

〈Original article〉

건조스트레스에 의한 오이와 토마토 공정육묘의 광화학적 지표 해석

함현돈 · 김태성 · 이미현 · 박기배 · 안재호¹ · 강동현² · 김태완*

국립한경대학교 식물생명환경과학과 식물생태화학연구소, ¹국립한경대학교 토목안전환경공학과,

²국립농업과학원 농업공학부

The Assessment of Photochemical Index of Nursery Seedlings of Cucumber and Tomato under Drought Stress

Hyun Don Ham, Tae Seong Kim, Mi Hyun Lee, Ki Bae Park, Jae-Ho An¹,
Dong Hyeon Kang² and Tae Wan Kim*

*Institute of Ecological Phytochemistry and Department of Plant Life and Environmental Science,
Hankyong National University, Anseong 17579, Republic of Korea*

¹*Department of Civil, Safety & Environmental Engineering, Hankyong National University,
Anseong 17579, Republic of Korea*

²*Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, RDA,
Jeonju 54875, Republic of Korea*

Abstract - The purpose of this study is to analyze photochemical activity of nursery seedlings under drought stress, using chlorophyll fluorescence reaction analysis. Young nursery seedlings of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) and cucumber (*Cucumis sativa* L.), were grown under drought stress for 8 days. Analysis of chlorophyll fluorescence reaction (OJIP) and parameters, were performed to evaluate photochemical fluctuation in nursery seedlings under drought stress. Chlorophyll fluorescence reaction analysis showed maximal recorded fluorescence (*P*) decreased from the 5 day after treatment in tomato seedlings, while an amount of chlorophyll fluorescence increased at the J-I step. Thus, physiological activity was reduced. In cucumber seedlings, maximal recorded fluorescence (*P*) and maximal variable fluorescence (*F_v*) lowered from the 4 day after treatment, and chlorophyll fluorescence intensity of J-I step increased. Chlorophyll fluorescence parameter analysis showed electron transfer efficiency of PSII and PSI were significantly inhibited with decreasing *ET2_o/RC* and *RE1_o/RC* from the 5 day after treatment, in tomato seedlings and from the 4 day after treatment, in cucumber seedlings. *ET2_o/RC* and *PI_{ABS}* significantly changed. In conclusion, 6 indices such as *F_v/F_M*, *DI_o/RC*, *ET2_o/RC*, *RE1_o/RC*, *PI_{ABS}* and *PI_{TOTALABS}* were selected for determining drought stress in nursery seedlings. Drought stress factor index (DFI) was used to evaluate whether the crop was healthy or not, under drought stress. Cucumber seedlings were less resistant to drought stress than tomato seedlings, in the process of drought stress.

Keywords : nursery seedlings, drought stress index, chlorophyll fluorescence reaction

* Corresponding author: Tae Wan Kim, Tel. 031-678-4750,
Fax. 031-678-4751, E-mail. taewkim@hknu.ac.kr

서 론

육묘는 재배의 분업화 및 전문화를 유도할 수 있는 원천 사업이며 밭아, 접목, 활착, 생장조절 및 병충해 관리 등 재배관련 기술이 집대성되는 정밀산업이다. 국내 육묘장 면적은 1997년 약 20 ha에서 2010년 159 ha로 크게 증가하였으며, 2015년 187 ha, 2020년 224 ha로 증가할 전망이다(Park *et al.* 2011), 시설재배의 발전과 함께 국내 육묘산업 또한 지속적으로 발전하고 있는 유망산업이다. 최근 농촌 인구 고령화 및 농업인구 감소화로 인한 국내 농가의 문제점을 타파하기 위하여 한국형 ICT (Information and communications technologies) 융합 스마트팜 연구개발에 대한 필요성이 대두되고 있다(RDA 2015).

육묘 기간 동안의 재배 환경 및 발육상태는 정식 후의 작물의 생육 및 수확량에 큰 영향을 미친다. 특히 건조스트레스는 밭아 및 육묘의 성장을 크게 저해하는 것으로 알려져 있다(Okcu *et al.* 2005). 작물의 수분관리는 농가의 수익성에 큰 연관성을 가지고 있는 요인 중 하나로서 육묘단계에서 수분이 부족하게 되면 영양 및 생식·생장이 저하되어 개화율이 떨어지게 되며 수확량이 감소하는 것으로 알려져 있다(Okunlola *et al.* 2015). 따라서 성장하는 육묘산업과 더불어 우량묘 생산을 위한 관수의 중요성이 대두되고 있다.

물관리는 대기-식물-토양이 복합적으로 연관되어 있어 농가에서 현실적으로 정밀한 물관리가 매우 어려운 실정이다. 또한, 생육 시기 및 온습도에 따라 필요한 물량이 유동적으로 변하므로 예측 보다는 실시간 측정을 통한 수분 조절이 필요하기 때문에 각각의 조건에 따른 식물 스트레스 진단 및 제량화를 통한 최적의 물관리가 요구되고 있다.

일반적으로 식물의 건전생장 및 모니터링에 파괴적인 방법(엽록소 함량, 2차 대사산물 분석 등)과 비파괴적 분석(엽록소 형광, 광화학 반사지수 등)을 활용한 식물 스트레스 관련 연구가 진행되어 왔다(Schuerger *et al.* 2003; Son *et al.* 2006; Kim *et al.* 2011; Park *et al.* 2015; Bandaru *et al.* 2016).

