

식물생장용 LED 램프의 적정 수냉조건 및 열교환량 분석

박종호¹ · 이재수¹ · 김동억² · 김용현^{1*}

¹전북대학교 생물산업기계공학과, ²국립농업과학원 농업공학부

Analysis of Optimum Water Cooling Conditions and Heat Exchange of LED Lamps for Plant Growth

Jong Ho Park¹, Jae Su Lee¹, Dong Eok Kim², Yong Hyeon Kim^{1*}

¹Dept. of Bioindustrial Machinery Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, 561-756, Korea

²Dept. of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, Suwon, 441-707, Korea

(Received: September 16th, 2011; Revised: October 6th, 2011; Accepted: October 13th, 2011)

Abstract

This study was conducted to compare the characteristics of heat dissipated from LED lamps with water cooling method and natural cooling method in a closed-type plant production system (CPPS) and to determine the optimum water temperature and flow rate for LED lamps with water cooling method. The experiments were performed in CPPS maintained at temperature of 24°C and humidity of 70%. As compared to the LED lamps operated at water temperature of 22.5±1.2°C and flow rate of 1,521±3.3 mL·min⁻¹, air temperature under LED lamps with natural cooling was approximately increased by 1°C and photosynthetic photon flux was decreased by 10 μmol·m⁻²·s⁻¹. PPF illuminated from LED lamps was affected by forward voltage varied by the surface temperature of LED lamps. Forward voltage of LED lamps was decreased with increasing surface temperature and then PPF was proportionately decreased. Five levels (14°C, 17°C, 20°C, 23°C, 26°C) of water temperature and three levels (500 mL·min⁻¹, 1,000 mL·min⁻¹, 1,500 mL·min⁻¹) of flow rate were provided to analyze the change of surface temperature and heat exchange of LED lamps. Heat exchange was increased with decreasing water temperature and increasing flow rate. At flow rate of 1,000-1,500 mL·min⁻¹ and water temperature of 22.0-22.6°C, surface temperature of LED lamps can be approached to 24°C that was almost same as air temperature in CPPS. The calorific value generated from LED lamps used in the study was estimated to be 103.0 kJ·h⁻¹.

Keywords : LED lamps, Water cooling, Heat exchange, Forward voltage, Plant growth

1. 서론

최근 기후변화와 소비자의 식생활 패턴 변화로 고품질 작물의 안정적인 생산을 위한 시설재배에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 인공광을 이용한 작물의 성장 촉진과 기능성 향상에 관련한 연구(Tibbitts et al., 1983; Li and Kubota,

2009; Park et al., 2010)가 활발히 이루어지고 있다. 인공광은 식물의 광합성과 광형태형성 반응에 커다란 영향을 주므로 재배목적에 적합한 인공광원의 선정이 중요하다(Kim, 1999).

현재까지 인공광원으로는 고압나트륨등, 메탈할라이드등, 형광등, LED 램프가 사용되고 있다. 특히, 비교적 근접조명에 유리한 형광등이나 LED 램프가 육묘 및 엽채류 재배에 많이 이용되고 있다. LED 램프는 형광등에 비하여 에너지를 절감할 수 있으며, 수명이 길고, 광질 선택 및 광양 제어가 용

*Corresponding author: Yong Hyeon Kim
Tel: +82-63-270-2618; Fax: +82-63-270-2620
E-mail: yhkim@jbnu.ac.kr

이하라는 장점을 지니고 있다(Kim, 1999; Oh, 2011). 그러므로 LED를 이용한 조직배양묘의 생장 특성(Eun et al., 2000), 접목묘의 활착 특성(Kim and Park, 2003), 육묘 과정에서의 묘소질 향상(Lee et al., 2010; Um et al., 2009), 과채류의 보광 효과(Brown et al., 1995; Dillard et al., 2008; Lee et al., 2010)에 관한 연구가 보고된 바 있다.

