Korean Journal of Environmental Agriculture

Korean J Environ Agric. 2020;39(3):273-279. Korean
Published online 2020 September 25. https://doi.org/10.5338/KJEA.2020.39.3.32

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Research Article

Open Access

UV-A LED을 이용한 고추 묘의 저온 내성 유도

박송이[1,2*]

[1]충북대학교 농업생명환경대학 응용생명공학부 원예학전공, [2]충북대학교 생물건강산업교육연구단

Elicitation of Chilling Tolerance of Pepper Seedlings Using UV-A LED

Song-Yi Park[1,2*] ([1]Major of Horticultural Science, School of Applied Science and Biotechnology, College of Agriculture, Life, and Environment Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea, [2]Brain Korea 21 Center for Bio-Health Industry, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea)

Received: 19 August 2020/ Revised: 8 September 2020/ Accepted: 22 September 2020
Copyright ⓒ 2020 The Korean Society of Environmental Agriculture
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Song-Yi Park
https://orcid.org/0000-0001-8412-485X

Abstract

BACKGROUND: After transplanting, the recent abnormal low temperature caused physiological disorders of pepper seedlings. This study was conducted to evaluate the effects of UV-A LED, a physical elicitor, on the chilling tolerance of pepper seedlings.

METHODS AND RESULTS: Seedlings were continuously irradiated with 370 and 385 nm UV-A LEDs with 30 W·m^{-2} for 6 d. After that, seedlings were exposed to 4°C for 6 h and then recovered under the normal growing condition for 2 d. There were no significant differences in growth characteristics of UV-A treatments compared to the control. Fv/Fm values of two UV-A treatments were below 0.8. Electrolyte leakage in the control was increased by chilling stress, while 385 nm UV-A had the significantly lowest value. Total phenolic content and antioxidant capacity of two UV-A treatments significantly increased due to UV-A radiation. However, total phenolic content and antioxidant capacity of the control increased due to chilling stress and tended to decrease again during the recovery time.

CONCLUSION: We confirmed that UV-A light was effective to induce the chilling tolerance of pepper seedling, and the supplemental radiation of 385 nm UV-A LED before transplanting could be used as a cultivation technique to produce high quality pepper seedlings.

Key words: Antioxidant capacity, Chilling stress, Electrolyte leakage, Elicitor, Total phenolic content

*Corresponding author: Song-Yi Park
Phone: +82-43-261-2525; Fax: +82-43-271-0414;
E-mail: 1songyi1@gmail.com

서 론

고추는 카로티노이드, 비타민, 캡사이신과 같은 다양한 파이토케미컬을 다량 함유하고 있어 위액분비를 촉진시키고 체지방 분해에 도움을 주며 항산화효과와 항암효과를 갖는다고 보고되어 있다[1-3]. 국내 전체 농업 생산액 중 2%와 조미 채소류 중 1위를 차지하는 고추의 1인당 연간 고추 소비량은 3.1 kg으로 세계 최고 수준이며 주요한 경제 작물 중 하나이다(농림축산부 주요통계, 2019). 최근 빈번하게 발생하는 기상재해는 작물의 정식, 재배, 개화, 수확 시기에 문제를 발생시켜 작물의 생산량과 상품성을 저하시킨다. 자연재해에 의한 농경지 피해액은 10년 동안 연평균 81억원 수준으로 추정되고 있으며 피해 규모도 매년 지속적으로 증가하고 있다(행정안전부 재해연보, 2018). 그 중, 이상저온에 의한 농작물 피해 면적은 2018년도에는 6,121 ha이었고 2020년도에는 7,374 ha로 증가하는 추세이다(농림축산부 보도자료, 2018, 2020). 저온은 식물의 생리적 대사적 반응들을 저해하고 호흡과 광합성을 억제시켜 결국 식물의 생장과 영양학적 품질을 저하시킨다[4, 5]. 호온성 작물인 고추는 온도에 의해 생장과 개화에 미치는 영향이 크다고 보고되었으며 특히, 10°C 이하의

이상 저온에 의해 생리 장해 및 생육 지연과 같은 냉해를 입는다[6, 7]. 이러한 문제와 연관되어 고추의 재배면적과 생산량은 2000년대에 들어 감소하는 추이이며 실제로 2019년 고추의 재배면적과 생산량은 10년전 대비 각각 42%와 50%씩 감소하였다(통계청, 2009, 2019). 그러므로, 이상 저온과 같은 자연재해로 인한 농산물의 피해 예방 및 피해를 최소화하기 위해서는 적극적인 재배적 대응 방안과 내재해성 품종의 육성 관련 연구가 요구된다.

