ISSN 1226-9999 (print)
ISSN 2287-7851 (online)

Korean J. Environ. Biol. 34(3) : 161~168 (2016) http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2016.34.3.161

광화학적 반응 분석을 통한 부화장 폐달걀 분해 액비의 고추 생장촉진효과 평가

유성영 · 강홍규[1] · 유재홍[2] · 이전규[3] · 심명용*

한경대학교 식물생태화학연구소, [1]한경대학교 식물생명환경과학과
[2]국립농업과학원 농업미생물과, [3]논산시 농업기술센터

Evaluation through Photochemical Response Analysis on Growth Enhancing Effect of Decomposed Hatchery Waste Egg for Red Pepper

Sung Yung Yoo, Hong Gyu Kang[1], Jae Hong Yoo[2], Jeon Gyu Lee[3] and Myoung Yong Shim*

Institute of Ecological Phytochemistry, Hankyong National University, Anseong-si, Gyeonggi-do 17579, Republic of Korea
[1]*Department Plant Life and Environmental Science, Hankyong National University, Anseong-si, Gyeonggi-do 17579, Republic of Korea*
[2]*Agricultural Microbiology Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea*
[3]*Nonsan Agricultural Technology Center, Nonsan-si, Chungcheongnam-do 32914, Republic of Korea*

Abstract - In this study, growth enhancing effect of hatchery waste egg decomposed liquid fertilizer in pepper plant cultivation through chlorophyll fluorescence (O-J-I-P) analysis. In a whole growth period, egg decomposed fertilizer treated pepper grew well than non treated plant, though it was not statistically significantly different. Amount of chlorophyll fluorescence of non treated plant was higher thant that of fertilizer treated plant. It is determined that eventually lead to increased photosynthesis. In this study, six parameters, Fo, ABS/RC, RC/ABS, TRo/RC, DI0/RC, and DF Total ABS were the important factors represent efficiency of photochemical responses of pepper plant treated with hatchery waste egg decomposed fertilizer.

Key words : growth enhancing effect, photochemical response analysis

서 론

고추는 전래 이래 한국에서 가장 중요한 채소의 하나로 재배되고 있다. 통계청 통계에 의하면 2014년 생산액이 1조 5,249억원으로 전체 농업 생산품 중 대단히 큰 비중을 차지한다(KOSIS 국가통계포털, http://kosis.kr/). 다른 작물과 마찬가지로 고추도 많은 수확량을 얻기 위하여 비료의 사용이 늘어나고 있다. 최근에는 화학비료의 사용과 더불어 친환경 재료를 사용하는 비료의 사용도 크게 늘어나고 있다. 축산업에서 발생하는 부산물은 폐기하는 경우 많은 비용과 악취 등 공해를 유발하고 있다. 이를 다시 농업에 활용하는 시

* Corresponding author: Myoung Yong Shim, Tel. 031-678-4750, Fax. 031-678-4751, E-mail. myshim@hknu.ac.kr

ⓒ2016. Korean Society of Environmental Biology.

도가 늘어나고 있다. 양계는 닭고기와 달걀 등 양질의 단백질을 공급하는 중요한 축산업의 하나이다. 2014년 닭 사육을 위하여 약 9백만 마리의 종계가 사육되었다(양계협회 통계자료, http://www.poultry.or.kr). 그러나 부화과정에서 한 달에 20만개의 달걀이 부화하는 동안 약 13톤의 달걀이 부화하지 못하고 폐기되고 있다. 이 폐달걀을 비료로 재활용할 경우 폐기처리 비용을 절감은 물론 작물의 생산을 증가하는 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 예비실험에서 달걀을 효율적으로 분해하는 세균을 발견하였고, *Bacillus amyloliquefaciens*로 동정되었다. 이렇게 폐달걀을 분해한 액비가 고추의 생장을 증진하는 효과를 가질 것으로 판단되었다. 비료의 식물 생장증진효과는 식물의 생육에 영향을 주는 요인을 분석하여 결정하는 것이 바람직하다. 작물의 생육상태를 확인하는 방법은 주로 식물의 잎의 색을 통하여 영양상태를 파악하는 표준차트 방법(Matsuzaki *et al*. 1982)과 잎의 chlorophyll 함량을 조사하는 방법 그리고 chlorophyll meter (Kariya *et al*. 1982; Katsumi 1985; Peng *et al*. 1993) 측정법 등이 많이 이용되었다. 특히 Chlorophyll meter는 식물의 엽록소 함량을 평가하는 데 있어 휴대가 쉽고 식물에 해를 주지 않는 비파괴적 방법으로 사용이 쉽고 빠르게 측정하여 포장에서 생육하고 있는 식물의 영양상태를 직접 진단할 수 있는 유용한 방법이다(Peng *et al*. 1995). Chlorophyll meter의 측정값은 식물의 잎의 태양광 반사율과 밀접한 상관관계를 보이고 잎의 엽록소함량을 평가하는 데 적절한 방법으로 평가되고 있다(Fred *et al*. 1991). 최근 이런 비파괴적 분석법에서 엽록소 형광반응을 측정하여 광화학적 해석을 통한 작물의 광생리 지표연구가 활발하게 진행하고 있으며 여러 가지 변수를 측정하는 기술로 이용할 수 있다고 평가되고 있다(Caclatayud *et al*. 2006; Oukarroum *et al*. 2007; Yoo *et al*. 2012, 2013, 2014). 식물의 형광유발현상을 응용한 Kautsky effect를 측정하는 것으로부터 발전된 엽록소 형광형상의 측정은 빛에 노출된 엽록소가 15분 이상 암상태를 유지하면 다시 원상태의 형광형상이 나타날 수 있는 상태로 복귀하는 것으로 알려졌다(Strasser 1985; Strivastava *et al*. 1995). 암상태의 기간을 거쳐 엽록소가 원상태로 복귀한 시점을 형광유발시점(O, origin)으로, 첫 번째 최소 형광변동 시점까지를 Jump (J), 중간 수준의 형광수준을 Intermediate (I), 그리고 최대 형광점에서의 형광 유도량을 Peak (P)로 하는 소위 OJIP가 보편적으로 쓰이고 있다(Govindjee 1995). 대부분의 연구에서 OJIP 가설에서의 잠정적인 전환(transient phase) 엽록소a의 변동형광량은 Photosystem II (PS II)가 직접적인 관여를 하며, Photosystem II (PS II)의 광화학적 변환율은 전자전달수용체(electron acceptor)에 의해 지배된다는 가정 하에 성립한다고 보고되어 있다(Duysens and Sweers, 1963). 이렇게 암상태를 거친 식물의 광합성 과정에서는 대부분이 광합성계 II 반응중심(Photosystem II reaction center, PS II RC)의 전자수용체가 대부분 산화상태로 존재하게 되며, 이 상태에서 엽록소의 형광은 최소값(Fo)을 나타나게 된다. 엽록소 형광반응의 O-J-I-P 과정은 2 ms (millisecond)이내의 아주 빠른 반응의 엽록소 형광현상으로 O-J는 전자가 여기되는 광화학적 전이(photochemical phase)이고 J-I와 I-P의 전이는 상대적으로 느린 열 의존적 전이(thermal phase)로 알려져 있다(Morin 1964; Delosme 1967).