그런데, LED조명은 발열에 의한 열화현상으로 그 수명이 단축될 수 있어 발열에 따른 안정적인 냉각 방법이 필요하다(Kim and Ham, 2009). 또한, LED 램프에서 발열이 원활하지 않을 경우, 광효율의 감소, 색온도의 변이, 조명 시스템의 신뢰성 저하 등의 문제가 나타날 수 있으므로 효율적인 발열 설계가 중요하다(Park et al., 2009). 최근 고효율 LED 램프의 유효수명에 대한 연구(Lee et al., 2008; Chan and Jang, 2010)와 히트파이프를 이용한 LED 램프의 방열 성능 최적화에 대한 연구(Hwang and Lee, 2011)가 보고된 바 있다. 그러나 이러한 연구들은 식물생장용 LED 램프를 대상으로 수행된 것이 아니어서 광합성유효광양자속에 기초한 유효수명 분석, 발열량, 주위 온도에 따른 파장 및 광양 변화, 제어기의 특성(주파수, 듀티비, 응답속도)등의 자료가 부족한 상황이며, 특히, 광합성유효광양자속(photosynthetic photon flux, PPF)에 기초하여 실험된 사례가 없다.

현재의 방열 설계 기술로서 LED chip의 발광효율이 현저하게 개선되지 않는다면 자연냉각만으로 LED 방열핀의 표면온도를 상온 수준으로 낮추는 데 한계가 있을 것으로 판단된다. 더구나 많은 광양을 필요로 할 경우, 출력에 비례하여 LED 모듈에서의 발열이 증가하므로 LED 램프에 대한 추가적인 냉각이 요구된다. 본 연구는 LED 램프로부터의 발열을 해결하고자 폐쇄형 식물생산시스템(이하 ‘폐쇄형시스템’)에서 수냉식과 자연냉각식 LED 램프의 발열 특성을 분석하고, 수냉식을 적용하였을 때 LED 램프의 적정 운전조건 즉, 냉각수의 유량과 수온을 결정하고자 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 측정 시스템 구성

본 실험을 위하여 폐쇄형시스템 내부의 재배선반에 LED 램프를 설치하고, 외부에 10,048.3 kJ·h⁻¹의 열교환 능력을 지닌 공랭식 냉각기(DA-1000B, DAEIL, Korea)와 체적이 50 L인 물탱크에 2 kW급 티타늄 히터를 설치하고, 수온 조절을 위한 냉각기 제어기(DOV-882, DAEIL, Korea)와 히터 제어기(OKE-6422H, IMTech, Korea)를 설치하였다. 또한, 관로손실과 손실수두를 고려하여 물탱크와 냉각기 사이에 유체펌프(PBS-43EP-1, HANIL, Korea)를 설치하였다(Fig. 1). 실험용 LED 램프는 가로 1,200 mm, 지름 45 mm의 크기로

서 120°의 방사각을 가지며, 1,200 × 450 × 400 mm 크기를 갖는 재배선반의 윗면에 90 mm 간격으로 5개를 설치하였다(Fig. 2). 각각의 LED 램프를 냉각시키기 위한 배관은 램프의 LED모듈기판 뒷면에 부착된 알루미늄 소재의 방열판 내부에 지름 8 mm의 원형 파이프 형태로 가공되었으며, 호스를 이용하여 직렬로 연결하였다.

냉각수 온도와 LED 램프의 표면온도를 측정하고자 -200~100±0.3°C의 정밀도를 지닌 Pt 100Ω의 RTD 센서(YOUNGJIN ENG., Korea)와 -267~260±0.5°C의 열전대(T-type, OMEGA, USA)를 데이터로거(CR-23X, Campbell, USA)에 연결하였다. RTD 센서는 LED 램프의 냉각수 입구와 출구측 배관에 T형 커넥터를 이용하여 설치하였으며, 열전대는 5개의 LED 램프에 부착된 알루미늄 방열판의 정중앙에 설치하였다. 유량을 측정하고자 출구측 배관에 0.3~3 L·min⁻¹, 정밀도± 2%인 유량센서(ND05-PATAAC-RC, Aichi tokei denki Co., Ltd., Japan)를 설치하여 상기의 데이터로거에 연결하였다.

