸른색부분이 증가하였는데, 이것은 $F_M - F_0$ 값이 0에 가까운 것을 통해 잎의 가장자리부터 황변되거나 마름현상이 나타났던 산딸나무의 가시적 피해현상과 동일한 부분임을 알 수 있다. 한편, 대조구의 경우 $F_M - F_0$ 값 1,000 이상의 값이 전체 잎에서 나타났으나, 0.5%처리구의 경우 50% 이상이 푸른색을 띄며 $F_M - F_0$ 값 1,200이상의 붉은색이 잎자루쪽 주맥을 중심으로 집중적으로 분포하였다. 1.0%와 3.0% 처리구에서는 $F_M - F_0$ 값 1,000이상의 붉은색이 완전히 소광되어 나타났다(Fig. 3). 또한, $F_M - F_0$

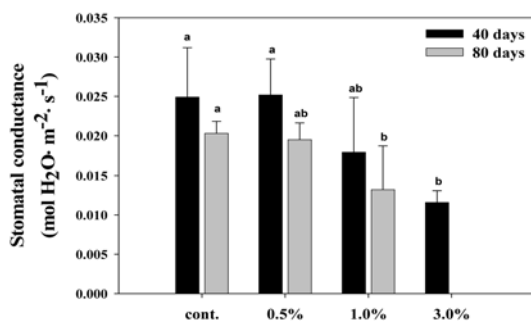


Fig. 2. Stomatal conductance in the leaves of *C. kousa* each of 40 and 80days CaCl₂ treatment at PPFD = 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Bars indicate standard deviation (SD). ANOVA had been conducted and compared the means by Duncan multiple range test. A different letter indicates significant difference at $P \leq 0.05$.

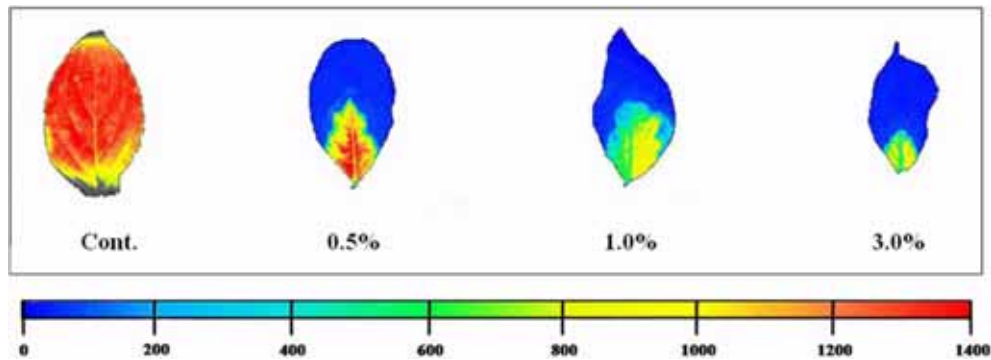


Fig. 3. The represent fluorescence image ($F_M - F_0$) in the leaves of *C. kousa* after 80days CaCl_2 treatment at 80days after treatment. Above fluorescence image's fluorescence values are $F_M - F_0$.

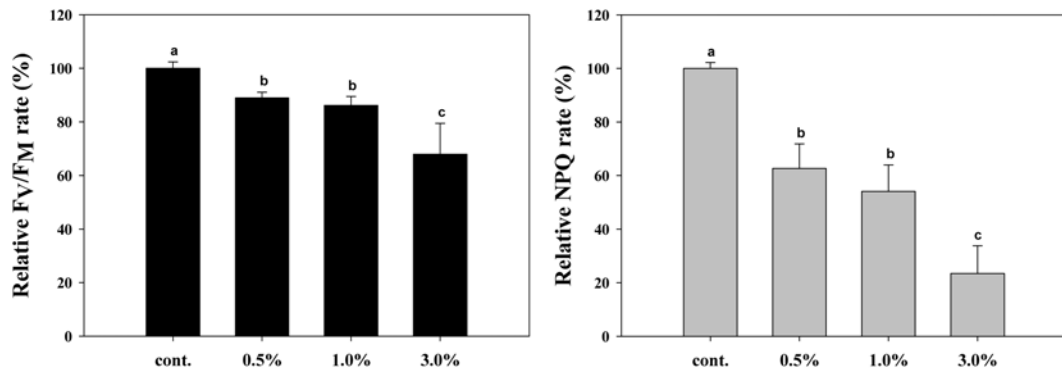


Fig. 4. The maximum F_v/F_M ($F_M - F_0/F_M$) and amount of NPQ (none-photochemical quenching) in the leaves of *C. kousa* after 80days CaCl_2 treatment was measured following 15 min of dark adaptation. Bars indicate standard deviation (SD). ANOVA had been conducted and compared the means by Duncan multiple range test. A different letter indicates significant difference at $P \leq 0.05$.

값이 0에 가까운 푸른색 부분과 상대적으로 건전한 곳의 경계간의 $F_M - F_0$ 로 나타난 형광이미지의 색차가 크게 나타나 피해를 받는 부분에 대해 세포의 고시를 통해 남아있는 건전부분의 활력을 높이려는 기작을 생각해 볼 수 있다.

