

# 염화칼슘에 의한 스트로브잣나무의 생장 및 생리반응<sup>†</sup>

제선미 · 김선희

국립산림과학원 산림보전부

## Growth and Physiological Responses of *Pinus strobus* to CaCl<sub>2</sub>

Je, Sun-Mi · Kim, Sun-Hee

Dept. of Forest Conservation, National Institute of Forest Science

### ABSTRACT

The present study aimed to investigate the effect of calcium chloride(CaCl<sub>2</sub>) on the growth and physiological responses of *Pinus strobus* and the variables that are sensitive to CaCl<sub>2</sub>. Thus, changes in the visible damage, growth of root collar diameter, plant water content, chlorophyll content and composition, maximum PS II photochemical efficiency, and electron transport rate of *P. strobus* was analyzed in relation to treatment with CaCl<sub>2</sub>. A CaCl<sub>2</sub> solution(0.5, 1.0 and 3.0%) was applied in the root zone before leaf unfolding. Leaf browning, defoliation, and drying were observed with CaCl<sub>2</sub> application and this pattern was aggravated as the CaCl<sub>2</sub> concentration increased and the treatment period became longer. The decrease of growth in root collar diameter and height and leaf water content were observed at CaCl<sub>2</sub> 1.0% and 3.0%. The total chlorophyll content indicated that photopigment, PS II photochemical efficiency and electron transport rate significantly decreased at CaCl<sub>2</sub> 3.0%. In conclusion, CaCl<sub>2</sub> affected leaf water content and led to a decrease of capability in light harvesting and photochemical responses. Also, as a result of the correlation between calcium chloride concentration and growth and physiological response parameters, it was found that the leaf moisture content and the ratio of chlorophyll a and b reflect the damage level of calcium chloride sensitively because their coefficient of determinations were relatively high.

**Key Words:** Chlorophyll Fluorescence, Deicing Material, Deicing Material, Leaf Water Contents, Photopigment

### 국문초록

이 연구는 염화칼슘이 스트로브잣나무(*Pinus strobus*)의 생장 및 생리반응에 미치는 영향과 그 중 염화칼슘에 민감하게 반응하는 변수를 알아보려고 실시되었다. 이를 위해 염화칼슘에 처리에 대한 스트로브잣나무의 가시적 피해, 근원경 생장, 식물체 내 수분함수량, 엽록소함량과 구성, 광계 II의 최대 활성, 전자전달율의 변화를 분석하였다. 염화칼슘 처리는 개엽하기 전에 염화칼슘 0.5, 1.0, 3.0% 수용액을 근권부에 관수하였다. 염화칼슘 처리에 의한 가시적 피해로 잎의 갈변

<sup>†</sup>: 본 연구는 국립산림과학원의 연구과제(산림건강성 모니터링 지표 및 평가기법 개발, 과제번호: FE0100-2012-03)에서 수행되었음.

**Corresponding author:** Sun-Hee Kim, Dept. of Forest Conservation, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea, Tel.: +82-2-961-2617, Fax: +82-2-961-2629, E-mail: sands02@korea.kr

과 탈락, 잎 마름이 나타났으며, 이러한 피해 양상은 염화칼슘 농도가 높고, 처리 기간이 길어질수록 가중되어 나타났다. 근원경(밑둥지름) 성장량 그리고 잎의 수분함수량의 감소는 염화칼슘 1.0%와 3.0% 처리에서 유의하게 나타났다. 광색소인 총엽록소함량, 광계 II의 최대 활성, 전자전달율은 염화칼슘 3.0% 처리에서 대조구 대비 유의한 감소를 보였다. 결론적으로 염화칼슘 처리는 엽 내 수분상태에 영향을 주었고, 광수확 능력과 광화학반응 능력의 감소를 초래하였다. 또한, 염화칼슘 농도와 성장 및 생리반응 변수들 간의 상호 연관성을 분석한 결과, 잎의 수분함수량과 엽록소 a와 b의 비율의 회귀식 결정계수가 상대적으로 높아, 스트로브잣나무의 염화칼슘 피해 수준에 민감하게 반응하는 변수로 나타났다.

주제어: 엽록소형광, 제설제, 잎의 수분함수량, 광색소

## I. 서론

제설제의 종류로는 염화나트륨(NaCl), 염화마그네슘(MgCl<sub>2</sub>), 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>) 그리고 염화칼륨(KCl) 등이 있으며, 이들 중 염화칼슘은 주로 우리나라에서 제설제로 사용하는 형태이다. 칼슘(Ca<sup>2+</sup>)과 염소(Cl<sup>-</sup>)이온은 식물에 필수원소 중 하나이지만, 염소의 경우, 매우 소량만 필요하다(Marschner, 2012). 따라서 염화칼슘은 염류로서, 살포 시 가로수의 근권부에 집적되거나, 식물체에 직접적으로 과도하게 노출될 경우, 염 스트레스로 작용하여 수목의 생리 및 성장반응에 부정적인 영향을 줄 수 있다(Fostad and Pedersen, 1997; Viskari and Kärenlampi, 2000). 염 스트레스는 다음의 두 가지 원인이 단독 혹은 복합적으로 작용하여 식물에 피해를 주게 된다. 첫째, 제설제의 용해성 염 이온이 토양 내 집적되면 근권부의 삼투포텐셜이 높아져 식물체 내 수분흡수가 어려워질 수 있으며(Hagemann and Erdmann, 1997; Meloni *et al.*, 2001), 둘째, 고농도 염 이온이 식물체 내 축적되어 이온독성 및 필수영양분의 흡수장애와 이온불균형을 초래할 수 있다(Goodrich and Jacobi, 2012). 제설제로 인한 가로수의 피해 현상으로는 잎의 갈변현상, 성장량 감소, 조기낙엽 등이 있으며, 극심한 경우에는 식물의 고사를 초래할 수 있다(Czerniawska-Kusza *et al.*, 2004; Galuszka *et al.*, 2011; Ju *et al.*, 2016). 제설제의 살포는 매년 겨울철마다 이루어지기 때문에, 이러한 피해 현상이 만성적으로 나타나거나, 제설제 살포시 직접적인 접촉으로 인해 도로측 수관에서 방향성을 가지고 나타나기도 한다.