실험에 사용된 LED 램프는 3개의 chip으로 구성된 120개의 적색 LED모듈과 120개의 청색 LED모듈을 이용하여 2열로 구성된 막대형으로서 최대출력은 약 40 W이다. 청색과 적색 LED모듈의 피크파장은 각각 450 nm와 660 nm로서 청색광과 적색광의 단일 또는 혼합 조사가 가능하다. 폐쇄형시스템 내부에 총 44개의 LED 램프를 설치하였으나, 실험의 편의를 위하여 1개의 선반에 설치된 5개의 LED 램프를 기반으로 발열 특성을 검토하였다. 자연냉각식 또는 수냉식의 적용이 모두 가능하도록 설계된 LED 램프에 자연냉각식을 적

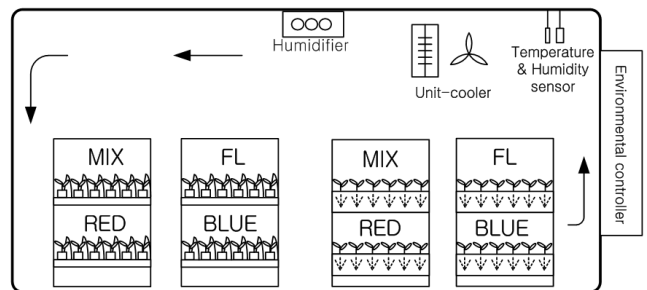


Fig. 1 Configuration of closed plant production system.

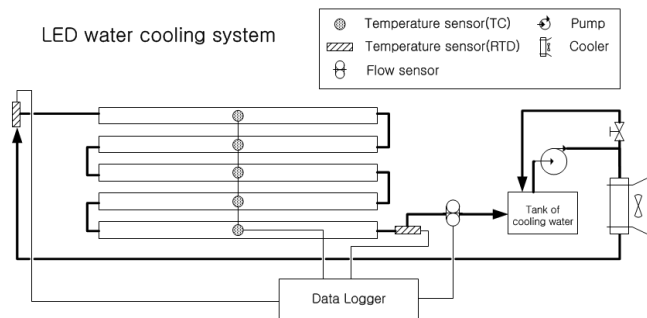


Fig. 2 Configuration of water cooling system for LED.

용할 경우, 외부기온이 24°C일 때 방열핀의 표면온도는 50°C 이하를 유지하도록 설계되었다. LED 램프에서 발열된 열전달 과정을 살펴보면 LED chip에서의 발광과 더불어 발생된 열이 chip을 보호하는 LED 모듈에 전달되고, LED모듈을 고정하는 MPCB(Metal printed circuit board)를 거쳐 80 mm의 중공으로 이루어진 반원형 알루미늄 방열핀을 통해 외기로 방열된다. LED 램프의 구체적인 방열 구조 설계는 제조회사의 컴퓨터를 이용한 방열 시뮬레이션을 거쳐 이루어졌다.

나. 실험 방법

1) 자연냉각식과 수냉식 LED 램프의 발열 특성(실험 I)

