

염화칼슘 처리가 산벚나무 잎의 엽록소형광반응과 광합성기구에 미치는 영향

성주한* · 제선미 · 김선희 · 김영걸
국립산림과학원 산림보전부

Effect of Calcium Chloride(CaCl₂) on Chlorophyll Fluorescence Image and Photosynthetic Apparatus in the Leaves of *Prunus sargentii*

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

요약: 겨울철 제설제로 사용되고 있는 염화칼슘(CaCl₂)이 산벚나무(*P. sargentii*) 가로수에 미치는 영향을 조사하기 위해서, 염화칼슘 농도가 다른 수용액을 2회 처리 후 엽록소형광이미지와 광반응-광합성속도와 같은 광합성기구의 반응, 엽과 근원경 생장을 조사하였다. 3년생 산벚나무를 대상으로 개엽 전에 염화칼슘 0.5%(9 mM), 1.0%(18 mM), 3.0%(54 mM)를 2(1 L)회 뿌리둘레 부위에 처리하였다. 염화칼슘의 처리결과, 염화칼슘의 농도가 짙어짐에 따라 대조구에 비해 염화칼슘처리구의 총엽록소합량과 엽록소 a/b, 광합성속도, 양자수율, 암호흡이 감소하였다. 반면 광보상점은 염화칼슘의 농도가 높아짐에 따라 증가였다. 광합성과 양자수율, 암호흡, 광보상점과의 상관관계에서 양자수율과 광보상점에서 유의성이 나타났다(p<0.05). 한편, 최대형광(F_M)과 최소형광(F₀)의 차이인 F_v값의 형광이미지를 통해 빛을 이용하는 능력의 차이가 처리구와 대조구간에 확실하게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 광계의 활성(F_v/F_M)과 비광화학적 소멸(NPQ)의 처리 80일째 값이 모든 처리구에서 대조구에 비해 급격히 감소하였다. 이와 같은 결과로 염화칼슘 수용액에 의해서 산벚나무의 광합성, 동화기관 및 비대생장이 장애를 받고 있음을 알 수 있었다.

Abstract: There is a little information on the effect of calcium chloride (CaCl₂) which is used as deicing salt in Korea on the physiological responses of the street trees. *Prunus sargentii* is one of the most widespread tree species of street vegetation in Korea. In this study, the effect of CaCl₂ on photosynthetic apparatus such as chlorophyll fluorescence image and light response curve of *P. sargentii* in relation to their leaf and root collar growth responses were investigated. To study the effect of CaCl₂ treatment in the early spring, we irrigated twice in rhizosphere of *P. sargentii* (3-year-old) planted plastic pots with solution of 0.5%, 1.0%, 3.0% CaCl₂ concentration before leaf expansion. Results after treatments, total chlorophyll contents and the chlorophyll a/b, photosynthetic rate, quantum yield, dark respiration decreased with increasing CaCl₂ concentration. On the contrary, light compensation point increased with increasing CaCl₂ concentration. Through the linear regressions of correlation of photosynthetic rate with photosynthetic parameters (quantum yield, dark respiration and light compensation point), we found a significant relationship (p<0.05) between photosynthetic rate and quantum yield and light compensation point except dark respiration. Calcium chloride (CaCl₂) induced inhibition of photochemical efficiency (F_v/F_M) and non-photochemical quenching (NPQ) were found in treatments of CaCl₂, and these reduction rates between control and CaCl₂ treatments were drastically showed at 80 days. We suggest that physiological activities are limited from treatment of CaCl₂. These reductions of photosynthetic apparatus ability caused eventually the reduction of leaf and diameter at root collar growth.

Key words : *Prunus sargentii*, Calcium chloride, photosynthetic rate, dark respiration, chlorophyll contents, Fluorescence image

*Corresponding author
E-mail: jhs033@forest.go.kr

서론

가로변의 수목은 좁은 식재지, 척박한 토양 및 대기오염등과 같이 생육에 불리한 환경조건에서 성장하기 때문에 특별한 관리가 필요하다. 특히, 겨울철과 이른 봄의 도로 제설제 살포로 인한 염분의 영향을 간과할 수 없다. 제설제로 이용되는 것은 염화물계 화합물로 NaCl, KCl, K₂SO₄, Na₂SO₄, MgCl 등이 있다(Jonsson and Magnusdottir, 2007; Goodrich *et al.*, 2009). 우리나라에서는 CaCl₂(염화칼슘)을 주로 이용하고 있다(도로건설교통부, 2003). 고농도의 특정 염이온들이 식물에 미치는 영향은 두 가지로 작용하는데, 토양으로 집적되어 수분포텐셜의 감소 및 양분흡수를 방해하거나(Greenway and Munns, 1980; Hagemann and Murata, 2003), 또한 염이온의 독성으로 인한 피해로 세포막이나 단백질에 피해를 주는 활성산소종이 발생할 수 있다(Wang *et al.*, 2008).

