

# 염화칼슘 농도에 따른 복자기의 생장 및 생리적 반응 특성<sup>1</sup>

권민영<sup>2</sup> · 김선희<sup>2\*</sup> · 성주한<sup>2</sup>

## The responses of Growth and Physiological traits of *Acer triflorum* on Calcium Chloride (CaCl<sub>2</sub>) Concentration<sup>1</sup>

Min-Young Kwon<sup>2</sup>, Sun-Hee Kim<sup>2\*</sup>, Joo-Han Sung<sup>2</sup>

### 요 약

겨울철 눈이 내린 도로의 동결을 방지하기 위해 염화칼슘을 제설제로 사용하는데 이것은 용해되어 도로주변의 수목에 피해를 줄 수 있다. 본 연구는 겨울철 제설제로 이용되는 염화칼슘 처리에 따른 복자기의 생장과 생리적 반응을 알아보기 위해 생장 특성, 광색소함량, 광합성 효율, 엽록소형광반응을 측정하고 식물체 및 토양 분석을 하였다. 실험구는 무처리(대조구), 9mM(0.5%), 18mM(1.0%), 54mM(3.0%)의 총 4개의 처리구로 나누어 용해액을 신초가 나기 전, 일주일 간격으로 2회 500ml씩 살포하였다. 염화칼슘 처리 결과, 처리 후 30일째 염화칼슘 농도가 증가함에 따라 0.5% 처리구부터 총엽록소함량, 광합성율, 증산율, 기공전도도, 광계 II 활성이 감소하였고 특히 3.0% 처리구에서 두드러졌다. 반면, 엽록소a/b는 염화칼슘 농도가 높아짐에 따라 증가하였고 수분이용효율은 1.0% 처리구에서부터 증가하였다. 처리 후 50일째 3.0% 처리구는 고사하여 측정할 수 없었고, 모든 처리구에서 대조구에 비해 엽록소a, 엽록소b, 총엽록소함량, 광계 II 활성, 광계 II 광화학효율이 감소하였다. 이러한 결과는 Ca<sup>2+</sup>와 Cl<sup>-</sup>이 잎과 토양에 축적되어 수분의 흡수와 전자전달의 방해에 기인한 것으로 염화칼슘 처리구에서 수고생장율의 50% 이상 저하를 가져왔다. 염화칼슘의 처리 농도와 시기에 따른 차이는 있었지만 모든 염화칼슘 처리구에서 생장율은 감소하고 생리적 활성은 둔화되었고 이는 시간이 경과함에 따라 심해졌다.

주요어: 가스교환능력, 엽록소 함량, 엽록소 형광, 수고생장

### ABSTRACT

To prevent freezing of the road by fallen snow, Calcium chloride(CaCl<sub>2</sub>) as a deicer is used to very often and it can be harmful to roadside trees. This study was conducted to investigate the effects of Calcium chloride(CaCl<sub>2</sub>) as a deicer on growth and physiological traits of *Acer triflorum* according to different concentration of CaCl<sub>2</sub>. We measured growth, chlorophyll contents, gas exchangement characteristics, chlorophyll fluorescence and mineral nutrition concentration in plant and soil. The experimental group was composed of four treatments including 0mM(control), 9mM(0.5%), 18mM(1.0%), 54mM(3.0%). Before germinating new shoot, the dissolution of CaCl<sub>2</sub> was irrigated twice interval of a week. At 30 days after treatment, all treatments decreased total chlorophyll content, photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal

1 접수 2014년 8월 21일, 수정 (1차: 2014년 10월 10일, 2차: 2014년 10월 16일), 게재확정 2014년 10월 17일

Received 21 August 2014; Revised (1st: 10 October 2014, 2nd: 16 October 2014); Accepted 17 October 2014

2 국립산림과학원 생태연구과 Divison of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute., 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul (130-712), Korea (sands02@forest.go.kr)

\* 교신저자 Corresponding author: sands02@forest.go.kr

conductance and photochemical efficiency( $F_v/F_m$ ) with increasing concentration of  $CaCl_2$  and especially, they significantly reduced in 3.0 % treatment. In contrast, chlorophyll a/b ratio increased with an increase of  $CaCl_2$  concentration and water use efficiency increased in 1.0 % and 3.0 % treatments. At 50 days after treatment, all treatments were decreased in chl a, chl b, total chlorophyll content, carotenoid content, photosynthetic capacity, photochemical efficiency( $F_v/F_m$ ) and quantum yield of photosystem II ( $\Phi_{PSII}$ ) compared with control and 3.0 % treatments were withered.  $Ca^{2+}$  and  $Cl^-$  were accumulated in leaves and soil, which inhibited water absorption and electron transport and it caused the reduction of height growth rate more than 50 %. Although there was a little difference according to time and  $CaCl_2$  concentration, all treatments decreased in growth rate and physiological activity slowed down. As time passed, these results got worse. Therefore we need to take a measure earlier in order to minimize damage of trees.

**KEY WORDS: GAS EXCHANGEMENT CHARACTERISTIC, CHLOROPHYLL CONTENT, CHLOROPHYLL FLOURESCENCE, HEIGHT GROWTH**

## 서론

최근 겨울철과 이른 봄에 내리는 잦은 강설로 인해 제설제인 염화칼슘( $CaCl_2$ )의 사용 빈도와 양이 증가하고 있다. 염화칼슘은 칼슘과 염소의 이온성 화합물로서 습한 여름에는 수분흡수를 하여 습기제거제로 이용되며 겨울에는 물의 어는점을  $-55^\circ C$ 까지 낮출 수 있어 눈길이나 빙판길의 얼음을 녹이는 제설제로 이용되고 있다. 하지만, 겨울철 차량과 보행자의 안전을 도모하기 위해 사용된 제설제는 눈에 용해된 염화칼슘이 도로와 토양에 스며들어 주변에 식재된 가로수 생육에 영향을 미친다. 토양에 집적되어 있는 염화칼슘은 봄에 기온이 상승하여 수목의 생리적 활동이 시작함에 따라 늦은 개엽, 신초신장 불량, 엽 생장 저해 및 엽 변색, 조기낙엽, 고사 등의 피해를 유발하고 그에 따라 가로수가 가지고 있는 대기오염 정화, 도로보호, 소음차단, 미세먼지 후 조절과 미관 조성과 같은 공익적 기능의 약화를 초래한다.

토양 내 염류집적의 증가는 수목에 염스트레스를 유발하며 식물에게 다양한 양상으로 피해를 주게 된다. 우선, 토양 내 염 누적은 삼투압이 증가하여 근권부를 통한 지상부로의 수분 흡수를 방해하고 식물에 흡수된 염은 이온의 농도증가로 식물체 내 독성이 증가하게 된다(Grattan and Grieve, 1999; Parida *et al.*, 2004; Sudhir and Murthy, 2004; Jaleel *et al.*, 2008; Slama *et al.*, 2008). 이온이 과다하게 축적되어 전자전달을 방해하며 이로 인해 광계 II 활성의 저하, 광합성 감소, 엽록소 함량 감소 등의 생리적 변화와 함께 갈변, 조기 낙엽, 괴화, 황화현상과 생장 감소 등의 가시적 피해 양상이 같이 나타나게 된다(Schreiber and Bilger, 1993; Jefferies, 1994; Boughalleb *et al.*, 2008; Jaleel *et al.*, 2008; Hichem *et al.*, 2009; Shin *et al.*, 2010).