재배선반 내의 자연대류에 의해 냉각이 이루어지는 자연냉각식과 수냉식 LED 램프의 발열 특성을 분석하기 위하여 폐쇄형시스템의 온도와 습도를 각각 24°C, 70%로 설정한 가운데, 광양, 표면온도, 입구측 수온과 출구측의 수온, 재배선반 내의 기온 등을 측정하였다. 광양을 측정하고자 재배선반의 정중앙 위치에서 LED 램프로부터 수직하 방향으로 20 cm 및 30 cm 떨어진 지점에 광양자센서(LI-190S, LI-COR, USA)를 설치하고, 데이터로거에 연결하였다. 재배선반 내부의 기온은 광원으로부터 25 cm 떨어진 지점에서 RTD센서를 이용하여 측정하였으며, 폐쇄형시스템의 내부기온과 상대습도는 시스템의 환경제어기(IPC-5000D, Honeywell, USA)에 연결된 RTD센서와 전자식 습도센서(CHS-UPS, TDK, Japan)를 이용하여 측정하였다. 또한, LED 램프의 전압과 전류는 멀티미터(2100D, Keithley, USA)를 이용하여 광양 및 표면온도가 정상상태(steady-state)에 도달하였을 때 측정하였다. LED 램프의 표면온도와 광양은 냉각수 유량을 1,500 mL·min⁻¹로 일정하게 유지하고, 입력측 수온을 조절하면서 측정하였다. 유량의 결정은 예비실험을 통하여 폐쇄형시스템에 6개의 재배선반에 거치된 44개의 수냉식 LED 램프에 동일하게 순환시킬 수 있는 최대유량과 수온변화에 대한 표면온도 변화의 응답속도를 고려하여 결정하였다. 각각의 특성은 1분 간격으로 데이터로거에 기록되었으며, 수온 설정 변경 후 안정화되는 2시간 이후에 1시간 정도의 데이터를 기반으로 분석되었다.

2) 수냉식 LED 램프의 운전 조건 설정(실험 II)

폐쇄형시스템 내부의 온도와 습도를 각각 24°C, 70%로 설정한 가운데 LED의 표면온도를 과도하게 올리지 않고, 주위

의 온도와 동일하게 유지할 수 있는 수온 및 유량 조건을 찾기 위하여 5수준(14°C, 17°C, 20°C, 23°C, 26°C)의 냉각수 수온과 3수준(500 mL·min⁻¹, 1,000 mL·min⁻¹, 1,500 mL·min⁻¹)의 냉각수 유량이 LED 램프의 표면온도와 열교환량에 미치는 효과를 검토하였다. 이 때 LED 램프를 계속 점등한 상태에서 각 설정 수온과 유량에 따른 LED 램프의 표면온도와 입·출구에서의 수온을 측정하였다. 수냉식 LED 램프의 열교환량(Q, kJ·h⁻¹)은 다음 식으로 계산되었다.

$$Q = C_w \cdot m \cdot (t_{wo} - t_{wi}) \quad (1)$$

단, C_w : 물의 비열(=4.1868 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹)

m : 물의 질량(kg·h⁻¹)

t_{wi} : 입구측 수온(°C)

t_{wo} : 출구측 수온(°C)

3. 결과 및 고찰

가. 자연냉각식과 수냉식 LED 램프의 발열 특성(실험 I)

실험기간 동안 폐쇄형시스템의 내부 환경을 측정한 결과 기온과 습도는 각각 24.0±0.2°C, 68.3±3.8%로 나타났다. 냉각 방식이 LED 램프로부터 조사된 광강도에 미치는 효과를 검토한 결과 수냉식 LED 램프의 표면온도가 자연냉각식에 비하여 더 낮게 나타난 가운데 광양은 자연냉각식에 비하여 10 μmol·m⁻²·s⁻¹ 정도 높게 나타났다(Table 1). 수냉식은 재배선반 내부의 기온에 영향을 미치지 않았으나, 자연냉각식에서는 재배선반 내부의 기온이 약 1°C 정도 높게 나타났다. 이러한 결과는 일정한 전류에서 LED 모듈을 구성하는 chip의 주위온도(ambient temperature)에 따라 구동전압(forward voltage)이 변화하기 때문이다(Fig. 3). 측정된 표면온도는 제조사의 설계사양 범위 안에서 변화하였다. 임의의 LED 램프 2개를 선택하여 입력측에서 전압 및 전류를 측정한 결과, 표면온도가 23.9±1.1°C인 수냉식의 구동전력은 35.23 W로서 표면온도가 45.0±2.5°C인 자연냉각식의 34.17 W에 비하여 1 W 이상 높게 나타났다. 이는 LED 램프의 표면온도가 낮아질수록 동일한 전류에서 LED chip의 구동전압이 상승하여 LED 램프의 구동전력이 높아진 것으로 판단된다(Table 2). 한편, 냉각방법과는 무관하게 적색 LED의 전력소비가 청색