식물이 성장하기 위해서는 빛에너지를 이용하여 CO₂를 고정하는 광합성작용이 필수이다. 1차적으로 빛을 수확하는 곳은 엽육세포내 엽록체안의 엽록소로써 엽록소에서 빛에너지를 흡수하게 되면 분자가 들뜬 상태가 되는데 이것을 안정된 상태의 바닥상태로 되돌리기 위해 광자를 방출하게 된다. 이때 이 광자는 붉은 빛의 형광의 형태로 방출되게 되는데, 이 엽록소 형광방출은 빛을 흡수하는 광계의 기능뿐만 아니라 광합성 전체의 기능과 스트레스에 대한 민감한 지표로 이용할 수 있다. 엽록소 형광에 대한 엽분의 피해에 대한 연구는 많은 선행연구들이 있지만 NaCl 처리에 관한 것들이 대다수이다. 최적양자수율(F_v/F_M)이나 비광화학적소멸(NPQ, non-photochemical quenching)과 같은 엽록소 형광변수들에 대해 NaCl에 대한 내성이 있는 수종과 민감한 수종들을 대상으로 한 연구를 보면 내성이 있는 수종들은 크게 변화가 없는 반면 민감한 수종들의 경우 최적양자수율(F_v/F_M)이 감소하거나 비광화학적소멸(NPQ)가 증가한다고 보고한다(Lu *et al.*, 2002; Maricle *et al.*, 2007).

산벚나무는 낙엽활엽교목으로 한국이 원산지로 일본 및 중국에도 분포한다. 내한성이 강하여 전국 어디서나 적응성이 강하고 양수의 특징을 가지며, 봄에 엽과 같이 피는 꽃이 화려하고 가을에 붉게 물드는 붉은 자색의 수피는 대중적인 아름다움을 주어 공원수나 가로수 소재로 적합하다(국가생물종지식정보시스템, 2009). 2008년 산림청 가로수조성현황을 보면 전체 식재 본 4,527천본 중 벚나무, 은행나무, 플라타너스, 느티나무가 전체의 75%를 차지하는데, 이중 벚나무의 경우 1,079 천본으로 가장 많은 30%를 차지한다(산림청, 2009). 본 연구는 가로수로 식재된 산벚나무를 대상으로 서로 다른 농도의 염화칼슘을 처리하여 빛을 포획하고 CO₂를 흡수, 고정하는 광합성기구의

변화를 엽록소 형광방출 이미지를 통해 고찰하고 이에 따른 생장율의 변화를 통하여 근권부의 염화칼슘처리에 따른 산벚나무의 생리적 변화를 연구하고자 한다.

재료 및 방법

1. 공시수종 및 염화칼슘(CaCl₂)처리

기온과 습도를 외부 환경조건과 동일하게 하기 위해 국립산림과학원(서울특별시 동대문구 회기로 57)의 온실 옆 야외에 비가림막 구조물 설치(4 m×4 m)를 하여 3년생 산벚나무 유묘 중 수고가 비슷한 묘목을 대조구, 염화칼슘 0.5%, 1.0%, 3.0% 로 각 처리구당 3본씩 선정하여 배치하였다. 염화칼슘은 CaCl₂와 H₂O가 74%이상으로 구성된 백색 제품으로 제설효과가 커서 겨울철 눈 제거작업에 많이 사용된다. 염화칼슘 처리시기는 공시묘의 생리적 활동이 시작되는 3월 29일에 처리하였다. 실험기간은 2007년 3월 29일부터 6월 17일까지 80일 동안 엽의 가시적인 피해 및 생리적인 변화를 모니터링 하였다. 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(기상청, 2009). 염화칼슘 수용액의 처리는 실제 제설작업 시 사용하는 농업용 염화칼슘을 이용하여 각 농도에 맞게 완전히 용해하여 제조한 후, 엽이 나기 전인 이른 봄 2007년 3월 29일 에 500 mL 씩 1차 처리를 하고 일주일 후에 같은 양을 2차 처리를 하였다. 염화칼슘처리 후, 수용액의 용탈을 막기 위해 화분에서 넘치지 않을 양만큼 동일하게 300 mL 씩 적정한 관수를 하여, 실험기간 동안 수분이 부족하지 않게 하였다.

