

상추 양액재배 시 탄산수 엽면시비가 광합성, 기공전도, 내서성, 생육에 미치는 영향

The Effect of Photosynthesis, Stomatal Conductivity, Thermotolerance and Growth on Foliar Fertilization of Carbonated Water at Lettuce Hydroponic Cultivation

우영희

Y. H. Woo
국립한국농수산대학
원예환경시스템학과¹

김동익

D. E. Kim
국립한국농수산대학
교양공통²

이종원 *

J. W. Lee
국립한국농수산대학
원예환경시스템과¹

Abstract

Foliar fertilization of carbonated water during lettuce hydroponic cultivation was increased photosynthetic rate and stomatal conductance as higher carbon dioxide concentration of carbonated water

The higher the carbon dioxide concentration in the carbonated water was better growth of lettuce. However, the carbon dioxide concentration of 500 ppm and 700 ppm in the carbonated water was increased the tip-burn occurrence, and the yield was higher in the 300 ppm. the carbon dioxide concentration of 300 ppm in the carbonated water was lower in the fresh weight but increased yield resulted in the lower of the tip-burn occurrence

The high temperature limits for growth were 32°C in the control, 33°C in the 300ppm and 34°C in the 500 ppm according to analyze chlorophyll fluorescent Fo. The high temperature tolerance in lettuce increased approximately 4°C by foliar fertilization treatments of carbonated water under this experiment conditions. Also the activity of SOD(superoxide dismutase), the antioxidant enzyme, was higher with high carbon dioxide concentration of the carbonated water.

Key words : High temperature, Fluorescence, Antioxidant enzyme, Carbonated water, Lettuce

*교신저자: leewon1@korea.kr

¹ Department of Horticulture Environment System, Korea National College of Agriculture and Fisheries

² Korea National College of Agriculture and Fisheries

I. 서론

공기 중의 이산화탄소(CO₂)는 광합성의 주원료로 작물생육의 필수 원소 중 탄소(C)의 공급원이다. 일반적으로 공기 중에 함유 되어 있는 이산화탄소 농도는 350 ppm 정도이다. 그러나 온실처럼 밀폐된 공간에서 작물을 재배하면 이산화탄소 부족 현상이 나타난다. 심할 경우 100 ppm 이하로 낮아져 광합성이 억제되고 작물의 생장이 둔화되어 수량이 감소한다^{1,2,4,5,6}.

작물의 이산화탄소 보상점은 대기 중의 이산화탄소 350 ppm보다 낮은 30~80 ppm 수준으로 알려져 있다. 겨울철 온실이 밀폐 상태에서는 작물의 광합성으로 이산화탄소가 보상점 이하로 낮아지게 될 경우 이산화탄소 시비효과는 거의 모든 작물에서 인정되고 있으며^{1,2,4,5,6}, 오이, 멜론, 가지, 고추 등 과채류에서 무처리에 비해 수량증대의 효과가 두드러지게 나타나고 있으며, 초장, 엽수, 생체중이 증가하는 효과를 보이고, 엽채류인 상추, 썩갓에도 효과가 있는 것으로 보고되어 있다^{1,2,4,5,6}. 유리온실을 비롯한 개량 아치형 플라스틱 온실에서 시설 과채류를 중심으로 고품질과 높은 생산성을 얻고자 이산화탄소 시용이 일반화되고 있다. 특히 수출 과채류의 양액 재배에서는 토양으로부터 이산화탄소 공급이 제한되기 때문에 이산화탄소의 시비의 중요성은 더 크게 부각되고 있다^{1,2}. 시설 엽채류의 적정 이산화탄소 시비 농도는 1,500 ~ 2,500 ppm, 과채류 500 ~ 1,500 ppm으로 상당히 높은 수준이며^{2,4,5}, 이에 따른 경제적 부담도 크고, 또한 CO₂ 농도가 높을수록 수량이 비례적으로 증대되는 것은 아니며, 광도, 엽온이 높아야 광합성이 증가하는 경향을 보이고 있어 온실 내 환경을 상호 적절히 조절해야 그 효과를 극대화 시킬 수 있다. 한편 내서성 향상을 위해 이산화탄소 시비 효과가 인정되고 있으며, 첨단화된 유리온실 경우 측정이 없고 양액 재배를 하므로 낮 동안은 지속적으로 이산화

탄소 농도를 토마토에서 450 ~ 500ppm으로 유지하고 있다⁵.

