

〈Original article〉

도시야간조명의 LED 색온도별 겹빛나무의 광화학적 생리지표 해석

김지수 · 유성영² · 김희서 · 김태완^{1,2,*}

단국대학교 건축공학과, ¹한경대학교 식물생명환경과학과,
²한경대학교 식물생태화학연구소

Photochemical Index Analysis on the Influence of LED Illumination Color Temperature on Donarium Cherry

Ji-Su Kim, Sung-Yung Yoo², Hway-Suh Kim and Tae-Wan Kim^{1,2,*}

Department of Architectural Engineering, Dankook University,
Yongin 16890, Republic of Korea

¹Department of Plant Life & Environmental Science, Hankyong National University,
Anseong 17579, Republic of Korea

²Institute of Ecological Phytochemistry, Hankyong National University,
Anseong 17579, Republic of Korea

Abstract - In this study, the efficiency of photosynthetic electron transfer according to LED color temperature was verified in order to find a way to efficiently grow trees under night illumination. The experiment was carried out with White treatment, Warmwhite treatment, and non-treatment with donarium cherry. The study uses to a method for analyzing and evaluating the color temperature of an LED light source by photochemical analysis. We found that all treatments 115 DAT of maximum fluorescence amount (*P*) had the lowest. In the treatment using white light and the Warmwhite light, the *T* amount of florescence of the late stage during the transition of the *J*-*I* level was increased, and the photosystem I electron transfer efficiency was decreased. Therefore, the electron transport efficiency of *REI_O/CS* and *REI_O/RC* were reduced. Especially, compared to Warmwhite, the light intensity increased greatly in the white-light treatment, The *PI_{TOTALABS}* of 7 DAT was the highest value, but it was decreased to the lowest value on 115 DAT. This study has shown that the white treatment was low in electron transfer efficiency and soundness. Warmwhite-light treatments showed lower stress.

Keywords : chlorophyll fluorescence, photochemical parameter, stress index

서 론

도시는 이산화탄소, 오존 등이 많아 공해로 오는 환경 문

제점이 크므로 이산화탄소를 흡수하는 수목은 도시의 필수적인 구성요소이며, 경관적으로도 수목의 중요성은 크다. 또한 도시의 발전으로 야간시간대의 활동이 점차 길어지고, 아름다운 야경을 창출하려는 문화적인 요구가 증가하면서 이전보다 더 많은 인공조명이 도시의 수목에 간접적 또는 직

* Corresponding author: Tae-Wan Kim, Tel. 031-678-4750,
Fax. 031-678-4751, E-mail. lsn36@hanmail.net

Table 1. Mean temperature by measurement date

	2016.6.26	2016.7.9	2016.8.13	2016.9.14	2016.10.22
Mean temperature	21.4	25.7	27.8	22.3	15.5
DAT	0 DAT	7 DAT	44 DAT	76 DAT	115 DAT

접적으로 영향을 주고 있다. 도시의 인공조명은 가로등, 보안등, 정원등, 건축물 경관조명, 수목조명 등이 있으며 주로 3,000~5,000 K의 색온도를 사용하며, 최근에는 LED광원을 대부분 적용한다. 지금까지 인공조명은 공간의 용도와 사람들의 감성적 방향에 따라 광원 및 색온도를 적용하고 있으며, 특히 안전을 위한 조명은 야간에 계속 점등하는 경우가 많아 인공조명에 의한 수목의 생장에 미치는 영향에 대하여 점차 관심이 높아지고 있다.