국내에서 간척지와 매립지 조성 등으로 인해 염화나트륨( $NaCl$ )과 관련한 염분스트레스에 대한 연구는 다양하게 수행되어 왔지만, 제설제로 많이 이용되는 염화칼슘이 수목에 미치는 영향에 대한 연구는 소나무, 스트로브잣나무, 산딸나무, 산벚나무 등 일부 수종에 국한되어 있다(Kwon and Kim, 2008; Sung *et al.*, 2009; Sung *et al.*, 2010). 또한, 염류에 대한 내성은 수종 간에 차이를 보이기 때문에 이에 대한 관리방안을 모든 수종에 동일하게 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 수종별 관리방안 마련을 위해 다양한 수종을 대상으로 한 연구 수행이 필요하다.

복자기는 단풍나무과 낙엽활엽교목으로 우리나라 전국 산야에 분포하며 주로 중부 이북에 자생한다. 추위와 건조에 잘 견디고 건조한 토양에 잘 적응하는 특징을 가지며 이른 봄 개화하는 수나무의 황금색 꽃의 경관이 훌륭하고 가을철 단풍이 아름다워 가로수, 공원수 등으로서 이용할 가치가 높다(Korea Biodiversity Information System, 2014). 그러나 생태적 입지조건이 열악한 도심 내 식재 시에는 공해와 염해에 대한 주의가 필요한 수종이다. 따라서 본 연구는 복자기를 대상으로 염화칼슘 처리에 따른 생장, 생리적 반응의 조사를 통해 가로수의 염류피해에 대한 관리방안 마련을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 연구방법

### 1.공시재료 및 염화칼슘 처리

공시 수종은 복자기(*Acer triflorum* Kom.) 4년생 묘목으로, 2009년 2월에 1년생 묘목을 포트(직경 30cm, 깊이 35cm)에 식재하여 3년간 활착시켰으며 2012년 4월에 평균수고( $102 \pm 7$ cm)와 평균근원경( $12 \pm 2$ mm)의 묘목을 선정하여 사용

하였다. 실험은 외부 환경의 영향이 없도록 국립산림과학원 실내 온실에서 진행하였다. 염화칼슘 처리는 농업용 염화칼슘( $\text{CaCl}_2$ )을 이용하여 무처리(대조구), 9mM(0.5%), 18mM(1.0%), 54mM(3.0%) 농도 수용액을 제조한 후, 각 처리구 당 5분씩 관수처리하였다. 염화칼슘 처리 시기는 신초가 나기 전인 2012년 4월 2일에 1차로 500ml씩 관수하고 일주일 후에 같은 양으로 2차 처리한 후, 5월 31일까지 60일 동안 생리 및 성장 반응을 모니터링하였다. 모니터링 기간 동안에는 토양의 수분부족으로 인한 건조스트레스를 방지하기 위해 화분 아래로 염화칼슘이 용탈되지 않도록 일주일에 한번 500ml씩 관수하였다.

## 2. 성장율

실험목의 수고와 근원경은 실험 시작일과 종료일인 처리 후 60일째 측정하여 성장율을 구하였다. 성장율은 다음의 식을 이용하여 상대성장율(RGR, relative growth rate)로 산출하였다(Hughes and Freeman, 1967).

$$\text{RGR} = \text{Log } H_2 - \text{Log } H_1 / T_2 - T_1$$

$H_1$ : 초기 수고     $H_2$ : 종료 시 수고

$T_1$ : 실험 시작시점     $T_2$ : 실험 종료시점

## 3. 생리반응

처리에 따른 생리반응 특성은 엽록소 함량, 엽록소 형광반응과 광합성기구 변화 등을 측정하였다. 처리 후 시간경과에 따른 생리반응 변화를 알아보기 위해 엽록소 함량과 형광반응은 처리 후 30일째와 50일째 측정하였고 광합성기구 변화는 처리 후 30일째 측정하였다. 측정은 처리구당 3반복씩 하였으며 광합성 측정과 동일한 잎을 사용하여 형광반응과 엽록소 함량을 측정하였다.

### 1) 엽록소 함량

각 처리구의 시료의 절편을 0.1g씩 채취하여 10ml DMSO용액에 넣고 65°C에서 6시간 동안 추출하였다. 그 후, 추출액은 분광광도계(UV/Visible Diode Array, Walden Precision Apparatus Ltd., UK)를 이용하여 645nm와 663nm에서 흡광도를 측정하고 엽록소 함량은 각각 Arnon(1949)의 방법에 따라 산출하였다.

$$\text{Chlorophyll a} = 12.7 A_{663} - 2.69 A_{645}$$

$$\text{Chlorophyll b} = 22.9 A_{645} - 4.68 A_{663}$$

$$\text{Total chlorophyll (a+b)} = 20.29 A_{645} - 8.02 A_{663}$$

### 2) 형광반응 및 형광이미지

엽록소 형광반응은 Portable Handy Fluorcam(Flour Cam,

Photon system Instruments Ltd, Brno, Czech Republic)을 이용하여 카우츠키유도 방법으로 측정하였다(Kautsky and Hirsch, 1931).

엽록소 형광반응 유도는 잎을 15분 동안 암적응 시킨 후, 측정광(modulated light)을 비추어 최소형광( $F_0$ )을 측정하고 포화광(saturated light)을 비추어 최고형광( $F_m$ )을 측정하였다. 그 후 광합성이 진행되는 동안 포화광을 비추어 ( $F_m'$ )을 측정하고, 수분 후에 안정 상태에 도달한 ( $F_t$ )를 구하였다. 또한 ( $F_t$ ) 측정 후 광선을 제거한 형광( $F_0'$ )을 측정하였다. 측정된 형광 파라미터들을 이용하여 광계 II의 활성(maximum potential PS II efficiency,  $F_v/F_m$ ), 광계 II 광화학효율(quantum yield of PS II electron transport,  $\Phi_{psII}$ ), 비광화학적 형광소멸(non-photochemical quenching, NPQ)은 다음 식으로 산출하였다.

$$F_v/F_m = F_m - F_0 / F_m,$$

$$\Phi_{psII} = (F_m' - F_t) / F_m',$$

$$\text{NPQ} = F_m - F_m' / F_m'.$$

### 3) 광합성 기구 및 가스교환 특성

처리별 광합성 속도는 휴대용 광합성기(Li-6400, Li-Cor Inc., USA)를 이용하여 광도 및 엽육 내  $\text{CO}_2$  농도 변화에 따른 반응을 측정하였고 측정은 날씨 맑은 날 08:00~11:00 사이에 수행되었다. 챔버 내 환경은 유량  $500 \mu\text{mol s}^{-1}$ , 습도 50~60%, 온도 25°C로 설정하여 외부의 영향이 없도록 하였다.