320-400 nm 파장 영역을 갖는 UV-A은 식물의 생리적, 생화학적, 유전적 특성을 변화시킬 수 있어 식물 생장과 발달을 제한하는 물리적 스트레스 요인 중 하나이다[8, 9]. 식물은 UV-A와 같은 광 스트레스로부터 스스로 보호하고 방어하기 위해 플라보노이드, 안토시아닌, 카로티노이드와 같은 2차 대사산물의 생합성을 촉진한다[4, 10]. 이러한 2차 대사산물은 식물체가 고온, 저온, 건조, 병해충 등과 같은 외부 환경스트레스로 의해 생성하는 ROS(Reactive oxygen species)를 소거하는 높은 항산화능력을 갖고 있다[11, 12]. 따라서, 높은 항산화능력을 보유한 식물은 불량한 환경스트레스에 대한 저항성이 높다. 식물 생장에 해를 주지 않는 에너지 수준의 UV-A 조사는 식물의 환경 저항성을 증대시킬 수 있는 재배기술로 활용될 수 있고, 식물의 파이토케미컬을 증대시키기 위한 UV-A와 관련된 많은 연구들이 진행되고 있다[8, 9, 13-16]. 실제로 UV-A 조사는 식물 세포벽 강화와 관련된 페놀화합물, 프롤린, 수베린, 리그닌을 증가시키며 이러한 화합물들은 저온 스트레스에 대한 내성을 증대시킨다고 보고되었다[14, 17, 18].

따라서, 본 연구에서 우리는 최근 상용화된 UV-A LED를 이용하여 특정 파장의 UV-A가 고추 묘의 저온 내성에 미치는 효과를 조사하고 UV-A LED 처리가 우량묘를 생산할 수 있는 재배기술로서 활용 가능한지를 평가하기 위해 본 실험을 수행하였다.

재료 및 방법

식물 재료 및 재배 환경

고추(*Capsicum annuum* L. Kidaemanbal) 종자(Dongbu Hannong Co., Seoul, Korea)를 종자 성장팩(Seed pack, USEM, Suwon, Korea)에 파종하고 30°C의 식물생장상(DS-51GLP, Dasol Science Co., Hwaseong, Korea)에서 3일간 암상태로 발아시켰다. 발아 후 고추 묘는 온도 25/20°C(낮/밤), 상대습도 50%, 형광등 PPFD (photosynthetic photon flux density) 140±5 μ mol·m^{-2}·s^{-1},명기 시간 15시간으로 설정된 식물생장상에서 재배되었다. 형광등의 PPFD는 휴대용 광양자 센서(Li-1400, LI-COR, Lincoln, USA)를 이용하여 400-700 nm 범위를 1 nm 간격으로 26구역을 측정하여 평균으로 나타내었다. 파종 후 9일 째 원예용 상토(Myung-Moon, Dongbu Hannong Co., Seoul, Korea)로 충전된 72공 플러그 트레이에 고추 묘를 1개체씩 정식하였으며 동일한 식물생장상에서 34일간 재배되었다. 관수는 별도로 제작한 베드(45×26×10 cm, L×W×H)에 72공 플러그 트레이를 넣고 2-3일 간격으로 증류수를 1 L씩 저면 관수 해주었다. 정식 후 1/2배액 Hoagland-Arnon solution(pH 6, EC 1.0 dS·m^{-1})을 1주 간격으로 1 L씩 공급해주었다. 식물 위치에 따른 광 분포의 균일성을 높이기 위해 2일 마다 트레이를 규칙적으로 회전시켜주었다.

UV-A LED 조사와 저온 처리

정식 후 34일째, 주광원 형광등 조건 하에서 재배되고 있는 고추묘에 370 nm와 385 nm의 피크 파장을 갖는 UV-A LED(LG Innotek, Seoul, South Korea)를 6일간 보조광원으로 24시간 연속 조사해 주었다(Fig. 1). 광 스펙트럼 분석기(JAZ-EL 200, Ocean optics, FL, USA)를 이용하여 처리구별 12구역의 에너지를 측정하였다. 두 가지 UV-A LED의 에너지를 30±1 W·m^{-2}으로 동일하게 설정해주었다. 대조구는 주광원 형광등 조건 하에서 재배되었다. UV-A 광 처리 후 UV-A LED가 고추 묘의 저온 저항성에 미치는 효과를 확인하기 위해 식물생장상(BI-1000M, JeioTech, Daejeon, Korea)에서 4°C로 6시간 동안 저온 처리해주었다. 저온 처리 종료 후 UV-A 광원이 없는 정상적인 재배 환경으로 설정되어 있는 식물생장상에서 고추묘를 2일 동안 회복시켰다.

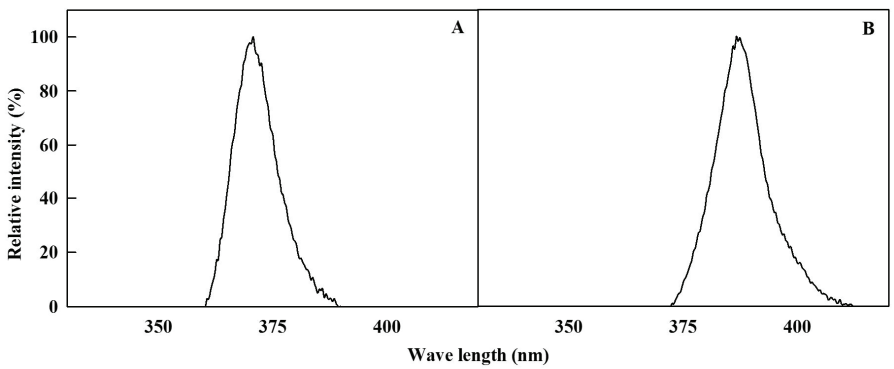

Fig. 1. Relative spectral distribution of 370 nm (A) and 385 nm (B) UV-A LED.