식물의 광합성과 관련된 엽록소함량 등에 빛환경이 영향을 미치는 것으로 알려졌고(Cho *et al.* 2008), 보편적으로 광합성 효율과 광합성 기구의 기능해석을 위한 엽록소 형광분석법이 이용되고 있다(Strasser 1985; Oukarroum *et al.* 2007; Yoo *et al.* 2014, 2016). 엽록소 형광(Chlorophyll Fluorescence) 분석법은 비 파괴적인 방법으로 지속적인 모니터링이 가능한 기술로 알려져 있다(Peng *et al.* 1995; Yoo *et al.* 2012, 2016). 특히 동일한 장소에서 인공조명에 다년간 노출되는 특성에 따라 지속적인 생육 모니터링이 크게 요구되고 있는 만큼 비파괴적인 방법의 생육진단이 필요하다. 식물의 건전한 생장에 대한 검증을 위한 영향평가를 위해 도입한 광화학반응은 광합성관련 효율을 알 수 있고, 간접적인 측정방식인 엽록소 형광반응으로 스트레스 평가가 가능하며, 식물의 효율을 확인할 수 있는 방법으로 활용하고 있다. 빛에 노출된 엽록소가 15분 암상태를 유지하면 원상태로 복귀하는 것으로 알려져 있다(Strasser 1985; Strivastava *et al.* 1995). 암상태를 지나 원상태의 엽록소 복귀시점을 형광유발시점(O, origin), 첫 번째의 최소 형광변동 시점을 Jump(J), 중간 정도를 Intermediate(I), 최대의 형광점에서 형광 유도량인 Peak(P)를 표현하는 OJIP가 쓰이고 있다(Jee 1995).

본 연구에서는 OJIP 분석인 엽록소 형광반응으로 LED광원 색온도 조건에 따른 광합성 효율과 광 스트레스 광생리 지표 분석을 하여 수목종 겹벚나무가 도시환경에서 효율적으로 성장하는지에 대해 검증하는 것이 목표이다.

재료 및 방법

1. 색온도 선정

연구에 사용된 재료는 LED광원이며, 조명기구의 재질은

온도와 습도, 바람 등 외부환경에 오래 견딜 수 있어야 하므로 내구성이 강한 알루미늄과 강화유리, IP등급(방진, 방습) 65이다. LED 소자는 CREE, USA 사의 1W급 소자 5개로 총 소비전력은 5W이고 지면에 설치하였다. LED광원의 색온도는 White(5,000 K)와 Warmwhite(3,000 K)를 적용하였으며, 본 논문에서 5,000 K, 3,000 K의 색온도를 White, Warmwhite로 명시하였다.

2. 재배방법

연구의 재료는 가로수 및 조경수로 많이 식재되는 벚나무종 겹벚나무(*Prunus donarium* Sieb)로 하였다. 2년 수령의 수목 식재는 4월 5일에 하였고, 처리구 간 간격은 5m로 하였다. 식재 후 두 달 동안은 조명을 비추지 않았으며 측정기간은 6월 26일에서 10월 22일까지로 동일 개체 대상으로 총 5회에 걸쳐 측정하였다. 측정 일은 2016.6.26, 7.9, 8.13, 9.14, 10.22으로 광화학반응과 스트레스 지수를 비교 분석하였다. 점등 전을 0일(0 DAT), 점등 후 7일(7 DAT), 44일(44 DAT), 76일(76 DAT), 115일(115 DAT)로 명시하였다(Table 1). 기상요인 및 생육기간에 따른 엽록소 형광반응의 변화를 점등 전 0일부터 점등 후 115일까지 각 처리구 별 변화를 분석하여, 무처리 수목과의 차이점을 분석하였으며, 에너지전달률(Energy Flux)은 날짜별 처리구의 전자전달 변화를 분석하였다.

3. 광화학반응분석

겹벚나무에 LED광원 White, Warmwhite 색온도의 빛을 비추어 형광반응에 의한 광화학반응 변화를 평가하는 것으로 엽록소 형광분석(Calatayudet *et al.* 2006; Gorbe and Calatayud 2012) 방법을 적용하였다. 매 측정일 23시에 Leaf Clip을 이용하여 겹벚나무 잎을 30분간 암처리 후 엽록소 형광분석을 5반복 실시하였다. 일반적으로 엽록소 분자는 빛을 흡수 후 들뜬 상태(Chl^*)로 전이되어 열에 의한 에너지 방출, 광화학적 에너지 전이 및 형광 현상 등 세 가지 경로를 통해 바닥상태로 되돌아오는데, 광 변환에 관련된 광화학 효율 등을 측정 가능하다(Maxwell and Johnson 2000). OJIP 에너지 전환은 환원된 Q_A 의 농도에 영향을 받으며(Duysens and Sweers 1963), 광계II 광화학 양자 수율 및 전자전달에 이용

Table 2. Equations and definitions of chlorophyll fluorescence parameters (Stirbet and Govindjee 2011)