장기간 이산화탄소 시비는 오히려 광합성 속도가 저하되고, 작물의 증산이 억제되며, 잎의 노화가 촉진되는 부정적인 영향도 있으므로 이들 문제점을 해결하기 위한 이산화탄소 시용기술의 확립이 필요하다^{1,2,4,5}. 과채류, 엽채류 재배 시 적정 이산화탄소 농도는 상당히 고농도이고 온실 내에서 일정하게 적정농도를 유지하기에는 상당히 어렵고 경제적 부담이 크다. 탄산가스의 공급 방법은 환기에 의한 방법, CO₂ 발생기(보일러 연소법, 백등유 연소방식, 프로판가스 연소방식, 액화 CO₂ 가스방식, 탄산가스 발생제)^{1,4,5}, 유기물 시비²) 등 여러 가지 방법들이 있는데 각각 장단점이 있으므로 가격, 조작 편리성, 안정성 등을 고려해서 선택해야한다.

여름철 시설채소의 내서성향상에 관련하여 화학물질처리(Dat 등 2000)와 CO₂ 시용(우 등 2015; Taub 등, 2000)등 연구가 보고되고 있다.

작물의 고온장애 발생 요인은 온도만이 아니라 다른 환경인자 또는 작물 자체의 내서성과 밀접한 관계가 있으며, 고온산화스트레스는 두 가지 반응 즉 고온 산화작용억제를 위한 신호로서, 또는 고온장애 원인으로 작용한다(Dat 등, 2000; Yordanov 2000). 고온장애를 받은 작물은 강한 산화물질을 생성하고 이들 산화물질들은 세포막 지질, 단백질, DNA등에 작용하여 세포를 파괴한다. 그러나 정상적인 조건하에서는 SOD(super-oxide dismutase), CAT(catalase), POD(peroxidase)등의 항산화 효소들은 산화물질들의 독성과 축적을 막는 분해 작용 역할을 하여 세포의 스트레스를 방지한다(Dat 등, 2000; Yordanov 2000).

본 연구는 가스 상태의 이산화탄소 시비와는 다른 물과 이산화탄소가 혼합된 액체상태의 탄산수를 이용한 양액 재배 상추의 이산화탄소 엽면 시비 효과와 그 가능성을 검토하고 내서성 향상

과 항산화효소의 활성을 알아보려고 본 연구를 실시하였다.

II. 재료 및 방법

상추 양액 재배 시 음료용 탄산수 엽면시비의 효과를 구명하고 그 이용 가능성을 검토하고자 본 연구를 실시하였다. 실험재료는 청치마인 어울림 품종, 적촉면인 선포포잡 품종으로 하였으며, 파종은 2014년 11월 14일, 정식은 2014년 12월 12일, 생육조사 1월 9일 하였다.

탄산수 제조는 탄산수 제조기(소다스트림)를 사용하여 실험하였다. 탄산수 엽면시비는 온실 내 기체상태의 CO₂ 시비보다 작물의 이용 효율 면에서 물과 이산화탄소를 동시 공급한다는 관점에서 유리한 방법으로 판단되어 음료용으로 사용되는 탄산수를 엽면시비를 하여 실험하였다. 탄산수 처리 농도는 무처리, 300, 500, 700 ppm 등 4 수준으로 실시하였으며, 실험구 배치는 완전임의 배치 3반복 하였다. 탄산수 농도 조절 및 처리는 Hach사에서 개발한 Sodium Hydroxide를 이용한 Digital Titrator 방법으로 주입하는 액체속의 이산화탄소 농도 측정 및 농도를 조절하여 처리하였다. 탄산수 엽면시비는 일주일에 2회씩 오전에 실시하여 총 8회 처리하였다. 재배방법은 간이형 엽채류 양액 재배기(하이그린 MPTP-14, W465 × L330 × T35, 가화텍)를 이용하여 재배하였으며, 양액 재배기당 14주 정식하였다. 양액 조성은 상추 원시 처방을 기준으로 하였다. 상추 재배시설은 Phytotron(식물생장 조절실, Koito, JP/KG-S) 2대에서 주간 23°C 야간 20°C, 주야간 상대 습도 65%, 광도는 90-100 W/m²로 하여 주간은 오전 7 ~ 오후 6시, 야간은 오후 6기 ~ 오전 7시까지 설정하였다. 엽록소 형광 F₀(initial fluorescence) 측정은 Phytotron 기온을 28°C에서 39°C까지 1시간 간격으로 1°C 씩 상승시키면