2. 광합성기구의 반응 측정

1) 엽록소 함량

각각의 염화칼슘 처리구당 세 본씩 무작위로 선정하여 전체 수고를 위에서부터 아래로 네 개의 그룹을 만들어 동일하게 두 번째 그룹의 위치에서 가지 가장자리 부분의 4-5개의 완전히 확장된 성숙한 엽을 채취 한 후, 절편 0.1 g을 10 mL의 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 663 nm와 645 nm에서 측정하여 Arnon(1949)의 방법(Chlorophyll a=12.7 A₆₆₃-2.69 A₆₄₅, Chloyophyll b=22.9 A₆₄₅-4.68 A₆₆₃, Total Chlorophyll=Chlorophyll a+Chlorophyll b)으로 산출하였다.

3. 엽의 가스교환 측정

처리별 광합성속도(Net photosynthesis rate)는 휴대용광합성측정기(Licor-6400, Li-cor Inc., USA)을 이용하여 엽

록소 측정을 위해 채취하였던 동일한 위치에서 측정하였다. 광반응곡선은 부착된 red-blue LED를 이용하여 PPFD(photosynthetic photon flux density) 0, 30, 50, 100, 300, 700, 1000, 1500, 2000 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 으로 광도가 높은 곳에서 낮은 곳 순으로 설정하였다. 이때 chamber에 유입되는 공기의 유량은 500 mol s^{-1} 이며, chamber 온도는 25°C , CO_2 농도는 $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 상대 습도는 60-70%로 조절하였다. 광합성의 양자수율(ϕ)은 PPFD $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이하에서 광도와 광합성속도 간의 직선 회귀식을 구하여 산출하였으며, 직선회귀식 $y = a + bx$ 의 x 절편은 광보상점, 광도가 0 일 때, 직선 회귀식과 맞닿는 y 절편인 a 는 암호흡으로 하였다(김관기 등, 2001; Timm *et al.*, 2002; Muraoka *et al.*, 2003). 수분이용효율은 광합성능력/증산량(Ashraf *et al.*, 2002)으로 PPFD $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 광도에서 계산하였다.

4. 형광이미지 측정

엽록소형광반응 유도는 공기목을 암적응 후, 690 nm에 가까운 붉은색의 엽록소 형광방출을 CCD(Charge-Coupled Device) 카메라와 비디오보드를 엽록소 형광 측정에 적합한 Portable HandyCam(FluorCam, Photon System Instruments Ltd., Brno, Czech Republic)를 이용하여 이미지화 하였다. 렌즈와 엽 표면과의 사이의 거리는 7 cm로 모든 측정에서 동일하게 유지하였다. 15분간의 암적응 후 FluorCam 소프트웨어의 quenching analysis 측정을 위한 프로토콜 템플릿을 이용하여(10 s pulses intensity 약 $0.003 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)의 낮은 광에서 최초 측정되는 값을 F_0 , 그 후, 지속적인 actinic saturating light(약 $2000 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)로 측정되는 최고 형광 값 F_M 을 측정하였다. 최소형광 F_0 는 광계II에 있는 엽록소 a 분자가 들뜬 후 에너지가 반응중심으로 이동하기 이전에 나오는 형광을 말하며, 최대형광 F_M 에서 F_0 를 빼준 값을 $F_V(=F_M-F_0)$ 라고 한다. F_V/F_M 은 광계II의 활성을 나타내주는 지표이며, 들뜬 에너지 포획능력을 나타낸다. 엽록소 형광의 비광화학 소멸(non-photochemical quenching, NPQ)은 $(F_M/F_M')-1$ 로 계산하였다(Lawson *et al.*, 2008).

5. 근원경 생장

포트 내 식재된 유묘의 토양으로부터 1 cm 위를 표시하며 실험초기와 실험 마지막 시기인 80 일째 근원경을 측정하여 근원경의 생장율을 구하였다. 생장율은((실험마지막 근원경)-(실험초기 근원경)/(실험마지막 근원경)) $\times 100$ 으로 산출하였다.

6. 통계분석

엽내 광합성기구의 변수(총엽록소 함량, 엽록소 a와 b함

량, 엽록소 a/b, 광합성속도, 양자수율, 암호흡, 광보상점, F_V/F_M , NPQ)들과 근원경 생장율에 대하여 엽화칼슘의 서로 다른 농도 처리구 간의 차이를 GLM(General Linear Model)을 이용하여 검증하였고, Duncan multiple range test를 통해서 $p < 0.05$ 수준에서 평균값 간의 차이를 분석하였다. 또한 엽화칼슘의 서로 다른 농도 처리구 간의 광합성율과 양자수율, 암호흡, 광보상점과의 관계를 Pearson의 상관분석을 통하여 분석하고, 상관관계가 유의성을 보이는 요소 간 회귀분석을 시행하였다. 통계분석은 SAS 9.1 프로그램을 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 엽록소함량