펄스-증폭-변조(pulse-amplitude-modulated, PAM)의 카우츠키 효과(Kautsky effect)에 의한 형광반응유도는 광합성의 전체적인 전자전달 및 이산화탄소 동화와 형광신호와의 연결성 뿐 아니라 광계II 반응중심의 특성을 반영한다. 80째의 광계II의 활성(F_v/F_M)과 NPQ는 염화칼슘 농도가 증가함에 따라 대조구에 비해 점차적으로 감소하였다(Fig. 4). F_v/F_M 은 광계II의 활성을 나타내며, 들뜬 에너지의 획득 능력으로서 스트레스에 대한 식물의 반응 지표로 이용된다. Glynn *et al.*(2003)의 단풍나무과의 유전자형에 따른 염분내성

(NaCl)에 관한 실험을 보면 거의 모든 유전자형에서 F_v/F_M 의 감소를 볼 수 있었다. 반면, 염생식물의 경우 F_v/F_M 의 값이 변하지 않은 경우도 있었다(Maricle *et al.*, 2007).

NPQ는 들뜬 에너지의 광화학 반응계로의 이동을 촉진하는 광화학적 소멸과 반대되는 개념으로 광화학계로 넘어가지 못한 엽록소 형광을 나타내는데, 잎의 에너지 상태나 광계II의 광양자 효율을 조절하는데 중요한 역할을 하고, 광억제로 인한 손상으로부터 광계II를 보호한다(Lee *et al.*, 2007). 염분(NaCl)에 민감한 수종인 *Triticum turgidum* 수종의 경우 염분처리에 따른 NPQ의 증가를 나타냈으나(James *et al.*, 2002) 반면, 염분에 강한 내성이 있는 *Suaeda salsa*와 같은 염생종들은 NPQ의 변화가 나타나지 않았다(Lu *et al.*, 2002; Maricle *et al.*, 2007). 공시수종인 산딸나

무의 경우, 염화칼슘처리에 따른 NPQ의 감소는 양자 수율의 감소와 F_v/F_M값으로 알 수 있는 광계II의 피해로 인한 광 포획의 감소에 기인한 것으로 생각된다.

적 요

겨울철 도로의 안전을 위해서 사용되고 있는 제설제가 가로변의 식생에 축적이 되면 식물에 피해를 가져올 수 있는데, 특히 이른 봄의 제설제 사용은 식물이 다량의 수분을 요구하게 되는 개엽 시기와 맞물리게 되면서 그 피해가 가속화 될 수 있다. 우리나라에서 주로 사용하고 있는 제설제인 CaCl₂으로 산딸나무(*C. kousa*) 3년생 유묘를 대상으로 개엽 전 대조구를 포함해 각 처리구당 3분씩 선정하여 배치하고 각각 CaCl₂ 0.5%, 1.0%, 3.0% 를 2회 근권부에 처리하였다. 먼저, 가지적 피해 현상으로 잎눈에서 개엽이 어려워지며, 잎의 전개 후에도 시들음 현상과 잎끝마름 현상 등이 나타났다. CaCl₂의 농도가 높아짐에 따라 산딸나무의 피해가 가중되었는데, CaCl₂ 처리에 따른 생리적 반응은 총엽록소함량, 엽록소 a:b, 광합성속도, 양자수율, 기공 전도도, F_v/F_M, NPQ의 감소를 가져왔다. 반면 광보상점과 암호흡속도의 증가를 나타냈다. 기공의 닫힘으로 인한 엽육내 CO₂ 농도 저하와 이로 인한 광합성속도의 감소가 1차적으로 일어나고 이후 물질대사량의 감소, 광화학계의 피해가 동반되는 것을 알 수 있었다. 모든 CaCl₂ 처리농도에서 산딸나무의 생리적 활동이 급격히 저하되는 경향으로 볼 때 CaCl₂에 민감한 수종으로 판단된다.

REFERENCES

Abreu, M. E., and S. Munné-Bosch, 2008: Salicylic acid may be involved in the regulation of drought-induced leaf senescence in perennials: A case study in field-grown *Salvia officinalis* L. plants. *Environmental and Experimental Botany* **64**(2), 105-112.

Agastian, P., S. J. Kingsley, and M. Vivekanandan, 2000: Effect of salinity on photosynthesis and biochemical characteristics in mulberry genotypes. *Photosynthetica* **38**, 287-290.

Arnon, D. I., 1949: Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenol-oxidase in *Betula vulgaris*. *Plant Physiology* **24**, 1-15.

Ashraf, M., M. Arfan, M. Shahbaz, M. Ahmad, and A. Jamil, 2002: Gas exchange characteristics and water

relation in some elite skra cultivars under water deficit. *Photosynthetica* **40**(4), 615-620.

Gadallah, M. A. A., 1999: Effects of proline and glycinebetaine on *Vicia faba* response to salt stress. *Biology Plant* **42**, 249-257.