엽록소 형광 분석은 빛에 노출된 식물체의 형광반응을 처음 발견한(Kautsky and Hirsch 1931) 식물의 비 생물학적 스트레스(Abiotic stress)를 진단하기 위한 분석법으로 오랫동안 연구되어왔으며, 비파괴적으로 시계열적인 모니터링이 가능하여 식물 스트레스 연구에 널리 활용되고 있다(Strasser 1985; Bjorkman and Demmig 1987; Govindjee 1995; Calatayud *et al.* 2006; Burke 2007). 특히, 건조 스트레스 조건에서 식물의 엽록소 형광 반응 분석을 통한 광생리 지표 및 스트레스 조기 진단 연구가 활발히 진행되고 있다. 식물은 건조 스트레스 조건에서 엽록소 함량 감소로 인한 광계 II 활성이 떨어져 역으로 엽록소 형광 방출량이 증

가하는 현상이 발생하며, NADP→NADPH 및 ATP 합성 감소로 이어지는 결과를 초래해 수량 감소 등의 피해가 발생한다(Lichtenthaler *et al.* 2005; Oukarroum *et al.* 2007; Yoo *et al.* 2013). 그러나 이는 건조 스트레스의 강도(지속기간, 수분함량 등), 생육 환경, 생육시기 및 식물종에 따라 매우 큰 차이(Jeffries 1994; Fracheboud and Leipner 2003; Baker and Rosenqvist 2004; Massacci *et al.* 2008)를 보이므로 각각의 조건에서 연구가 이루어져야 할 필요가 있다. 본 논문은 정밀한 물관리를 위해 엽록소 형광 반응을 활용해 건조 조건에서 오이와 토마토 육묘의 광이용 효율을 분석하여 건조 스트레스 광생리 지표 연구를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 공정육묘 재배 및 건조스트레스 처리

본 연구는 국립한경대학교 육묘생장실에서 2018년 7월부터 8월까지 진행하였다. 연구에서 사용된 공정육묘재료는 아산셀탑육묘장에서 출하한 토마토 및 오이 육묘를 사용하였으며 토마토(*Lycopersicon esculentum* Mill.)의 접수는 도태랑다디아, 대목은 B블로킹, 오이(*Cucumis sativus* L.)의 접수는 조은백다다기, 대목은 흑종을 사용하였으며 생장억제제(빈나리)를 사용하지 않은 어린묘를 사용하였다. 모종토양은 농우 초록이(Nongwoobio, Korea)와 Pindstrup Blonde Special (Pindstrup, Denmark)을 1:6(v:v)으로 섞은 혼합상토를 사용했으며 비료는 Technigro (Sungro, USA; N:P:K 13:2:13) 120 mg kg⁻¹을 사용하였다. 대조구의 경우 매일 오전 저면관수 1회 실시하였고 처리구는 관수를 중단하여 재배하였다.

2. 엽록소 형광 반응 분석

엽록소 형광분석(OJIP; Origin Jump Intermediate Peak)은 식물체 잎에 leaf clip을 물려 30분간 암처리 후 Chlorophyll fluorescence meter (FP-100, Photon System Instruments, Czech Republic)을 이용하여 처리 전부터 처리 후 7일까지 매일 측정하였다. 측정 결과는 JIP-TEST(Stirbet and Govindjee 2011)의 방법에 따라 건조스트레스에 적합한 엽록소형광지표를 선정하였다(Table 1). 또한 건조스트레스지수(DFI; Drought Factor Index)를 이용하여 작물 간 건조스트레스 차이를 분석하였다(Oukarroum *et al.* 2007).

3. 통계분석

본 연구는 SAS (Statistical Analysis System, Version 9.4)

Table 1. Equations and definitions of chlorophyll fluorescence parameters (modified from Stribet and Govindjee 2011)

Data extracted from the recorded fluorescence transient O-J-I-P	
F_O	Fluorescence at the O-step (50 μ s) 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 recorded (= maximal possible) fluorescence, at the peak P of O-J-I-P
$F_V = F_M - F_O$	Maximal variable fluorescence
$V_J = (F_J - F_O) / (F_M - F_O)$	Relative variable fluorescence at the J-step
$V_I = (F_I - F_O) / (F_M - F_O)$	Relative variable fluorescence at the I-step
$F_V / F_M = 1 - F_O / F_M$	Maximum quantum yield of primary PSII photochemistry
$F_O / F_V = F_O / (F_M - F_O)$	Ratio of minimal chlorophyll fluorescence intensity to variable chlorophyll fluorescence
$V_{op} = (F_T - F_O) / (F_M - F_O)$	Relative variable fluorescence at any time (Strasser <i>et al.</i> 2007)
$\Delta V_{op} = (V_{op} (treatment) - V_{op} (control))$	Relative variable fluorescence as difference kinetic profile (Strasser <i>et al.</i> 2007)
Specific energy fluxes (per Q_A -reducing PSII reaction center-RC)	
$ABS/RC = M_O(1/V_J)(1/\phi_{PO})$	Absorption flux per RC
$RC/ABS = \phi_{PO} \cdot V_J/M_O$	Number of Q_A reducing RCs per PSII antenna Chl.
$TR_O/RC = M_O(1/V_J)$	Trapped energy flux per RC (at $t=0$)
$ET_O/RC = (M_O/V_J)(1-V_J)$	Electron transport flux from Q_A to Q_B per RC (at $t=0$)
$REI_O/RC = (M_O/V_J)(1-V_I)$	Electron transport flux until PSI acceptors per RC (at $t=0$)
$DI_O/RC = (ABS/RC) - (TR_O/RC)$	Dissipated energy flux per RC (at $t=0$)
Performance indices at $t=0$	
$PI_{ABS} = (RC/ABS) \cdot (\phi_{PO}/(1-\phi_{PO})) \cdot (\Psi_O/(1-\Psi_O))$	Performance index for energy conservation from photons absorbed by PSII antenna, to the reduction of Q_B
$PI_{TOTALABS} = PI_{ABS} \cdot (\delta_{REI_O}/(1-\delta_{REI_O}))$	Performance index for energy conservation from photons absorbed by PSII antenna, until the reduction of PSI acceptors
Drought Stress factor index	
$DFI = \log(A) + 2\log(B)$	Drought stress factor index (at $A = PI_{2DAT} / PI_{control}$, $B = PI_{4DAT} / PI_{control}$)