엽화칼슘 처리 후 80 일째의 엽록소 함량의 분석결과 엽화칼슘 처리농도가 높아질수록 총 엽록소함량(Chl. T), 엽록소 a (Chl. a)와 엽록소 b (Chl. b)함량이 감소하였다. 총 엽록소함량의 경우 엽화칼슘 0.5%와 1.0% 처리구는 각각 대조구에 비해 62%, 85% 감소하였다(Table 1). 3.0% 처리구의 경우 모두 낙엽이 되었다. 대조구와 비교하여 엽화칼슘처리에 따른 엽록소 a의 감소 폭이 엽록소 b의 감소 폭에 비해 크게 나타났기 때문에 엽록소 a/b의 경우 대조구에 비해 0.5% 처리구에서는 32%, 1.0% 처리구에서는 55% 감소하였다. 이러한 결과는 식물의 생장조건이 좋지 못한 경우 혹은 엽의 노화가 진행될 때 주로 나타날 수 있으며, 이것은 스트레스를 감지할 수 있는 좋은 지표로 이용될 수 있다(양수진 등, 2007; Abreu and Munné-Bosch, 2008; Zhang *et al.*, 2008).

2. 광합성기구

엽화칼슘처리 40 일째와 80 일째의 광도변화에 따른 광합성속도의 변화를 살펴보면 광도가 증가함에 따라 광합성속도는 증가하는 일반적인 경향을 보인 가운데, 40 일째의 경우 대조구, 0.5%, 1.0%, 3.0% 처리구의 순서로 광합성속도가 낮아짐을 알 수 있었다. 80 일째 처리구의 경우 3.0% 처리구는 모두 고사하였고, 대조구에 비해 처리구들의 광합성속도가 현저하게 낮게 나타났다(Figure 1). 광반응 곡선을 통한 광합성기구의 값들을 비교하여 보면

Table 1. Change of Chlorophyll contents and Chlorophyll a/b ratio at 80 days after CaCl_2 concentration treatments in the leaves of *P. sargentii*.
unit: $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{F.W}$

Treatment	Chl.a	Chl.b	Chl.T	Chl.a : Chl.b
Control	1.31 \pm 0.16a	0.58 \pm 0.08a	1.89 \pm 0.24a	2.26 \pm 0.04a
0.5%	0.43 \pm 0.15b	0.29 \pm 0.08b	0.72 \pm 0.21b	1.53 \pm 0.39b
1.0%	0.14 \pm 0.06c	0.14 \pm 0.01c	0.29 \pm 0.05c	1.02 \pm 0.49b
3.0%	-	-	-	-

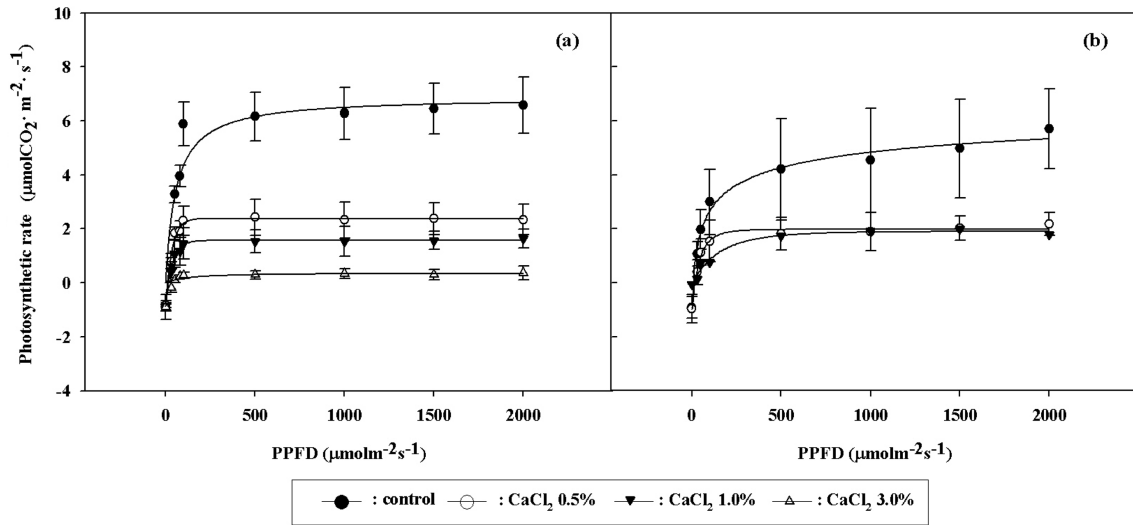


Figure 1. The light response curve of net photosynthetic rate in the leaves of *P. sargentii* at 40 days(a) and 80 days(b) after treatment of different CaCl_2 concentration.