광화학계 효율을 알아보는 광-광합성반응 곡선(Light response curve)은,  $\text{CO}_2$  농도  $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 에서 PPFD(photosynthetic photon flux density) 0, 50, 100, 400, 700, 1000, 1500  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 으로 설정하여 측정된 광합성 속도를 이용하여 작성하였다. 암호흡과 순양자수율은 광과 광합성의 관계가 직선으로 이루어지는 PPFD 0~100  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서의 직선회귀식  $y=a+bx$ 을 이용하여 y절편 a는 암호흡 속도(Drep, dark respiration), 기울기 b는 순양자수율( $\Phi$ , net apparent quantum yield)로 나타냈다(Kim and Lee, 2001).

탄소고정계의 효율을 알아보는  $\text{CO}_2$  반응 곡선은 PPFD 1000  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서  $\text{CO}_2$  농도를 0, 100, 200, 400, 700, 1000, 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ 의 7단계로 조절하여 광합성 속도를 측정하고 엽육 내  $\text{CO}_2$  농도( $C_i$ )와 광합성(A)의 관계를 나타내는 A- $C_i$  곡선으로 나타냈다. 광호흡과 탄소고정효율은  $\text{CO}_2$  농도에 따른 광합성 속도가 직선적으로 나타나는 구간인 0~150  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ 에서의 직선회귀식  $y=a+bx$ 의 y절편 a는 광호흡 속도(photorespiration rate) 기울기 b는 탄소고정효율(carboxylation efficiency)을 구하였다(Kim and Lee, 2001).

가스교환능력을 알아보기 위해 PPFD 1000  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$

에서의 광합성속도( $P_n$ , Photosynthetic rate)와 함께 측정된 증산속도( $E$ , Transpiration rate)를 이용하여 수분이용효율(WUE, water use efficiency,  $P_n/E$ )을 산출하였다. 기공개폐흐름을 알아보기 위해 기공전도도( $G_s$ , Stomatal conductance)를 비교 분석하였다.

#### 4. 통계분석

분석결과의 통계적 유의성을 알아보기 위해 SPSS(Ver,19.0)을 이용하여 일원분산분석(One way Analysis of Variance)을 실시하였으며 대조구와 염화칼슘 처리간의 유의성 검정을 알아보기 위하여 Duncan의 다중비교를 실시하였다( $p < 0.05$ ).

### 결과 및 고찰

#### 1. 가시적 피해

염화칼슘 처리에 따른 가시적 피해는 처리 후 25일째 3.0% 처리구에서 가장 먼저 발생하였으며 개엽초기 잎이 마르는 현상과 개엽한 잎에서 갈색반점이 관찰되었다. 0.5%와 1.0% 처리구의 잎마름 현상은 처리 후 각각 35일째, 28일째 그리고 갈색반점은 각각 39일째, 30일째 발생하였다. 고사 현상은 3.0% 처리구에서 처리 후 44일째부터 시작되었다. 이러한 결과로 염화칼슘 처리 농도가 높을수록 피해 발생시기가 빨랐으며 개엽 초기뿐만 아니라 잎이 성장하는 시기에도 피해가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Sung *et al.*(2009)에 따르면, 염화칼슘을 처리한 산딸나무의 경우 1.0%와 3.0% 처리구에서 처리 후 각각 30일, 50일에 갈색반점이 관찰되었다고 한다. 이러한 결과와 비교하여 복자기는 가장 낮은 농도인 0.5% 처리구부터 가시적 피해를 나타

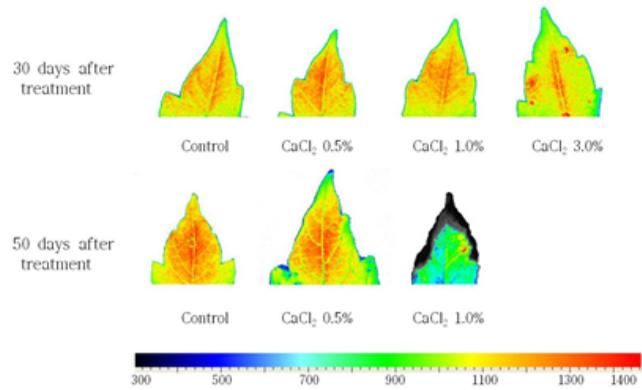


Figure 1. The fluorescence image( $F_m-F_0$ ) of *Acer triflorum* grown under four levels of Calcium chloride( $CaCl_2$ ) concentration at 30 days and 50 days after treatment

내 염화칼슘에 대한 내성이 산딸나무보다 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

#### 2. 엽록소 함량

염화칼슘 처리 후 30일째, 엽록소 a 함량은 대조구와 비교하여 모든 처리구 간 유의차를 보이지 않은 반면, 엽록소 b와 총엽록소함량은 처리 농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였고 특히 3.0% 처리구에서는 대조구에 비해 30% 이상 감소하였다. 엽록소 함량의 감소는 염화칼슘 처리에 의한 이온 독성의 누적으로 인한 엽록소 합성의 저하와 엽록소 분해로 인한 산화스트레스의 피해로 나타나며 이는 광합성능 저하를 유발했을 것으로 생각된다(Parida *et al.*, 2002; Stepien and Klobus, 2006; Jaleel *et al.*, 2008; Aghaleh *et al.*, 2009; Hichem *et al.*, 2009). 이와 유사한

Table 1. Changes in chlorophyll a contents, chlorophyll b contents, total chlorophyll contents, chlorophyll a/b ratio and carotenoid contents of *Acer triflorum* grown under four levels of Calcium chloride( $CaCl_2$ ) concentration at 30 days and 50 days after treatment

Treatment		Chlorophyll a ( $mg^{-1}g^{-1}FW$ )	Chlorophyll b ( $mg^{-1}g^{-1}FW$ )	Total Chlorophyll ( $mg^{-1}g^{-1}FW$ )	Chlorophyll a/b ratio
30 days after treatment	Control	15.66 ± 0.49a	13.87 ± 0.71a	29.52 ± 0.26a	1.13 ± 0.09b
	$CaCl_2$ 0.5%	15.29 ± 1.78a	12.39 ± 1.60ab	27.67 ± 2.87a	1.27 ± 0.10b
	$CaCl_2$ 1.0%	16.27 ± 0.76a	11.45 ± 1.20b	27.71 ± 1.91a	1.43 ± 0.09b
	$CaCl_2$ 3.0%	13.74 ± 2.90a	6.44 ± 0.74c	20.18 ± 3.38b	2.64 ± 1.27a
50 days after treatment	Control	16.08 ± 0.59a	18.12 ± 0.78a	34.18 ± 2.57a	0.89 ± 0.07b
	$CaCl_2$ 0.5%	14.72 ± 0.95a	8.74 ± 0.78b	23.46 ± 1.69b	1.69 ± 0.07a
	$CaCl_2$ 1.0%	11.75 ± 1.74b	9.52 ± 1.67b	21.26 ± 2.15b	1.27 ± 0.32b
	$CaCl_2$ 3.0%	-	-	-	-

Values are mean±S.D.(n=3). Different letters indicate significant differences among treatments at  $P < 0.05$  by Duncan's multiple range test

결과는 산딸나무, 산벚나무, 사철나무와 순비기나무에서도 여러 차례 보고되었다(Sung *et al.*, 2009; Sung *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2013). 두 광계의 흡수 능력을 보여주는 엽록소 a/b는 처리 후 30일째 염화칼슘 처리구에서 점점 증가하다가 3.0% 처리구에서 대조구에 비해 2배가량 증가하였고 50일째에서는 대조구와 비교하여 0.5% 처리구에서만 유의한 차이를 나타냈다. 이는 엽록소 a 함량의 변화에 비해 엽록소 b 함량의 감소율의 증가에 기인한 것으로 엽록소 a/b의 증가는 광계 II 광수확 안테나 크기의 감소와 관련있는 것으로 알려져 있다(Anderson, 1986; Pinheiro *et al.*, 2008).