	Data extracted from the recorded fluorescence transient O-J-I-P
F_0	Fluorescence at the O-step of O-J-I-P
$F_J = F_{2ms}$	Fluorescence at the J-step (2 ms) of O-J-I-P
$F_I = F_{30ms}$	Fluorescence at the I-step (30 ms) of O-J-I-P
$F_p = F_M$	Maximal recored Fluorescence at the peak P of O-J-I-P
$F_V = F_M - F_0$	Maximal variable fluorescence Variable chlorophyll fluorescence ($F_M - F_0$) measured in the dark-adapted state, when non-photochemical processes are minimum
$V_J = (F_J - F_0)/(F_M - F_0)$	Relative variable fluorescence at the J-step
$V_I = (F_I - F_0)/(F_M - F_0)$	Relative variable fluorescence at the I-step
$F_V/F_M = (F_M - F_0)/F_M$	Maximum quantum yield of primary photochemistry
RC/ABS	Number of Q_A reducing RC_S per PSII antenna Chl
TR_0/RC	Trapped energy flux per RC
ET_0/RC	Electron transport flux from Q_A to Q_B per PSII
REI_0/RC	Electron transport flux until PSII acceptors per PSII
DI_0/RC	Heat dissipation at time zero, per RC
ABS/CS	Absorbed photon flux per cross section
RC/CS	The number of active $PSIIRC_S$ per cross section
TR_0/CS	Maximum trapped excitation flux per cross section
ET_0/CS	Electron transport flux from Q_A to Q_B per cross section
REI_0/CS	Electron transport flux until PSI acceptors per cross section
DI_0/CS	Heat dissipation at time zero, per cross section
PI_{ABS}	Performance index for energy conservation from photons absorbed by PSII antenna, to the reduction of Q_B
$PI_{TOTALABS}$	Performance index for energy conservation from photons absorbed by PSII antenna, to the until the reduction of PSI acceptors
Stress factor index (LFI)	Lighting stress factor index

될 잠재적인 에너지로 가정할 수 있어(Stirbet and Govindjee 2011) 식물의 광합성 활력을 검사하는 유용한 기술로 평가되고 있다(Strasser *et al.* 1985). 또한 일반적으로 흡수된 광자의 PSII와 PSI 전자수용체가 환원 시 에너지 효율을 알 수 있는 광생리지표는 광화학 성능지수(Performance index)로 알려져 있으며(Stirbet and Govindjee 2011), $PI_{TOTALABS}$ 및 PI_{ABS} 는 에너지가 효율적으로 전환되어 건전성을 판단하는 지표로 사용되고 있다(Oukarroum *et al.* 2007). 측정된 데이터는 엽록소 형광반응(OJIP)(Stirbet and Govindjee 2011)방법에 의해 분석하였다(Table 2).

4. 통계분석

IMB SPSS(Statistics 24)프로그램으로 통계분석을 하였으며, ANOVA와 Duncan's multiple range test분석으로 유의성 분석을 하였다.

결과 및 고찰

1. 야간조명에 따른 형광반응(OJIP) 비교

무처리 수목의 엽록소 형광반응은 처리 전, 처리 후 7일, 44일, 76일, 115일 순으로 점차 최대 형광방출량이 감소하였으나, 전반적으로 엽록소 형광방출량의 차이가 크지 않았다

(Fig. 1a). 최대형광량 기준 상대 형광량(VOP)에서 무처리는 O-J 전이에서 생육기간에 따라 감소하는 경향을 보였고 J-I 전이도 115 DAT인 생육후기에만 형광방출량이 증가하여, 형광방출량에 의한 광화학반응의 감소가 없었다(Fig. 1d).

Warmwhite는 O-J 전이에서 생육기간에 따라 감소하는 경향을 보였고 J-I에서는 처리 후 44일까지는 처리 전보다 감소하다가 처리 76일 이후 형광방출량이 증가하였으며, 무처리에 비하여 J-I 전이의 증가로 인해 광화학반응은 감소되는 것이 확인되었다. 이와 같은 결과는 Warmwhite 광처리 시 빛 스트레스로 인해 생육후기 광계I(J-I 전이) 광화학반응 저해 현상이 나타나는 것으로 사료되었다(Fig. 1b, e). White는 O-J 전이에서 생육기간에 따라 감소하는 경향을 보여, Warmwhite와 비슷한 양상을 보였고, J-I 전이도 Warmwhite와 같이 처리 후 76일, 115일에 형광방출량 증가를 보였으나 Warmwhite보다 형광방출량 증가로 인한 광화학반응 감소를 예측할 수 있었다(Fig. 1c, f).