본 연구에서는 엽록소 형광반응(OJIP)분석을 통해 고추 재배에서 폐달걀 분해 액비의 생육증진효과에 대한 평가를 할 수 있는지 알기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

1. 고추 재배

본 연구는 2015년 충청남도 논산시 농업기술센터에 위치한 온실에서 고추(PR사령탑)를 사용하여 실시하였다. 1월 28일 원예용 상토에 파종하였고, 부화장에서 발생하는 폐달걀을 *Bacillus amyloliquefaciens*를 이용하여 분해한 액비(1000배 희석액)를 3월 25일부터 일주일 간격으로 3회 관주하였다. 고추는 생체중과 지상부와 뿌리의 길이를 각각 3반복씩 측정하였다.

2. 광화학반응(OJIP) 분석

엽록소 형광반응은 Fluorepen FP-100 (PS I, Czech)을 이용하여 측정하였다. 고춧잎을 leaf clip로 집어놓고 30분간 암처리를 한 후 OJIP를 측정하였다. 측정된 측정치는 Stirbet과 Govindjee (2011)의 방법에 의하여 JIP-Test를 실시하였다(Table 1). 실험은 3반복으로 수행하였다.

3. 통계분석

실험결과는 SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, Version 12.0)프로그램을 사용하여 ANOVA, LSD 및 Duncan's multiple range test 분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 고추의 엽록소 형광반응(OJIP) 비교

고추의 엽록소 형광(OJIP)반응은 무처리와 폐달걀 분해

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

Data extracted from the recorded fluorescence transient O-J-I-P	
F_O	Fluorescence at the O-sep (50 μs) of O-J-I-P
$F_J \equiv F_{2ms}$	Fluorescence at the J-step (2 ms) of O-J-I-P
$F_I \equiv F_{30ms}$	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
$F_V \equiv F_M - F_0$	Maximal variable fluorescence
$V_J = (F_J - F_0)/(F_M - F_0)$	Relative variable fluorescence at the J-step
$V_I = (F_I - F_0)/(F_M - F_0)$	Relative variable fluorescence at the I-step
$N = S_M \cdot M_0 \cdot (1/V_J)$	Turn-over number Q_A
Specific energy fluxes (per Q_A-reducing PSIIreaction center - RC)	
$ABS/RC = M_0\,(1/V_J)\,(1/\varphi_{Po})$	Absorption flux per RC
$RC/ABS = \varphi_{Po} \cdot V_J/M_0$	Number of Q_A reducing RCs per PSII antenna Chl
$TR_0/RC = M_0\,(1/V_J)$	Trapped energy flux per RC (at $t=0$)
$ET_0/RC = (M_0/V_J)\,(1-V_J)$	Electron transport flux from QA to QB per RC (at $t=0$)
$RE1_0/RC = (M_0/V_J)\,(1-V_I)$	Electron transport flux until PSI acceptors per RC (at $t=0$)
$DI_0/RC = (ABS/RC) - (TR_0/RC)$	Dissipated energy flux per RC (at $t=0$)
Phenomenological energy fluxes/activities (per excited cross section, CS)	
$ABS/CS = \mathrm{FM}$	Absorbed photon flux per cross section (or also, apparent PSII antenna size)
$RC/CS = (RC/ABS) \cdot (ABS/CS)$	The number of active PS II RCs per cross section
$TRo/CS = TRo/RC \cdot (ABS/CS)$	Maximum trapped exciton flux per cross section
$ETo/CS = ETo/RC \cdot (ABS/CS)$	Electron transport flux from QA to QB per cross section
$RE1o/CS = RE1o/RC \cdot (ABS/CS)$	Electron transport flux until PSI acceptors per cross section
$DIo/CS = DIo/RC \cdot (ABS/CS)$	Heat dissipation at time zero, per cross section
Performance indexs at $t=0$	
$PI_{ABS} \equiv \frac{RC}{ABS} \cdot \frac{\varphi_{Po}}{1-\varphi_{Po}} \cdot \frac{\psi_o}{1-\psi_o}$	Performance index on absorption basis
$PI_{TOTAL\ ABS} = PI_{ABS} \cdot [\delta \pm RE1o/(1-\delta RE1o)]$	Performance index for energy conservation from photons absorbed by PS II antenna, until the reduction of PSI acceptors
Driving forces (total driving forces for photochemical activity)	
$DF_{TOTAL\ ABS} = \log(PI_{TOTAL\ ABS})$	Driving force on absorption basis