Table 1 Comparison of PPF illuminated from LED lamps and surface temperatures of LED lamps by cooling methods

Cooling methods	PPF at 20 cm apart from LED Lamps (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	Surface temperature of LED Lamps (°C)	Air temperature (°C)
Water cooling	338.1±1.0	23.9±1.1	24.1±0.9
Natural cooling	328.1±0.3	45.0±2.5	25.0±0.8

Table 2 Comparison of power consumption of red and blue LED by cooling methods

Cooling methods	Number of LED bars	Red LED			Blue LED			Mixed power (W)	Average of Power (W)
		Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)		
Water cooling	1	30.81	0.44	13.49	31.90	0.68	21.56	35.06	35.23
	2	31.31	0.46	14.25	31.85	0.66	21.15		
Natural cooling	1	28.81	0.45	12.85	31.23	0.68	21.14	33.99	34.17
	2	29.18	0.46	13.48	31.29	0.67	20.87		

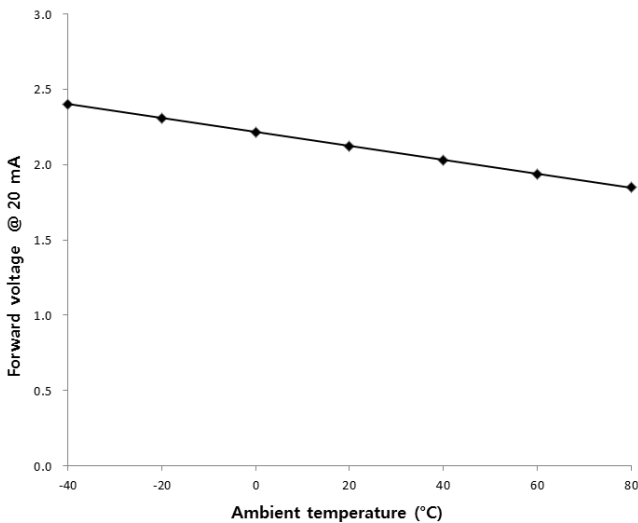


Fig. 3 Forward voltage of red LED chip as affected by ambient temperature (from manufacturer’s catalog).

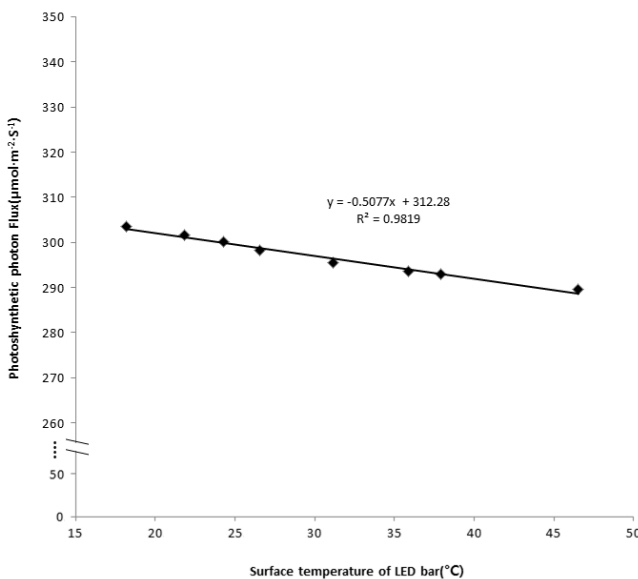


Fig. 4 Photosynthetic photon flux as affected by surface temperature of LED lamps.