1920년경에 도입된 스트로브잣나무는 비교적 공해에 강하며, 내건성이 강하다고 알려져 있다(<http://www.nature.go.kr>). 이러한 특성으로 인해 우리나라에서 조경수나 가로변 식재 종류로 널리 이용하고 있으며, 특히 고속도로에서 가장 많이 식재하고 있는 수종이다(<http://data.ex.co.kr>). 이에 스트로브잣나무는 겨울철 제설제에 의한 염류피해의 우려가 있다. 제설제의 이용은 겨울철 보행자와 도로운행의 안전을 위해 필수 불가결하므로, 제설제에 의한 염류피해를 최소화하기 위한 관리방안을 마련하기 위해 수목의 피해 반응에 대한 이해가 필요하다.

더욱이 제설제에 의한 피해 반응은 수종마다 서로 다르게 나타나는 종 특이성을 보이므로(Sung *et al.*, 2009; Sung *et al.*, 2010; Kwon *et al.*, 2014; Je and Kim, 2016; Ju *et al.*, 2016), 다양한 가로수종들에 대한 염화칼슘 피해 반응 구명이 요구된다. 수목을 대상으로 한 기존의 염화칼슘 피해 반응에 관한 연구들은 주로 활엽수종에 국한되어 보고된 바 있다. 침엽수종의 경우, 잎의 형태적인 특성 차이로 활엽수종에 비해 생리적인 반응 측정이 쉽지 않은 측면이 있다. 또한 침엽수종의 경우, 불건전한 환경조건에서 생리적인 스트레스 수준이 심화되더라도 가시적인 피해가 나타나지 않는 경우가 있어, 피해의 진단이 용이하지 않다. 이 연구는 침엽 가로수종인 스트로브잣나무를 대상으로 염화칼슘 처리에 따른 가시적 피해, 성장, 식물체 내 수분함수량, 광색소 함량, 엽록소 형광반응 분석을 통해 염 스트레스에 대한 피해 반응과 염화칼슘 피해 수준을 민감하게 반영할 수 있는 성장 및 생리적 반응변수에 대해 알아보려고 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 공시수종 및 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>) 처리

국립산림과학원 본원의 야외실험지에 외부로부터 유입되는 수분공급을 제한하고자 상부 비가림막 구조물(4×4m)을 설치하였다. 이때, 상부 비가림막은 투명한 아크릴 판을 이용하여 광량의 제한을 최소화하였다. 실험목은 성장상태가 비슷한 3년생 스트로브잣나무 유묘를 대상으로 하였으며, 실험 전 수고와 근원경의 평균과 표준편차는 각각 48.07±8.20cm, 7.58±0.95mm 이었다. 근원부의 성장을 제한하지 않도록 2.5L 크기의 포트에 균일하게 섞은 홍릉시험림 내 산토양을 이용하여 실험목을 이식한 후, 대조구와 0.5, 1.0, 3.0% 염화칼슘 처리구별로 5본씩 수목을 배치하였다. 염화칼슘 수용액은 제설작업 시 현장에서 사용하는 공업용 염화칼슘을 이용하여 각 농도에 맞도록 완전히 용해하여 2007년 3월 스트로브잣나무의 개엽 전에 500mL 씩 일주일 간격으로 2회, 총 1L를 근권부에 관수하였다. 실험에 사용한 산토양의 이화학 특성은 Table 1과 같다. 실험기간은 처

Table 1. Chemical properties of soil used in the experiment. Values are

pH	EC(dS/m)	K <sup>+</sup> (cmolc/kg)	Na <sup>+</sup> (cmolc/kg)	Ca <sup>2+</sup> (cmolc/kg)	Mg <sup>2+</sup> (cmolc/kg)
5.960±0.035	0.550±0.028	0.141±0.006	0.408±0.027	3.838±0.145	0.679±0.031

means±S.D.(n=4)

리 시작 시기인 3월부터 당해 6월까지로, 잎의 가시적 피해와 생장 및 생리적인 반응을 조사하였다. 처리 기간인 3, 4, 5, 6월의 월평균 온도는 각각 6.1, 11.4, 18.1, 23.2℃였고, 월평균 상대습도는 59.7, 52.9, 62.1, 60.9%이었다(http://www.kma.go.kr). 관수 시, 수용액의 용탈을 막기 위해 화분에서 넘치지 않을 양 만큼 300ml 씩 적정 관수를 하여 염류의 외부 용탈을 막았고, 실험기간 동안 수분 부족으로 인한 영향이 없도록 하였다.

## 2. 가시적 피해 분석

염화칼슘 처리 후 각 처리구 내 개체목의 당년생 잎과 구엽을 대상으로 수관의 가시적 피해 양상을 관찰하였고, 염화칼슘 처리 후 30, 50, 80일째 수관의 변화를 이미지화 하였다. 수관의 가시적 피해 양상은 잎의 변색, 잎의 형태, 조기 탈락 여부를 중심으로 관찰하였다.

## 3. 근원경 생장량 분석

근원경(밑둥지름)을 실험 초기와 실험 마지막 시기에 2회 동일하게 측정 후, 92일 동안의 생장의 차이를 산출하여 염화칼슘 처리에 의한 근원경의 생장 변화량을 구하였다. 포트 내 식재된 유묘의 지표와 근접한 줄기부분에 표시를 한 후, 동일한 위치에서 측정하여 위치 변동에 따른 값의 차이가 없도록 하였다.