Glynn, C. P., A. F. Gillia, and G. Oxenham, 2003: Foliar salt tolerance of Acer genotypes using chlorophyll fluorescence. *Journal of Arboriculture* **29**(2), 61-65.

Grattan, S. R., and E. V. Maas, 1988: Effect of salinity on phosphate accumulation and injury in soybean. I. Influence of CaCl/NaCl ratios. *Plant Soil* **105**, 25-32.

Greenway, H., and R. Munns, 1980: Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. *Annual Review Plant Physiology* **31**, 149-190.

Gulzar, S., M. A. Khan, and I. A. Ungar, 2003: Salt tolerance of a coastal salt marsh grass. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **34**, 2595-2605.

Hagemann, M., and N. Murata, 2003: Glucosylglycerol, a compatible solute, sustains cell division under salt stress. *Plant Physiology* **131**, 1628-1637.

Hernandez, J.A., E. Olmos, F. J. Corpas, F. Sevilla, and L. A. del Rio, 1995: Salt-induced oxidative stress in chloroplasts of pea plant. *Plant Science* **105**, 151-167.

James, A. R., 2002: Factors affecting CO₂ assimilation, leaf injury and growth in salt-stressed durum wheat. *Functional plant biology* **29**(12), 1393-1403.

Kim, P. G., Y. S. Yi, D. J. Chung, S. Y. Woo, J. H. Sung, and E. J. Lee, 2001: Effects of light intensity of photosynthetic activity of shade tolerant and intolerant tree species. *Journal of Korean Forest Society* **90**(4), 476-487.

Korea Forest Service, 2009: A Guideline for Street Trees, 2pp. (in Korean)

Lawson, T., S. Lefebvre, N. R. Baker, J. I. L. Morison, and C. A. Baines, 2008: Reductions in mesophyll and guard cell photosynthesis impact on the control of stomatal responses to light and CO₂. *Journal of Experimental Botany* **59**(13), 3609-3619.

Lee, H. Y., Y. I. Park, and Y. N. Hong, 2007: Effects of Ultraviolet-B Radiation on Photosynthesis in Tobacco (*Nicotiana tabacum* cv. Petit Havana SR1) Leaves. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **26**(3), 239-245.

Lu, C. M., N. W. Qiu, Q. T. Lu, B. S. Wang, and T. Y. Kuang, 2002: Dose salt stress lead to increased susceptibility of photosystem II to photoinhibition and changes in photosynthetic pigment composition in halophyte *Suaeda salsa* grown outdoors? *Plant Science* **163**, 1063-1068.

Maricle, B. R., R. W. Lee, C. E. Hellquist, O. Kirasts, and G. E. Edwards, 2007: Effects of salinity on chlorophyll fluorescence and CO₂ fixation in C₄ estuarine grasses. *Photosynthetica* **45**(3), 433-440.

Ministry of Construction and Transportation, 2003: Handbook of the roads clear of snow 29pp. (in Korean)

Muraoka, H., H. Koizumi, and R. W. Pearcy, 2003: Leaf

- display and photosynthesis of tree seedlings in a cool temperate deciduous broad leaf forest understory. *Oecologia* **135**, 500-509.
- Parida, A. K., A. B. Das, and B. Mitra, 2004: Effects of salt on growth, ion accumulation photosynthesis and leaf anatomy of the mangrove, *Bruguiera parviflora*. *Trees Structure Function* **18**, 167-174.
- Ripullone, F., M. R. Guerrieri, A. Nole, F. Magnani, and M. Borhetti, 2007: Stomatal conductance and leaf water potential responses to hydraulic conductance variation *Pinus pinaster* seedlings. *Trees* **21**, 371-378.
- Ryang, S. Z., S. Y. Woo, and S. M. Je, 2007: Antioxidant enzyme, chlorophyll contents and stomatal changes of five tree species under ozone stress. *Journal of Korean Forest Society* **96**(4), 470-476. (in Korean with English abstract)
- Syvertsen, J. P., J. Lloyd, and P. E. Kriedemann, 1988: Salinity and drought stress effects on foliar ion concentration, water relations, and photosynthetic characteristics of orchard citrus. *Australian Journal of Agricultural Research* **39**(4), 619-627.
- Takemura, T., N. Hangata, K. Sugihara, S. Baba, I. Karube, and Z. Dubinsky, 2000: Physiological and biochemical responses to salt stress in the mangrove, *Bruguiera gymnorhiza*. *Aquatic Botany* **68**, 15-28.
- Timm, H. C., J. Stegemann, and M. Küppers, 2002: Photosynthetic induction strongly affects the light compensation point of net photosynthesis and coincidentally the apparent quantum yield. *Trees* **16**, 47-62.
- Walker, R. R., E. Torokfalvy, and W. J. S. Downton, 1982: Photosynthetic Responses of the Citrus Varieties Rangpur Lime and Etrog Citron to Salt Treatment. *Australian Journal of Plant Physiology* **9**(6), 783-790.
[http://www.kma.go.kr\(2009.11.1\)](http://www.kma.go.kr(2009.11.1))
[http://www.nature.go.kr\(2009.11.1\)](http://www.nature.go.kr(2009.11.1))