엽록소 형광반응 측정 결과 무처리, Warmwhite, White 순으로 생육 후기 엽록소 형광방출량이 감소하는 것으로 나타났다. 겹벚나무는 야간 조명에 의해 광계II부터 광계I 광화학반응(J-I 전이)이 감소하는 것으로 사료되었다.

2. 엽록소 형광의 매개변수 분석

0 DAT의 광계II 안테나 Q_A 환원수인 RC/ABS (활성화된

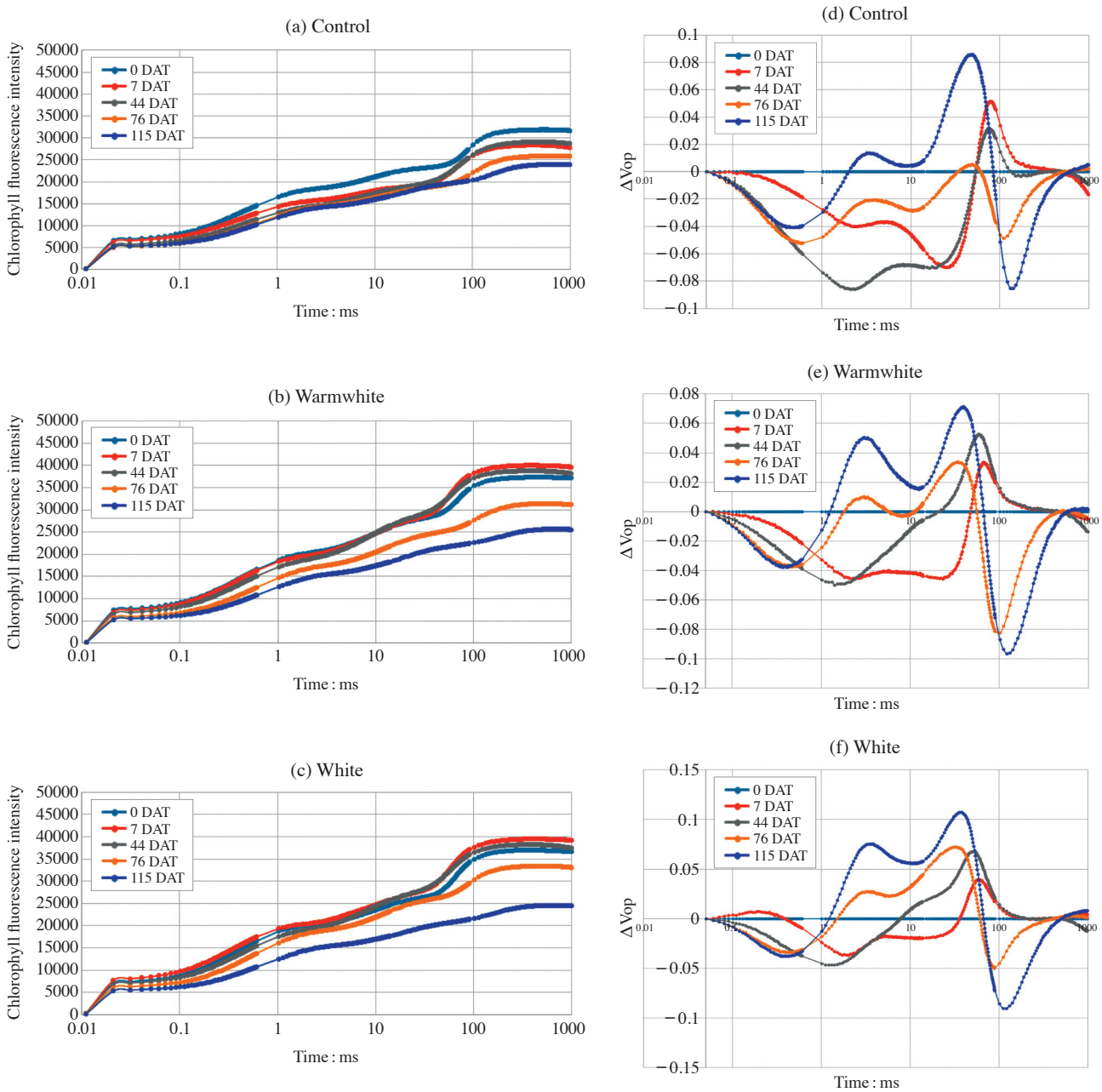


Fig. 1. Comparison of chlorophyll fluorescence transient (OJIP) and relative chlorophyll fluorescence transient (VOP) of donarium cherry at different illumination color temperature levels (a, untreated tree level OJIP; b, Warmwhite Illumination color temperature level OJIP; c, White Illumination color temperature level OJIP; d, untreated tree level VOP; e, Warmwhite Illumination color temperature level VOP; f, White Illumination color temperature level VOP).