생육 특성

UV-A LED에 6일 동안 조사된 고추 묘의 생육 특성을 조사하였다. 전자저울(Si-234, Denver Instrument, Bohemia, NY, USA)을 이용하여 지상부와 지하부의 생체중을 측정하였다. 지하부의 생체중은 뿌리에 묻은 원예용 상토를 흐르는 물로 씻어낸 후 물기를 종이 타월로 제거하고 측정하였다. 지상부와 지하부의 건물중은 시료를 건조 봉투에 넣어 항온 건조기(VS-1202D3, Vision Science, Daejeon, Korea)에서 70°C로 72시간 동안 건조시킨 후 그 무게를 측정하였다. 엽면적은 엽면적계(Li-3000A, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)를 이용하여 측정하였으며, 비엽중(specific leaf weight)은 엽면적을 지상부 건물중으로 나누어 계산되었다. 엽록소 함량은 정단부에서 3번째 잎을 엽록소 측정기(SPAD-502, Minolta, Tokyo, Japan)로 SPAD 을 측정하여 값을 얻었다.

엽록소 형광

UV-A 광 조사와 저온 처리에 의한 고추 묘의 스트레스 정도를 확인해 보기 위해 엽록소 형광 측정기(PAM-2000, Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Germany)로 광계 II의 최대 양자수율(Fv/Fm)을 측정하였다. 측정하기 30분 전 고추 기부에서부터 떡잎을 포함한 5번째에 있는 잎에 dark clip을 물려 30분 동안 암적응을 시켜주었다. 그 후 엽록소 형광 측정기로 고추 잎에 20 kHz, PPFD 1100 μmol·m^{-2}·s^{-1}의 광을 조사하여 최대 형광값(Fm)과 초기 형광값(Fo)를 구하고, Fv/Fm은 (Fm-Fo)/Fm으로 계산되었다.

전해질 유출

저온 처리에 의한 고추 잎 조직의 세포 붕괴도를 알아보기 위해 저온 처리 후와 2일간 회복 후에 고추 잎의 전해질 유출값을 측정하였다. 대조구와 두 가지 UV-A LED를 처리한 고추 묘의 기부를 기준으로 떡잎을 제외한 2번째 잎을 각각 칼로 3등분하였다. 이 샘플을 50 mL 코니칼튜브에 넣은 후 증류수 15 mL를 넣고 10시간 동안 상온 보관하였다. 그 후 Vortex mixer (BV1000, Benchmark Scientific, Edison, NJ, USA)로 1분간 섞어 주고, 전기 전도도 측정기(Multi 3430, WTW, Weilheim, Germany)로 전기전도도(측정 1)를 측정하였다. 이 샘플을 다시 항온수조(MSB-2011D, MonoTech Co., Siheung, Korea)에 80°C로 2시간 처리를 한 후 10시간 동안 상온 보관하였다. 그 후 1분간 Vortex mixer로 섞어 주고 전기전도도(측정 2)를 측정하였다. 전해질 유출 정도는 측정 1의 값을 측정 2의 값으로 나누어 %로 표현하였다.

총 페놀화합물과 항산화도

고추 잎의 총 페놀화합물은 기존 연구[19]에서 기술한 방법을 수정하여 분석에 사용하였다. 분석을 위해 고추 잎(0.2 g)을 칼로 잘라 채취하여 액체질소로 급속 냉각시켜주었고, -70°C 초저온 냉장고(DF8524, Il-Shinbiobase, Yangju, Korea)에서 분석 전까지 보관하였다. Folin-Ciocalteu reagent (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 방법을 이용하여 얻은 최종 반응물의 흡광도는 분광광도계(UV-1800, Shimadzu, Kyoto, Japan)로 765 nm에서 측정되었다. 표준곡선은 Gallic acid(Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)를 이용하여 얻었으며, 고추의 총 페놀화합물은 단위 생체중당 Gallic acid의 함량으로 표현하였다.

고추의 항산화도는 ABTS(2,2′-Azino-bis[3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid] diammonium salt)를 이용한 방법[20]을 약간 수정한 [19]의 방법으로 분석하였다. 총 페놀화합물과 동일한 방법으로 추출하였으며, 최종 추출물의 흡광도는 분광광도계를 이용하여 730 nm에서 측정하였다. 표준곡선은 Trolox(6- hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid)(Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)를 이용하여 얻었고, 고추의 항산화도는 단위 생체중당 Trolox의 몰 농도로 표현했다.