통계프로그램을 이용하여 통계분석을 실시하였으며 정규성 검정 후 분산분석은 ANOVA-test을 사용하였다. 사후검정은 DMRT (Duncan's multiple range test, $p < 0.05$)을 이용하여 통계적 유의성을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 건조 스트레스에 따른 엽록소 형광반응(OJIP) 비교

공정육묘의 엽록소 형광반응은 대조구의 경우 토마토와 오이 모두 시간이 경과되어도 전반적으로 엽록소 형광반응의 차이가 크게 나타나지 않았다.

건조 처리구의 경우 토마토는 처리 후 5일차부터 활력이 급격하게 떨어지며 최대 형광량(P)의 수치가 낮아지며 변동형광량(F_V)도 감소한 것으로 보였다(Fig. 1a, b). 실제로, 작물은 가뭄과 같은 스트레스 환경에 노출되었을 때 엽록소 형광반응이 유의미하게 감소하는 것으로 밝혀졌다(Rensburg *et al.* 1996). 상대적인 변동 형광량(ΔV_{op})은 건조처리 후 4일부터 J-I 단계(2~30 ms)의 형광방출량이 증가하는 경향

이 보이며 5일차부터 급등하였다. 일반적으로 건조스트레스 조건에서 J(2 ms) 단계의 형광반응이 높아지고 스트레스 경과에 따라 광계II 광화학반응의 감소(Falqueto *et al.* 2017) 및 I-P 전이 과정 중 엽록소 형광량 증가(Oukarroum *et al.* 2009) 등 광화학 기구의 활성 저해가 나타나는 것으로 보고되었다. 본 연구결과 토마토와 오이는 J-I 단계의 엽록소 형광량이 증가한 것으로 보아 건조처리로 인하여 광계I의 광화학 반응이 저해되는 것으로 판단되었다(Fig. 1c, d).

토마토의 경우 처리 후 4일차부터 활력이 크게 감소하며 작물의 생육이 저하되는 것으로 보였다(Fig. 1e, f). 엽록소 형광방출량의 경우 처리 후 3일부터 J-I 단계에서 엽록소 형광방출량이 증가하기 시작하며, 4일차부터 큰 폭으로 올라가 토마토와 마찬가지로 건조스트레스로 인하여 광계II에서 광계I까지의 전자전달 전이 단계가 피해를 받은 것으로 사료되었다(Fig. 1g, h). J-I 및 I-P 단계는 열 의존적인 전이로서 전자의 연속적인 여기 현상에 의한 전자전달계의 포화 현상 및 이로 인한 비광화학적 소광이 나타난다고 알려져 있다(Papageorgiou and Govindjee 2004). 따라서 건조스트레스로 인한 전자전달 지체 및 비광화학적 소광으로 인해 각 전이단계에서 광화학 반응이 급격하게 감소한 것으로 사료되었다.

