

# 토양 건조 및 침수처리가 박태기나무의 광계 II 활성에 미치는 영향

## Effects of Soil Drought and Waterlogging on Photosystem II Activities in *Cercis Chinensis* Bunge

이경철

K. C. Lee  
국립한국농수산대학  
산림학과<sup>1</sup>  
dlrud112@korea.kr

이의열

U. Y. Lee  
국립한국농수산대학  
산림학과<sup>1</sup>  
blueuiyeol@naver.com

윤경규

K. K. Youn  
국립한국농수산대학  
산림학과<sup>1</sup>  
ykk3126@naver.com

권영휴

Y. H. Kwon  
국립한국농수산대학  
조경학과<sup>2</sup>  
kwonla@korea.kr

한상균\*

S. K. Han\*  
국립한국농수산대학  
산림학과<sup>1</sup>  
hsk5311@korea.kr

### Abstract

This study was conducted to investigate the photosystem II activities of *Cercis chinensis* by soil water condition. Drought stress was induced by withholding water and waterlogging treatments was immersing the pots for 15 days. Results showed that the relative activities per reaction center such as ABS/RC, TRo/RC and Dio/RC were significantly increased compared with the control group after 12 days in waterlogging treatments. Particularly, Dio/RC increased substantially under waterlogging stress, indicating that excessive energy was consumed by heat dissipation. Furthermore, the performance index on absorption basis( $PI_{abs}$ ) and responses to structural and functional PS II( $SFI_{abs}$ ) were dramatically decreased after 15 days in both the drought and waterlogging treatments, which reflects the relative reduction state of the photosystem II. These results of chlorophyll a fluorescence by OKJIP analysis show that the sensitive changes photosystem II activity. Thus, on the basis of our results that *Cercis chinensis* was exhibited a strong reduction of photosynthetic activity to waterlogging stress, and OKJIP parameters such as ABS/RC, Dio/RC,  $PI_{abs}$  and  $SFI_{abs}$  could be useful indicator to monitor the physiological states of *Cercis chinensis* under soil water condition.

**Key words** : *Cercis chinensis*, drought, OKJIP analysis, photosystem II, waterlogging

\*교신저자

1 Department of Forestry, Korea National College of Agriculture & Fisheries

2 Department of Landscape Architecture, Korea National College of Agriculture & Fisheries

## I. 서론

토양 수분함량의 변화는 식물의 생장에 영향을 미치는 가장 중요한 환경요인 중 하나로서 식물은 생활사 전반에 걸쳐 과습 및 건조에 의한 스트레스를 빈번하게 경험하게 된다. 배수가 불량한 토양환경이나 생육기에 강우기간이 길어질 경우에는 과습으로 인한 피해가 유발되는데 토양과 대기와의 공기접촉이 제한되어 토양 내 용존산소의 고갈을 일으키면서 식물 뿌리 호흡을 저해하고, 양분 흡수와 물질 수송에 필요한 에너지 공급을 어렵게 한다(Boru *et al.*, 2003). 이와 반대로 수분부족으로 인한 식물의 반응은 초기에는 엽의 확장이나 줄기 신장과 같은 팽압에 영향을 받는 요소들이 감소하게 되며, 엽의 탈리, 기공 닫힘 등 체내 수분보존과 수분이용효율을 높이는 기작을 보이다가 극심한 스트레스를 받게 되면, 현저한 광합성속도의 감소, 삼투조절기능(osmoregulation)의 상실 및 세포내 주요 대사에 심각한 장애 등을 유발하여 영구적인 손상을 끼치게 된다(Taiz and Zeiger, 2006).