## 4. 식물체 내 수분함수량 분석

식물체 내 부위별 수분함수량 분석은 실험 마지막 시기에 근원경을 측정 후 수확하여 지상부의 잎, 가지, 줄기 세 부분으로 구분하여 분석하였다. 수확한 즉시 측정된 생중량(F.W.)과 65℃로 설정한 건조기에서 24시간 동안 건조시킨 후 측정된 건조량(D.W.)을 이용하여 (F.W.-D.W./D.W.)×100의 식을 통해 각 부위별 수분함수량을 산출하였다.

## 5. 광색소 함량 및 구성 분석

광색소 함량 및 구성 분석은 염화칼슘 처리 80일째, 처리구별로 당년생의 성숙한 잎을 채취한 후, 잎 절편 0.1 g을 10 mL의 DMSO(Dimethyl Sulfoxide)용액에 넣어 65℃로 설정한 건조기에서 6시간 30분 동안 추출한 후, 분광광도계(UV/Visible

Diode Array, Walden Precision Apparatus Ltd., UK)를 사용하여 파장 415, 435, 645, 663 nm에서 측정하였다. 총엽록소합량(CHL)과 엽록소 a / b(CHL a/b)은 Arnon(1949)의 방법으로 산출하였고, 엽록소가 Pheophytin(PHE)으로 분해되는 비율인 총엽록소합량과 PHE1의 비율(CHL./PHE.)은 Nakajima (2015)의 방법으로 수행하였다.

## 6. 엽록소 형광반응 분석

엽록소 형광반응 유도는 염화칼슘 처리 80일째, 처리구별로 당년생의 성숙한 잎을 15분 동안 암적응시킨 후, 690 nm에 가까운 붉은색의 엽록소 형광방출을 휴대용 엽록소형광 측정장치인 Portable HandyCam(FluorCam, Photon System Instruments Ltd., Brno, Czech Republic)을 이용하여 측정하였다. 렌즈와 잎 표면과의 사이의 거리는 모든 측정에서 동일하게 유지하였으며, Sung *et al.*(2010)과 Kitao *et al.*(2012)의 방법을 이용하여 F<sub>V</sub>/F<sub>M</sub>과 ETR을 산출하였다.

## 7. 통계 분석

근원경 생장량, 식물체 내 수분함수량, 광색소 함량 및 구성, F<sub>V</sub>/F<sub>M</sub>, ETR에 대한 결과는 통계 프로그램 SPSS ver.19.0 (IBM, Co., Armonk NY, USA)를 이용하여 일원분산분석을 하였고, 던컨의 다중검정을 통해 p<0.05 수준에서 염화칼슘의 서로 다른 농도 처리에 대한 처리구 간의 차이를 검증하였다. 또한 염화칼슘 처리 농도와 생장 및 생리반응 변수들 간의 선형회귀분석을 통해 회귀식의 결정계수를 구하고, 유의성 검증을 하였다.

# III. 결과 및 고찰

## 1. 가시적 피해

염화칼슘 처리에 의한 스트로브잣나무 수관의 가시적 피해는 염화칼슘 농도가 높아질수록, 그리고 처리 기간이 길어질수록 가중되어 나타났다. 염화칼슘 처리구의 수관의 형태는 염화칼슘 처리 80일째 결과에서 볼 수 있듯이, 대조구에 비해 상대적으로 저해된 신초의 생장과 가늘어진 엽의 두께로 인해 잎이 모여져 있는 형태를 보였다(Figure 1 참조). 염화칼슘 처리에 의한 잎의 갈변현상은 잎의 가장자리에서부터 나타났는데, 염

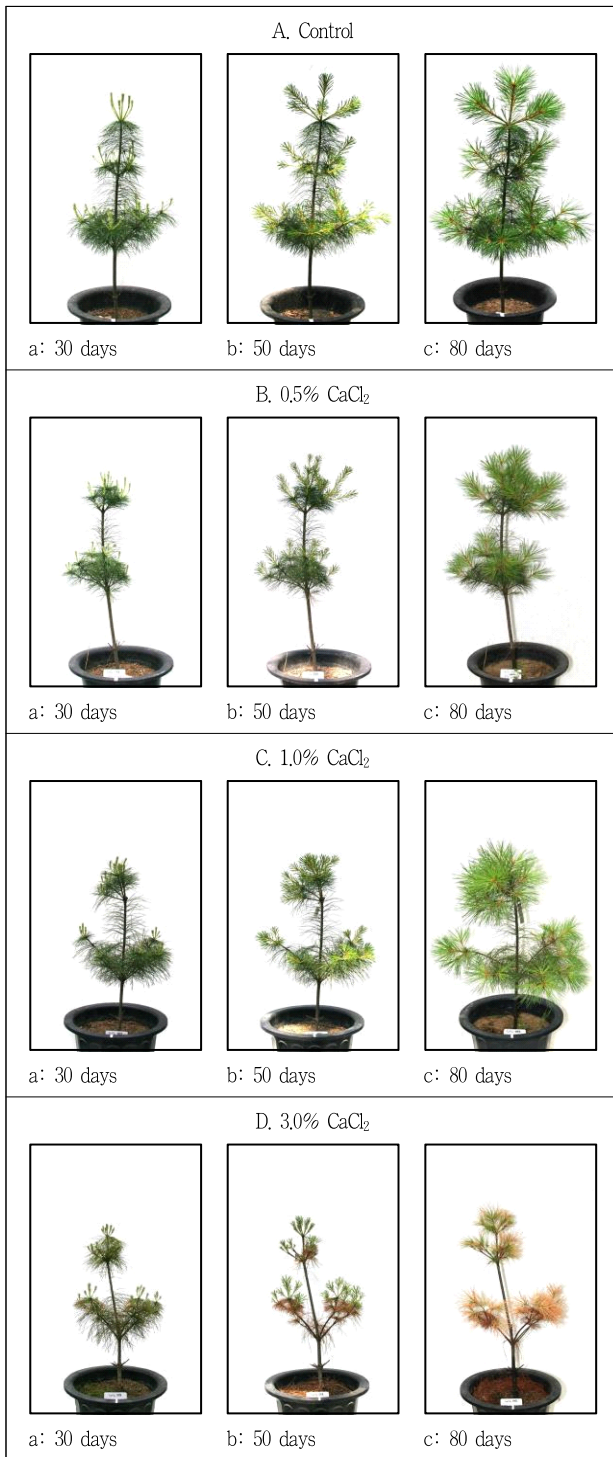


Figure 1. Visible damages of *Pinus strobus* at 35, 50 and 80 days after treatment of different  $CaCl_2$  concentration.