반응중심)는 무처리, Warmwhite, White 광처리 모두 비슷 하였으며, 광계I까지 Cross section (CS)당 Energy flux인 REI_0/RC 와 에너지 전환효율인 $PI_{TOTALABS}$ 는 Warmwhite, 무처리, White 순으로 높았으며, 광계II까지 Cross section (CS)당 Energy flux인 ET_0/RC 와 에너지 전환효율인 PI_{ABS} 는 무처리가 가장 낮으며, Warmwhite와 White가 같았다 (Fig. 2a). 7

DAT의 RC/ABS 는 White가 가장 낮았으며, 무처리와 Warmwhite가 비슷하였으며, REI_0/RC 와 $PI_{TOTALABS}$ 는 Warmwhite가 가장 낮았으며, 무처리와 Warmwhite가 비슷해져서 0 DAT에 비하여 특히 White 처리구의 전자전달효율이 감소되는 변화가 보였다. ET_0/RC 는 무처리가 가장 낮으며, Warmwhite와 White가 0 DAT에 비하여 10% 정도 증가되었다. White와

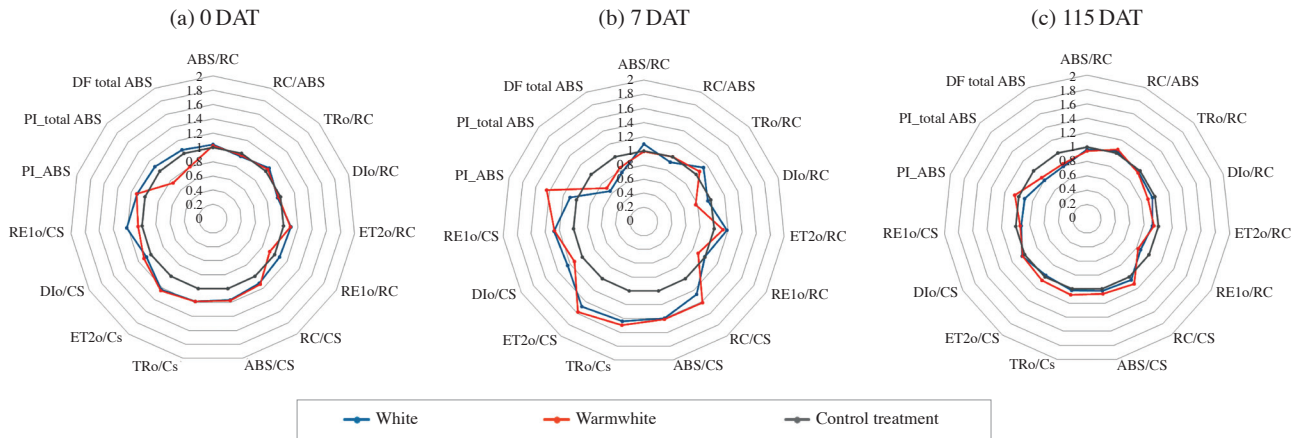


Fig. 2. Comparison of energy fluxes in donarium cherry at different illumination color temperature levels (a, untreated tree; b, tree of Warmwhite illumination color temperature; c, tree of White illumination color temperature).