액비 처리구 모두 4월 20일에 가장 높은 엽록소 형광량을 보였다(Fig. 1a~d). 그러나 액비 처리 후 시간이 경과할수록 무처리구에서 분해 액비 처리구보다 O-J 전이 단계에서 엽록소 형광량이 증가하는 것으로 나타났다. O-J 전이 단계는 50 μs의 엽록소 형광 유발시점(Fo)으로부터 2 ms까지인 F_J는 광합성계 II (PS II)에서의 빛에 의한 엽록소 형광 및 전자전달 과정이므로 엽록소 형광량의 증가는 전자전달 저해로 이어진다. 따라서 무처리구에서는 생육이 진행됨에 따라 광합성계 II의 전자전달 과정 중 엽록소 형광 방출량의 증가로 인한 전자전달 효율이 감소하는 것으로 판단되었고, 반면에 분해산물 처리구에서는 형광 방출량이 감소하여 전자전달 효율이 증가하는 것으로 판단되었다. 변동형광량(Vop)도 OJIP 결과와 동일하게 무처리구에서 O-J 및 I-P 전이 단계에서 엽록소 형광량의 증가 현상이 나타났다. 특히, 무처리구에서 분해 액비 처리구에 비해서 Vop가 지속적으로 증가하였으며, 4월 20일부터 2 ms 이내의 초기 엽록소 형광량(O-J)이 크게 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 1e, f). 식물은 스트레스 조건에서 엽록소 형광 유도 과정 중 200~300 μs의 매우 빠른 초기 광화학 반응인 K-step이 나타난다고 보고가 되었으며, K-step을 보통 O-J 전이단계에서의 숨겨진 형광반응이라고 알려져 왔다(Prakash *et al*. 2003; Strasser *et al*. 2004; Stribet and Govindjee 2011). 따라서 분해 액비 처리구에서는 초기 광화학 반응이 무처리구에 비해서 감소하여 광 이용효율이 증가한 것으로 판단되었다.

2. 고추의 엽록소 형광 매개변수 분석(JIP-Test)

고추의 광합성계 II 및 광합성계 I 전자수용체까지의 전자전달 Energy flux는 3월 26일 무처리구에서 분해 액비 처리구보다 높았으나, 이후 분해 액비 처리구에서 높은 광화학 Energy flux 효율을 보였다(Fig. 2). 5월 11일의 분해 액비 처리구에서 무처리구 대비 광계 II의 반응중심당(DIo/RC) 및 단면당(DIo/CS) 열에 의한 에너지 손실률이 각각 40% 및 59% 수준으로 매우 낮았다. Cross section (CS)은 최대 형광량을 기반으로 한 단면당 Energy flux로서 총 광화학 에너지 플럭스를 의미한다.