화칼슘 농도가 높아질수록, 그리고 처리 기간이 길어질수록 갈변현상이 잎의 기부쪽으로 확산되어 진행되었다(Figure 1 참조). 이러한 가시적 피해 현상은 제설제로 쓰이는 염화나트륨을 스트로브잣나무에 처리하였을 때의 연구결과와 일치한다

(Hall *et al.*, 1972). 또한 Lodgepole pine과 Ponderosa pine의 침엽의 경우에도 염화마그네슘 제설제 처리로 인해 잎의 끝부터 고사현상이 나타났다(Trahan and Peterson, 2007). 이러한 연구결과들은 침엽에 있어서 제설제인 염화물이 공통적으로 잎의 가장자리에서부터 세포의 괴사를 유도함을 암시한다. 또한, 잎의 갈변 및 탈락현상은 당년생 잎보다는 구엽에서 피해가 더 크게 나타났다(Figure 1 참조). Trahan and Peterson (2007)의 연구에 의하면 Lodgepole pine과 Ponderosa pine에 제설제 염화마그네슘을 처리하였을 때, 새로운 잎보다는 구엽에서 잎의 갈변과 탈락현상이 더 많이 나타났다. Kayama *et al.*(2003)과 Goodrich *et al.*(2009)은 제설제 처리에 의한 잎의 염소 함량이 당년생 잎보다는 구엽에서 더 높게 나타났음을 보고하였으며, 염소 농도와 수관외 가지적 피해 수준 간의 정의 관계를 밝힌 바 있다. 한편, 잎의 변색이 진행되지 않은 잎의 경우에도 염화칼슘 처리에 의해 잎 마름 현상이 나타나, 식물의 수분스트레스 현상과 유사성을 나타냈다. 이는 근권부 내 염분집적으로 인해 식물체 내 수분흡수가 어려워졌기 때문으로 판단된다(Walker *et al.*, 1982; Aziz and Khna, 2001; Sung *et al.*, 2010).

## 2. 근원경 성장량

염화칼슘 처리 기간 동안 스트로브잣나무의 근원경 성장의 변화를 분석한 결과, 염화칼슘 처리 농도가 높아질수록 근원경의 성장량이 감소하는 경향을 보였다. 실험 초기에 비해 대조구, 염화칼슘 0.5, 1.0, 3.0% 처리구는 근원경이 각각 평균 34, 39, 17, 8% 증가하였다(Figure 2 참조). 염화칼슘 0.5% 처리구는 대조구와 근원경 성장량에 있어 유의한 차이가 없었다. 그

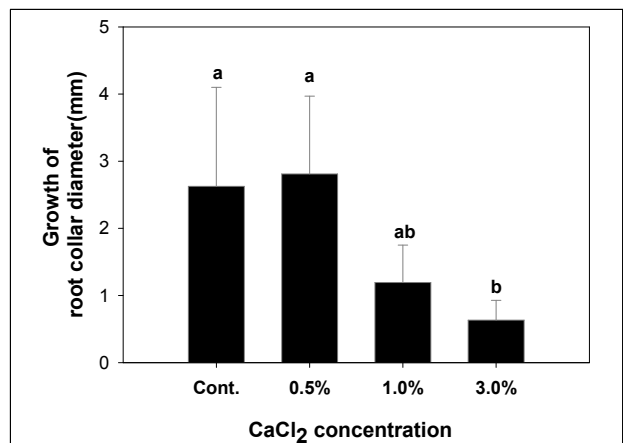


Figure 2. Difference in growth of root collar diameter between at the beginning of the experiment and at the end of the experiment in each  $CaCl_2$  treatment.

Values are means±S.D.(n=4), data sharing the same letter are not significantly different ( $p < 0.05$ ).

러나 대조구 대비 유의한 차이를 보인 1.0%와 3.0% 처리구의 경우, 대조구 대비 근원경 성장량 약 45%, 24% 수준에 그쳐 염화칼슘 처리 농도와 근원경의 성장량 간의 부의 관계를 보였다( $p < 0.05$ ) (Figure 2 참조). 염화칼슘과 같은 염 이온은 근권부에 집적되면 식물체 내 수분흡수를 어렵게 할 뿐만 아니라, 이온항상성의 교란과 독성의 원인이 되어 식물의 생장에 부정적인 영향을 미친다고 알려져 있다(Hagemann and Erdmann, 1997; Meloni *et al.* 2001; Galuszka *et al.*, 2011). 염화칼슘 처리에 따른 근원경의 성장량 감소는 개엽 전 스트로브잣나무의 염화칼슘 처리가 생장의 장애요인으로 작용하였음을 의미한다.