박태기나무(*Cercis chinensis* Bunge)는 콩과에 속하는 낙엽활엽 관목으로 중국이 원산지이나 우리나라에 조경수로 널리 보급된 수목이다. 수고는 3-5m이며, 피목이 많고, 골속은 사각형 비슷한 백색이지만 점차 연한 갈색으로 변한다. 잎은 심장형으로 교목인 계수나무와 비슷한 모양을 하고 있으며, 4월 하순경 잎보다 먼저 길이 1.2~1.8 cm의 자주색의 꽃이 20~30개씩 모여 피면서 화려한 색상으로 인해 많은 사람들이 즐겨 찾는 대표적인 정원수이다(Lee *et al.*, 1999; Korea National Arboretum, 2020).

박태기나무에 대해 보고된 연구결과로는 잎에서 피부 멜라닌 색소의 억제 성분에 관한 내용(Lee *et al.*, 1999)이나 살초활성물질 함유에 대한 보고(Kim *et al.*, 2003) 등 대부분 성분에 관한 연구

로서 박태기나무의 생장과 생태에 관한 연구결과는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 생활권 수목으로 각광받고 있는 박태기나무를 대상으로 봄철 개엽 시기에 일시적인 토양침수 및 가뭄처리가 박태기나무 잎의 광계 II 활성에 미치는 영향을 조사하여 효율적인 생산과 관리를 위한 생리적인 기초자료를 제공하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험재료 및 수분 스트레스 처리

실험에 사용된 재료는 2019년 4월에 파종하여 한국농수산물대학 구내 온실에서 1년간 생육시킨 2년생 박태기나무 묘목을 사용하였으며, 2020년 3월 10일 원예용 상토(Horticulture nursery media, Punong, Gyeongju, Korea)를 이용한 높이 15cm, 직경 10 cm 포트에 이식하고 약 1개월간 개엽을 유도하였다.

2020년 4월 6일부터 4월 22일까지 인위적인 단수처리를 통한 건조스트레스(DS)를 유발하였으며, 침수처리구는(WL) 물이 배출되지 않는 직사각형의 투명상자를 이용하여 포트를 투입하고 화분높이를 고려해 8~10 cm 범위로 침수시켰다. 침수처리시 깊이가 일정하게 유지되도록 주기적으로 물을 공급하였다. 대조구는 휴대용 토양수분 측정기를 통해 토양수분함량이 20 % 미만으로 감소될 시 포트당 약 100 ml의 수분을 주기적으로 관수하였다. 각각의 처리구는 10개체씩 배치하였으며, 실험이 진행되는 기간의 토양수분함량 변화는 중량법(gravimetric method)을 이용해 토양시료 채취 후 무게와 완전 건조시킨 뒤의 무게로 조사하였다.

## 2. 엽록소 함량 및 엽록소 형광반응

엽록소 함량과 엽록소 형광반응은 처리 후 2일, 5일, 9일, 12일 그리고 15일이 경과되는 시점에 측정하였으며, 엽록소 함량은 SPAD 측정기 (CCM-200, opti-sciences Inc, USA)를 이용하였고, 엽록소 형광반응은 휴대용 엽록소 형광반응 측정기(Plant Efficiency Analyzer, Hansatech Instrument Ltd., King's Lynn, UK)를 이용하여 OKJIP 분석법(polyphasic rise of Chlorophyll a fluorescence transients)으로 측정하였다. 측

정시 광을 충분히 수광하는 엽을 대상으로 조사하였으며, 20분간 암적응 시킨 엽에 3,500  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광량을 1 초간 조사하고, 50  $\mu\text{s}$ (O단계), 300  $\mu\text{s}$ (K단계), 2 ms(J단계), 30 ms(I단계), 500 ms(P단계)의 엽록소 형광밀도를 조사하였다. OKJIP 분석 결과를 통해 생물리학적 변수 (biophysical parameters;  $F_0$ ,  $F_m$ ,  $\Phi_{PO}$ ,  $\Psi_0$ ,  $\Phi_{EO}$ , ABS/RC, TRo/RC, ETo/RC, DIo/RC,  $PI_{\text{abs}}$ ,  $SFI_{\text{abs}}$ )를 산출하여 제시하였다(Strasser et al., 2000; Wang et al., 2012).