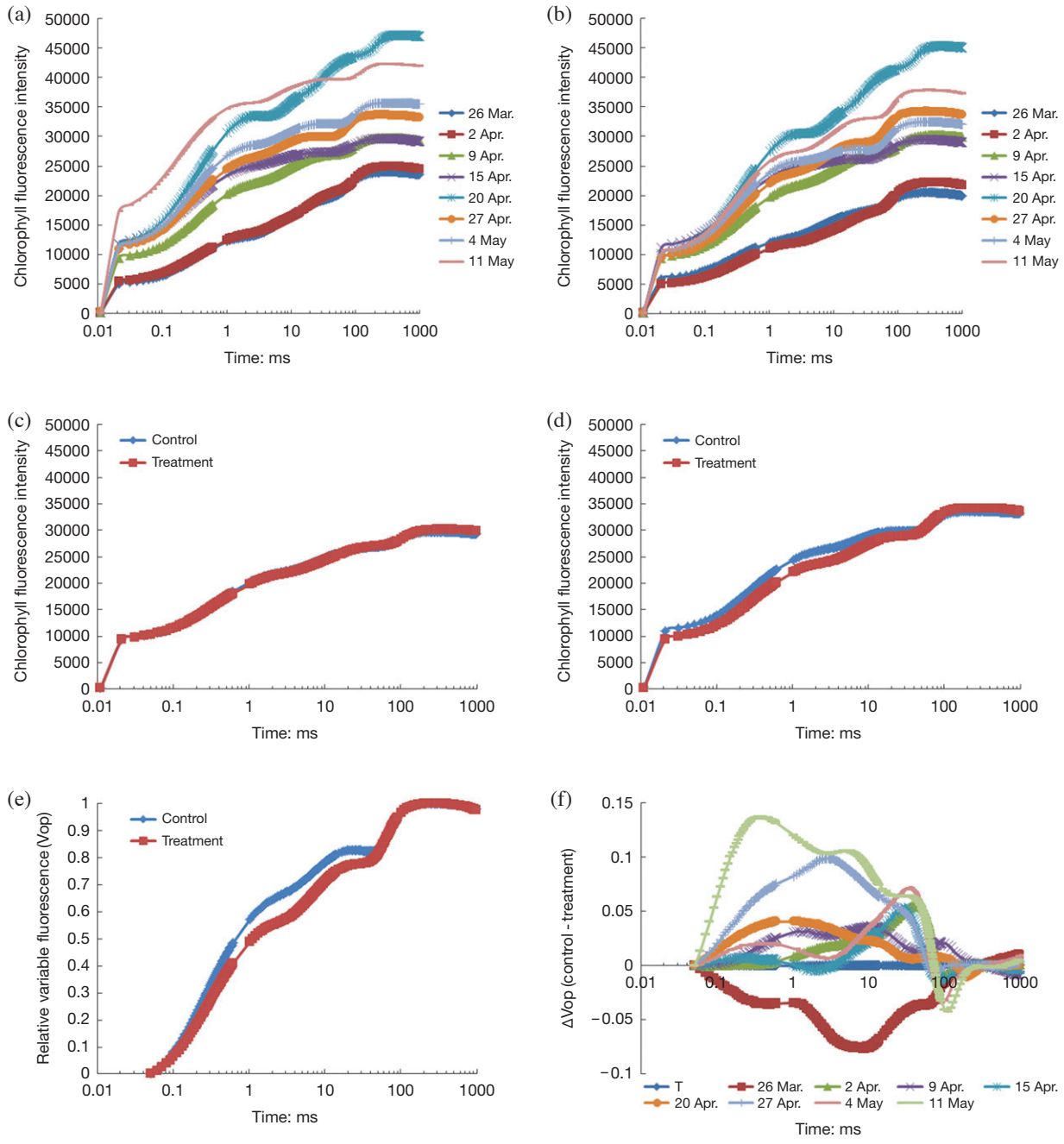

Fig. 1. The comparison of chlorophyll a fluorescence transient (a, b, c, d) and relative Variable chlorophyll fluorescence (e, f) for different growth stages in red pepper (a: control, b: decomposed egg fertilizer treatment, c: 9 April, d: 27 April OJIP, e: 27 April Vop, f: $Vop_{control}$-$Vop_{treatment}$).

분해 액비 처리구 대비 무처리구 고추는 활성화된 반응중심(RC/ABS,CS)의 감소와 관련해 반응중심(혹은 단면)당 흡수하는 광자(ABS/RC,CS) 및 열에 의한 방출량(DIo/RC,CS) 증가로 인한 에너지 손실로 이어지는 것으로 확인되었다. Zushi *et al.* (2012)은 비활성화된 반응중심(RC/ABS)이 증가할 때 DIo/RC 또한 증가한다고 밝혔으며, 본 연구에서 무처리구의 RC/ABS 및 DIo/RC 증가와 비슷한 결과를 보였다. 또한, 흡수한 광자의 고정 효율(TRo/Rc,CS)은 3월 27일 이후 무처리구에 비하여 높은 것으로 나타나 전자전달 시 에너지로 사용되는 총량이 증가했음을 유추할 수 있었다. 5월 11일의 PS II RC의 전자전달 Energy flux (ET2o/RC,CS)는 분해 액비 처리구에서 각각 15.1%, 47.3% 증가하