### 3. 엽록소 형광 및 형광이미지

염화칼슘 처리 후 30일째, 광계 II 활성( $F_v/F_m$ )은 3.0% 처리구에서 급격히 감소하였고 처리 후 50일째에는 1.0% 처리구에서 급격히 감소하였다. 이러한 광계 II 활성의 감소는 염화칼슘에 의한 광계 II 반응중심의 손상에 의한 것으로 해를 받았거나 스트레스 시에 보이는 현상이다(Schreiber and Bilger, 1993; Stepien and Klobus, 2006; Krause and Weis, 1991; Baker, 2008; Boughalleb *et al.*, 2008). 염분에 민감한 수종인 스트로브잣나무는 염분처리농도가 증가함에 따라 광계 II 활성이 점차 감소하였지만, 염분에 덜 민감한 수종인 곰솔은 변하지 않았다(Kwon and Kim, 2008). 서로 다른 유전형질을 가진 산사나무 6종의 경우, 유전형질별로 감소율의 차이는 있었지만 염분처리농도별 광계 II 활성의 감소경향은 동일하게 나타났다(Percival and Fraser, 2001). 광계 II 광화학효율( $\Phi_{psII}$ )은 처리 후 30일째 처리구 간 유의한 차이 없었지만 50일째 처리농도가 증가함에 따라 감소하였다. 광계 II 광화학효율의 감소는 광계 II에서 원활하지 못한 전자수송의 결과에 따른 것이다(Reddy and Vora, 1986; Yang and Lu, 2005). 비광화학적 형광소멸(NPQ)은 두 시기 모두 대조구와 모든 처리구의 간에 유의적 차이를 보이

지 않았지만 처리농도가 증가할수록 감소율이 크게 나타났다. 이는 광계 II 광수확안테나에서 에너지 소산을 통해 광계를 보호하는 역할을 수행하는 열 소산이 제대로 이루어지지 않아 광저해를 받은 것으로 판단된다.

육안으로 확인할 수 없는 잎의 피해경로를 최대 형광값( $F_m$ )과 최소 형광값( $F_0$ )의 차이를 통해 형광이미지로 관찰할 수 있다. 처리 후 30일째의 대조구와 비교하여 0.5%와 1.0% 처리구는 크게 차이가 없었지만 3.0% 처리구의 50% 이상은  $F_m-F_0$ 값 1000을 나타내었다. 50일째의 0.5%와 1.0% 처리구에서 푸른색을 띄는 부분이 넓어지고  $F_m-F_0$ 값이 각각 1300, 345을 나타내며 대조구 대비 감소하였다.  $F_m-F_0$  값의 감소는 반응중심 에너지를 전달할 수 없는 엽록소 분자의 증가를 의미하는데 본 실험에서 염화칼슘 농도가 높을수록 염화칼슘 처리구에서  $F_m-F_0$ 값이 낮아지고 차지하는 면적이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 주로 잎 가장자리에서 중심부로 이동하였고 가시적 피해의 위치와 동일한 부위에서 나타났다.

### 4. 광합성 기구 특징 및 가스교환능력

광반응 곡선을 통한 광화학계 특징을 살펴본 결과, 최대 광합성 속도는 대조구에 비해 모든 염화칼슘 처리구에서 감소하였고, 특히 1.0%와 3.0% 처리구에서 70% 이상의 감소율을 보였다. 양자수율은 광합성 속도의 결과와 유사한 경향을 보이며 모든 처리구에서 감소하였고 1.0%와 3.0% 처리구에서 60% 이상 감소율을 나타냈다. 그러나 암호흡율은 대조구와 염화칼슘처리구간에 유의적인 차이를 보이지 않았다. 양자수율의 감소는 광합성 과정 중 빛에너지를 화학에너지로 전환하는 능력이 저하된 것을 의미하며 이는 염화칼슘 처리에 의해 광화학계가 손상을 입은 것으로 판단된다.

엽육 내  $CO_2$  농도에 따른 광합성 측정 결과, 탄소고정효

Table 2. Changes in maximum potential PS II efficiency( $F_v/F_m$ ), quantum yield of PS II electron transport( $\Phi_{psII}$ ) and non-photochemical quenching(NPQ) of *Acer triflorum* grown under four levels of Calcium chloride( $CaCl_2$ ) concentration at 30 days and 50 days after treatment

Treatment		$F_v/F_m$	$\Phi_{psII}$	NPQ
30days after treatment	Control	0.78 ± 0.02a	0.44 ± 0.08a	1.06 ± 0.40a
	$CaCl_2$ 0.5%	0.79 ± 0.02a	0.36 ± 0.14a	1.44 ± 0.48a
	$CaCl_2$ 1.0%	0.79 ± 0.02a	0.39 ± 0.11a	1.23 ± 0.47a
	$CaCl_2$ 3.0%	0.70 ± 0.06b	0.40 ± 0.09a	1.04 ± 0.60a
50days after treatment	Control	0.75 ± 0.03a	0.46 ± 0.05a	0.97 ± 0.50a
	$CaCl_2$ 0.5%	0.69 ± 0.09a	0.35 ± 0.10ab	1.13 ± 0.61a
	$CaCl_2$ 1.0%	0.37 ± 0.12b	0.18 ± 0.08b	0.74 ± 0.43a
	$CaCl_2$ 3.0%	-	-	-

Values are mean±S.D.(n=3). Different letters indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$  by Duncan's multiple range test

Table 3. Dark respiration( $D_{resp}$ ), maximum photosynthesis rate( $P_{nmax}$ ), net apparent quantum yield( $\phi$ ), carboxylation efficiency, photorespiration rate of *Acer triflorum* grown under four levels of Calcium chloride( $CaCl_2$ ) concentration at 30 days after treatment

Treatment	$D_{resp}$ ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\phi$ ( $\text{mmol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$P_{nmax}$ ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Carboxylation efficiency ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Photorespiration rate ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$ )
Control	1.01 ± 0.47a	32.17 ± 4.48a	5.19 ± 1.23a	17.80 ± 7.19a	3.10 ± 1.99a
$CaCl_2$ 0.5%	1.29 ± 0.18a	18.87 ± 4.57b	3.54 ± 0.83b	18.45 ± 4.48a	2.02 ± 1.18ab
$CaCl_2$ 1.0%	0.99 ± 0.52a	9.23 ± 3.62b	1.48 ± 1.00b	13.42 ± 2.72a	1.38 ± 0.13ab
$CaCl_2$ 3.0%	1.14 ± 0.63a	12.37 ± 9.07b	1.35 ± 1.20b	14.40 ± 0.36a	1.01 ± 0.66b

Values are mean±S.D.(n=3). Different letters indicate significant differences among treatments at  $P < 0.05$  by Duncan's multiple range test.