통계 분석

생장 특성, 전해질 유출, 총 페놀화합물과 항산화도는 처리구별 5개체씩 실시하였으며, SPAD와 엽록소 형광 측정은 처리구별 4개체씩 실시하였다. 데이터 분석은 SAS 9.4(SAS Institute, Cary, NC, USA) 통계프로그램을 이용하여 분산분석을 하였고, 처리구간 유의적 차이를 비교하기 위해서 Fisher's least-significant- difference(LSD) test를 이용하여 분석하였다. 그래프는 Sigma Plot 8.0(Systat Software Inc, San Jose, CA, USA)을 이용하여 나타내었다.

결 과

생육 특성

370 nm와 385 nm 피크를 갖는 UV-A 광에 6일 동안 연속 노출된 고추 묘의 생육특성을 조사하였다(Table 1과 Fig. 2A). 대조구와 비교하여 UV-A LED가 조사된 고추 묘의 지상부와 지하부의 생체중과 건물중, 엽면적, 비엽중, SPAD 값에 유의적인 차이는 없었다.

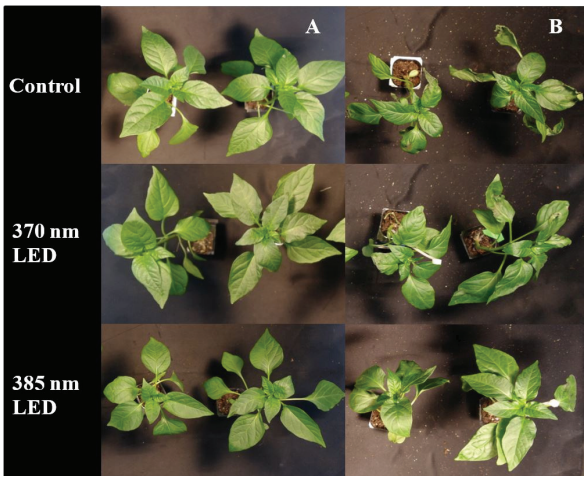

Fig. 2. Pepper seedlings irradiated with 370 or 385 nm UV-A LED before (A) and after 6 hours of chilling stress (B). Plants grown under fluorescent lamps were used as the control.

Table 1. Growth characteristics of pepper seedlings irradiated with 370 or 385 nm UV-A LED for 6 days. Plants grown under fluorescent lamps were used as the control

Treatment[a]	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		Leaf area (cm^2)	Specific leaf weight ($mg \cdot cm^{-2}$)	SPAD value
	Shoot	Root	Shoot	Root			
Control	4.29 ± 0.2	0.67 ± 0.1	0.35 ± 0.03	0.05 ± 0.01	163.74 ± 7.4	2.13 ± 0.1	41.86 ± 2.0
370 nm	3.91 ± 0.2	0.53 ± 0.1	0.33 ± 0.02	0.04 ± 0.01	145.62 ± 6.5	2.32 ± 0.2	39.48 ± 1.1
385 nm	4.39 ± 0.2	0.69 ± 0.1	0.38 ± 0.03	0.06 ± 0.01	147.53 ± 6.6	2.58 ± 0.2	43.80 ± 0.5
Significance	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

[a] UV-A treatment was started at 34 days of transplanting
NS not significant

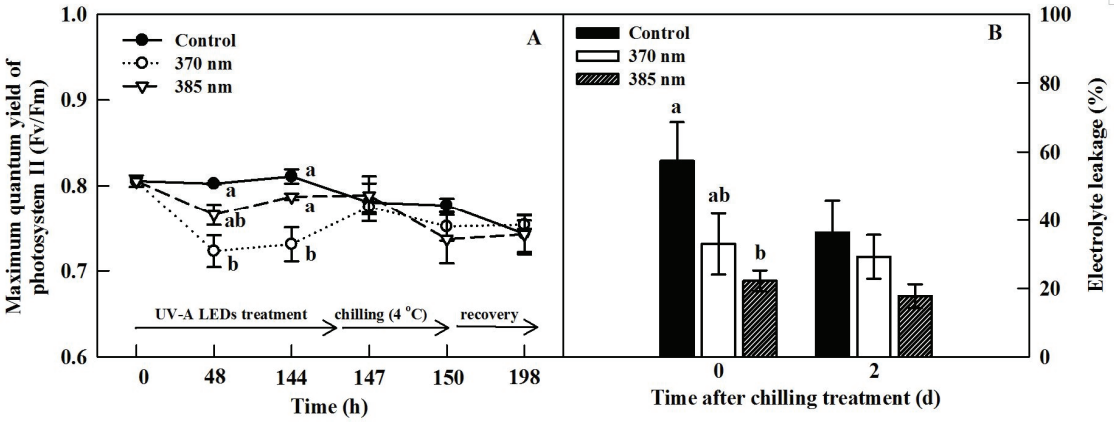

Fig. 3. Maximum quantum yield of photosystem II (Fv/Fm) of pepper seedlings irradiated with 370 or 385 nm UV-A LED for 6 days and chilling stress for 6 hours followed by 2 days of recovery (A). Electrolyte leakage of pepper seedlings before chilling stress (4℃) and after 2 days of recovery (B). The data indicate the means ± S.E. Different letters indicate statistical difference by Fisher's least-significant-difference (LSD) test at $p < 0.05$.