### 3. 잎, 가지, 줄기의 수분함수량

스트로브잣나무 잎의 수분함수량의 경우, 염화칼슘 처리 농도가 증가할수록 감소하는 부의 경향을 보였다. 염화칼슘 0.5% 처리구의 경우, 잎의 수분함수량에 있어서 대조구와 유의성이 나타나지 않았지만, 염화칼슘 1.0%와 3.0% 처리구는 잎의 수분함수량이 대조구 대비 각각 78%, 53% 수준으로 유의하게 감소하였다( $p < 0.05$ ) (Figure 3 참조). 이는 염화칼슘 처리에 의해 잎 마름 현상이 나타난 결과를 뒷받침하며, 근권부 내 염화칼슘의 집적으로 인해 수분흡수가 용이하지 않았음을 알 수 있다. 잎의 수분함수량의 감소는 잎 내부의 수분을 보존하기 위한 기공 닫힘을 유도하여 기공을 통한 CO<sub>2</sub> 흡수를 어렵게 하며, 동화산물 생산과 관련한 기작들에 작용하는 효소활성 저하를 초래할 수 있다(Wüsche *et al.*, 2005, Geissler *et al.*, 2009). 동화산물의 생산에 있어서 이러한 제한은 결국 성장감소를 초래하게 된다(Stepien and Klobus, 2006). 또한 염 스트레스 조건에서 잎의 수분함량의 감소는 세포 내 염 이온들의 이동을 저해하여 염 이온의 축적을 가중시킬 수 있는데, 이는 염 스트레스에 의한 피해를 증가시킬 수 있다(Geissler *et al.*, 2009). 한편, 줄기와 가지의 경우, 염화칼슘 처리에 의해 잎의 수분함수량이 감소했던 결과와 달리 수분함수량의 변화가 나타나지 않았다(Figure 3 참조). 이는 뿌리로부터 수분흡수가 시작되어 잎으로 이동하는 과정에서 잎은 가장 마지막 단계이자 직접적으로 수분이 기공을 통해 방출되는 곳이므로, 잎이 염분에 의한 식물체 내 수분함수량의 변화에 가장 민감하게 반응한 것으로 사료된다(Lacerda *et al.*, 2003).

### 4. 엽록소함량 및 구성

스트로브잣나무의 CHL과 CHL/PHE는 염화칼슘 3.0% 처리에서 각각 대조구 대비 53%, 45%의 유의한 수준으로 감소한 반면( $p < 0.05$ ), 상대적으로 저농도인 다른 두 처리구에서는 대조구와 유사하게 나타났다(Table 2 참조). 엽록소는 광합성을 위해 빛에너지를 흡수하는 광색소로서 엽록소함량은 광합

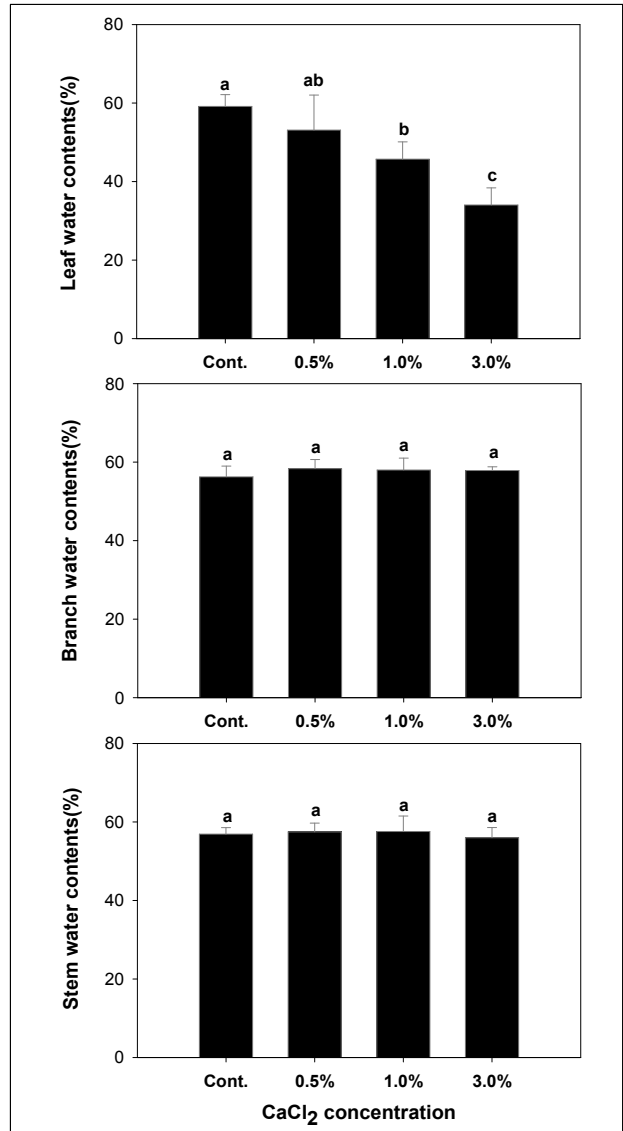


Figure 3. Leaf, branch and stem water contents of *Pinus strobus* under treatment of different concentration of CaCl<sub>2</sub>. Values are means±S.D.(n=4), data sharing the same letter are not significantly different( $p < 0.05$ ).

성과 밀접한 관련이 있다. 이러한 엽록소함량은 불건전한 환경 조건에서 엽록체의 분해와 틸라코이드 구조의 해체에 의해 감소할 수 있다(Cornoy *et al.*, 1988). 또한, PHE는 엽록소가 파괴되면서 PHE와 Mg<sup>2+</sup>로 전환되어 생성되는 것으로, CHL/PHE는 엽록소의 파괴정도를 의미한다. 따라서 염화칼슘 3.0% 처리구에서 감소한 CHL과 CHL/PHE는 염화칼슘 처리에 의해 엽록체가 손상되었음을 나타낸다. 한편, 광색소의 질을 나타내는 CHL a/b는 모든 염화칼슘 처리에서 대조구 대비 유의한 감소를 보였다( $p < 0.05$ ) (Table 2 참조). CHL a/b의 감소는 엽록소 a가 엽록소 b에 비해 더 빨리 쇠퇴하였기 때문으로 판단되며, 이러한 현상은 낙엽시기에 생물계절적인 반응으로 나타