율은 염화칼슘 1.0%와 3.0% 처리구에서 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었고 광호흡속도는 대조구와 처리구 간 유의적인 차이는 없었으나 처리농도가 증가함에 따라 점차적으로 감소하였고 1.0%와 3.0% 처리구에서는 50% 이상의 감소율을 보였다. 이는  $CO_2$  고정효소인 rubisco의 활성

의 감소에 의한 것으로 판단되며 광호흡속도의 감소는 광계에서 광화합산물을 소비하고 손상을 지연시키는 능력이 저하된 것이다(Seemann and Critchley, 1985; Garg and Singla, 2004; Takahashi and Murata, 2008; Silva *et al.*, 2010). PPF 1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  에서의 가스교환능력을 살펴본

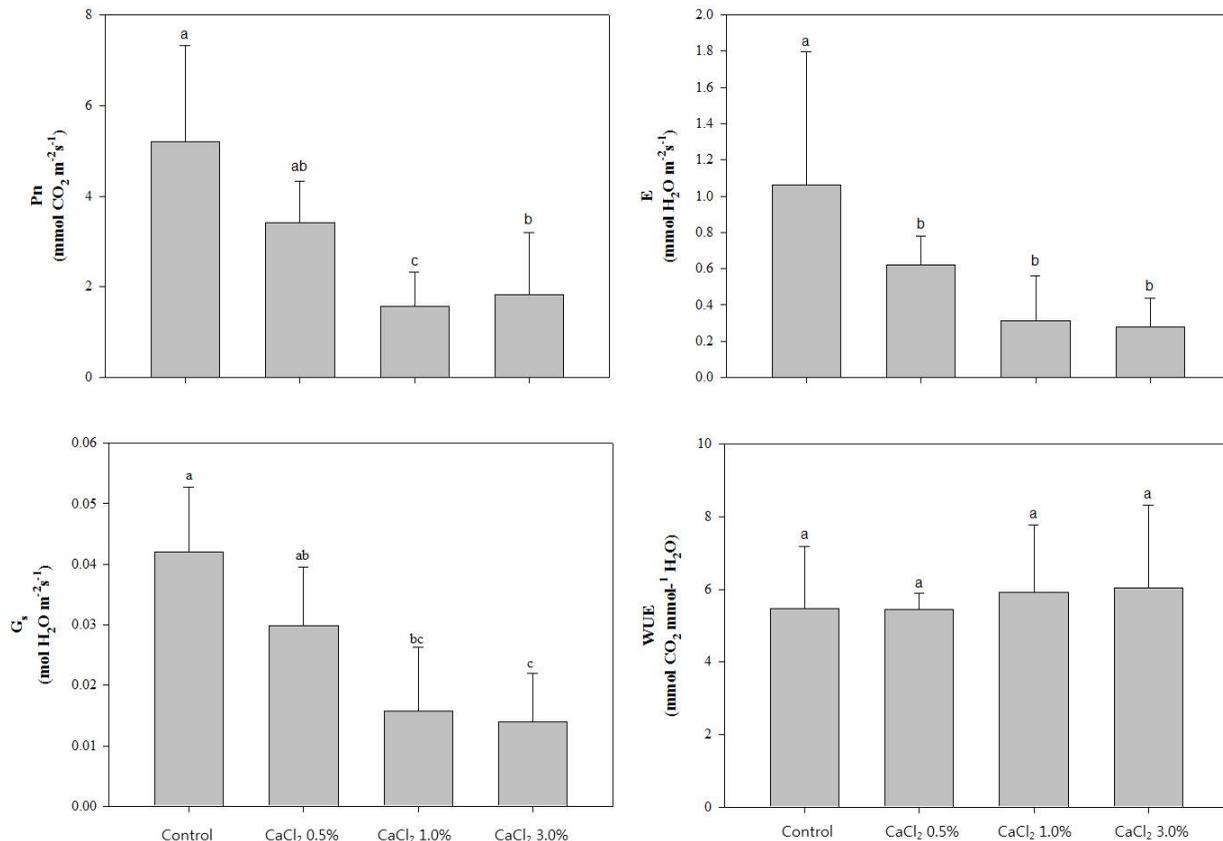


Figure 2. Changes in photosynthetic rate( $P_n$ ), transpiration rate( $E$ ) and stomatal conductance( $G_s$ ) and water use efficiency(WUE) of *Acer triflorum* grown under four levels of Calcium chloride( $CaCl_2$ ) concentration at 30 days after treatment. Values are mean±S.D.(n=3). Different letters indicate significant differences among treatments at  $P < 0.05$  by Duncan's multiple range test

결과, 처리 후 30일째 광합성율( $P_n$ ), 증산율(E) 그리고 기공전도도( $G_s$ )는 0.5% 처리구에서 대조구 대비 30%, 1.0%와 3.0% 처리구에서 65%이상 감소하였다. 염분처리에 따른 광합성율의 감소 경향은 산딸나무의 경우 복자기와 유사하였고(Sung *et al.*, 2009), 산벚나무는 처리농도가 증가함에 따라 점차적으로 감소하였다(Sung *et al.*, 2010). 수분이용효율(WUE)은 처리구 간 유의차는 없었지만 1.0%와 3.0% 처리구에서 다소 증가하였다. 염화칼슘 처리구에서 증산율과 기공전도도의 감소는 수분스트레스 상황에서 나타나는 현상으로, 수분이용효율을 높여 수분 손실을 막기 위한 반응이다(Downton *et al.*, 1985; Brugnoli and Björkman, 1992; Sultana *et al.*, 1999; Qiu *et al.*, 2003; Chaves *et al.*, 2009; Hichem *et al.*, 2009). 하지만 이것은 일시적 스트레스에 의해 유도된 작용이므로 장기적으로 생리적 장애를 가져올 수 있을 것이다. 기공폐쇄로 인한 수분이용효율의 증가는 장기적으로 보았을 때 가스교환능력을 떨어뜨리고 이는 광합성을 위한  $CO_2$ 의 유입이 제한됨으로써 광합성이 감소할 것이다(Binkley *et al.*, 1994; Barhoumia *et al.*, 2007).