**Table 1. Summary of chlorophyll fluorescence parameters from OKJIP test**

Parameters	Description
$F_0$	Fluorescence intensity at 50 $\mu\text{s}$
$F_m$	Maximal fluorescence intensity
$F_v$	Variable fluorescence( $F_m - F_0$ )
$V_j$	relative variable at the J-step
$\Phi_{PO}(=\text{TRo}/\text{ABS})$	Probability that an absorbed photon leads to reduction further than $Q_A^-$
$\Phi_{EO}(=\text{ETo}/\text{ABS})$	Probability that an absorbed photon leads to electron transport further than $Q_A^-$
$\Psi_0(=\text{ETo}/\text{TRo})$	probability that an absorbed photon leads to reduction of $Q_A^-$
ABS/RC	Absorption flux per reaction center
TRo/RC	Trapping of electrons per reaction center
ETo/RC	Electron flux per reaction center beyond $Q_A^-$
DIo/RC	Energy dissipation flux per reaction center
$PI_{\text{abs}}$	Performance index on absorption basis.
$SFI_{\text{abs}}$	Responses to structural and functional PSII events leading to electron transport within photosynthesis

## III. 결과 및 고찰

실험이 진행되는 기간의 토양함수량과 엽록소 함량의 변화를 Table 2에 나타냈으며, 토양수분 함량은 과습처리구는 실험기간 동안 69~74 %를

보이고, 대조구는 약 50 % 수준으로 유지되었다. 건조처리구의 경우 단수처리 이후 점진적인 토양 수분함량 감소를 보이다가 9일에서 12일로 경과 되는 시점에서 급격하게 감소하여 15일경에는 약 13.5 %의 토양수분함량을 나타냈다. 엽록소 함량

은 대조구는 전반적으로 개엽 이후 점차 증가하였고, 건조스트레스 처리구는 다소 감소하는 경향을 보였으나 편차가 커 통계적인 유의성을 갖지는 못하였다(Table 2).

광계 II의 안테나 엽록소에 의해 흡수된 빛에너지(ABS)는 에너지 전이과정(energy transfer)을 통해 반응중심(P680)을 들뜬 상태로 만들며, 들뜬 반응 중심은 전하 분리과정으로 인접한 페오피틴(pheophytin)에 전자를 방출하고, 전하 안정화 과정을 통해 초기 전자수용체인  $Q_A$ 를 환원시킨다

(TRo). 이후 전자전달 과정에서 일부에너지는 열로 소산되고(DIo), 나머지는 일련의 전자전달계를 거쳐(ETo) 최종적으로 NADP+를 NADPH로 환원시킨다(Strasser et al., 2000). OKJIP 곡선은 이러한 광계 II에서의 에너지 흐름 변화와 전자수용체의 환원 등 다양한 정보를 제공하여 스트레스에 따른 생리적 반응을 나타내는 대표적인 엽록소 형광유도 분석법이다(Oh and Koh, 2004; Lee, 2017).