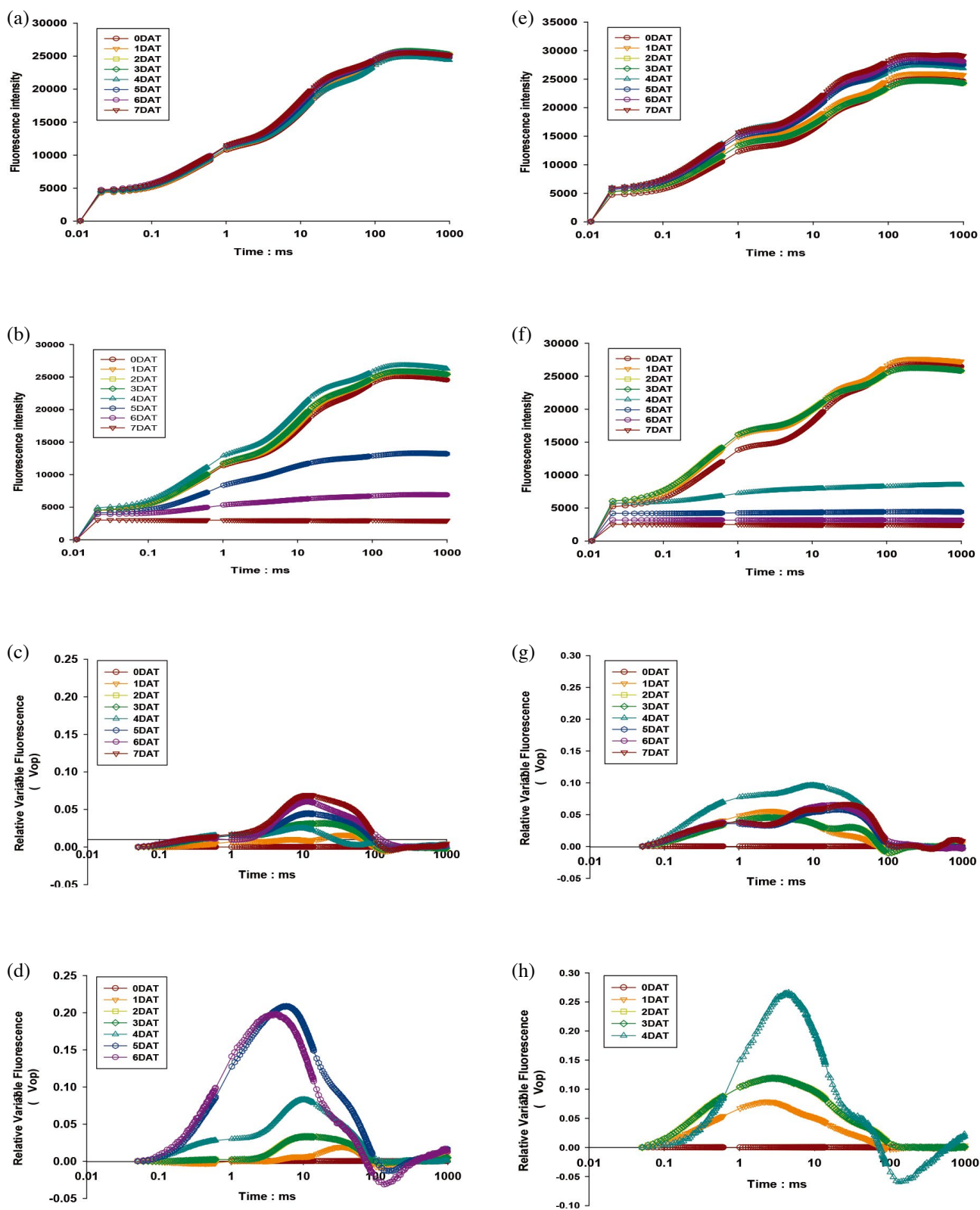


Fig. 1. The comparison of chlorophyll fluorescence transient (OJIP) and relative variable fluorescence (V_{op}) of nursery seedlings by control and treatment (a, OJIP of tomato control; b, OJIP of tomato treatment; c, ΔV_{op} of tomato control; d, ΔV_{op} of tomato treatment; e, OJIP of cucumber control; f, OJIP of cucumber treatment; g, ΔV_{op} of cucumber control; h, ΔV_{op} of cucumber treatment).

2. 엽록소 형광 매개변수 분석(JIP-TEST)

건조 처리에 의한 공정육묘의 엽록소 형광 매개변수는 육묘 중에 따라 상당한 차이가 나타났다. 토마토는 건조 처리구에서 광계I 전자 수용체까지의 전자전달 에너지플럭스 ($RE1o/RC$)가 처리 후 4일에 대조군 대비 24% 감소하였으며 5일에서는 56% 감소하며 건조스트레스로 인하여 광계I 전자 전달 활력이 피해를 입은 것으로 나타났다. 광계II 전자전달 에너지 플럭스($ET2o/RC$)의 경우 4일까지는 차이가 크지 않으나 5일부터 46% 감소하며 활력이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 열로 소실되는 에너지(DIo/RC)은 5일에 30% 이상 증가하여 식물이 포집한 빛 에너지를 열로 소실시키는 것으로 나타났다(Fig. 2a).

토마토의 엽록소 형광 매개변수의 통계분석 결과, Fv/Fm , DIo/RC , $ET2o/RC$, $RE1o/RC$, PI_{ABS} , $PI_{TOTALABS}$ 총 6개의 지표가 통계적인 유의성을 나타내며 건조스트레스에 대한 토마토의 지표로 선정되었다. 특히 $ET2o/RC$ 와 PI_{ABS} 의 경우 6 일차에서 고도의 유의성이 인정되어 ($p < 0.001$) 건조스트레스 생리지표로 활용이 가능한 것으로 판단되었다(Table 1).