Table 2. Photosynthetic apparatuses in the leaves of *P. sargentii* at 40 and 80 days after treatment with different CaCl_2 concentration.

Treatment	Φ ($\mu\text{molCO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$)		D_{resp} ($\mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		P_n ($\mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		L_{comp} ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	
	40days	80days	40days	80days	40days	80days	40days	80days
Control	1.68±0.17a	1.26±0.44a	0.89±0.16a	0.92±0.41a	6.28±0.96a	4.54±1.93a	1.46±0.10bc	1.38±0.28b
0.5%	0.74±0.17b	0.83±0.38ab	0.84±0.19a	1.21±0.26a	2.32±0.67b	1.88±0.72b	1.36±0.33c	2.13±0.14a
1.0%	0.54±0.15bc	0.35±0.07b	0.86±0.06a	0.20±0.06b	1.53±0.56b	1.40±0.47b	1.86±0.37b	2.31±0.13a
3.0%	0.28±0.13c	-	0.90±0.47a	-	0.34±0.18c	-	3.43±0.10a	-

* Φ : Quantum yield, D_{resp} : Dark respiration, P_n : photosynthetic rate at PPFD 1000 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, L_{comp} : Light compensation point

(Table 2), 흡수된 광자수에 대한 흡수된 이산화탄소의 비를 나타내는 양자수율(Φ , quantum yeild)은 40 일째 이미 대조구에 비해 0.5% 처리구에서 56%의 감소율을 나타냈으며, 1.0% 처리구의 경우 40 일째와 80 일째 대조구에 비해 68%, 75%로 감소율이 더 증가하였다. 이것은 광합성 작용을 하기 위한 빛을 이용하는 능력이 염화칼슘처리에 의해 감소된 것을 나타내며 염화칼슘처리 농도에 따라 급격히 감소하는 포화광도에 속하는 1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서의 광합성속도와 관련된다. 암호흡(D_{resp} , dark respiration)의 경우 큰 차이는 나타나지 않았지만 80일째 1.0% 처리구에서 급격히 감소되었다. 암호흡은 세포의 성장과 유지에 필수적인 기작으로 생합성 과정에 필요한 탄소, 환원력 그리고 ATP를 공급하는 중요한 기작으로서, 동화된 전체 탄소의 30~80% 정도 호흡에 의해 CO_2 가 소실될 수 있다(Amthor, 2000). 특히 엽에서의 호흡은 전체 식물호흡의 거의 절반 정도를 차지한다(Poorter *et al.*, 1990). 외생적 스트레스에 대한 암호흡의 변화는 수종마다 다르게 나타날 수 있지만(Galmés *et al.*, 2007; Gratani *et al.*, 2008), 식물의 전체 호흡량은 식물전체의 광합성량과 밀접한 관련이 있으므로(Cannell and Thornley, 2000), 80일

째의 1.0% 처리구의 암호흡의 급격한 감소는 매우 낮은 광합성속도와 관련 되어 광합성과 관련된 생리적 활성이 거의 정지된 상태로 생각된다. 광보상점은 CO_2 의 흡수와 방출이 동일해지는 광도로서, 광보상점이 낮으면 그만큼 낮은 광도에서부터 CO_2 흡수를 할 수 있다는 것을 의미한다. 광보상점은 40일째 3.0% 처리구에서 가장 높았으며, 특히 80일째의 경우 대조구에 비해 0.5% 처리구에서 벌써 54% 이상 증가율을 나타냈다. 이러한 결과는 산벚나무가 낮은 수준의 염화칼슘 수용액에서도 생리적 장애를 일으키는 것으로 판단되었다.

3. 형광반응이미지

형광반응 이미지는 전체 엽면적을 대상으로 형광방출을 측정할 수 있는 장점이 있으며, 식물의 피해가 엽의 어느 부분에서 진행되며 어떻게 진행되는지를 비파괴적으로 보다 쉽게 알 수 있는 장점이 있다. 15 분간의 암적응 후 최대 형광값(F_M)과 최소 형광값(F_0)의 차이에 의한 Figure 2의 형광반응이미지 결과를 통해 산벚나무의 엽이 염화칼슘처리에 따라 엽맥쪽으로 점차 붉은색이 사라지며 낮은 형광 값인 푸른색을 띄는 것을 알 수 있었다. 처

리 40 일째의 경우 처리 80 일째의 광계II의 활성(F_v/F_M)은 처리구별 변화가 거의 없었지만 80 일째의 경우 0.5%.