LED에 비해 더 낮게 나타났다. 제조사의 적색 LED chip 사양에 따르면, 적색 LED의 구동전력은 온도 24°C에서 15.16 W, 온도 45°C에서 14.46 W로 약 1.7 W의 감소가 예상된다.

이는 LED 램프의 표면 온도가 LED chip의 주위온도와 유사하다고 가정한 결과이다(Fig. 3). 실험 결과에 따르면 적색 LED의 구동전력 차이가 약 0.7 W로 예상보다 작았으나, LED 램프의 표면온도에 따른 LED chip의 주위온도 변화로 발생하는 구동전력의 차이가 광량의 차이를 초래한 것으로 판단된다. 청색 LED의 경우는 제조사의 사정으로 청색 LED chip 사양에 온도에 따른 구동전압 변화 특성 실험이 진행되지 않아 확인 할 수 없었으나, 실험 결과를 미루어 판단할 때 약 0.3 W 정도의 차이가 있었던 것으로 판단된다. 반복실험에서 수냉식 LED 램프의 표면온도에 따른 광량변화(광원으로부터 30 cm 떨어진 위치)는 46.5°C의 표면온도에서 289.6 µmol·m⁻²·s⁻¹로서 24.3°C의 300.2 µmol·m⁻²·s⁻¹에 비해서 약 10.7 µmol·m⁻²·s⁻¹ 정도 작게 나타났다. 비록 광량의 변화가 크지 않았으나, LED 램프의 표면온도가 증가함에 따라 광량이 비례적으로 감소하였다(Fig. 4).

따라서, 수냉식을 적용하여 LED 램프를 적정 조건으로 운전하면 폐쇄형시스템의 재배선반 내부 기온에 미치는 영향을 줄이며, 광양 측면에서 약간의 이득이 있을 것으로 판단된다. 자연냉각식의 경우 수냉식에 비하여 광량이 다소 떨어지고, LED 램프의 방열에 의해 주위 기온에 영향을 미치나, 광원과 작물과의 거리를 충분하게 확보할 수 있고 폐쇄형시스템의 냉방부하가 충분하다면 시설이 상대적으로 단순하기 때문에 수냉식 LED 램프에 비해 초기 투자비용이 절감될 것으로 판단된다. 하지만, 장기적으로 보았을 때 수냉식 LED 램프는 폐쇄형시스템에서 적정한 조건으로 운전한다면 LED 램프의 방열에 의한 주위 기온에 영향을 미치지 않아 선반 높이를 최대한 낮게 설계하여 근접조명을 할 수 있고, 이에 따른 재배 면적 증가와 거리에 따른 광양 증가로 LED 램프의 수요를 줄일 수 있으며, 또한, LED의 수명을 안정적으로 유지할 수 있다는 점에서 가치가 있다고 판단된다. 특히, LED 램프가 수냉식으로 설계될 경우 LED 모듈에 흐르는 전류를 유효 수명에 영향을 미치지 않는 수준까지 올릴 수 있어 저렴한 비용으로 최대 광량의 확보가 가능한 LED 램프 제작이 가능할 것이다. 그러므로, 향후 LED 램프의 냉각방식에 따른 유효수명과 발열량, LED 온도에 따른 광양 변화에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

나. 수냉식 LED 램프의 열교환량 및 운전조건 설정(실험 II)

본 실험은 실험 I의 결과에 기초하여 재배선반 내의 기온 영향이 적은 수냉식 LED 램프의 적정 운전조건을 결정하고자 수행되었다. 수냉식의 설정 수온과 유량에 따른 LED 표면온도, 입구측 수온(T_{wi}), 출구측 수온(T_{wo})과 이를 이용한 LED 램프 1개의 열교환량을 산출한 결과는 다음과 같다 (Table 3, Fig. 5). 수온이 낮고 유량이 증가할수록 LED 램프의 열교환량이 증가한 가운데 LED 램프의 표면온도는 설정 유량보다 설정 수온에 의해서 더 큰 영향을 받는 것으로 나타