## 5. 식물성분 및 토양 분석

염화칼슘 농도가 증가함에 따라 복자기의 잎, 줄기, 뿌리에서의  $Ca^{2+}$ 와  $Cl^-$ 가 증가했다.  $Ca^{2+}$ 의 경우, 1.0% 처리구의 잎과 뿌리에서 대조구 대비 각각 1.5배, 1.2배의 증가율을 보였고  $Cl^-$ 는 1.0% 처리구의 잎과 뿌리에서 대조구 대비 각각 14배, 3.5배의 증가율을 보이며 특히 잎에 많이 축적되었다. 그러나  $Mg^{2+}$ 은 측정할 세 부위에서 처리구간 유의차가 없었다. 일반적으로  $Mg^{2+}$ 와  $Ca^{2+}$ 는 경쟁관계를 보이며 높

은  $Ca^{2+}$ 농도는  $Mg^{2+}$ 를 감소시킨다고 알려져 있지만, 염스트레스에서 항상  $Mg^{2+}$ 가 감소하는 것은 아니다.(Bernstein and Hayward, 1958; Bernstein *et al.*, 1974; Grattan and Grieve, 1999). 염화칼슘 농도가 증가함에 따라  $K^+$ 는 염화칼슘 처리구의 잎에서 1.5배 이상 증가하였고  $Na^+$ 는 잎과 뿌리에서 모두 감소하였다. 양분의 흡수 시 이온 간의 경쟁에 따른 길항작용이 일어나게 되는데  $Ca^{2+}$ 와  $Na^+$ 는 강한 상호작용을 가지고 있어 뿌리 주변 막에  $Ca^{2+}$ 가 흡착되면서  $Na^+$ 가 감소하였고 이로 인해 뿌리와 줄기를 관통해오면서 잎에 도달하는 이온이 적었던 것으로 판단된다. 또한,  $K^+$ 는  $Na^+$ 와 길항작용을 가지고 있어  $Na^+$  감소 시  $K^+$ 는 증가하게 되며, 이는 높은 염스트레스 상황에서 광계의 보전을 위한 기작으로 판단된다(Robinson *et al.*, 1983; Chow *et al.*, 1990; Brugnoli and Björkman, 1992; Parida *et al.*, 2004).

토양분석 결과,  $Ca^{2+}$ 와  $K^+$ 는 대조구에 비해 염화칼슘 처리구에서 증가하였고 0.5%와 1.0% 처리구에서는 각각 1.2배, 1.6배 증가하였다. 전기전도도(EC) 역시, 0.5% 처리구에서 대조구 대비 3배 증가하기 시작하여 3.0% 처리구에서는 24배 증가하였다. 토양에 축적된 뿌리주변의 이온은 뿌리로부터 공변세포와 호르몬 신호전달에서 뿌리로의 수분 흡수를 방해하고 토양 내 전기전도도를 증가시켰다. 본 실험을 통해 전기전도도 0.5 이상의 값은 복자기의 생리적 장애를 발생시켰고 4.0 이상은 생육에 영향을 주는 것으로 나타났다.

## 6. 생장

염화칼슘 처리에 의해 수고의 상대생장율은 0.5% 처리구

Table 4. Mineral nutrition concentration of *Acer triflorum* grown under four levels of Calcium chloride( $CaCl_2$ ) concentration

Treatment		$Ca^{2+}$ (%)	$Mg^{2+}$ (%)	$K^+$ (%)	$Na^+$ (%)	$Cl^-$ (%)
Leaf	Control	0.90 ± 0.03b	0.14 ± 0.00a	0.85 ± 0.04b	0.14 ± 0.04a	0.13 ± 0.07b
	$CaCl_2$ 0.5%	1.36 ± 0.17ab	0.19 ± 0.02a	1.27 ± 0.06a	0.10 ± 0.01ab	1.37 ± 0.31a
	$CaCl_2$ 1.0%	1.46 ± 0.37a	0.17 ± 0.04a	1.39 ± 0.27a	0.06 ± 0.03b	1.85 ± 0.64a
	$CaCl_2$ 3.0%	-	-	-	-	-
Stem	Control	1.22 ± 0.21a	0.03 ± 0.01a	0.34 ± 0.05a	0.05 ± 0.01a	0.04 ± 0.01b
	$CaCl_2$ 0.5%	1.45 ± 0.10a	0.04 ± 0.01a	0.39 ± 0.09a	0.06 ± 0.01a	0.08 ± 0.01b
	$CaCl_2$ 1.0%	1.44 ± 0.11a	0.04 ± 0.00a	0.35 ± 0.07a	0.06 ± 0.02a	0.10 ± 0.05b
	$CaCl_2$ 3.0%	1.47 ± 0.02a	0.03 ± 0.01a	0.37 ± 0.04a	0.05 ± 0.03a	0.36 ± 0.21a
Roots	Control	0.55 ± 0.14b	0.14 ± 0.01a	0.28 ± 0.04a	0.07 ± 0.03a	0.07 ± 0.04b
	$CaCl_2$ 0.5%	0.66 ± 0.07b	0.12 ± 0.01a	0.22 ± 0.04ab	0.03 ± 0.01b	0.09 ± 0.04b
	$CaCl_2$ 1.0%	0.70 ± 0.07b	0.15 ± 0.04a	0.19 ± 0.04b	0.05 ± 0.01ab	0.26 ± 0.14b
	$CaCl_2$ 3.0%	1.05 ± 0.19a	0.14 ± 0.00a	0.18 ± 0.01b	0.03 ± 0.01b	0.69 ± 0.25a

Values are mean±S.D.(n=3). Different letters indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$  by Duncan's multiple range test

Table 5. Soil mineral nutrition concentrations of *Acer triflorum* grown under four levels of Calcium chloride(CaCl<sub>2</sub>) concentration

Treatment	C.E.C(cmolckg <sup>-1</sup> )				EC(dSm <sup>-1</sup> )
	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	
Control	0.09 ± 0.01b	0.10 ± 0.00c	3.65 ± 0.13c	0.46 ± 0.03ab	0.17 ± 0.00d
CaCl <sub>2</sub> 0.5%	0.09 ± 0.01b	0.08 ± 0.01d	4.29 ± 0.25c	0.39 ± 0.03c	0.54 ± 0.05c
CaCl <sub>2</sub> 1.0%	0.11 ± 0.01a	0.12 ± 0.01b	6.00 ± 0.39b	0.42 ± 0.03bc	1.28 ± 0.02b
CaCl <sub>2</sub> 3.0%	0.12 ± 0.01a	0.18 ± 0.01a	9.90 ± 0.99a	0.50 ± 0.04a	4.12 ± 0.06a

Values are mean±S.D.(n=3). Different letters indicate significant differences among treatments at P<0.05 by Duncan's multiple range test

(0.0024mm<sup>-1</sup>week)부터 대조구(0.0048mm<sup>-1</sup>week)에 비해 52% 감소하기 시작하여 3.0% 처리구(0.0018mm<sup>-1</sup>week)에서는 62% 감소하였으며, 근원경의 상대생장율은 대조구(0.0062 mm<sup>-1</sup>week)에 비해 모든 염화칼슘 처리구에서 20~30% 내외로 감소하였다. 생장의 감소율이 근원경보다 수고에서 더 큰 것으로 보아 염화칼슘 처리가 근원경보다 수고에 더 영향을 준 것으로 판단된다. 이와 같이 생장의 차이는 식물체와 토양 내 염증가로 인한 스트레스 발생으로 엽록소의 파괴, 광합성의 감소 등으로 인해 생육의 저해가 발생한 것으로 보인다(Morsy, 2003; Gama *et al.*, 2007; Mordy and Ismail, 2007; Jaleel *et al.*, 2008; Liu and Shi, 2010; Shin *et al.*, 2010; Sung *et al.*, 2010).