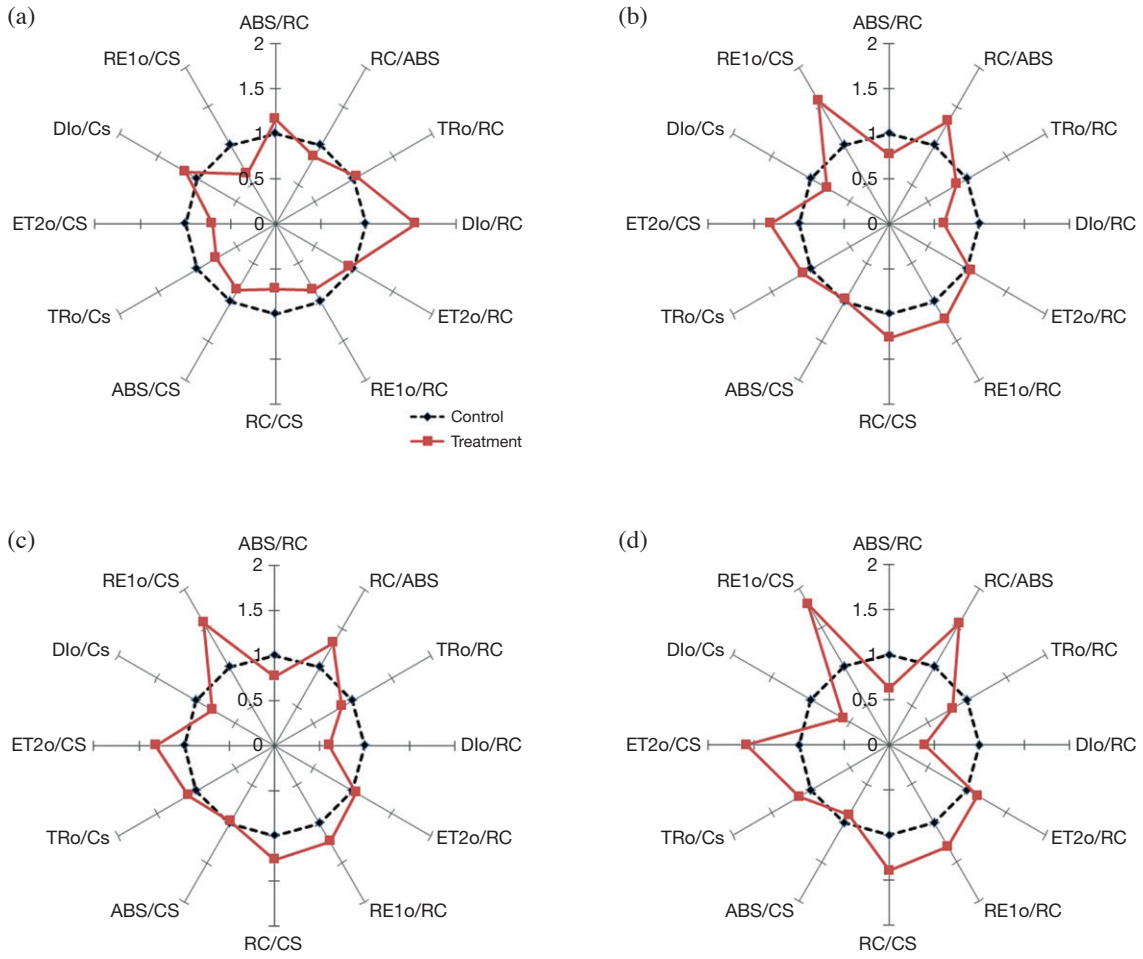

Fig. 2. The comparison of photon yield and electron transport efficiency (dotted line: untreated control, solid line: decomposed egg fertilizer treatment) for different growth stages in red pepper (a: 26 Mar, b: 9 Apr, C: 27 Apr, d: 11 May).

였으며, PS I 전자수용체까지의 전자전달 Energy flux (RE1o/RC, RE1o/CS)는 각각 13.9%, 44.4% 증가하였다. 따라서 분해 액비 처리 시 무처리구 대비 높은 광합성 효율을 예상할 수 있었으며, 이는 NADPH 생성 및 ATP합성 능력 증가로 이어진다고 판단되었다.

분해 액비 처리 21일(4월 9일) 후 무처리구와 액비 처리한 고추의 광화학 매개변수를 비교한 결과 엽록소 형광 유발시점(Fo) 등 6개의 parameter에서 유의성이 인정되었다 (Table 2). 특히 무처리구 고추의 엽록소 형광 방출량(J-I-P)이 높았으나 형광 유발시점인 Fo의 증가로 인한 가변형광량 (Fv = Fm − Fo)의 감소 현상이 나타났다. 무처리구 대비 분해 액비 처리구에서 최대 형광량이 낮았음에도 Fv가 높아 광합성계 II 최대 양자수득률(Fv/Fm)이 더 큰 것으로 확인되었다. 5월 11일의 경우 OJIP 모두 무처리에서 높았으나 흡수한 광자의 열 등에 의한 에너지 방출량 DIo/RC ($p < 0.01$)가 2.24로 액비 처리구(0.89)보다 크게 증가하였다. 4월 9일과 5월 11일의 광화학 성능지수는 무처리구와 액비 처리구에서 큰 차이를 보였으나 유의성이 인정되지 않는 것으로 확인되었으며, $DF_{TOTAL\ ABS}$는 각각 4월 9일($p < 0.05$) 및 5월 11일($p < 0.01$)에 유의성이 인정되었다. 따라서 분해 액비 처리구에서 지속적인 광이용 효율을 보이며 활력이 유지되는 것으로 판단되었다. 그러나 지상부 및 지하부 길이와 생체중 등 생육조사 결과 통계적으로 유의성이 있는 차이는 보이지 않는 것으로 나타났다.