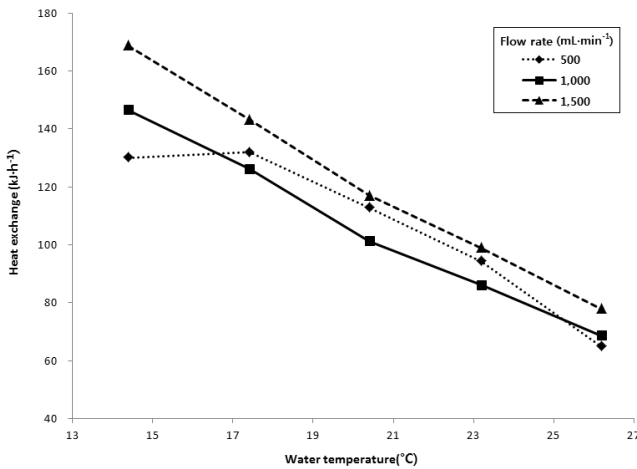


Fig. 5 Heat exchange as affected by water temperature and flow rate of water cooling system.

났다(Fig. 6, 7). 유량이 $1,000 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 또는 $1,500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 인 경우 설정수온이 낮을수록 열교환량이 높게 나타났다. 한편, 유량이 $500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 의 경우 설정 수온이 17°C 까지 낮아질수록 열교환량이 증가하였으나, 수온이 17°C 보다 낮은 14°C 에서는 열교환량이 감소하였다. 설정 조건 가운데 최대 열교환량은 설정 수온 14°C , 유량 $1,500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 에서 $168.62 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 나타났다. 이 경우, 44개의 LED 램프의 열교환 요구량은 $7,419.41 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 산출되었다. 최소 열교환량은 설정수온 26°C , 유량 $500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 에서 $64.87 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 나타났다. 이 경우, 44개의 LED 램프의 열교환 요구량은 $681.56 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 산출되었다.

실험 I의 결과에 기초하여 수냉식 LED 램프의 적정 표면온도를 폐쇄형시스템의 기온과 동일한 수준인 24°C 로 설정한다면, 표면온도가 $24.4\pm 0.4^\circ\text{C}$ 로 나타나는 설정 수온 23°C , 유량 $1,500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 의 조건과 표면온도가 $24.2\pm 1.1^\circ\text{C}$ 로 나타나는 설정 수온 20°C , 유량 $500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 가 적정 운전 조건에 해당될 것이다. 그런데 후자의 경우, LED 램프들의 표면온도 편차가 크게 나타났다. 그러므로 이 경우를 제외하면 수냉식 LED 램프의 적정 운전 조건은 설정 수온 23°C , 유량 $1,500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 이며, 이 때 열교환량은 $98.84 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 로 나타났다.

정확한 설정 수온과 유량을 예측하기 위하여 입구측 수온에 따른 유량별 표면온도 변화를 분석하였다. 동일 입구측 수온에 대하여 유량이 $1,500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 인 조건에서 표면온도가

Table 3 Measured water temperatures at inlet and outlet and surface temperature of LED lamps by setting values of water temperature and flow rate of water cooling system