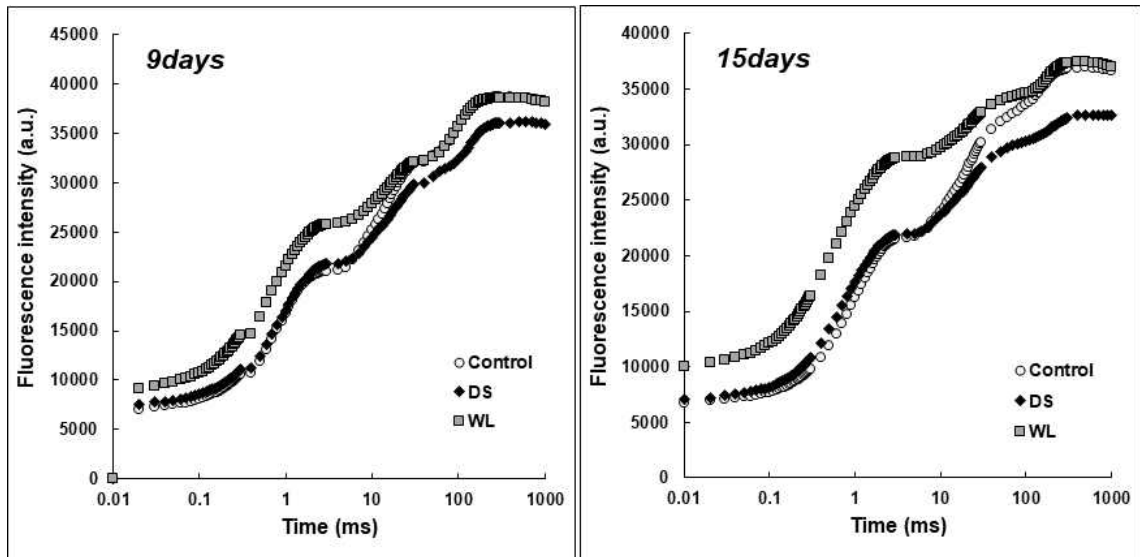


Fig. 1. Changes of OKJIP fluorescence curves of *C. chinensis* by water stress

OKJIP 곡선을 통해 산출한 형광변수를 살펴보면(Table 2), 처리 후 5일까지는 유의적인 변화를 관찰할 수 없었으나 처리 후 9일이 경과한 시점에서 비교적 두드러진 경향을 나타냈다. 일반적으로 식물이 스트레스를 받게 되면 초기형광  $F_0$ 는 증가하고 최대형광  $F_m$ 은 감소하여  $F_0/F_m$ 가 증가하는 경향을 나타내는데, 박태기나무 역시 건조처리구와 침수처리구 모두 대조구에 비해 다소 증가한 경향을 보였다. 잠재적인 광합성 능력을 보여주는  $F_v/F_0$ 는 9일이 경과한 시점까지 건조처

리구에서 비교적 높은 경향을 나타내었으나 이후 감소되는 경향을 보여 지속적인 수분부족으로 인해 광합성 효율 저하를 의심할 수 있다.

$\Phi_{P_0}$ ,  $\Psi_0$ ,  $\Phi_{E_0}$ 는 광화학반응의 각 단계에 대한 에너지전이 비율 및 형광수율을 의미하는 것으로(Strasser et al., 2000),  $\Phi_{P_0}$ 는 초기광화학반응에서 최대양자수율을 의미하며,  $\Phi_{E_0}$  및  $\Psi_0$ 는  $Q_A^-$  이후 전자전달을 나타낸다. 9일이 경과한 시점에서 대조구에 비해 건조처리구와 침수처리구가 비교적 낮은  $\Phi_{P_0}$ ,  $\Psi_0$ ,  $\Phi_{E_0}$ 를 나타내었는데 이후의