7. 결론

염화칼슘 처리 농도가 증가할수록 토양의 전기전도도는 대조구에 비해 최대 24배까지 증가하였고 식물체의 Ca<sup>2+</sup>와 Cl<sup>-</sup>이온 축적량은 잎, 줄기, 뿌리 모든 기관에서 증가하였으며 이 중 잎에 가장 많이 축적되었다. 토양과 식물체내의 이온 축적의 증가는 지하부에서 지상부로의 수분과 양분흡

수를 저해했을 뿐만 아니라 잎의 광계 II 반응중심을 손상시켜 전자전달을 방해하였다. 이로 인해 엽록소 파괴 및 광화학계와 탄소고정계 활성이 저하되는 결과를 가져왔으며 형광이미지와 가시적으로도 손상된 것을 확인할 수 있었다. 잎의 가시적 피해는 3.0% 처리구에서 처리 후 25일째 갈색반점을 보이며 가장 먼저 나타났고 0.5%와 1.0% 처리구에서 각각 35일째, 28일째 나타나기 시작했다. 그리고 3.0% 처리구는 처리 후 44일째 고사하기 시작했다. 복자기의 생장은, 수고와 근원경의 생장을 변화로 보아 염화칼슘 처리가 근원경보다 수고 생장에 더 영향을 준 것으로 나타났다.

염화칼슘 처리에 따른 복자기의 생장 및 생리적 장애는 처리농도에 따라 시기적인 차이는 있었지만 0.5% 처리구부터 모든 염화칼슘 처리구에서 나타났고 시간이 지남에 따라 피해가 악화되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 복자기는 염류의 농도가 낮다하더라도 장기적으로 염류에 노출될 경우 심각한 생장 장애가 발생할 것으로 예측된다. 이를 위해서 생육이 시작되기 전 세척이나 중화제 살포와 같은 빠른 대처를 통해 피해를 감소시키는 방안을 마련해야 할 것이다.

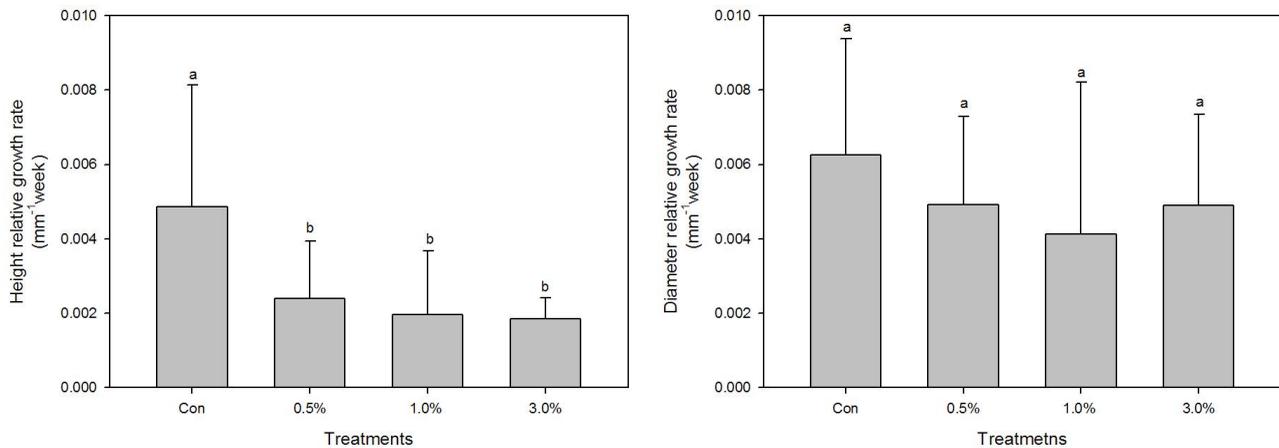


Figure 3. Height and diameter relative growth rate of *Acer triflorum* grown under four levels of Calcium chloride(CaCl<sub>2</sub>) concentration. Values are mean±S.D.(n=5). Different letters indicate significant differences among treatments at P<0.05 by Duncan's multiple range test