Table 3. Comparison of chlorophyll fluorescence parameters of donarium cherry at illumination color temperature levels

		RC/ABS	ABS/RC	TRO/RC	DI0/RC	ET0/RC	REI0/RC
0 DAT	Control	0.4927	2.0445	1.5956	0.4489	0.8819	0.5673
	White	0.4722	2.1187	1.6913	0.4273	0.9720	0.6110
	Warmwhite	0.4781	2.0930	1.6578	0.4351	0.9618	0.5223
	Significance	NS	NS	NS	NS	NS	*
7 DAT	Control	0.4631	2.1730	1.6589	0.5140	0.9711	0.7014
	White	0.4236	2.3752	1.8845	0.4907	1.1498	0.6994
	Warmwhite	0.4639	2.1557	1.7568	0.3988	1.0985	0.6256
	Significance	*	*	NS	**	**	NS
115 DAT	Control	0.6152	1.6279	1.2567	0.3711	0.7004	0.3703
	White	0.6351	1.5749	1.2184	0.3564	0.6451	0.3198
	Warmwhite	0.6516	1.5392	1.2064	0.3327	0.6591	0.3060
	Significance	NS	NS	NS	NS	NS	*

Statistically difference. NS: no significance, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

RC/ABS: Number of Q_A reducing RCs per PSII antenna Chl, TR0/RC: Trapped energy flux per RC, ET0/RC: Electron transport flux from Q_A to Q_B per PS, REI0/RC: Electron transport flux until PSII acceptors per PSII, DI0/RC: Heat dissipation at time zero, per RC, ABS/CS: Absorbed photon flux per cross section.

Warmwhite의 처리 후 7일부터 최대형광방출량이 증가된 것과 연결된다(Fig. 2b). 115 DAT의 RC/ABS는 무처리, Warmwhite, White 광처리구 모두 비슷하였으며, REI0/RC는 Warmwhite가 가장 낮으며, White, 무처리 순으로 높았다. White 처리구의 전자전달효율이 계속 감소되는 변화가 보였다. ET0/RC는 무처리보다 Warmwhite와 White가 감소되었다. 0 DAT와 비교해서 무처리, Warmwhite의 REI0/RC의 변화보다 White의 변화가 있었다(Fig. 2c).

종합적으로 White 광처리구에서 광계I전자전달 에너지플럭스인 REI0/CS의 전자전달 에너지플럭스(Energy Flux)가 0 DAT 대비 30% 감소되었으며, 광계I전자수용체까지의 전자전달이 잘 이루어지지 않았다. ET0/CS 및 REI0/CS는 0 DAT에 비해 7DAT에 증가된 후 115 DAT에 감소되는 것으로, 광처리 후 최대형광방출량이 처리 후 7DAT 이후로 증가 후 생

육후기인 115 DAT에 감소되는 것과 같은 것으로 사료된다. 이와 같은 결과는 White 광처리가 J-I 전이에서 스트레스를 받아 광계I까지 Cross section(CS)당 Energy flux인 REI0/CS가 60% 이내로 감소로 나타나 전자전달능력이 감소되는 것으로 판단된다.

매개변수(Parameter)의 통계분석에 의해 7 DAT 중 ET0/RC에서 집단간 유의성이 인정되었다($p < 0.01$). 그리고 ET0/CS 구간에서도 $p < 0.001$ 로 고도의 유의성이 인정되어서 광스트레스 생리지표로 활용이 가능한 것으로 판단되었다(Table 3).