**Table 2. The chlorophyll fluorescence parameters of *C. chinensis* by water stress.**

Treatment	SWC (%)	SPAD	Fo/Fm	Fv/Fo	Φ <sub>PO</sub>	Ψ <sub>O</sub>	Φ <sub>EO</sub>	
2 days	control	64.7	39.8±3.4 <sup>ns</sup>	0.21±0.01 <sup>ns</sup>	3.27±0.06 <sup>ns</sup>	0.79±0.01 <sup>ns</sup>	0.49±0.03 <sup>ns</sup>	0.39±0.03 <sup>ns</sup>
	DS	61.0	39.6±4.2	0.23±0.01	3.79±0.06	0.77±0.01	0.45±0.04	0.35±0.03
	WL	69.0	39.4±5.1	0.24±0.03	3.19±0.48	0.76±0.03	0.40±0.08	0.31±0.07
5 days	control	52.4	42.1±4.8 <sup>ns</sup>	0.19±0.01 <sup>ns</sup>	3.81±0.44 <sup>ns</sup>	0.81±0.01 <sup>ns</sup>	0.55±0.04 <sup>ns</sup>	0.44±0.04 <sup>ns</sup>
	DS	49.4	42.1±4.6	0.21±0.02	4.24±0.34	0.79±0.02	0.52±0.04	0.41±0.03
	WL	73.5	41.4±3.8	0.24±0.04	3.24±0.62	0.76±0.04	0.46±0.05	0.35±0.05
9 days	control	52.7	42.8±6.3 <sup>ns</sup>	0.18±0.01 <sup>a</sup>	3.82±0.05 <sup>ab</sup>	0.82±0.01 <sup>b</sup>	0.57±0.02 <sup>b</sup>	0.47±0.02 <sup>b</sup>
	DS	39.5	40.2±5.0	0.21±0.01 <sup>ab</sup>	4.49±0.31 <sup>b</sup>	0.79±0.01 <sup>ab</sup>	0.53±0.03 <sup>b</sup>	0.42±0.02 <sup>b</sup>
	WL	71.7	42.8±3.3	0.24±0.03 <sup>b</sup>	3.29±0.46 <sup>a</sup>	0.76±0.03 <sup>a</sup>	0.45±0.02 <sup>a</sup>	0.35±0.03 <sup>a</sup>
12 days	control	50.3	43.6±6.5 <sup>ns</sup>	0.17±0.01 <sup>ns</sup>	4.73±0.34 <sup>ns</sup>	0.79±0.04 <sup>ns</sup>	0.50±0.09 <sup>ns</sup>	0.40±0.09 <sup>ns</sup>
	DS	17.6	39.7±5.1	0.21±0.04	3.88±0.81	0.62±0.24	0.75±0.11	0.38±0.24
	WL	71.4	39.5±7.1	0.25±0.11	3.42±1.53	0.83±0.01	0.54±0.03	0.45±0.02
15 days	control	50.8	45.2±9.2 <sup>ns</sup>	0.18±0.01 <sup>ns</sup>	4.44±0.34 <sup>ns</sup>	0.78±0.02 <sup>ns</sup>	0.45±0.08 <sup>ns</sup>	0.35±0.07 <sup>ns</sup>
	DS	13.5	37.8±7.7	0.22±0.02	3.65±0.36	0.67±0.17	0.73±0.08	0.33±0.17
	WL	74.4	40.4±8.4	0.27±0.08	2.94±1.01	0.82±0.01	0.55±0.02	0.45±0.01

Each value is expressed as the means ± SD(n = 5). \*The asterisk symbols indicated significantly different from control and P values were calculated by duncan's multiple range test(P≤0.05).

진행과정에서 유의한 결과가 나타나지는 않았다 (Table 2).

반응중심당 에너지 흐름의 변화를 나타내는 ABS/RC, Dlo/RC, TRo/RC 및 ETo/RC를 살펴 보면(Fig. 2), 대조구의 경우 전반적으로 ABS/RC, Dlo/RC, TRo/RC가 감소하는 경향을 보였으며, 건조처리구는 9일까지는 비슷한 경향으로 감소하다가 12일 이후 다소 증가하는 경향을 보였다. 또한 침수처리구의 경우 12일간 침수시 ABS/RC, Dlo/RC가 급격하게 높아지는 경향을 보였으며, TRo/RC 역시 다소 증가하였다. ABS/RC의 증가는 반응중심의 비활성화를 의미하고, Dlo/RC의 증가는 에너지가 열로 소산되는 것을 나타내는데

(Falqueto et al., 2010), 박태기나무는 건조처리에 비해 침수처리시 더 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다,