오이는 $RE1o/RC$ 가 처리 후 4일에 50% 이상 감소하며 광계I 전자전달수용체까지 전자전달이 잘 이루어지지 않았다. 광계II 전자전달 에너지 플럭스($ET2o/RC$)도 4일차에 51% 감소하며 건조처리로 인한 오이 공정육묘의 Q_A 에서 Q_B 까지의 전자전달계에 피해를 입은 것으로 사료되었다. Fv/Fm 은 식물의 건전성 평가 지표로 보편적으로 사용되며 0.78~0.84의 지수일 때 식물의 양자수득 효율이 좋은 것으로 알려져

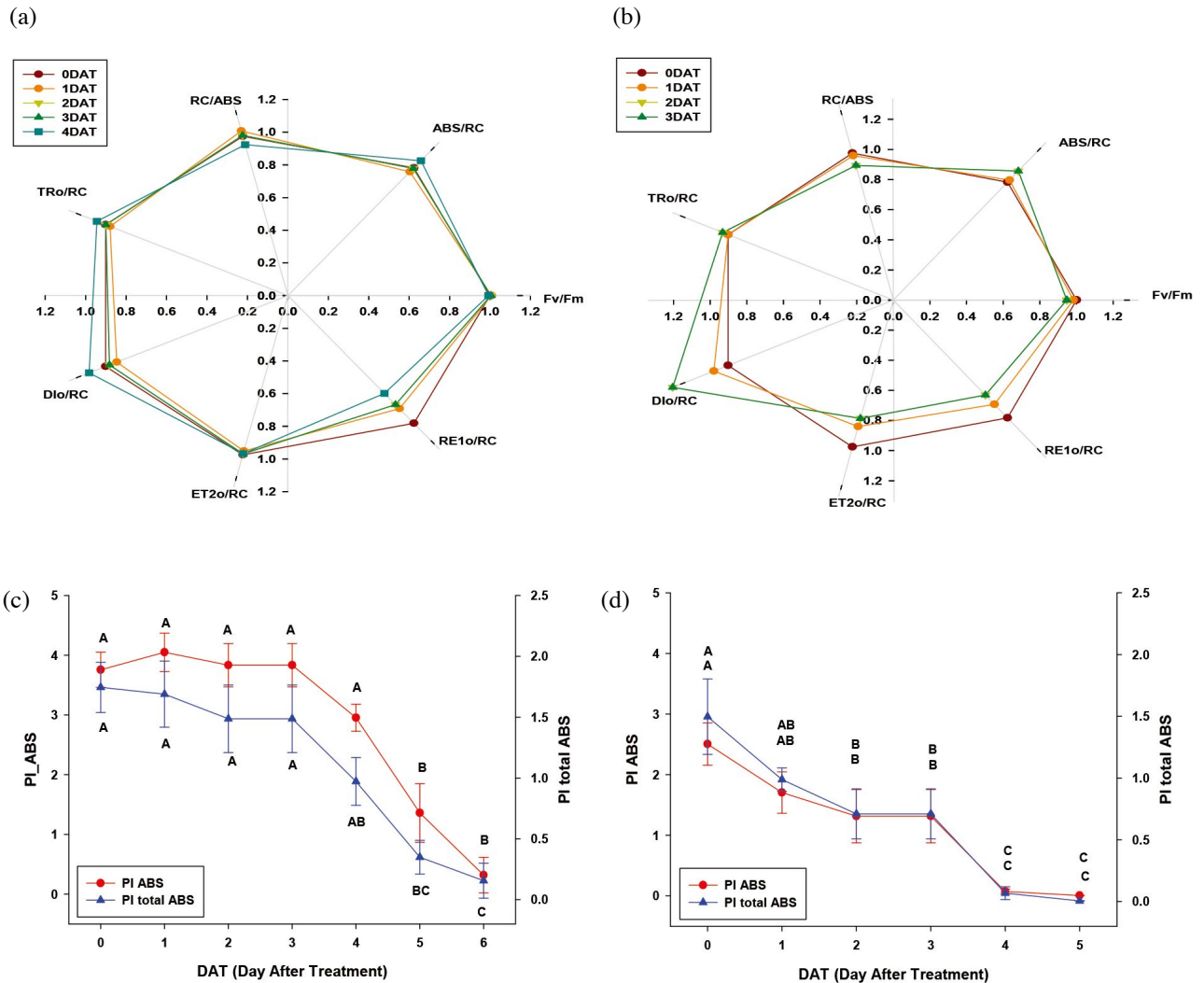


Fig. 2. The comparison of energy fluxes in nursery seedlings by drought stress (a, energy flux of tomato treatment; b, energy flux of cucumber treatment; c, line plot of tomato treatment; d, line plot of cucumber treatment).

Table 2. Comparison of chlorophyll fluorescence parameters of nursery seedlings by drought stress

		F_v/F_m	ABS/RC	RC/ABS	TR_o/RC	DI_o/RC	$ET2_o/RC$	$RE1_o/RC$	PI_{ABS}	$PI_{Total ABS}$
1 DAT	<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	<i>Cucumis sativus</i> L.	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS
4 DAT	<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*
	<i>Cucumis sativus</i> L.	***	NS	**	***	*	***	**	***	**
5 DAT	<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.	**	NS	NS	NS	**	**	**	**	**
	<i>Cucumis sativus</i> L.	***	***	***	***	***	***	*	***	**
6 DAT	<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.	*	*	*	*	*	***	**	***	**
	<i>Cucumis sativus</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-

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

F_v/F_m : Maximum quantum yield of primary PSII photochemistry, ABS/RC : Absorption flux per RC, RC/ABS : Number of Q_A reducing RCs per PSII antenna Chl, TR_o/RC : Trapped energy flux per RC, DI_o/RC : Dissipated energy flux per RC, $ET2_o/RC$: Electron transport flux from Q_A to Q_B per RC, $RE1_o/RC$: Electron transport flux until PSI acceptors per RC, 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, until the reduction of PSI acceptors.