3. 광화학 생리지표 분석

광계II와 광계I의 에너지가 효율적으로 전환되는지를 알아보는 Performance index (PI)는 건전함을 알 수 있는 것으로

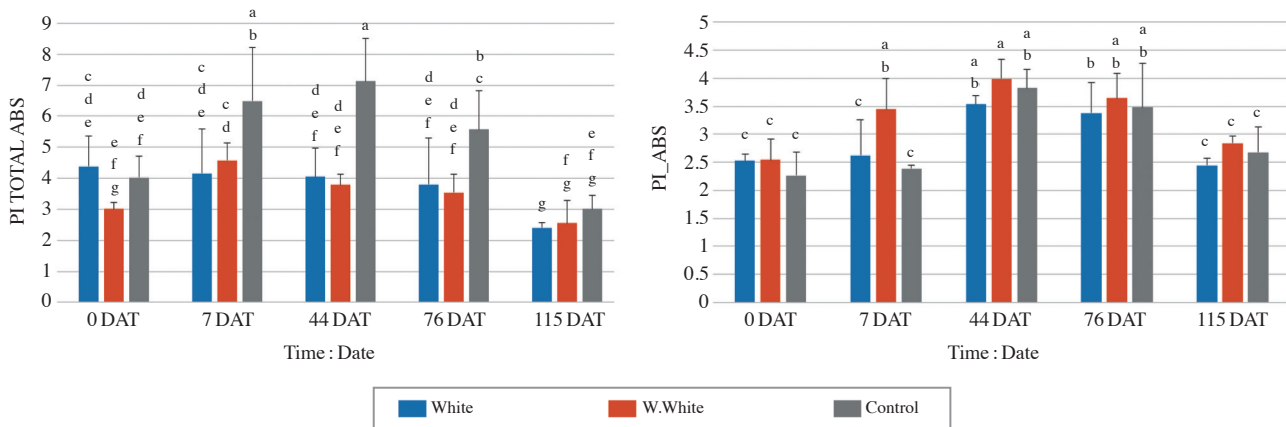


Fig. 3. Comparison of performance index in donarium cherry at Illumination color temperature levels.

알려져 왔다(Oukarroum *et al.* 2007; Stirbet and Govindjee 2011). $PI_{TOTALABS}$ 및 PI_{ABS} 의 수치가 높으면 에너지가 효율적으로 전환되어 건전성을 알 수 있는 지표로 사용되고 있다(Oukarroum *et al.* 2007).

0 DAT의 광합성계II광화학 성능지수 PI_{ABS} 는 모든 처리구에서 비슷했으며, 광합성계I광화학 성능지수인 $PI_{TOTALABS}$ 는 White, 무처리, Warmwhite 순으로 낮았다. 처리 후 7일 후의 PI_{ABS} 는 Warmwhite 처리구에서 무처리 대비 40% 높은 수치를 보였으며 White 처리구에서는 10% 높은 수치를 보였으나, $PI_{TOTALABS}$ 는 Warmwhite, White 모두 무처리 대비 약 30% 이상 낮은 수치를 보였다. 115 DAT에서 PI_{ABS} 는 Warmwhite 처리구에서 무처리 대비 10% 높은 수치를 보였으며, White 처리구는 무처리 대비 10% 이상 낮은 수치를 보였다. $PI_{TOTALABS}$ 는 Warmwhite 처리구에서 무처리 대비 18%, White 처리구는 무처리 대비 20% 낮은 수치를 보였다(Fig. 3).

PSII보다 PSI에서의 전자전달이 잘 안 이뤄지며, White의 $PI_{TOTALABS}$ 경우 0 DAT에 무처리 대비 높은 수치를 보였으나 115 DAT에 무처리 대비 20% 수치로 낮아져 가장 큰 감소를 보였으며, 이는 계속된 White 빛에 스트레스를 받아 광합성계I광화학에너지 효율이 크게 감소된 것을 알 수 있다.

보리의 건조 스트레스가 성능지수(PI)를 변화시킨다는 연구에 근거에 log(PI) 상대지수를 적용한 Drought factor index (DFI)를 스트레스 지표로 활용하고 있다(Oukarroum *et al.* 2007; Yoo *et al.* 2016). 이에 따라서 본 연구 또한 log(PI) 상대지수를 적용하여 광조건에 의한 Lighting Factor Index (LFI)를 산정하여, 광조건에 의한 스트레스 지표로 활용하였다. Warmwhite의 LFI는 -0.293 이며, White는 -0.386 으로 무처리보다 낮으므로 광처리에 의한 피해가 예상되며, 상대적으로 Warmwhite 광처리구의 스트레스가 더 낮은 것으로 나타나 광처리에 의한 겉빛나무의 건전성 평가의 기초자료

로서 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 야간조명 하에서 수목이 효율적으로 성장하는 방법을 모색하고자 LED 색온도에 따른 광합성 전자전달 효율을 검증하였다. 가로수와 조경수로 도시환경에 많이 식생하는 겉빛나무를 대상으로 White 색온도를 비춘 수목과 Warmwhite 색온도를 비춘 수목, 그리고 무처리 수목을 대상으로 건전도를 비교하였으며, 연구방법으로는 엽록소 형광반응(OJIP)을 활용해 LED광원 색온도 조건에 따른 광 스트레스 광생리지표 분석을 통해 광화학반응 해석과 건전성 평가를 하였다.