이를 통해 박태기나무는 침수가 12일 이상 지속되는 경우 환원상태로 존재하는 반응중심들이 많아져 비활성화가 증가하며, 반응중심을 통해 흡수된 에너지 역시 전자전달에 충분히 쓰이지 못하고 많은 비율이 열로 소산되는 것을 알 수 있다. 또한 TRo/RC의 증가를 통해 반응중심으로부터 전해진 에너지는 Q<sub>A</sub>를 환원시키는데 사용하고 있음을 알 수 있다. ETo/RC는 전자전달로 전해지는 에너지의 변화를 의미하는데 건조 및 침수처리에 따라 유의적인 변화가 관찰되지는 않았으며,

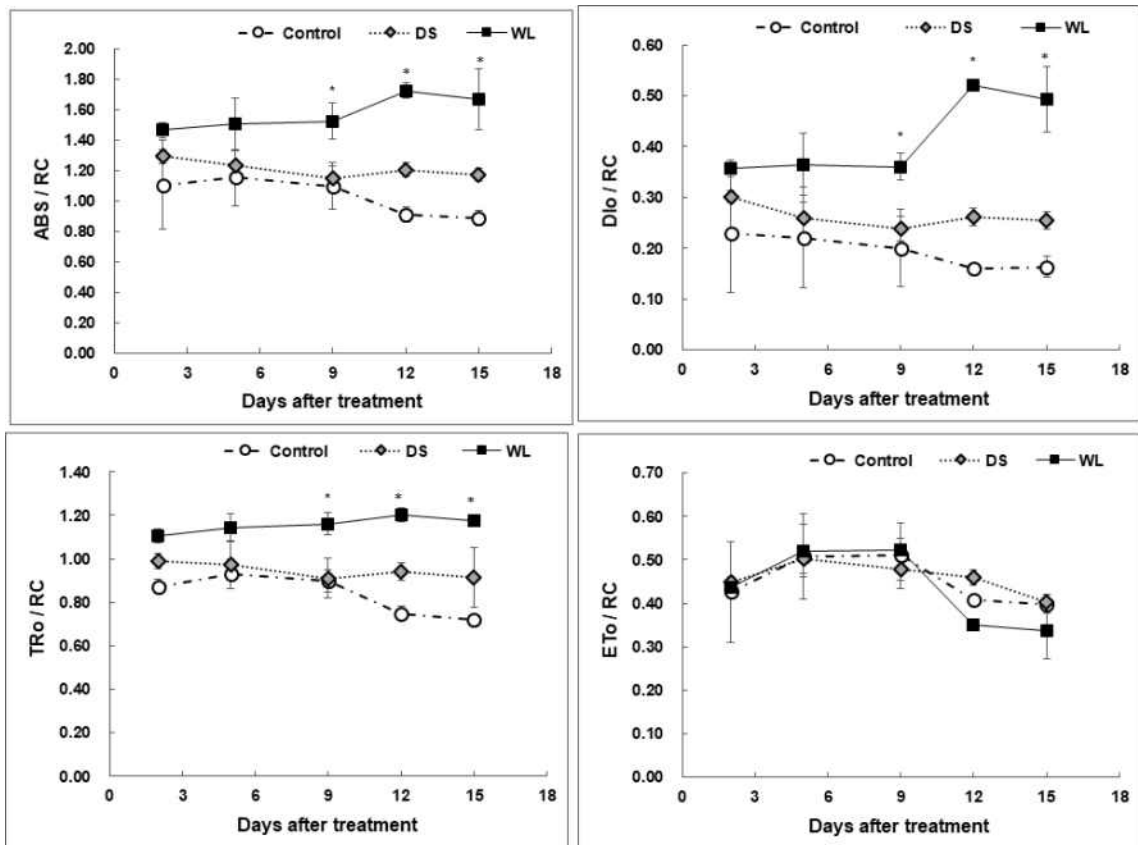
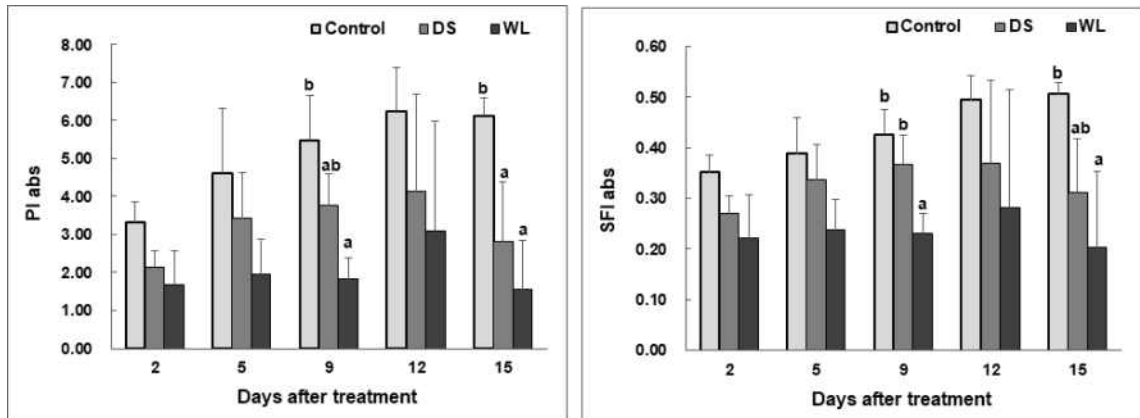