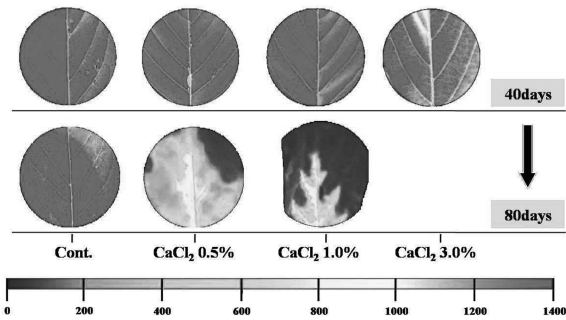


Figure 2. The represent fluorescence image in the leaves of *P. sargentii* at 40 and 80 days after $CaCl_2$ treatment. Above fluorescence image's fluorescence values are $F_M - F_0$.

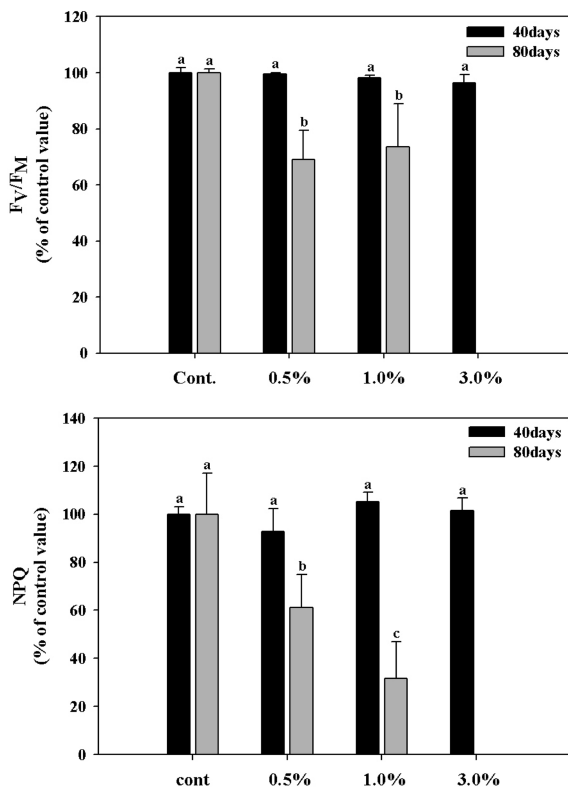


Figure 3. The maximum F_v/F_M ($F_M - F_0/F_M$) and amount of NPQ (none-photochemical quenching) in the leaves of *P. sargentii* 80 days after $CaCl_2$ treatment was measured following 15 min of dark adaptation. Three replicates are given for each species/treatment combination. Bars indicate standard deviation (SD).

1.0% 처리구는 30% 이상 광계II의 활성(F_v/F_M)이 감소하였다(Figure 3). F_v/F_M 은 광계II의 활성을 나타내며, 들뜬 에너지의 획득 능력으로서 스트레스에 대한 식물의 반응 지표로 이용된다. NaCl의 처리에 대한 내성에 관한 보고는 F_v/F_M 의 값이 염분처리에 따라 감소하였지만(Glynn *et al.*, 2003), 염생식물의 경우 F_v/F_M 의 값이 변하지 않았다고 한다(Maricle *et al.*, 2007). 한편 비광화학적 소실을 의미하는 NPQ(non-photochemical quenching)의 에너지 소산의 증가는 일반적으로 내생적, 외생적 스트레스에 대한 반응으로 알려져 있으며, 염분(NaCl) 처리에 대한 NPQ의 증가는 NaCl 처리에 민감한 수종들에서 나타나며, 염내성이 있는 식물에서는 NPQ가 증가하지 않았다(Masojidek *et al.*, 2000; James *et al.*, 2002). 산벚나무의 경우 40 일째는 큰 변화가 없었으나 80 일째 처리 농도가 증가할수록 NPQ가 0.5% 처리구는 39% 감소, 1.0% 처리구의 경우 68%로 대조구에 비해 감소하였다(Figure 3). 이러한 결과는 산벚나무가 낮은 농도의 염화칼슘 수용액에서부터 피해를 받을 수 있음을 보여 주었다.