엽록소 형광

UV-A 광과 저온 처리 그리고 회복 과정 동안, 두 UV-A 광 처리구와 대조구의 엽록소 형광 값은 차이를 보였다(Fig. 3A). UV-A 조사 48시간째 370 nm과 385 nm 처리구의 엽록소 형광 값은 각각 0.766과 0.723으로 대조구(0.803)에 비해 감소하였고 특히, 370 nm UV-A 처리구는 유의적으로 가장 낮았다. 저온 처리 동안 두 UV-A 광 처리구의 엽록소 형광 값은 감소하지 않았고 오히려 370 nm UV-A 광의 엽록소 형광은 0.775로 대조구(0.781)와 비슷한 값으로 회복되었다. 반면에 대조구의 엽록소 형광 값은 정상적인 재배 환경에서 0.8 이상의 값을 가졌으나, 저온 환경에 노출되자 바로 0.8 이하로 떨어졌으며 회복 후 2일째까지 감소하였다.

전해질 유출

저온 처리 후와 2일 동안 회복 후 대조구와 UV-A 광에 노출된 고추 묘 잎의 전해질 유출을 비교하였다(Fig. 3B). 저온 처리 직후 대조구의 전해질 유출은 57.4%로 가장 컸고 22.2% 값을 갖는 385 nm UV-A 광 처리구 보다 2.6배 유의적으로 높았다. 정상적인 재배 환경에서 2일 동안 회복한 후에 전해질 유출을 측정한 결과 대조구의 전해질 유출은 감소하였으나 두 UV-A광 처리구의 전해질 유출은 저온 처리 후의 값과 비슷하였다.

총 페놀화합물과 항산화도

UV-A 광 처리 기간 동안 두 UV-A 처리구의 총 페놀화합물 함량은 대조구에 비해 유의적으로 증가하였고 저온 처리 기간과 회복 기간에도 높았다(Fig. 4A). 저온 처리 전과 후를 비교하면 대조구의 총 페놀화합물 함량은 저온 처리 후에 급격히 증가하였지만 두 UV-A 광 처리구와 유의적인 차이는 존재하지 않았다. 회복기간 동안 대조구의 총 페놀화합물 함량은 다시 감소하였다.

전 실험기간 동안 두 UV-A 광 처리구의 항산화도는 대조구에 비해 높았다(Fig. 4B). UV-A 광 조사 동안 총 페놀화합물 함량과 비슷하게 두 UV-A 광 처리구의 항산화도가 대조구보다 유의적으로 높았다(Fig. 4B). 저온 처리 기간 동안에는 대조구의 항산화도가 증가하였고 370 nm과 385 nm UV-A 처리구의 항산화도도 증가하였다. 저온 처리 직 후, 두 UV-A 광 처리구의 항산화도는 대조구보다 유의적으로 높았고 회복 기간 동안 두 UV-A 광 처리구와 대조구 모두 감소하였다.

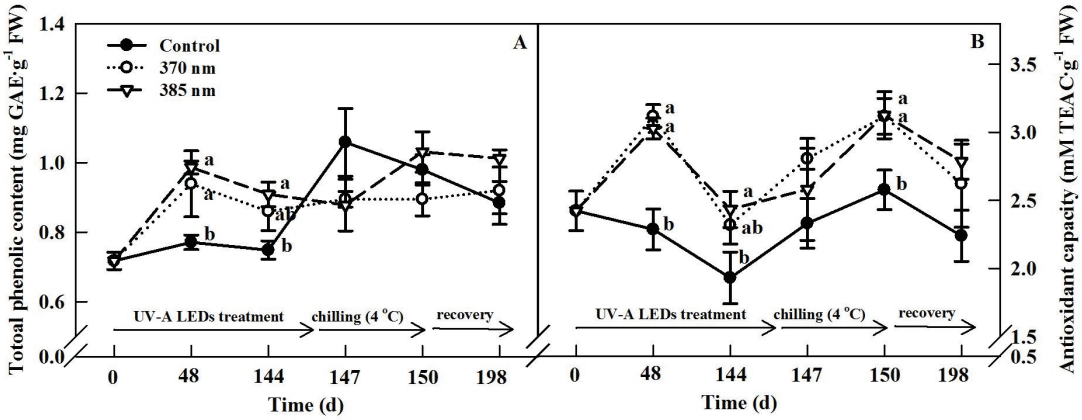

Fig. 4. Total phenolic content (A) and antioxidant capacity (B) per unit fresh weight of pepper seedlings irradiated with 370 or 385 nm UV-A LED for 6 days and chilling stress for 6 hours followed by 2 days of recovery. The data indicate the means ± S.E. Different letters indicate statistical difference by Fisher's least-significant-difference (LSD) test at $p < 0.05$.