3. 광화학적 생리지표

일반적으로 PI_{ABS} 및 $PI_{TOTAL\ ABS}$는 에너지 전환 효율에 근거하여 식물의 건전성을 판단하는 지표로 사용되고 있다 (Oukarroum *et al*. 2007). 분해 액비 처리 직후(3월 26일) 측정한 광합성계 II 광화학 성능지수(PI_{ABS})는 무처리구(2.14)에서 액비 처리구(1.02)보다 높았으며, 광합성계 I의 광화학

Table 2. The comparison of chlorophyll fluorescence parameters for different growth stages in red pepper

Characters	9 Apr.			11 May		
	Control	Treatment	Significance[1)]	Control	Treatment	Significance
Fo	12451.00	9872.67	*	18997.00	11140.00	**
Fj	23976.50	21143.00	ns	35447.00	27081.00	**
Fi	28446.50	26442.33	ns	39479.00	32857.33	**
Fm	30690.00	29953.33	ns	42145.00	37647.33	*
Fv	18239.00	20080.67	ns	23148.00	26507.33	ns
Vj	0.63	0.56	ns	0.71	0.60	**
Vi	0.88	0.82	ns	0.89	0.82	*
Fv/Fm	0.59	0.67	ns	0.55	0.70	**
N	920.92	815.53	ns	1186.41	628.73	**
ABS/RC	3.61	2.75	*	4.85	3.02	**
RC/ABS	0.28	0.37	**	0.21	0.33	**
TRo/RC	2.12	1.84	**	2.61	2.12	**
DIo/RC	1.49	0.91	ns	2.24	0.89	**
ET2o/RC	0.77	0.81	ns	0.75	0.85	ns
RE1o/RC	0.26	0.32	ns	0.30	0.38	ns
RC/CS	8627.55	10961.60	ns	8949.09	12496.68	**
ABS/CS	30690.00	29953.33	ns	42145.00	37647.33	*
TRo/Cs	18242.28	20081.46	ns	23152.59	26505.65	ns
ET2o/CS	6709.14	8809.52	ns	6697.51	10564.99	**
DIo/CS	12447.72	9871.87	*	18992.41	11141.68	**
RE1o/CS	2243.80	3510.47	ns	2665.11	4788.76	**
PI_{ABS}	0.25	0.59	ns	0.12	0.53	ns
$PI_{TOTAL\ ABS}$	0.12	0.41	ns	0.08	0.44	ns
DF Total ABS	−0.93	−0.41	*	−1.17	−0.36	**
Height (cm)	27.60	27.33	ns	27.97	25.83	ns
Root (g)	12.83	13.47	ns	12.10	9.23	ns
Stem (g)	14.77	13.87	ns	15.87	16.60	ns
FW (g)	2.73	1.87	ns	3.17	3.63	ns

[1)] Statistically difference. NS : no significance, *: $p<0.05$, **: $p<0.01$ significance level in LSD.

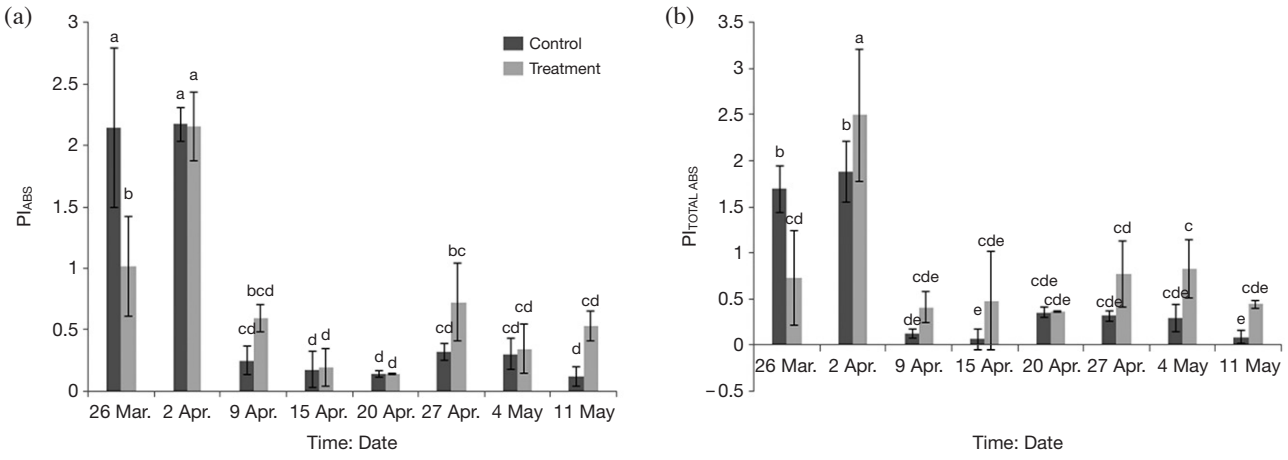

Fig. 3. The comparison of performance index for different growth stages in red pepper (a: PI_{ABS}, b: $PI_{TOTAL\ ABS}$). Same superscript letters in the same line are not different, statistically (Duncan's multiple range test, $p<0.05$).