엽록소 형광반응(OJIP)을 분석한 결과는 모든 처리구에서 처리 후 115일인 생육후기로 갈수록 낮아졌으며, White 광처리구와 Warmwhite 광처리구에서 J-I구간의 전이 과정 중 생육후기의 형광량이 증가하여 광계I전자전달효율은 감소된 것을 알 수 있었다. 따라서 전자전달효율인 REI_o/CS 및 REI_o/RC 모두 감소되었다. 이 중 White 광처리구는 Warmwhite 대비 형광량의 증가폭이 컸으며, $PI_{TOTALABS}$ 는 처리 전 무처리에 비해 가장 높은 수치였지만, 115 DAT에는 가장 낮은 수치로 감소된 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 White 광을 비춘 수목은 전자전달효율 및 건전도가 낮은 것으로 판단되었으며 상대적으로 Warmwhite 광처리구의 스트레스가 더 낮은 것으로 나타났다.

REFERENCES

Calatayud A, D Roca and PF Marinez. 2006. Spatial-temporal

- variations in rose leaves under water stress conditions studied by chlorophyll fluorescence imaging. *Plant Physiol. Biochem.* 44:564–573.
- Cho MS, KW Kwon, GN Kim and SY Woo. 2008. Chlorophyll contents and growth performances of the five deciduous hardwood species growing under different shade treatments. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 10:149–157.
- Duysens LMN and HE Sweers. 1963. Mechanism of the two photochemical reactions in algae as studied by means of fluorescence. pp. 353–372. In *Studies on Microalgae and Photosynthetic Bacteria* (Japanese Society of Plant Physiologists ed.). University of Tokyo Press, Tokyo.
- Gorbe E and A Calatayud. 2012. Applications of chlorophyll fluorescence imaging technique in horticulture research: a review. *Sci. Hortic.* 138:24–35.
- Jee G. 1995. Sixty-three years since Kautsky chlorophyll a fluorescence. *Aust. J. Plant Physiol.* 22:131–160.
- Maxwell K and GN Johnson. 2000. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *J. Exp. Bot.* 51:659–668.
- Oukarroum A. 2007. Vitalité des plantes d'orge (*Hordeum vulgare* L.) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne. Doctorate thesis, Univ. Geneve. p. 184.
- Oukarroum A, S El Madidi, G Schansker and RJ Strasser. 2007. Probing the responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.) by chlorophyll a fluorescence OJIP under drought-stress and re-watering. *Environ. Exp. Bot.* 60:438–446.
- Peng S, FV Garcia, RC Laza and KG Cassman. 1993. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. *Agron. J.* 85: 987–990.
- Peng S, G Kenneth and J Martin. 1995. Relationship between leaf photosynthesis and nitrogen content of field-grown rice in tropics. *Crop Sci.* 35:1627–1630.
- Strasser RJ. 1985. Dissipative Strukturen als thermodynamischer Regelkreis des Photosyntheseapparates. *Ber. Deutsch. Bot. Ges. Bd.* 98:53–72.
- Stribet A and Govindjee. 2011. On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll a fluorescence induction) and photosystem II: Basics and applications of the OJIP fluorescence transient. *J. Photochem. Photobiol. B-Biol.* 104:236–257.
- Strivastava A, H Greppin and RJ Strasser. 1995. Effects of high temperature and water stress on the polyphasic chlorophyll a fluorescence transient of potato leaves. pp. 913–916. In *Photosynthesis from Light to Biosphere* (Mathis P ed.). Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Strivastava A, H Greppin and RJ Strasser. 1995. Acclimation of landplants to diurnal changes in temperature and light. In *Photosynthesis from Light to Biosphere* (Mathis P ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 4:909–912.
- Yoo SY, HG Kang, TS Kim, SH Park and TW Kim. 2016. Photochemical index analysis on different shading level of garden plants. *Korean J. Environ. Biol.* 34:264–271.
- Yoo SY, KC Eom, SH Park and TW Kim. 2012. Possibility of drought stress indexing by chlorophyll fluorescence imaging technique in red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:676–682.
- Yoo SY, S Ferrah and TW Kim. 2014. Chlorophyll fluorescence imaging analysis for fresh quality assessment of apple and kiwi fruits preserved under different storage conditions. *IJAIST* 29:60–68.
- Yoo SY, YH Lee, SH Park, KM Choi, JY Park, AR Kim, SM Hwang, MJ Lee, TS Ko and TW Kim. 2013. Photochemical response analysis on drought stress for red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46:659–664.

Received: 2 March 2018

Revised: 6 April 2018

Revision accepted: 9 April 2018