있다(Butler and Kitajima 1975; Paillotin 1976; Genty *et al.* 1989; Govindjee 2004). 오이는 토마토와는 다르게 암적응 최대양자수득률(F_v/F_m)도 4일차에 67%로 크게 떨어지며, 광계II 광화학 에너지가 감소한 것으로 보였다(Fig. 2b). 오이는 반응중심당 환원효율(ABS/RC)가 높아지면서 열로 의한 손실(DI_o/RC) 수치도 증가하는데, 이는 스트레스에 의해 ABS/RC 의 수치가 급격하게 높아지면 포집한 에너지를 모두 광화학에너지로 환원하지 못하고 열로 소실되는 것이 원인으로 판단되었다(Fghire *et al.* 2015).

오이의 엽록소 형광 매개변수의 통계분석 결과, F_v/F_m , ABS/RC , RC/ABS , TR_o/RC , DI_o/RC , $ET2_o/RC$, $RE1_o/RC$, PI_{ABS} , $PI_{TOTALABS}$ 총 9개가 오이의 건조스트레스 지표로 선정되었으며 $ET2_o/RC$ 의 경우 처리 후 4일부터 $p < 0.001$ 로 고도의 유의성을 보였다(Table 2). 일반적으로 건조스트레스를 받으면 먼저 작물의 양자수율이 급속히 감소한다고 보고되었으며(Burke 2007), 이는 작물의 광화학적 활력에 직접적인 영향을 미치며 전자전달 능력의 감소로 이어진다.

실험 결과, F_v/F_m , DI_o/RC , $ET2_o/RC$, $RE1_o/RC$, PI_{ABS} , $PI_{TOTALABS}$ 총 6개의 지표가 토마토와 오이 모두에서 공통된 유의성이 확인되어 공정육묘의 건조스트레스 지표로 대표성이 인정되었다. 지금까지 엽록소 형광분석 기술을 활용한 식물 건조 스트레스 연구를 통해 F_v/F_m , Φ_{PSII} , QP , qL , Φ_{NO} , NPQ , Rfd 등이 광생리 지표로 활용되고 있으며(Butler and Kitajima 1975; Paillotin 1976; Calatayud *et al.* 2006; Yoo *et al.* 2012), 본 연구를 통해 선발된 광생리 지표와 유사한 결과를 보였다.

3. 광화학 생리지표 분석

Performance index (PI)는 광계II와 광계I의 에너지 보존

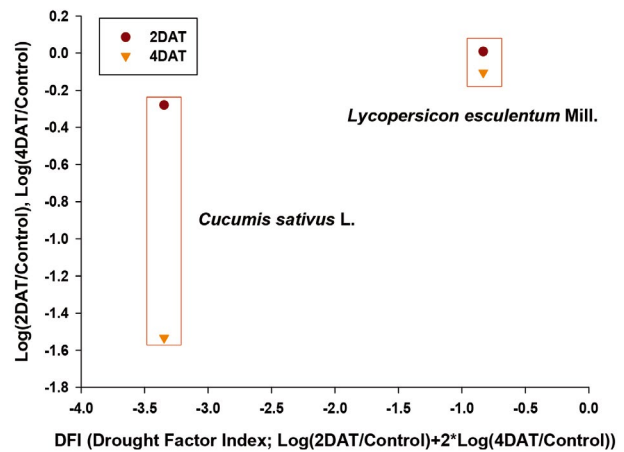


Fig. 3. The comparison of drought factor index in nursery seedlings.

효율을 나타내는 광화학성능지수이다. PI는 반응중심 밀도, 에너지 포획, 전자전달 효율의 영향을 받으며 다른 지표보다 높은 민감성을 가지며 식물의 건전성 판단 지표로 보편적으로 사용되고 있다(Oukarroum *et al.* 2007; Stirbet and Govindjee 2011). 토마토는 처리 후 5일차에 광계II 광화학 지수인 PI_{ABS} 가 대조군 대비 64% 낮아졌으며, 광계I 광화학 지수인 $PI_{TOTALABS}$ 가 80% 감소하면서 건조스트레스로 인하여 광화학성능이 악화된 것을 알 수 있었다(Fig. 2c). 오이의 경우 처리 후 2일에 PI_{ABS} 는 48%, $PI_{TOTALABS}$ 는 53% 대조군 대비 감소한 것으로 나타났으며 4일차부터는 PI_{ABS} 와 $PI_{TOTALABS}$ 가 대조군 대비 각각 98%, 95% 감소하며 급격하고 활력이 감소하였다(Fig. 2d). 광화학성능(PI)을 보면 토마토와 오이 모두 광계I의 광합성 전달 효율이 광계II에 비해 상대적으로 감소한 것으로 나타났으며 오이가 토마토보다 건조로 인한 광합성 성능피해가 더 큰 것으로 사료되었다.