고 찰

UV-A의 광수용체인 Cryptochrome은 배축 신장 억제, 기공 개폐, 엽록체 발달, 광합성 색소 발현과 같은 식물의 다양한 생리적 반응을 매개한다[21, 22]. 자외선과 같은 광 스트레스 조건하 Cryptochrome은 광 보호 전략 중 하나인 광형태형성 반응을 유도한다[21]. Li 등[22]은 UV-A 광 조사가 엽록소 생합성에 관여하는 유전자의 발현 수준을 감소시켰고 보고하였다. 실제로 390 nm UV-A 광은 바질 새싹의 배축 신장을 억제하였고 365 nm UV-A는 *Camellia sinensis* 어린 묘의 엽록소 함량을 감소시켰다[23, 24]. 하지만 본 실험에서 사용한 두 가지 UV-A LED에 의해 고추 묘의 지상부와 지하부의 생체중과 건물중, 엽면적, 엽록소 함량(SPAD)은 대조구에 비해 유의적 차이는 없었다(Table 1). 따라서, 본 실험에서 사용한 두 가지 UV-A의 파장과 30 $W \cdot m^{-2}$ 에너지 수준 그리고 6일의 조사 시간이 고추 묘의 생장에 지장을 줄 정도의 스트레스가 아니었을 것으로 판단된다.

광계 II의 광양자 효율(Fv/Fm)은 전자전달 과정 중 불필요한 에너지를 방출하는 과정에서 나타나는 현상으로 전자를 이동시키는 능력에 의해 결정되며 광 이용 효율을 추정할 수 있는 수치로 사용된다[25]. 스트레스에 의한 전자 수송의 제한은 전자 전달 속도를 낮춰 Fv/Fm 값을 감소시킨다. 일반적으로 건강한 식물의 Fv/Fm 값은 0.8 이상이지만 스트레스를 받는 식물체는 0.8 미만으로 값이 감소한다[14, 19, 25, 26]. 본 실험의 결과 UV-A 광 조사는 고추 묘의 Fv/Fm 값을 0.8 이하로 감소시켰고 특히, 상대적으로 광양자 당 에너지가 더 큰 370 nm UV-A에 의해 Fv/Fm 값이 유의적으로 감소되었다(Fig. 3A). 또한, 4℃ 저온 스트레스는 광합성기구인 엽록체의 광합성을 저해하여 Fv/Fm 값을 감소시킨다는 연구 결과[25, 26]와 동일하게 본 연구에서도 4℃ 저온 스트레스에 의해 대조구의 Fv/Fm 값이 감소되었다. 반면에 저온 처리 기간 동안 370 nm UV-A의 Fv/Fm 값은 대조구와 비슷한 값으로 회복되었다. 이는 저온 스트레스 처리 전 6일간의 UV-A 처리에 의해 사전에 축적된 2차 대사산물 및 그에 따라 증가된 항산화능력 때문에 저온 스트레스에 대한 저항성이 향상된 것으로 판단된다.

식물의 세포막을 구성하는 인지질 이중층은 온도의 영향을 많이 받으며 저온에서 겔로 상전이 되어 물질의 투과성이 증가된다[27]. 따라서 저온에서는 세포 밖으로의 물질 유출이 증가하며 세포내 이온 균형이 깨짐에 따라 세포가 손상을 받고 파괴된다. UV-A 광이 조사된 고추 묘는 저온 처리 직후의 전해질 유출이 대조구에 비해 낮았고 특히, 385 nm UV-A의 전해질 유출 값은 유의적으로 가장 낮았으며 저온 스트레스에 의한 시듦 손상도 가장 적었다(Fig. 2B와 Fig. 3B). 기존 연구[4]은 건조 스트레스 조건 하에서 유리 페놀화합물이 세포벽과 결합하여 세포벽이 더 강화되어 물 투과성이 낮아진다고 보고하였다. 또한, Clarke과 Robinson[28]은 용해성 페놀화합물과 같은 UV 차단 물질이 세포벽에 결합되고 이는 UV에 대한 중요한 방어 반응이라고 보고하였다. 본 실험에서도 UV-A 광에 의해 유도되어 생성된 페놀화합물이 세포벽 강화에 기여하여 전해질 유출을 감소시킨 것으로 생각된다(Fig. 4A). 하지만 UV-A 광에 의한 세포벽 강화와 관련된 반응을 좀 더 명확하게 확인하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

UV-A 광 스트레스에 대응하는 방법으로 식물은 UV 광을 흡수하는 하이드록시신남산류, 플라보노이드류, 안토시아닌류와 같은 페놀화합물을 잎의 표피세포에 축적시켜 엽육조직을 보호한다[4, 10, 14, 29]. 페놀화합물의 수산기는 산화환원 전위를 조절할 수 있는 치환기로 활성산소(ROS: reactive oxygen species)를 소거시킬 수 있는 높은 항산화능력을 갖고 있다[12]. UV-A광은 페놀화합물 생합성과 관련된 CHS(chalcone synthase)와 PAL(phenylalanine ammonia-lyas) 유전자의 발현 수준을 증가시켰고*Camellia sinensis*에서는 안토시아닌 함량을 케일에서는 플라보노이드와 페놀화합물 함량을 증가시켰다[14, 23]. 본 실험의 결과에서도 두 UV-A 광 처리 동안 고추 묘의 잎에서 총 페놀화합