4. 근원경 생장율

염화칼슘 처리 전과 실험마지막 80 일째의 근원경 측정 후 생장율을 비교해 본 결과, 감소하는 광합성과 형광반응능력 곧, 광합성 기구능력의 쇠퇴로 인해 고농도의 염

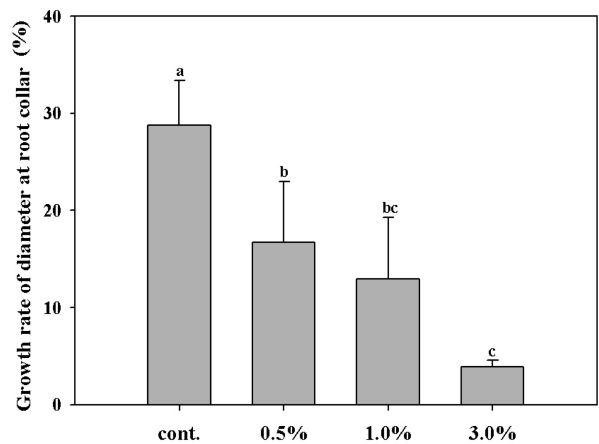


Figure 4. Growth rate of diameter at root collar in the *P. sargentii* at the last day of experiment compare of initial value. Bars indicate standard deviation (SD).

Table 3. Correlations of photosynthetic rate with photosynthetic parameters in the leaves of *P. sargentii* at 40 and 80 days after treatment with different $CaCl_2$ concentration.

Division	Φ ($\mu\text{molCO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$)			D_{resp} ($\mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)			L_{comp} ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)		
	equation	r^2	P-value	equation	r^2	P-value	equation	r^2	P-value
40days	$y=0.2351x+0.1935$	0.9914	<0.0001	$y=0.0018x+0.8734$	0.0004	0.9413	$y=-0.222x+2.6655$	0.456	0.0058
80days	$y=0.2356x+0.1211$	0.8338	0.0039	$y=0.0554x+0.6979$	0.0421	0.6222	$y=-0.2522x+2.5752$	0.7627	0.0105

* Φ : Quantum yield, D_{resp} : Dark respiration, L_{comp} : Light compensation point

화칼슘 처리구일수록 생장율이 감소하였다. 대조구에 비해 0.5%, 1.0%, 3.0% 처리구의 근원경 생장율은 각각 45%, 49%, 89%가 감소하는 것으로 나타났다(Figure 4). 이와같은 결과는 염화칼슘처리가 빛을 포획하고 CO₂를 고정하는 광합성기구의 피해로 인해 성장량에 영향을 미친 것으로 판단되었다.

결론

염화칼슘에 대한 식물의 영향은 뿌리부근의 수분포텐셜 감소로 인한 수분과 영양분 이동의 불균형 및 이온의 독성 혹은 이온의 항상성의 교란과 이에 따른 스트레스로 인한 활성산소의 증가 피해가 나타날 수 있다. 산벚나무의 개엽 전 염화칼슘처리에 대한 광합성 변수들과 형광반응이미지의 반응 특성은 염화칼슘처리 40 일째의 경우 양자수율(Φ)의 감소와 광합성속도의 감소가 두드러지게 나타났으나, F_v/F_M 과 NPQ 의 경우에는 거의 변화가 없었다. 80 일째의 경우 3.0% 처리구의 엽이 이미 모두 고사하였으며, 0.5% 처리구에서부터 총엽록소함량의 감소 및 엽록소 a/b의 비율 감소가 나타났다. 또한, 염화칼슘처리구에서 양자수율(Φ)의 감소와 포화광도에서의 광합성속도의 감소 그리고 광보상점의 증가를 통해 산벚나무가 빛을 포획하고 CO₂를 고정하는 능력에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 형광반응 이미지를 통한 F_v/F_M 및 NPQ 역시 처리 80 일째가 되면서 0.5% 처리구에서부터 각각 30% 이상의 감소율을 나타냈다. 이러한 결과는 빛을 포획하고 이용하여 CO₂를 고정하고 물질생산을 하는 광합성경로가 염화칼슘처리로 인해 직접적인 피해를 받는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 염화칼슘 처리가 산벚나무의 생장 및 생리적 활동이 저해를 받으므로 염화칼슘의 제설제 사용 시에는 주의가 필요하다.