한발 및 수분스트레스 조건에서 광화학 성능지수 (PI) 가 감소하는 것으로 알려져 있다(Thach 2007; Zivcak *et al.* 2008; Yoo *et al.* 2013). Oukarroum *et al.* (2007)은 건조처리 및 재관수 실험에 의한 광화학성능지수 변화를 기반으로 한 건조스트레스지수 (DFI; Drought factor index)을 이용하여 보리 품종들의 건조 스트레스를 평가하였다. 본 실험은 수분 스트레스로 인하여 광화학 성능지수를 감소한다는 연구 결과에 근거하여 광화학 성능지수를 활용한 건조스트레스지수를 작물별 건조스트레스 평가지표로 선정하였다. 대조구 대비 처리 후 2일과 4일을 기준으로 건조스트레스지수를 활용하여 건조스트레스에 의한 토마토와 오이의 광화학성능 감소의 차이를 분석하였다. 오이의 DFI는 -3.35 이며 토마토의 DFI는 -0.20 으로 상대적으로 오이가 토마토에 비해 건조스트레스로 인한 피해가 더 큰 것으로 보였다. 건조처리 기간을 기준으로 확인했을 때 오이는 $\Delta\text{Log}(\text{Treatment/Control})$ 이 처리 후 2일에서 4일이 지나는데 1.25 가 감소하였지만 토마토는 0.11 만큼 감소하여 오이가 토마토에 비해 상대적으로 건조 처리 기간이 지속될수록 건조스트레스로 인하여 광화학반응의 활력이 떨어지는 것으로 나타났다(Fig. 3). 본 연구의 공정육묘에 대한 광화학적 건조스트레스 평가에서 오이는 토마토에 비해 상대적으로 건조조건에서의 저항성이 낮은 것으로 판단되어 각별한 수분관리가 요구된다.

현재 우리나라는 농업 모델 개발에 필요한 작물 생육 등의 기초데이터 수집량이 부족하고 최적작물 생육제어 모델 개발에 어려움을 겪고 있다(Yeo *et al.* 2016). 따라서 본 연구를 통해 선별된 광화학 지표 (DFI 등 7개)는 육묘의 건조스트레스에 대한 데이터베이스의 원천자료로서의 가치를 가지며 ICT기반 스마트팜 모델의 생리적 기반을 제시하고 관수 시스템 구축에 대한 생리적 기초데이터로 의미있게 사용될 것으로 기대된다.

적 요

본 연구는 엽록소형광반응 분석을 이용하여 건조스트레스에 의한 공정육묘의 광화학적 활력을 분석하였다. 토마토와 오이 공정육묘를 8일 동안 건조스트레스 처리를 하였다. 엽록소형광반응 (OJIP)과 매개변수 분석을 통해 건조스트레스로 인한 작물의 광화학적 변동을 평가하였다. 엽록소 형광반응(OJIP) 분석 결과, 토마토는 처리 후 5일부터 최대 형광량(P)이 감소한 반면 J-I 단계에서는 엽록소 형광량이 증가하였다. 따라서 생리적 활력이 감소한 것을 알 수 있었다. 오이의 경우 처리 후 4일부터 최대 형광(P) 및 변동 형광량(F_V)이 낮아지고 J-I 단계의 엽록소 형광 수치가 증가하였다.

엽록소 형광 매개변수 분석한 결과 토마토는 처리 후 5일부터 특히 ET_{20}/RC 와 REI_{0}/RC 가 감소하면서 광계II와 광계I의 전자전달효율이 유의적으로 낮아진 것으로 보인 반면 오이는 처리 후 4일부터 ET_{20}/RC 와 PI_{ABS} 가 상당히 변화하였다. 결론적으로 F_V/F_M , DI_{0}/RC , ET_{20}/RC , REI_{0}/RC , PI_{ABS} , $PI_{TOTALABS}$ 6개의 지표가 공정육묘의 건조스트레스를 판단하는 지표로 선정되었다. 건조스트레스지수(DFI)를 통해 건조스트레스로 인한 작물별 건전성 평가를 하였고 오이의 경우 토마토에 비해 건조 저항성이 낮은 것으로 판단되었다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구개발과제(과제번호: PJ102783 022018, 과제명: 공정육묘 모종의 수분스트레스 분석 연구)의 지원으로 수행되었다.

REFERENCES

- Baker NR and E Rosenqvist. 2004. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *J. Exp. Bot.* 55:1607-1621.
- Bandaru V, CS Daughtry, EE Codling, DJ Hansen, S White-Hansen and CE Green. 2016. Evaluating leaf and canopy reflectance of stressed rice plants to monitor arsenic contamination. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13:606.
- Björkman O and B Demmig. 1987. Photon yield of O_2 evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta* 170:489-504.
- Burke JJ. 2007. Evaluation of source leaf responses to water-deficit stresses in cotton using a novel stress bioassay. *Plant Physiol.* 143:108-121.
- Butler W and M Kitajima. 1975. Fluorescence quenching in photosystem II of chloroplasts. *Biochim. Biophys. Acta-Bioenerg.* 376:116-125.
- Calatayud A, D Roca and PF Martinez. 2006. Spatial-temporal variations in rose leaves under water stress conditions studied by chlorophyll fluorescence imaging. *Plant Physiol. Biochem.* 44:564-573.
- Falquetto AR, RA da Silva Júnior, MTG Gomes, JPR Martins, DM Silva and FL Partelli. 2017. Effects of drought stress on chlorophyll a fluorescence in two rubber tree clones. *Sci. Hortic.* 224:238-243.
- Fghire R, F Anaya, OI Ali, O Benlhabib, R Ragab and S Wahbi. 2015. Physiological and photosynthetic response of