물과 항산화도의 유의적인 증가를 확인하였다. 저온 스트레스는 식물체 내에서 세포막의 유동성을 감소시키고 활성산소(ROS)를 발생시켜 산화적 스트레스를 야기시킨다[4, 26]. 따라서 식물은 저온 저항성과 관련된 2차대사산물을 생성해 저온에 의한 손상을 방어한다[14, 25]. 저온 처리 후 저온 스트레스에 의해 대조구의 총 페놀화합물과 항산화도가 증가한 반면UV-A 광에 조사된 고추 묘의 총 페놀화합물은 증가하지 않았다(Fig. 4). 이는 UV-A 광에 의해 저온 저항성에 일조하는 항산화적 페놀화합물를 포함한 2차 대사산물이 이미 축적되었기 때문이라고 생각된다. 또한, 스트레스가 없는 회복 기간 동안에는 두 UV-A 광 처리구의 총 페놀화합물 함량과 항산화도는 대조구보다 높았다.

우리는 고추 묘에 370 nm와 385 nm 피크파장을 갖는 UV-A 를 30 $W \cdot m^{-2}$의 에너지 수준으로 6일 동안 연속 조사 후 저온 저항성을 평가하였다. UV-A 광 조사는 고추 묘의 생장에 부정적인 영향을 주지 않았고 370 nm UV-A 광 조사만이 엽록소 형광을 유의적으로 감소시켰다. UV-A 광 조사는 고추 묘의 항산화적 페놀화합물 축적을 유도하였고 저온 스트레스에 의한 전해질 유출을 감소시켰으며 이는 UV-A 처리가 저온 저항성을 증대시켰음을 의미한다. 따라서, 스마트팜과 식물공장과 같은 환경 제어가 가능한 식물생산 시스템에서 정식 전 고추 묘에 일정시간 동안 추가적인 UV-A 광 조사는 정식 후 이상 저온에 의한 피해를 최소화 할 수 있는 우량묘 생산 기술로써 활용이 가능 할 것으로 판단된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Kim JS, Hong JS (2008) Quality characteristics of fresh pasta noodle added with red hot pepper juice. Korean Journal of Food and Cookery Science, 24(2), 882-890.
2. Materska M, Perucka I (2005) Antioxidant activity of the main phenolic compounds isolated from hot pepper fruit (*Capsicum annuum* L.). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53, 1750-1756. https://doi.org/10.1021/jf035331k.
3. Oboh G, Puntel RL, Rocha JBT (2007) Hot pepper (*Capsicum annuum*, Tepin and *Capsicum chinese*, Habanero) prevents Fe^{2+}-induced lipid peroxidation in brain–in vitro. Food Chemistry, 102, 178-185. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.048.
4. Gall HL, Philippe F, Domon JM, Gillet F, Pelloux J, Rayon C (2015) Cell wall metabolism in response to abiotic stress. Plants, 4, 112-166. https://doi.org/10.3390/plants4010112.
5. Yang P, Wang Y, Bian Z (2019) Effects of brassinosteroids on photosynthetic performance and nitrogen metabolism in pepper seedlings under chilling stress. Agronomy, 9, 839. https://doi.org/10.3390/agronomy9120839.
6. Korkmaz A, Korkmaz Y, Demirkiran AR (2010) Enhancing chilling stress tolerance of pepper seedlings by exogenous application of 5-aminolevulinic acid. Environmental and Experimental Botany, 67, 495-501. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.07.009.
7. Park EJ, Heo Y, Son BG, Choi YW, Lee YJ, Park YH, Cho JH, Hong CO, Lee SG, Kang JS (2014). The influence of abnormally low temperatures on growth and yield of hot pepper (*Capsicum annum* L.). Journal of Environmental Science International, 23, 781-786. https://doi.org/10.5322/JESI.2014.5.781.
8. Khoshimkhujaev B, Kwon JK, Park KS, Choi HG, Lee SY (2014) Effect of monochromatic UV-A LED irradiation on the growth of tomato seedlings. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 55, 287-292. https://doi.org/ 10.1007/s13580-014-0021-x.
9. Sarghein SH, Carapetian J, Khara J (2011) The effects of UV radiation on some structural and ultrastructural parameters in pepper (*Capsicum longum* A. DC.). Turkish Journal of Biology, 35, 69-77. https://doi.org/10.3906/biy-0903-11.
10. Wilson KE, Thompson JE, Huner NPA, Greenberg BM (2001) Effects of ultraviolet-a exposure on ultraviolet-B–induced accumulation of specific flavonoids in *Brassica napus*. Photochemistry and photobiology, 73, 678-684. https://doi.org/10.1562/0031-8655(2001)0730678EOUAEO2.0.CO2.
11. Cartea ME, Francisco M, Soengas P, Velasco P (2011) Phenolic compounds in *Brassica* vegetables. Molecules, 16, 251-280. https://doi.org/10.3390/molecules16010251.
12. Gill SS, Tuteja N (2010) Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. Plant Physiology and Biochemistry, 48, 909-930. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016.
13. Lee MJ, Son JE, Oh MM (2013) Growth and phenolic content of sowthistle grown in a closed-type plant production system with a UV-A or UV-B lamp. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 54, 492-500. https://doi.org/10.1007/s13580-013-0097-8.
14. Lee JH, Oh MM, Son KH (2019) Short-term ultraviolet (UV)-A light-emitting diode (LED) radiation improves biomass and bioactive compounds of kale. Frontiers in Plant Science, 10, 1042.