## REFERENCES

- Aghaleh, M., V. Niknam and H. Ebrahimzadeh (2009) Salt stress effect on growth, pigments, proteins and lipid peroxidation in *Salicornia persica* and *S. europaea*. *Bio. Plant.* 53(2): 243-248.
- Anderson, J. M. (1986) Photoregulation of the composition, function, and structure of thylakoid membranes. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 37:93-136.
- Arnon, D. I. (1949) Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* 24: 1-15.
- Baker, N. R. (2008) Chlorophyll fluorescence a probe of photosynthesis in vivo. *Ann. Rev. Plant Biol.* 59: 89-113.
- Barhoumia, Z., W. Djebalib, A. Smaouic, W. Chaïbib and C. Abdellya (2007) Contribution of NaCl excretion to salt resistance of *Aeluropus litoralis* (Willd) Parl. *J. Plant Physiol.* 164(7): 842-850.
- Bernstein, L., L. E. Francois and R. A. Clark (1974) Interactive effects of salinity and fertility on yields of grains and vegetables. *Agron. J.* 66(3): 412-421.
- Bernstein, L. and H. E. Hayward (1958) Physiology of salt tolerance. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 9: 25-46.
- Binkley, D., R. Stottleyer, F. Suarez and J. Cortina (1994) Soil nitrogen availability in some arctic ecosystems in northwest Alaska: responses to temperature and moisture. *Ecoscience* 1: 64-70.
- Boughalleb, F., M. Denden and B. B. Tiba (2008) Photosystem-II photochemistry and physiological parameters of three fodder shrubs, *Nitraria retusa*, *Atriplex halimus* and *Medicago arborea* under salt stress. *Acta Physiol. Plant.* 31: 463-476.
- Bruynoli, E. and O. Björkman (1992) Growth of cotton under continuous salinity stress: influence on allocation pattern, stomatal and non-stomatal components of photosynthesis and dissipation of excess light energy. *Planta* 187: 335-347.
- Chaves, M. M., J. Flexas and C. Pinheiro (2009) Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Ann. Bot.* 103(4): 551-560.
- Chow, W. S., M. C. Ball and J. M. Anderson (1990) Growth and photosynthetic responses of spinach to salinity: implications of K<sup>+</sup> nutrition for salt tolerance. *Aust. J. Plant Physiol.* 17(5): 563-578.
- Downton, W. J. S., W. J. R. Grant and S. P. Robinson (1985) Photosynthetic and stomatal responses of spinach leaves to salt stress. *Plant Physiol.* 77: 85-88.
- Gama, P. B., S. Inanaga, K. Tanaka and R. Nakazawa (2007) Physiological response of common bean (*Phaseolus Vulg.* L.) seedlings to salinity stress. *African. J. Biotechnol.* 6(2): 79-88.
- Garg, N. and R. Singla (2004) Growth, photosynthesis, nodule nitrogen and carbon fixation in the chickpea cultivars under salt stress. *Braz. J. Plant Physiol.* 16: 37-146.
- Grattan, S. R. and C. M. Grieve (1999) Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Sci. Hort.* 78: 127-157.
- Hichem, H., E. A. Naceur and D. Mounir (2009) Effects of salt stress on photosynthesis, PSII photochemistry and thermal energy dissipation in leaves of two corn (*Zea mays* L.) varieties. *Photosynthetica* 47: 517-526.
- Hughes, A. P. and P. R. Freeman (1967) Growth analysis using frequent small harvests. *J. appl. ecol.* 4: 553-560.
- Jaleel, C. A., B. Sankar, R. Sridharan and R. Panneerelvam (2008) Soil salinity alters growth, chlorophyll content, and secondary metabolite accumulation in *Catharanthus roseus*. *Turk. J. Biol.* 32:79-83.
- Jefferies, R. A. (1994) Drought and chlorophyll fluorescence in field grown potato (*Solanum tuberosum*). *Plant Physiol.* 90: 93-97.
- Kautsky, H. and A. Hirsch (1931) Neue Versuche zur Kohlensäureassimilation. *Naturwissenschaften* 19(48): 964.
- Kim P. G. and E. J. Lee (2001) Ecophysiology of Photosynthesis 1: effects of light intensity and intercellular CO<sub>2</sub> pressure on photosynthesis. *Korean. J. Agric. For. Meteorol.* 3(2): 126-133. (in Korean with English abstract)
- Korea Biodiversity Information System, <http://www.nature.go.kr> (2014. 07. 01)
- Krause, G. H. and E. Weis (1991) Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Ann. Rev. Plant Biol.* 42: 313-349.
- Kwon, H. B. and T. J. Kim (2008) Evaluation of the Coating Liquid Sprayed on Landscape Plants to Prevent De-icing Stresses -Focus on Chlorophyll Fluorescence Analysis-. *J. Korean. Inst. Landsc. Archit.* 35(6): 29-36. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. Y., W. T. Kim, J. H. Ju and Y. H. Yoon (2013) Effect of calcium chloride concentration on roadside ground cover plant growth. *J. Korean. Inst. Landsc. Archit.* 41(4): 17-23. (in Korean with English abstract)
- Liu, J. and D. C. Shi (2010) Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, inorganic ion and organic acid accumulations of sunflower in response to salt and salt-alkaline mixed stress. *Photosynthetica* 48: 127-134.
- Moradi, F. and A. M. Ismail (2007) Responses of photosynthesis, chlorophyll fluorescence and ROS scavenging system to salt stress during seedling and reproductive stages in rice. *Ann. Bot.* 99: 1161-1173.
- Morsy, M. H. (2003) Growth ability of mango cultivars irrigated with saline water. *Acta horticulture* 609: 475-482.
- Parida, A., A. B. Das and P. Das (2002) NaCl stress causes changes in photosynthetic pigments, proteins, and other metabolic components in the leaves of a true mangrove, *Bruguiera parviflora*,

- in hydroponic cultures. *Biol. Plant.* 45(1): 28-36.
- 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* 18: 167-174.
- Percival, G. C. and G. A. Fraser (2001) Measurement of the salinity and freezing tolerance of *Crataegus* genotypes using chlorophyll fluorescence. *J. Arboric.* 27(5):233-245.
- Pinheiro, H. A., J. V. Silva, L. Endres, V. M. Ferreira, C. A. Camara, F. F. Cabral, J. F. Oliveira, L. W. T. de Carvalho, J. M. dos Santos and B. G. dos Santos Filho (2008) Leaf gas exchange, chloroplastic pigments and dry matter accumulation in castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings subjected to salt stress conditions. *Ind. Crops Prod.* 27: 385-392.
- Qiu, N. W., Q. T. Lu and C. M. Lu (2003) Photosynthesis, photosystem II efficiency and the xanthophyll cycle in the salt-adapted halophyte *Atriplex centralasiatica*. *New Phytol.* 159: 479-486.
- Reddy, M. P. and A. B. Vora (1986) Changes in pigment composition, hill reaction activity and saccharide metabolism in bajra (*Pennisetum typhoides* S&H) leaves under NaCl salinity. *Photosynthetica* 20: 50-55.
- Robinson, S. P., W. J. S. Downton and J. A. Millhouse (1983) Photosynthesis and ion content of leaves and isolated chloroplasts of salt-stressed spinach. *Plant Physiol.* 73: 238-242.
- Schreiber, U. and W. Bilger (1993) Progress in chlorophyll fluorescence research: major developments during the past years in retrospect. *Progr. Bot.* 54: 151-173.
- Seemann, J. R. and C. Critchley (1985) Effects of salt stress on the growth, ion content, stomatal behaviour and photosynthetic capacity of a salt-sensitive species, *Phaseolus vulgaris* L. *Planta* 164: 151-162.
- Shin, S. S., S. D. Park, H. S. Kim and K. S. Lee (2010) Effects of calcium chloride and eco-friendly deicer on the plant growth. *J. Korean. Soc. Environ. Eng.* 32(5): 487-498. (in Korean with English abstract)
- Silva, E. N., R. B. Ribeiro, S. L. Ferreira-Silva, R. A. Viegas and J. A. G. Silveira (2010) Comparative effects of salinity and water stress on photosynthesis, water relations and growth of *Jatropha curcas* plants. *J. Arid. Environ.* 74: 1130-1137.
- Slama, I., T. Ghnaya, A. Savouré and C. Abdely (2008) Combined effects of long term salinity and soil drying on growth, water relations, nutrient status and proline accumulation of *Sesuvium portulacastrum*. *Comptes rendus biologiques* 331: 442-451.
- Stepien, P. and G. Klobus (2006) Water relations and photosynthesis in *Cucumis sativus* L. leaves under salt stress. *Biol. Plant.* 50:610-616.
- Sudhir, P. and S. D. S. Murthy (2004) Effects of salt stress on basic processes of photosynthesis. *Photosynthetica* 42(4): 481-486.
- Sultana, N., T. Ikeda and R. Itoh (1999) Effect of NaCl salinity on photosynthesis and dry matter accumulation in developing rice grains. *Environ. exp. Bot.* 42: 211-220.
- 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. J. Agric. For. Meteorol.* 11(4): 143-150. (in Korean with English abstract)
- 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*. *J. Korean. For. Soc.* 99(6): 922-928. (in Korean with English abstract)
- Takahashi, S. and N. Murata (2008) How do environmental stresses accelerate photoinhibition. *Trends. Plant Sci.* 13:178-182.
- Yang, X. and C. Lu (2005) Photosynthesis is improved by exogenous glycinebetaine in salt-stressed maize plants. *Physiol. Plant.* 124: 343-352.