Table 2. The chlorophyll content and composition in current leaves of *Pinus strobus* under treatment of different concentration of  $\text{CaCl}_2$

$\text{CaCl}_2$ treatment (%)	CHL( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{F.W.}$ )	CHL a/b	CHL/PHE
Cont.	5.607±0.684 <sup>a</sup>	2.484±0.146 <sup>a</sup>	4.203±0.512 <sup>a</sup>
0.5	5.867±0.102 <sup>a</sup>	2.259±0.114 <sup>b</sup>	4.422±0.120 <sup>a</sup>
1.0	5.356±1.096 <sup>a</sup>	1.920±0.052 <sup>c</sup>	4.250±0.831 <sup>a</sup>
3.0	2.654±0.654 <sup>b</sup>	1.947±0.076 <sup>c</sup>	2.317±0.531 <sup>b</sup>

CHL.: Total chlorophyll contents

CHL a/b: Ratio of chlorophyll a and b

CHL/PHL.: Ratio of total chlorophyll and pheophytin

Values are means±S.D.(n=4), data sharing the same letter are not significantly different( $p<0.05$ ).

날 수 있지만, 식물이 생장에 부적합한 환경조건에 노출되었을 경우에도 나타날 수 있다(Zhang *et al.*, 2008; Sung *et al.*, 2010). 결론적으로, 염화칼슘 처리는 스트로브잣나무의 광색소 함량을 감소시키고 광색소의 질을 저하시켰다. 이것은 광반응에 필요한 광수확 능력이 쇠퇴하였음을 나타낸다.

## 5. 엽록소 형광반응

$F_v/F_M$ 과 ETR의 경우, 염화칼슘 0.5% 처리구를 제외하고 처리 농도가 높아짐에 따라 값이 감소하는 경향을 보였으나, 유의성 있는 차이는 염화칼슘 3.0% 처리에서만 나타났다( $p<0.05$ ) (Figure 4 참조). 잎의 암적응 후, 엽록소의 형광반응 유도를 통해 분석한  $F_v/F_M$ , ETR 값은 광합성기구의 기능을 반영하는데 (Sung *et al.*, 2010; Kitao *et al.*, 2012), 이러한 결과는 CHL과 CHL/PHE의 결과와 일치한다(Table 2 참조). 이는 염화칼슘 처리는 스트로브잣나무의 광수확 능력을 저해시켰을 뿐만 아니라, 엽록소의 활성화와 관련한 광화학반응 능력 또한 감소시켰음을 의미한다. 이것은 염화칼슘 처리에 의한 엽 내 수분함수량 감소에 기인할 수 있으며, 광합성의 광반응에서 중요한 광수확 능력과 광화학반응 능력의 저하는 광합성에 의한 최종 동화산물의 감소를 가져와, 스트로브잣나무의 근원경 성장량을 감소시키는데 영향을 주었을 것으로 판단한다.

## 6. 염화칼슘 농도와 스트로브잣나무의 성장 및 생리 반응과 상관관계

염화칼슘 농도와 성장 및 생리반응 변수들의 상호 연관성 정도를 알아보기 위해 회귀분석을 통한 회귀식의 결정계수( $r^2$ ) 값을 살펴본 결과, 염화칼슘 농도와 잎의 수분함수량이 결정계수 0.834로 가장 높게 나타났다( $p<0.001$ ) (Table 3 참조). 이는 스트로브잣나무의 경우, 염화칼슘 농도의 변화에 따라 잎의 수분함수량이 민감하게 반응한다는 것을 의미한다. 그 다음으로

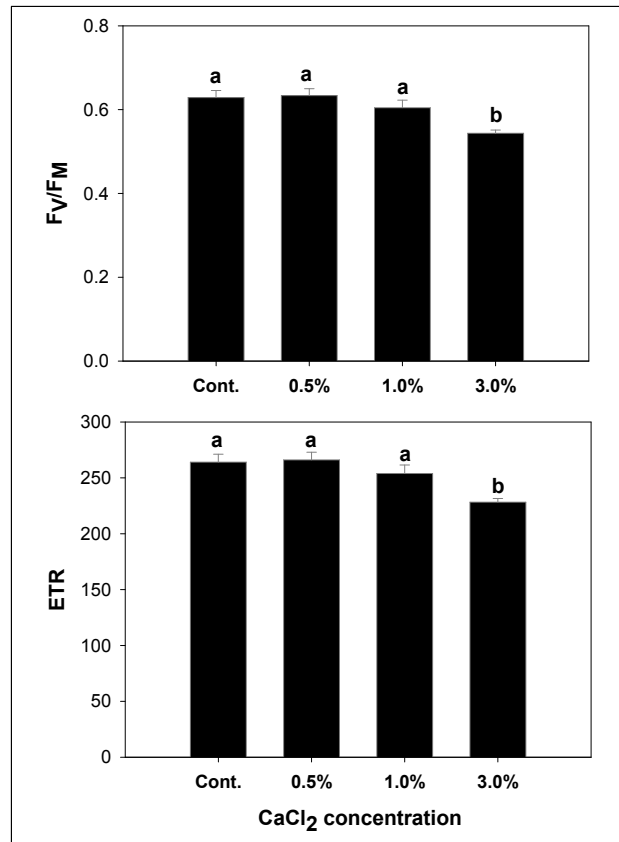


Figure 4. The chlorophyll fluorescence characteristics( $F_v/F_M$  and ETR) in the leaves of *Pinus strobus* under treatment of different concentration of  $\text{CaCl}_2$ .

Values are means±S.D.(n=4~5), data sharing the same letter are not significantly different( $p<0.05$ ).  $F_v/F_M$ - maximum photochemical efficiency of PS II, ETR- electron transport rate.