서 조사하였다. 엽록소형광 F₀(initial fluorescence) 반응 조사는 엽록소 형광 측정기기 OS-30(Opti-sciences, US)로 캡을 이용하여 20 ~ 30분간 인위적으로 암흑 상태로 처리한 후 측정하였다. 엽록소 형광 F₀(initial fluorescence) 반응 측정은 정식 후 엽령이 25일 정도인 왕성하게 활동하는 건전한 잎을 선택하여 1개체 당 2엽을 선정하여 농도별로 3개체 6엽을 측정 조사하였다. 광합성측정 장치는 Lcpro-SD (ADC bioscientific, GB)를 사용하였으며, 광합성과 기공전도 측정은 동시에 이루어지며, 측정 엽은 정식후 엽령이 25일 정도인 왕성하게 활동하는 건전한 잎을 선택하여 1개체 당 2엽을 선정하여 농도별로 3개체 6엽을 측정 조사하였다. 생육조사는 정식 후 28일에 조사하였다.

탄산수 처리농도에 따른 항산화효소 SOD (superoxide dismutase)활성을 조사하였다. 항산화효소는 처리농도별로 엽령이 5일 이내인 생장점부근의 왕성하게 활동하는 건전한 어린잎을 선택하여 1개체 당 2엽을 선정하여 3개체를 조사하였다. 항산화효소 분석은 Yamane 등(1999)이 사용한 방법에 준하여 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

본 실험 결과 탄산수의 이산화탄소 농도가 500, 700 ppm로 엽면시비 한 어울림상추와 선포포잡 상추 두 품종 모두 생육이 우수하여 엽면적, 엽중, 근중이 무처리, 300 ppm보다 높았으나 tip burn 발생이 500 ppm이 41.7%, 700 ppm이 58.3%로 높아 오히려 300ppm이 생체중은 낮으나 수량은 높았다(Table 1). 이는 저광도 고농도 이산화탄소에 의한 칼슘결핍으로 야기되는 생육장애라 추측되나 그 원인에 대해서는 추후 연구할 과제라 생각되며, 이에 관련된 참고자료나 문헌은 없다. 다만 고농도 이산화탄소에 의한 생육의

Table1. Growth and yield of lettuce according to CO₂ treatment con (January 9)

CO ₂ treatment con.	Cultivar	No. of leaf	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf area (cm ²)	Fresh weight of top (g/plant)	Fresh weight of root (g/plant)	Dry weight of plant (g/plant)	Rate of Tip Burn (%)	Yield (g/42 plant)
Control	Uhwoolrim	11	18.9	12.3	501.4	28.0	9.3	2.59	14.3	1,007.8
	Sunpoong	7	11.5	12.2	291.8	17.3	2.0	1.36	16.7	605.3
	Means	9	15.2	12.3	396.6	26.7	5.7	2.0	15.5	806.6
300ppm	Uhwoolrim	17	18.2	13.5	622.6	36.7	10.2	2.68	11.9	1,358.0
	Sunpoong	8	14.1	14.2	344.5	23.2	3.0	1.42	12.3	854.6
	Means	12.5	16.2	13.9	483.6	30.0	6.6	2.1	13.1	1,106.3
500ppm	Uhwoolrim	13	19.4	12.8	801.6	34.5	10.4	2.78	42.9	827.4
	Sunpoong	9	13.0	14.5	461.2	31.2	5.5	2.00	40.5	779.7
	Means	11.0	16.2	13.7	631.4	32.9	8.0	2.4	41.7	803.6
700ppm	Uhwoolrim	16	19.2	13.7	936.4	41.8	12.2	3.16	59.5	711.0
	Sunpoong	10	14.0	16.0	480.3	27.7	4.2	1.59	57.1	499.1
	Means	13.0	16.6	14.9	708.4	34.8	8.2	2.4	58.3	605.1
Significance	CO ₂ treatment con	NS	NS	NS	*	*	*	NS	*	*
	Cultivar	*	NS	NS	*	*	*	NS	NS	*
	CO ₂ treat. × Cultivar	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS, * : Nonsignificant or significant at P,0.05, respectively.

unbalance에 의한 장애라 생각된다.