Fig. 2. Changes of relative activities per reaction center(ABS/RC, TRo/RC, ETo/RC, Dlo/RC) of *C. chinensis* by water stress. Each point is expressed as the mean  $\pm$  S.D.(n = 5). The asterisk symbols indicated significantly different from control and *P* values were calculated by duncan's multiple range test( $P \leq 0.05$ ).

전자전달 과정의 손실보다는 이전 과정에서의 손실이 에너지 흐름 변화에 더 큰 요인인 것으로 생각할 수 있다.

PI<sub>abs</sub>와 SFI<sub>abs</sub>는 다양한 환경스트레스에 대한 광합성 기구의 활력지수(vitality indexes)로 활용되며, PI<sub>abs</sub>는 흡수된 빛에너지를 이용해 전자 운반자들(electron carriers)이 환원되는 과정에서의 에너지 보존효율을 의미하고, SFI<sub>abs</sub>는 광합성 과정에서 전자 수송을 유도하는 광계 II의 구조적, 기능적인 반응을 보여준다(Holland et al., 2013). 박태기나무의 경우 대조구의 초기생

장이 이루어 짐에 따라 PI<sub>abs</sub>와 SFI<sub>abs</sub>가 전반적으로 향상되는 경향을 보였으며, 건조 및 침수 처리구 역시 유사한 경향을 보이다가 15일 이후에 감소하는 것으로 나타났다. 전반적으로 건조처리로 인한 활력값이나 감소율보다 침수처리에 따른 활력 및 감소 경향이 두드러진 것을 알 수 있었다(Fig. 3). 특히 PI<sub>abs</sub>는 건조 스트레스를 평가 및 모니터링 하는데 좋은 지표로 사용되는데 (Van Heerden et al. 2007), 본 결과를 통해 침수처리에 따른 과습 스트레스에서도 유의적인 지표로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.



**Fig. 3. Changes of vitality indexes(PIabs and SFI abs) of *C. chinensis* by water stress.** Each bars is expressed as the mean  $\pm$  S.D.(n = 5). Different letters indicate values significantly different by duncan's multiple range test( $P \leq 0.05$ ).