Table 3. Relationship between concentration of  $\text{CaCl}_2$  and growth and physiological parameters of *Pinus strobus* under treatment of different concentration of  $\text{CaCl}_2$

Parameters	Liner equation	$r^2$
Growth of root collar diameter	$y = -0.759x + 3.713$	0.477 <sup>*</sup>
Leaf water content	$y = -8.237x + 68.508$	0.834 <sup>***</sup>
Branch water content	$y = -1.428x + 51.610$	0.039
Stem water content	$y = 0.466x + 53.982$	0.007
CHL.	$y = -0.948x + 7.136$	0.575 <sup>**</sup>
CHL a/b	$y = -0.198x + 2.650$	0.778 <sup>***</sup>
CHL/PHL	$y = -0.545x + 5.128$	0.431 <sup>*</sup>
$F_v/F_M$	$y = -0.026x + 0.672$	0.591 <sup>**</sup>
ETR	$y = -10.781x + 282.080$	0.591 <sup>***</sup>

CHL.: Total chlorophyll contents

CHL a/b: Ratio of chlorophyll a and b

CHL/PHL.: Ratio of total chlorophyll and pheophytin

$F_v/F_M$ : Maximum photochemical efficiency of PS II

ETR: Electron transport rate

Level of significance: \*  $p<0.05$ , \*\*  $p<0.01$ , \*\*\*  $p<0.001$ , n=14~16

는 CHL a/b의 결정계수가 0.778 로 높게 나타나, 광색소의 함량보다는 광색소 함량의 구성이 염화칼슘 처리에 민감하게 반응할 수 있음을 나타냈다( $p < 0.001$ ). 암반응 후 잎의 형광반응을 통해 구한  $F_v/F_m$ 과 ETR은 외부의 환경스트레스에 대해 민감하게 반응하는 반면, 현장에서 비교적 수월하게 측정할 수 있는 장점이 있다(Percival, 2005; Kitao *et al.*, 2012; Sung *et al.*, 2009; Kwon *et al.*, 2014). 그러나 스트로브잣나무의 경우, 염화칼슘 처리 농도와  $F_v/F_m$ 과 ETR 간의 회귀분석을 통해 상호 연관성을 알아본 결과, 회귀식의 결정계수가 0.591 로 나타나, 잎의 수분함수량과 CHL a/b에 비해 염화칼슘 처리 농도와 상호 연관성이 낮은 것으로 나타났다( $F_v/F_m$ :  $p < 0.01$ , ETR:  $p < 0.001$ ) (Table 3 참조). 따라서 생장 및 생리반응 변수들 중 잎의 수분함수량과 CHL a/b를 스트로브잣나무의 염화칼슘 피해 수준을 잘 반영할 수 있는 분석항목으로 제안할 수 있을 것으로 판단한다.

#### IV. 결론

이 연구는 침엽 가로수종인 스트로브잣나무의 염화칼슘에 의한 피해 반응과 피해 수준을 민감하게 반영할 수 있는 생장 및 생리적 반응 변수를 구명하기 위해 서로 다른 염화칼슘 농도에 따른 가지적 피해 현상 및 생장과 생리 반응을 분석하였다. 연구결과, 가지적 피해 현상으로 염화칼슘 농도가 높아지고, 처리 기간이 길어질수록 잎의 갈변과 탈락, 잎 마름 현상이 증가하였다. 식물체 내 잎, 가지, 줄기의 수분함수량을 분석한 결과, 염화칼슘 처리 농도가 높아질수록 잎의 수분함수량 감소가 크게 나타났다. 또한, 염화칼슘 처리에 의해 광색소 함량과 질, 그리고  $F_v/F_m$ 과 ETR이 감소하여 광합성 과정 중 빛을 흡수하고 이용하는 능력이 저하된 것을 알 수 있었다. 이러한 생리적 반응들은 근원경의 생장량 감소를 초래하였다. 또한 염화칼슘 처리 농도와 생장 및 생리적 반응 변수들 간의 상호 연관성을 분석한 결과, 잎의 수분함수량과 CHL a/b의 회귀식의 결정계수가 상대적으로 높게 나타나, 스트로브잣나무의 염화칼슘 피해 수준을 진단하기 위한 분석항목으로 제안할 수 있을 것으로 판단한다. 다만, 이것은 염화칼슘에 대한 단기간의 피해 반응 결과로, 겨울철마다 지속적으로 가로변에 처리되는 제설제의 만성적인 피해 반응에 대한 적용에는 한계가 있을 수 있다. 따라서, 추후 장기간의 시계열적인 피해 반응 연구가 요구되는 바이다. 한편, 좀 더 나아가 이 연구결과를 바탕으로 가로수의 피해 수준과 엽 내 염화칼슘 농도 간의 상호 연관성이 구명된다면, 가로수 관리를 위한 실증 자료 마련이 가능할 것으로 사료된다.