Phytotron 재배 광환경이 90 ~ 100 W/m²로 lux로 환산하면 약 9,600 ~ 10,800 lux 수준으로 상추의 광포화점이 25,000 lux를 감안한다면 광도를 광포화점까지 높일 경우 탄산수에 함유된 이산화탄소 농도에 따른 상추 탄산수 엽면시비 효과는 더 두드러지게 나타날 것으로 예상되며 500 ppm, 700 ppm 농도에 의한 tip-burn 발생도 감소 될 것으로 판단되나 앞으로 심도 있는 연구가 필요하다고 생각된다. 탄산수 엽면시비는 낮은 광도에서도 효과가 인정되므로 이산화탄소 시비를 위한 부대장치 설치비용과 매월 이산화탄소 가스 구입비용 절약이 예상된다. 또한 탄산수 엽면시비로도 이산화탄소 시비와 동일한 효과를 얻을 수 있다고 사료되며 그 경제적 수익은 클 것으로 추

정된다.

광합성 효율은 700 > 500 > 300 ppm > 무처리 순으로 높았으며, 기공전도도도 광합성과 동일한 경향을 보였다. 이 결과는 광포화점 1/2 수준으로 낮은 저광도하에서도 탄산수에 의한 이산화탄소 시비는 효율적이며 낮은 이산화탄소 농도인 300 ppm에서도 그 효과가 인정된다는 점은 고무적인 결과(Fig. 1, 2)라 생각되며, 앞으로 더욱 연구할 과제라 생각된다. 다만 액체상태의 이산화탄소 엽면시비는 액체상태의 탄산수 엽면시비가 기체상태의 이산화탄소 시비보다 저 농도에서도 효과가 인정되며 오히려 엽채류 적정 시비농도인 1,500 ~ 2,500 ppm^{2,4,5}의 1/3일 수준인 500 ppm이상에서 tip-burn과 같은 생육장애가 나타나므로 그 원인 규명이 필요하다고 생각된다.

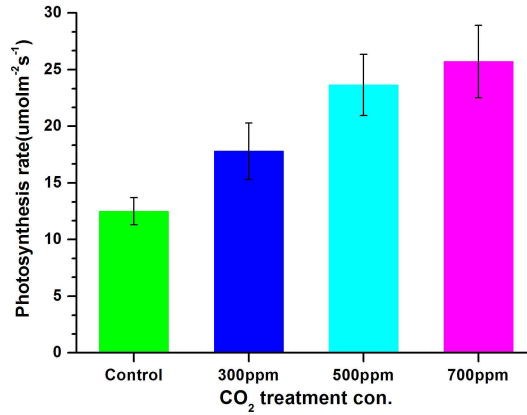


Fig. 1. Comparison of photosynthesis rate according to CO₂ treatment concentration in Sunpoong pochap lettuce. Vertical bars(I) represent ±SE of means

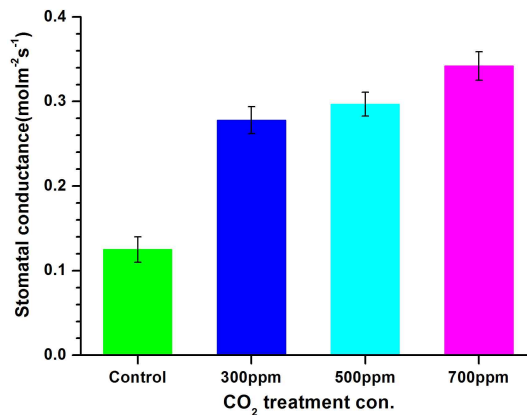


Fig. 2. Comparison of stomatal conductance according to CO₂ treatment concentration in Sunpoong pochap lettuce. Vertical bars(I) represent ±SE of means

토마토에서 이산화탄소 시비가 내서성 향상을 유도한다는 선행연구 결과(우 등 2015)에 근거하여 탄산수의 이산화탄소 농도에 따라 무처리, 300 ppm, 500 ppm, 700 ppm 엽면시비 한 결과 시비농도가 농도가 높을수록 항산화 효소인 SOD(superoxide dismutase) 활성이 높았으며 (Fig. 3), 엽록소 형광 F_v 값의 비가역적인 현상 나타나는 온도가 무처리구는 32°C, 300 ppm은 33°C, 500 ppm은 34°C, 700 ppm은 36°C이었다 (Fig. 4). 이는 탄산수의 이산화탄소 농도가 높을수록 내서성이 향상되는 효과를 보여주고 있다.