https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01042.

15. Park SM, Cho EK, An JH, Yoon BH, Choi KY, Choi EY (2019) Plant growth and ascorbic acid content of *Spinacia oleracea* grown under different light-emitting diodes and ultraviolet radiation light of plant factory system. Protected Horticulture and Plant Factory, 28, 1-8. https://doi.org/10.12791/KSBEC.2019.28.1.1.
16. Brazaitytė1 A, Viršilė A, Jankauskienė J, Sakalauskienė S, Samuolienė G, Sirtautas R, Novičkovas A, Dabašinskas L, Miliauskienė J et al. (2015) Effect of supplemental UV-A irradiation in solid-state lighting on the growth and phytochemical content of microgreens. International Agrophysics, 29, 13-22. https://doi.org/10.1515/intag-2015-0004.
17. Naikoo MI, Dar MI, Raghib F, Jaleel H, Ahmad B, Raina A, Khan FA, Naushin F (2019) Plant Signaling Molecules, pp. 157-168, Woodhead Publishing, UK.
18. Salama HMH, Watban AAA, Al-Fughom AT (2011) Effect of ultraviolet radiation on chlorophyll, carotenoid, protein and proline contents of some annual desert plants. Saudi Journal of Biological Sciences, 18, 79-86. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2010.10.002.
19. Park SY, Kim HT, Oh MM (2014) Effect of exogenous application of salicylic acid or nitric oxide on chilling tolerance and disease resistant in pepper seedlings. Protected Horticulture and Plant Factory, 23, 329-336. https://doi.org/10.12791/KSBEC.2014.23.4.329.
20. Miller NJ, Rice-Evans CA (1996) Spectrophotometric determination of antioxidant activity. Redox Report, 2, 161-171. https://doi.org/10.1080/13510002.1996.11747044.
21. Higuchi Y, Hisamatsu T (2016) LED Lighting for urban agriculture, pp. 57-73, Springer. Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0.
22. Brelsford CC, Morales L, Nezval J, Kotilainen TK, Hartikainen SM, Aphalo PJ, Robson TM (2019) Do UV-A radiation and blue light during growth prime leaves to cope with acute high light in photoreceptor mutants of *Arabidopsis thaliana*? Physiologia Plantarum, 165, 537-554. https://doi.org/10.1111/ppl.12749.
23. Li W, Tan L, Zou Y, Tan X, Huang J, Chen W, Tang Q (2020) The effects of ultraviolet A/B treatments on anthocyanin accumulation and gene expression in dark-purple tea cultivar 'Ziyan' (Camellia sinensis). Molecules, 25, 354. https://doi.org/10.3390/molecules25020354.
24. Vaštakaitė V, Viršilė A, Brazaitytė A, Samuolienė G, Jankauskienė J, Sirtautas R, Duchovskis P (2015) The effect of UV-A supplemental lighting on antioxidant properties of *Ocimum basilicum* L. microgreens in greenhouse. In Proceedings of the 7th international scientific conference rural development, pp. 1-7. Aleksandras Stulginskis University, Lithuania. https://doi.org/10.15544/RD.2015.031.
25. Baker NR, Roseqvist E (2004) Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. Journal of Experimental Botany, 55, 1607-1621. https://doi.org/10.1093/jxb/erh196.
26. Lee JH, Oh MM (2015) Short-term low temperature increases phenolic antioxidant levels in kale. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 56, 588-596. https://doi.org/10.1007/s13580-015-0056-7.
27. Upchurch RG (2008) Fatty acid unsaturation, mobilization, and regulation in the response of plants to stress. Biotechnology Letters Volume, 30, 967-977. https://doi.org/10.1007/s10529-008-9639-z.
28. Clarke LJ, Robinson SA (2008) Cell wall-bound ultraviolet-screening compounds explain the high ultraviolet tolerance of the Antarctic moss, *Ceratodon purpureus*. New Phytologist, 179, 776-783. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02499.x.
29. Zlatev ZS, Lidon FJC, Kaimakanova M (2012) Plant physiological responses to UV-B radiation. Emirates Journal of Food and Agriculture, 24, 481-501. https://doi.org/10.9755/ejfa.v24i6.14669.