#### References

1. Arnon, D. I. (1949) Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenol-oxidase in *Betula vulgaris*. Plant Physiology 24: 1-15.
2. Aziz, I. and M. A. Khan (2001) Effect of seawater on the growth, ion content and water potential of *Rhizophora mucronan* Lam. Journal of Plant Research 114: 369-373.
3. Conroy, J. P., J. M. Virgona, R. M. Smillie and E. W. Barlow (1988) Influence of drought acclimation and CO<sub>2</sub> enrichment on osmotic adjustment and chlorophyll a fluorescence of sunflower during drought. Plant Physiology 186: 1108-1115.
4. Czerniawska-Kusza, I., G. Kusza and M. Duzynski (2004) Effect of deicing salts on urban soils and health status of roadside trees in the Opole region. Environmental Toxicology 19(4): 296-301.
5. Fostad, O. and P. A. Pedersen (1997) Vitality, variation, and causes of decline of trees in Oslo center (Norway). Journal of Arboriculture 23: 155-165.
6. Galuszka, A., Z. M. Migaszewski, R. Podlaski, S. Dolegowska and A. Michalik (2011) The influence of chloride deicers on mineral nutrition and the health status of roadside trees in the city of Kielce, Poland. Environmental Monitoring Assessment 176: 451-464.
7. Geissler, N., S. Hussin and H. W. Koyro (2009) Interactive effects of NaCl salinity and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on growth, photosynthesis, water relations and chemical composition of the potential cash crop halophyte *Aster tripolium* L. Environmental and Experimental Botany 65: 220-231.
8. Goodrich, B. A. and W. R. Jacobi (2012) Foliar damage, ion content, and mortality rate of five common roadside tree species treated with soil applications of magnesium chloride. Water, Air, & Soil Pollution 223: 847-862.
9. Goodrich, B. A., R. D. Koski and W. R. Jacobi (2009) Condition of soils and vegetation along roads treated with magnesium chloride for dust suppression. Water, Air and Soil Pollution 198: 165-188.
10. Hagemann, M. and N. Erdmann (1997) Environmental stresses. In: Rai, A. K. (Ed.), Cyanobacterial Nitrogen Metabolism and Environmental Biotechnology. Springer, Heidelberg, Narosa Publishing House, New Delhi, India, pp. 156-221.
11. Hall, R., G. Hofstra and G. P. Lumis (1972) Effects of deicing salt on eastern white pine: Foliar injury, growth suppression and seasonal changes in foliar concentrations of sodium and chloride. Canadian Journal of Forest Research 2: 244-249.
12. Je, S. M. and S. H. Kim (2016) Effect of CaCl<sub>2</sub> on gas exchange and stomatal responses in the leaves of *Prunus serrulata*. Journal of Korean Forest Society 105(3): 303-308.
13. Ju, J. H., J. Y. Park, H. Xu, E. Y. Lee, K. H. Hyun, J. S. Jung, E. Y. Choi and Y. H. Yoon (2016) Growth and physiological response of three evergreen shrubs to de-icing salt (CaCl<sub>2</sub>) at different concentrations in winter. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 44(2): 122-129.
14. Kayama, M., A. M. Qureshi, S. Kitaoka, Y. Kitahashi, Y. Sakamoto, Y. Maruyama, M. Kitao and T. Koike (2003) Effects of deicing salt on the vitality and health of two spruce species, *Picea abies* (Karst.) and *Picea glehnii* (Masters) planted along roadsides in northern Japan. Environmental Pollution 124(1): 127-137.
15. Kitao, M., H. Tobita, H. Utsugi, M. Komatsu, S. Kitaoka, Y. Maruyama and T. Koike (2012) Photosynthetic traits around budbreak in pre-existing needles of Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) seedlings grown under elevated CO<sub>2</sub> concentration assessed by chlorophyll fluorescence measurements. Tree Physiology 32(8): 998-1007.
16. Kwon, M. Y., S. H. Kim and J. H. Sung (2014) The responses of growth and physiological traits of *Acer triflorum* on calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>) concentration. Korean Journal of Environment and Ecology

- 28(5): 500-509.
17. Lacerda, C. F., J. Cambráia, M. A. Oliva, H. A. Ruiz and J. T. Prisco(2003) Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. *Environmental and Experimental Botany* 49(2): 107-120.
  18. Marschner, P.(2012) *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, Ed 3. San Diego: Academic Press.
  19. Meloni, D. A., M. A. Oliva, H. A. Ruiz and C. A. Martinez(2001) Contribution of proline and inorganic solutes to osmotic adjustment in cotton under salt stress. *Journal of Plant Nutrition* 24: 599-612.
  20. Nakajima, H., K. Hara, Y. Yamamoto and K. Itoh(2015) Effects of Cu on the content of chlorophylls and secondary metabolites in the CU-hyperaccumulator lichen *Stereocaulon japonicum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 113: 477-482.
  21. Percival, G. C.(2005) Identification of foliar salt tolerance of woody perennials using chlorophyll fluorescence. *HortScience* 40(6): 1892-1897.
  22. Stepień, P. and G. Kłobus(2006) Water relations and photosynthesis in *Cucumis sativus* L. leaves under salt stress. *Biologia Plantarum* 50(4): 610-616.
  23. Sung, J. H., S. M. Je, S. H. Kim and Y. K. Kim(2009) Effect of calcium chloride(CaCl<sub>2</sub>) on the characteristics of photosynthetic apparatus, stomatal conductance, and fluorescence image of the leaves of *Cornus kousa*. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 11(4): 143-150.
  24. Sung, J. H., S. M. Je, S. -H. Kim and Y. -K. Kim(2010) Effect of calcium chloride(CaCl<sub>2</sub>) on chlorophyll fluorescence image and photosynthetic apparatus in the leaves of *Prunus sargentii*. *Journal of Korean Forest Society* 99(6): 922-928.
  25. Trahan, N. A. and C. M. Peterson(2007) *Factors Impacting the Health of Roadside Vegetation*. Colorado Department of Transportation Research Branch Final Report No., CDOTDTD-R-2005-12.
  26. Viskari, E. -L. and L. Kärenlampi(2000) Roadside scots pine as an indicator of deicing salt use -A comparative study from two consecutive winters. *Water, Air and Soil Pollution* 122(3): 405-419.
  27. 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. *Functional Plant Biology* 9(6): 783-790.
  28. Wüschel, J. N., D. H. Greer, W. A. Laing and J. W. Palmer(2005) Physiological and biochemical leaf and tree responses to crop load in apple. *Tree Physiology* 25: 1253-1263.
  29. Zhang, X., B. Wollenweber, D. Jiang, F. Liu and J. Zhao(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.
  30. <http://data.ex.co.kr>
  31. <http://www.kma.go.kr>
  32. <http://www.nature.go.kr>

---

Received : 10 January, 2017

Revised : 01 February, 2017 (1st)

01 March, 2017 (2nd)

24 April, 2017 (3rd)

Accepted : 24 April, 2017

3인익명 심사필