인용문헌

1. 국가생물종지식정보시스템. 2009. 식물도감. <http://www.nature.go.kr>
2. 기상청. 2009. 기상연보. pp. 306.
3. 도로건설교통부. 2003. 도로제설핸드북. pp. 74.
4. 산림청. 2009. 가로수 조성·관리 대책. pp. 16.
5. 김판기, 이용섭, 정동준, 우수영, 성주환, 이은주. 2001. 광환경이 내음성이 서로 다른 세 수종의 광합성 생리에 미치는 영향. 한국임학회지 90(4): 476-487.
6. 양수진, 우수영, 제선미. 2007. 저농도 오존처리에 따른 다섯 가지 유묘의 기공 변화, 엽록소 함량 및 항산화 효소 활성. 한국임학회지 96(4): 470-476.
7. Abreu, M.E. and Munné-Bosch, S. 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.
8. Amthor, J.S. 2000. The McCree-de Wit-Penning de Vries-Thornley Respiration Paradigms: 30 Years Later. Annals of Botany 82: 1-20.
9. Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenol-oxidase in *Betula vulgaris*. Plant Physiology 24: 1-15.
10. Ashraf, M., Arfan, M., Shahbaz, M., Ahmad, M. and Jamil, A. 2002. Gas exchange characteristics and water relation in some elite skra cultivars under water deficit. Photosynthetica 40(4): 615-620.
11. Cannell, M.G.R., Thornley, J.H.M. 2000. Modelling the components of plant respiration: Some guiding principles. Annals of Botany 85: 45-54.
12. Galmés, J., Ribas-Carbó, M., Medrano, H. and Flexas, J. 2007. Response of leaf respiration to water stress in Mediterranean species with different growth forms. Journal of Arid Environments 68: 206-222.
13. Glynn, C.P., Gillia, A.F. and Oxenham, G. 2003. Foliar salt tolerance of Acer genotypes using chlorophyll fluorescence. Journal of Arboriculture 29(2): 61-65.
14. Gratani, L., Varone, L. and Catoni, R. 2008. Relationship between net photosynthesis and leaf respiration in Mediterranean evergreen species. Photosynthetica 46(4): 567-573.
15. Goodrich, B.A., Koski, R.D. and Jacobi, W.R. 2009. Condition of soils and vegetation along roads treated with magnesium chloride for dust suppression. Water, Air, Soil Pollution 198: 165-188.
15. Greenway, H. and Munns, R. 1980. Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. Annual Review Plant Physiology 31: 149-190.
16. Hagemann, M. and Murata., N. 2003. Glucosylglycerol, a compatible solute, sustains cell division under salt stress. Plant Physiology 131: 1628-1637.
17. James, A.R. 2002. Factors affecting CO₂ assimilation, leaf injury and growth in salt-stressed durum wheat. Functional plant biology 29(12): 1393-1403.
18. Jonsson, T.H. and Magnusdottir, M.L. 2007. Salt-related suppression of bud break in *Populus trichocarpa*: Cost of inclusion, ion-specific or osmotic effects? Icelandic Agricultural Sciences 20: 35-47.
19. Lawson, T., Lefebvre, S., Baker, N.R., Morison, J.I.L. and Baines, C.A. 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.
20. Lu, C.M., Qiu, N.W., Lu, Q.T., Wang, B.S. and Kuang, T.Y. 2002. Dose salt stress lead to increased susceptibility of photosystem to photoinhibition and changes in photosynthetic pigment composition in halophyte *Suaeda salsa* grown outdoors? Plant Science 163: 1063-1068.

21. Maricle, B.R., Lee, R.W., Hellquist, C.E. Kirasts, O. and Edwards, G.E. 2007. Effects of salinity on chlorophyll fluorescence and CO₂ fixation in C4 estuarine grasses. *Photosynthetica* 45(3): 433-440.
22. Masojidek, J., Torzillo, G, Kopecký, J., Koblížek, M., Nidiaci, L., Komenda, J., Lukavska, A. and Sacchi, A. 2000. Change in chlorophyll fluorescence quenching and pigment composition in the green *Chlorococcum* sp. Grown under nitrogen deficiency and salinity stress. *Journal of Applied Phycology* 12: 417-426.
23. Muraoka, H., Koizumi, H. and Pearcy, R.W. 2003. Leaf display and photosynthesis of tree seedlings in a cool temperate deciduous broad leaf forest understory. *Oecologia* 135: 500-509.
24. Poorter, H., Remkes, C. and Lambers, H. 1990. Carbon and nitrogen economy of 24 wild species differing in relative growth rate. *Plant physiology* 94: 621-627.
25. Timm, H.C., Stegemann, J. and Küppers, M. 2002. Photosynthetic induction strongly affects the light compensation point of net photosynthesis and coincidentally the apparent quantum yield. *Trees* 16: 47-62.
24. Wang, R., Chen, S., Zhou, X., Shen, X., Deng, L., Zhu, H., Shao, J., Shi, Y., Dai, S., Fritz, E., Hüttermann, A., and Polle, A. 2008. Ionic homeostasis and reactive oxygen species control in leaves and xylem sap of two poplars subjected to NaCl stress. *Tree physiology* 28: 947-957.
26. Zhang, X., Wollenweber, B., Jiang, D., Liu, F. and Zhao, J. 2008. Water deficits and heat shock effects on photosynthesis of a transgenic *Arabidopsis thaliana* constitutively expressing ABP9, a bZIP transcription factor. *Journal of Experimental Botany* 59(4): 839-848.

(2010년 9월 26일 접수; 2010년 11월 15일 채택)