일반적으로 작물의 고온장애 발생 요인은 온도만이 아니라 다른 환경인자 또는 작물 자체의 내서성과 밀접한 관계가 있으며, 고온 산화스트레스는 두 가지 반응 즉 고온 산화작용 억제를 위한 신호로서, 또는 고온장애 원인으로 작용한다(Dat 등, 2000; Yordanov 등 2000). 작물은 각종 스트레스에 의해 생성되는 활성산소를 무독화하기 위한 생체 내 방어기구를 가지고 있으며, 여기에는 SOD(superoxide dismutase), CAT (catalase), POD(peroxidase)등의 항산화 효소가 크게 관여하고 있는 것으로 알려져 있다.

상추 양액재배 시 탄산수 엽면시비가 광합성, 기공전도, 내서성, 생육에 미치는 영향

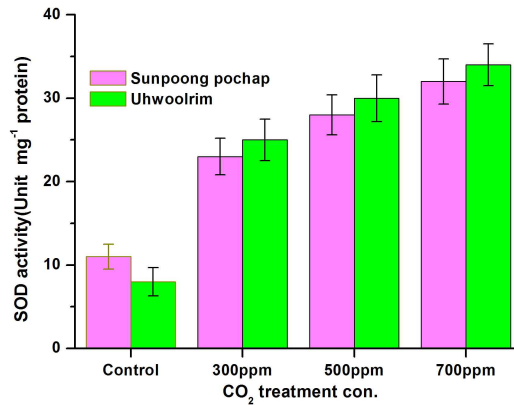


Fig. 3. Activity of SOD according to CO₂ treatment concentration in difference lettuce cultivars. Vertical bars(I) represent ±SE of means.

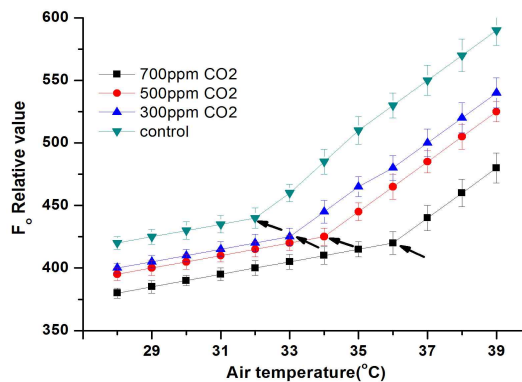


Fig. 4. Effects of CO₂ treatment concentration on initial fluorescence(F₀) of Uhwoolrim. Arrow(→) represent the critical high temperature limit. Vertical bars(I) represent ±SE of means.

(Dat 등, 2000; Yordanov 등 2000). 향산화 효소 활성을 이용한 작물 내서성 향상에 관련된 연구는 작물자체의 적응성 향상을 위해 eu-stress 개념이 도입되고 있다. 즉 인위적으로 환경에 의한 장애나 병해를 미약하게 발생시켜 작물이 이에 대한 적응성을 키움으로써 이를 방제에 이용하고 있다(Dat 등, 2000; Yordanov 등 2000) 본 연구 조건하에서도 탄산수 엽면시비는 향산화효소 SOD(superoxide dismutase) 활성으로 내서성 향상 효과가 있음을 확인하였다(Fig. 3).

일반적으로 엽록소 형광은 F₀ 값이 높을수록

광합성 효율이 떨어진다. 고온 조건하에서 엽록소 형광 F₀ 값은 고온장애 정도에 따라 점차 증가하였다가 어느 시점에서 급격하게 상승하는 비가역적인 현상이 나타나는데 이 시점의 값을 작물이 고온장애로 인해 회복될 수 없는 시점으로서의 한계 값을 표현하는데 이용하고 있다(Weis 등, 1988; Yamane 등, 1997). 본 연구 조건하에서 고온 한계 시점을 분석하기 위하여 기온 처리별 F₀를 조사한 결과 무처리구에는 32°C, 300 ppm은 33°C, 500 ppm은 34°C, 700 ppm은 36°C이었다(Fig. 4). 이 결과를 보면 탄산수 엽면시비는

확실히 작물의 고온 한계온도를 최고 약 4 °C정도 높이므로 내서성이 향상된 것으로 판단되었다 (Fig. 4).