- quinoa to drought stress. *Chil. J. Agr. Res.* 75:174–183.
- Fracheboud Y and J Leipner. 2003. The application of chlorophyll fluorescence to study light, temperature, and drought stress. pp. 125–150. In *Practical applications of chlorophyll fluorescence in plant biology*, Springer, Boston, MA.
- Genty B, JM Briantais and NR Baker. 1989. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochim. Biophys. Acta-Gen. Subj.* 990:87–92.
- Govindjee G. 1995. Sixty-three years since Kautsky: chlorophyll a fluorescence. *Aust. J. Plant Physiol.* 22:131–160.
- Govindjee G. 2004. Chlorophyll a fluorescence: a bit of basics and history. pp. 1–42. In *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis*. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Jefferies R. 1994. Drought and chlorophyll fluorescence in field-grown potato (*Solanum tuberosum*). *Physiol. Plant.* 90:93–97.
- Kautsky H and A Hirsch. 1931. Neue versuche zur kohlenäure-assimilation. *Naturwissenschaften* 19:964.
- Kim MI, WK Lee, TH Kwon, DA Kwak, YS Kim and SH Lee. 2011. Early detecting damaged trees by pine wilt disease using DI (Detection Index) from portable near infrared camera. *J. Korean For. Soc.* 100:374–381.
- Lichtenthaler HK, G Langsdorf, S Lenk and C Buschmann. 2005. Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity with the flash-lamp fluorescence imaging system. *Photosynthetica* 43:355–369.
- Massacci A, SM Nabiev, L Pietrosanti, SK Nematov, TN Chernikova, K Thor and J Leipner. 2008. Response of the photosynthetic apparatus of cotton (*Gossypium hirsutum*) to the onset of drought stress under field conditions studied by gas-exchange analysis and chlorophyll fluorescence imaging. *Plant Physiol. Biochem.* 46:189–195.
- Okçu G, MD Kaya and M Atak. 2005. Effects of salt and drought stresses on germination and seedling growth of pea (*Pisum sativum* L.). *Turk. J. Agric. For.* 29:237–242.
- Okunlola GO, AA Adelusi, ED Olowolaju, OM Oseni and GL Akingboye. 2015. Effect of water stress on the growth and some yield parameters of *Solanum lycopersicum* L. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 9:1755–1761.
- 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.
- Oukarroum A, G Schansker and RJ Strasser. 2009. Drought stress effects on photosystem I content and photosystem II thermotolerance analyzed using Chl a fluorescence kinetics in barley varieties differing in their drought tolerance. *Physiol. Plant.* 137:188–199.
- Paillotin G. 1976. Movement of excitations in the photosynthetic domains of photosystem II. *J. Theor. Biol.* 58:237–252.
- Park KH, HT Park and HS Han. 2011. A study on the current state and development strategies of raising seedling industry. Korea Rural Economic Institute.
- Park SH, SY Yoo, MJ Lee, JY Park, KT Song, TW Kim and BM Lee. 2015. Photochemical response analysis on different seeding date and nitrogen (N) level for maize (*Zea mays* L.). *Korean J. Crop Sci.* 60:1–7.
- RDA. 2015. Progress plant for korean smart-farm based on ICT convergence. pp. 1–51. Rural Development of Administration.
- Schuerger AC, GA Capelle, JA Di Benedetto, C Mao, CN Thai, MD Evans, JT Richards, TA Blank and EC Stryjewski. 2003. Comparison of two hyperspectral imaging and two laser-induced fluorescence instruments for the detection of zinc stress and chlorophyll concentration in bahia grass (*Paspalum notatum* Flugge.). *Remote Sens. Environ.* 84:572–588.
- Son MH, WK Lee, SH Lee, HK Cho and JH Lee. 2006. Natural spread pattern of damaged area by pine wilt disease using geostatistical analysis. *J. Korean For. Soc.* 95: 240–249.
- Stirbet A and G 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.
- Strasser RJ. 1985. Dissipative Strukturen als thermodynamischer Regelkreis des Photosyntheseapparates. *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 98:53–72.
- Strasser RJ, M Tsimilli-Michael, D Dangre and M Rai. 2007. Biophysical phenomics reveals functional building blocks of plants systems biology: a case study for the evaluation of the impact of mycorrhization with *Piriformospora indica*. pp. 319–341. In *Advanced techniques in soil microbiology*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Thach W. 2007. On the mechanism of cerebellar contributions to cognition. *Cerebellum* 6:163–167.
- Van Rensburg L, GHJ Krüger, P Eggenberg and RJ Strasser. 1996. Can screening criteria for drought resistance in *Nicotiana tabacum* L. be derived from the polyphasic rise of the chlorophyll a fluorescence transient (OJIP)? *S. Afr. J. Bot.* 62:337–341.
- 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. Fertil.* 45:676–682.
- 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 (*Capsium annuum* L.). Korean J. Soil. Sci. Fertil. 46:659–664.
- Yeo UH, IB Lee, KS Kwon, TW Ha, SJ Park, RW Kim and SY Lee. 2016. Analysis of research trend and core technologies based on ICT to materialize smart-farm. Protected Hort. Plant Fac. 25:30–41.
- Živčák M, M Brestič, K Olšovská and P Slamka. 2008. Performance index as a sensitive indicator of water stress in *Triticum aestivum* L. L. Plant Soil Environ. 54:133–139.

Received: 22 October 2018

Revised: 5 November 2018

Revision accepted: 8 November 2018