성능지수($PI_{TOTAL\ ABS}$)도 무처리구에서 1.69로 액비 처리구(0.73)보다 높았다(Fig. 3). 그러나 일주일 후(4월 2일)의 PI는 무처리구와 같은 수준으로 증가했으며, 4월 27일의 PI_{ABS} 및 $PI_{TOTAL\ ABS}$는 무처리구 대비 224%, 245% 높은 수치를 보였다. 광화학 성능지수(performance index, PI)는 흡수된 광자의 광합성계 II (PS II) 및 광합성계 I (PS I) 전자수용체의 환원 시 에너지 전환 효율을 나타내는 광생리 지표로 알려져 있다(Stirbet and Govindjee 2011). 또한, Driving Force

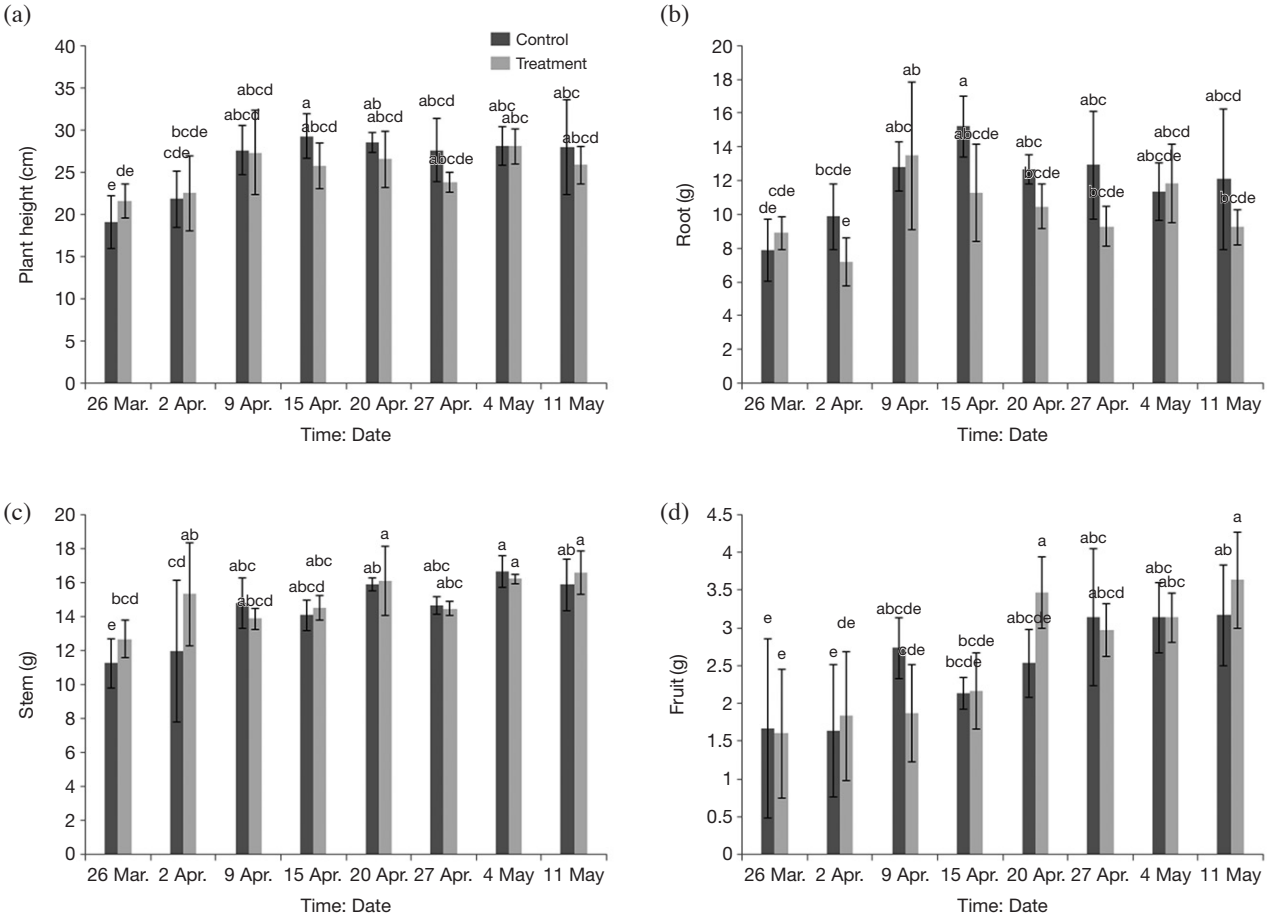

Fig. 4. The comparison of liquid fertilizer on growth characteristics in red pepper (a: plant height, b: root length, c: stem length, d: fresh weight per plant). Same letters in the same line are not different, statistically (Duncan test, $p<0.05$).

(DF)는 3월 26일부터 5월 11일까지 무처리구 −1.17~0.27, 분해 액비 처리구는 −0.63~0.38 범위에서 분포하였으며, 액비 처리구에서 식물체내 활력이 큰 변화 없이 유지되는 것으로 확인되었다. Park *et al*.(2015)은 옥수수 질소 배량 처리 시 전자전달 효율 및 에너지 전환 효율(PI) 등이 생육 후기까지 높게 유지된다고 보고하였다. 따라서 본 연구의 결과에서 분해 액비 처리 시 식물의 광합성의 전자전달 과정에서 에너지 전환 효율 및 식물체내 활력이 생육 후기까지 꾸준히 유지되며 생육에 유리할 것으로 판단되었다. 고추의 생체중, 줄기 및 뿌리 길이 등 생육 조사를 하여 분해 액비 처리효과를 확인하였다(Fig. 4). 고추의 줄기 길이는 최소(3월 26일) 11.2 cm에서 최대(5월 11일) 16.6 cm 범위였으며, 처리 간 차이는 크지 않았다. 그러나 뿌리의 길이는 무처리구 평균 11.9 cm, 액비 처리구 평균 10.2 cm로 무처리구에서 더 길었다. 이와 같은 결과는 무처리구 고추의 양분 부족으로 인한 지하부 뿌리의 생장이 촉진되어 나타난 현상으로 생각되었다 또한, 생체중은 무처리구와 액비 처리구 모두 지속적인 증가 경향을 보였으며, 5월 11일의 무처리구와 액비 처리구에서 각각 3.2 g, 3.6 g으로 액비 처리구에서 더 높았다.