본 연구결과를 종합해보면 탄산수 엽면시비는 작물체에 항산화 효소의 생성을 유도하여 고온장해에 대한 방어시스템 형성으로 광계II(PSII)를 통한 전자전달계 손상을 어느 정도 보호하는 것으로 관찰되었으나 더 세부적인 연구가 필요하다고 생각된다.

연구 결과 본 실험 조건하에서 탄산수 엽면시비는 이산화탄소 시비를 위한 부대장치 설치비용과 매월 이산화탄소 가스 구입비용 절약 등 과도한 시설투자 없이 탄산수 엽면시비 의한 최소한 비용으로 상추의 생산성과 내서성을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 적요

상추 양액 재배 시 탄산수 엽면시비는 탄산수의 이산화탄소 농도가 높을수록 광합성률, 기공전도도가 높았으며, 내서성이 향상되었다. 상추 생육은 탄산수의 이산화탄소 농도가 높을수록 좋았으나, 이산화탄소 농도가 700 ppm, 500 ppm 에서는 tip-burn 발생률이 높아 수량은 300 ppm, 대조구가 700 ppm, 500 ppm 보다 많았다. 본 연구 조건하에서 탄산수 엽면시비에 의한 고온 한계 시점을 분석하기 위하여 기온 처리별 F_0 를 조사한 결과 무처리구에는 32°C, 300 ppm은 33°C, 500 ppm은 34°C, 700 ppm은 36°C이었다. 이 결과를 보면 탄산수 엽면시비는 작물의 고온 한계온도를 최고 약 4 °C정도 높이므로 내서성이 향상된 것으로 판단되었다. 또한 탄산수의 이산화탄소 농도가 높을수록 항산화 효소 SOD(superoxide dismutase) 활성이 높았다.

V. 참고문헌

1. 김용현, 배종향, 손정익, 이용범, 장홍거, 전하준, 정병룡. (2003). 생물환경조절공학. 향문사
2. 문원, 이용범, 손정익. (2017). 시설원예학. 한국방송통신대학교출판문화원
3. 우영희, 이관호, 강인철, 김동억. (2015). 여름철 시설 토마토 재배 시 Carbon Dioxide 처리가 Water Stress에 미치는 영향. 현장농수산연구지. 17(1):93-100
4. 이용범, 전하준, 손정익. (2016). 신고시설원예학. 향문사
5. 高倉 直. (1995). 生物環境調節ハンドブック. 株式會社養賢堂
6. (社)日本施設園藝協會. (2009). 五訂 施設園藝ハンドブック. 園藝情報センター
7. Dat J., S. Vandenabeele, E. Vranová, M. Van Montagu, D. Inzé and F. Van Breusegem. (2000). Dual action of the active oxygen species during plant stress responses. Cell. Mol. Life Sci. 57:779 -795
8. Taub, D. R., J. R. Seemann and J. S. Coleman. (2000). Growth in elevated CO₂ protects photosynthesis against high-temperature damage. Plant, Cell and Environment. 23, 649-656.
9. Yamane, K., S. Kawabata, and N. Fujishige. (1999). Change in activities of superoxide dismutase, catalase, and peroxidase during senescence of gladiolus florets. J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 68:798-802.
10. Yamane, Y., Y. Kashino, H. Koike and K. Satoh. (1997). Increases in the fluorescence F_0 level and reversible inhibition of Photosystem II reaction center by high-temperature treatments in higher plants. Photosynthesis Resear- ch 52:57-64.

상추 양액재배 시 탄산수 엽면시비가 광합성, 기공전도, 내서성, 생육에 미치는 영향

11. Yordanov L., V. Velikova and T. Tsonev. (2000). Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance. *Photosynthetica* 38(1):171-186.
12. Weis, E. and J. A. Berry. (1988). Plants and high temperature stress. *Experimental Biology*. 1004: 329-346.

논문접수일 : 2019년 4월 3일
논문수정일 : 2019년 5월 21일
게재확정일 : 2019년 5월 30일