위의 결과를 통해 박태기나무는 건조처리 및 침수처리 모두 약 12일 이상 경과되면서 대조구에 비해 반응중심의 비활성화가 증가하여 광화학 반응 과정에 이용하기 위해 포획하는 빛 에너지가 줄어들었으며, 흡수된 에너지는 열로 소산되어 전자전달에 이용되지 못하는 비율이 높아지는 경향을 보였다. 이러한 에너지 흐름의 효율 감소를 통해 PI<sub>abs</sub> 와 SFI<sub>abs</sub>와 같은 광합성 기구의 활력지수(vitality indexes) 역시 감소되는 것으로 나타나 전반적인 광계 II의 활성이 저하되는 것을 알 수 있었으며, 건조스트레스에 비해 침수스트레스 시 더 민감한 반응을 보이는 것으로 나타났다. 또한 OKJIP 분석법을 통해 산출된 ABS/RC, DIO/RC, PI<sub>abs</sub> 및 SFI<sub>abs</sub>는 수분스트레스에 대한 생리적 지표로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 참고문헌

1. Boru, G., Vantoi, T., Alves, J., Hua, D. and Knee, M. (2003). Responses of soybean to oxygen deficiency and elevated root-zone carbon dioxide concentration. *Annals of Botany*. 91: 447-453.
2. Falqueto, A. R., Silva, F. S., Cassol, D., Júnior, M., Ariano, M., Oliveira, A. C. and Bacarin, M. A. (2010). Chlorophyll fluorescence in rice: probing of senescence driven changes of PSII activity on rice varieties differing in grain yield capacity. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 22: 35-41.
3. Holland, V., Koller, S. and Brüggemann, W. (2013). Insight into the photosynthetic apparatus in evergreen and deciduous European oaks during autumn senescence using OJIP fluorescence transient analysis. *Plant Biology*. 1-8.
4. Kim, H. Y., Choi, H. J., Lim, S. H., Heo, S. J., Han, S. S., Kim, D. S. and Kim, S. M. (2003). Herbicidal activity of Korean

1. Boru, G., Vantoi, T., Alves, J., Hua, D. and

- native plants(I). The Korean Journal of Pesticide Science, 7:248-257.
5. Korea National Arboretum. (2020). Korea biodiversity information system. <http://www.nature.go.kr/>.
  6. Lee, K. C. (2017). Change of Photosynthesis Performance and Water Relation Parameters in Seedling of Korean Den-dropanax under Drought Stress. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 26: 181-187
  7. Lee, S. H., Kim, S. Y., Kim, J. J., Jang, T. S. and Chung, S. R. (1999). The isolation of the inhibitory constituents on melanin polymer formation from the leaves of *Cercis chinensis*. Korean Journal of Pharmacognosy 30:397-403.
  8. Oh, S. J. and Koh, S. C. (2004). Chlorophyll fluorescence and antioxidative enzyme activity of *Crinum* leaves exposed to natural environmental stress in winter. Korean Journal of Environmental Biology. 22:233-241.
  9. Strasser, R. J., Srivastava, A. and Tsimilli-Michael, M. (2000). The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In Yunus M, Pathre U and Mohanty P.(eds.). Probing Photosynthesis: Mechanism, regulation and adaptation. Taylor and Francis. London and New York. p.445-483.
  10. Taiz, L. and Zeiger, E. (2006). Plant Physiology. 4th ed. Sinauer Associates. Sunderland. Massachusetts. USA. p.672-705.
  11. Van Heerden, P. D. R., Swanepoel, J. W. and Krüger, G. H. J. (2007). Modulation of photosynthesis by drought in two desert scrub species exhibiting C3-mode CO<sub>2</sub> assimilation. Environmental and Experimental Botany. 61:124-136.
  12. Wang, Z. X., Chen, L., Ai, J., Qin, H. Y., Liu, Y. X., Xu, P. L., Jiao, Z. Q., Zhao, Y. and Zhang, Q. T. (2012). Photosynthesis and activity of photosystem II in response to drought stress in amur grape(*Vitis amurensis*Rupr.). Photosynthetica. 50:189-196.

논문접수일 : 2020년 4월 27일  
논문수정일 : 2020년 6월 2일  
게재확정일 : 2020년 6월 12일