적 요

본 연구에서는 엽록소 형광반응(OJIP)분석을 통해 고추 재배에서 폐달걀 분해 액비의 생육증진효과에 대하여 평가하였다. 고추재배 전기간을 통하여 고추의 생장은 통계학적으로 유의성을 보이지는 않았으나, 폐달걀 분해 액비를 처리한 실험구에서 좋은 생육을 보였다. 엽록소 형광반응 실험 시작한 후 무처리구의 엽록소 형광량이 분해 액비의 형광량보다 커서 분해 액비 처리구의 광이용 효율이 더 좋았음을 알 수 있었다. 이는 결국 광합성량의 증가로 이어질 것으로 판단된다. 광화학 매개변수 중 Fo, ABS/RC, RC/ABS, TRo/RC, DI_0/RC, $DF_{TOTAL\ ABS}$ 등 6개 parameter가 광화학 반응의 효율을 나타내는 중요한 요인으로 판단되었다.

사 사

이 논문은 농촌진흥청 어젠다과제(과제번호: PJ01071701, 과제명: 미생물을 이용한 부화장 동물성 폐기물 자원화 연구)의 지원으로 수행되었다.

REFERENCES

KOSIS 국가통계포털, http://kosis.kr/

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.

Delosme R. 1967. Etude de l'induction de fluorescence des alguesverteset des chloroplastes au debut d'une illumination intense. Biochim. Biophys. Acta. 143:108-128.

Duysens LMN and HE Sweers. 1963. Mechanism of the two photochemical reactions in algae as studied by means of fluorescence. in: Japanese Society of Plant Physiologists (Ed.). Studies on Microalgae and Photosynthetic Bacteria. University of Tokyo Press. Tokyo. p. 353-372.

Fred T and F Michael. 1991. Chlorophyll meter to predict nitrogen top dress requirement for semidwarf rice. Agron. J. 83: 926-928.

Govindjee. 1995. Sixty-three years since Kautsky: chlorophyll a fluorescence. J. Aust. Plant Physiol. 22:131-160.

Kariya K, M Akio, M Hiroyasu and T Kosei. 1982. Distribution of chlorophyll content in leaf blade of rice Plant. Jpn. J. Crop Sci. 51:134-135.

Katsumi I. 1985. Spectral ratio of reflectance for estimating chlorophyll content of leaf. Jpn J. Crop Sci. 54:261-272.

Matsuzaki A, K Kunio, M Hiroyasu and T Kosei. 1982. Studies on the growth control and the nutritional diagnosis in rice plants. III. Growth diagnosis at the stage of spikelet initiation for nitrogen top dressing. Jpn. J. Crop Sci. 51:325-331.

Morin P. 1964. Etudes des cinetiques de fluorescence de la chlorophylle in vivo, dans les premiers instants qui suivent le debut de l'illumination. J. Chim. Phys. 61:674-680.

Oukarroum A, SE Madidi, G Schansker and RJ Strasser. 2007. Probing the responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.) by chlorophyll a fluorescence OLKJIP under drought stress and re-watering. Envi & Exp. Bot. 60:438-446.

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.). Kor. J. Crop Sci. 60:1-7.

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.

Peng S, V Felipe, C Rebeacca and G Kenneth. 1993. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. Agron. J. 85: 987-990.

Prakash H. and P Natarajan. 2003. Flash photolysis studies of charge-transfer photochemistry of nickel (II) and cobalt (III) complexes. Res. Chem. Intermed. 29:349-364.

Srivastava A, H Greppin and RJ Strasser. 1995. Acclimation of land plants to diurnal changes in temperature and light. in: Mathis P. (ed.). Photosynthesis: From Light to Biosphere, Kluwer Academic Publishers. The Netherlands 4:909-912.

Strasser RJ. 1985. Dissipative Strukturen als thermodynamischer Regelkreis des Photosyntheseapparates. Ber. Deutsche Bot. Ges. Bd. 98:53-72.

Strasser RJ, M Tsimilli-Michael and A Srivastava. 2004. Analysis of the fluorescence transient. pp. 321-362. In Chlorophyll Fluorescence: A Signature of Photosynthesis. Advances in Photosynthesis and Respiration Series. (George C, C Papageorgiou and Govindjee eds.). Springer, Dordrecht.

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. 104:236-257.

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.). Kor. 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. Int. J. Adv. Inform. Sci. Tech. 29:60-68.

Yoo SY, YH Lee, SH Park, K 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.). Kor. J. Soil. Sci. Fert. 46:659-664.

Received: 6 September 2016
Revised: 18 September 2016
Revision accepted: 19 September 2016