Setting values		Measured water temperature (°C)		Measured surface temperature of LED	Measured flow rate (mL·min ⁻¹)	Calculated heat exchange of a LED bar (kJ·h ⁻¹)
Water temperature (°C)	Flow rate (mL·min ⁻¹)	Inlet	Outlet			
14	500	14.6±0.3	19.7±0.1	19.7±1.4	502.0±1.3	130.05
	1,000	14.5±0.5	17.4±0.2	18.2±1.1	997.7±1.9	146.58
	1,500	14.3±0.5	16.6±0.3	17.5±1.1	1,489.8±3.6	168.62
17	500	17.4±0.1	22.5±0.2	21.7±1.1	518.8±8.4	131.97
	1,000	17.3±0.4	19.8±0.2	20.4±0.9	1,006.2±1.5	126.15
	1,500	17.3±0.5	19.2±0.3	19.7±0.9	1,522.7±4.7	143.18
20	500	20.2±0.1	24.8±0.0	24.2±1.1	484.4±10.7	112.81
	1,000	20.8±0.3	22.8±0.1	22.7±0.5	989.0±2.5	101.11
	1,500	20.2±0.2	21.7±0.1	21.8±0.5	1,486.4±2.2	116.89
23	500	23.1±0.2	27±0.0	26.4±1.0	475.5±9.2	94.20
	1,000	23.4±0.2	25.2±0.1	25.1±0.4	986.8±3.0	86.01
	1,500	23.1±0.2	24.4±0.1	24.4±0.4	1,494.6±2.5	98.84
26	500	26.2±0.2	28.7±0.1	28.6±0.6	504.5±2.1	64.87
	1,000	26.2±0.3	27.7±0.1	27.5±0.4	935.9±4.5	68.52
	1,500	26.3±0.2	27.3±0.2	27.1±0.3	1,503.5±1.8	77.87

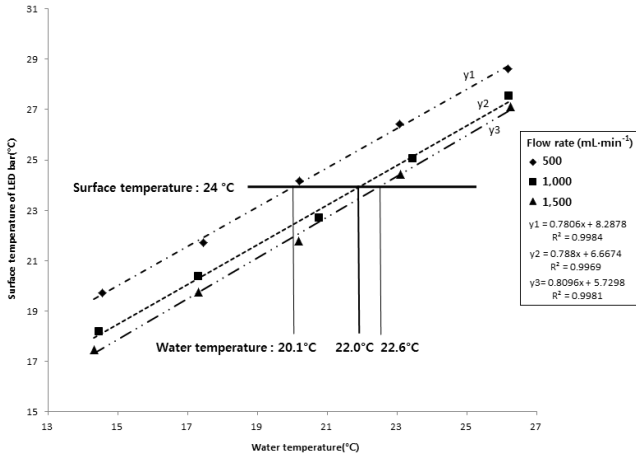


Fig. 6 Surface temperature as affected by water temperature of water cooling system.

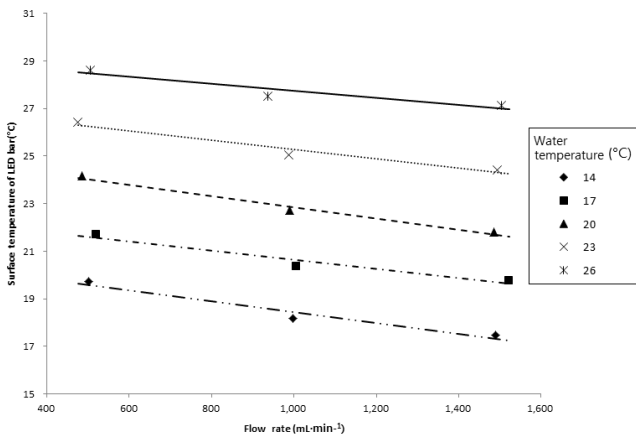


Fig. 7 Surface temperature as affected by water flow rate of water cooling system.

가장 낮았으며, 다음으로 1,000 mL·min⁻¹, 500 mL·min⁻¹ 순으로 나타났다(Fig. 6). LED 램프의 적정 동작 표면온도를 24°C로 간주할 때 설정 유량 500 mL·min⁻¹, 1,000 mL·min⁻¹, 1,500 mL·min⁻¹에 따라 입구측 수온을 각각 20.1°C, 22.0°C, 22.6°C로 설정하는 것이 적절하다. 그런데 Table 3에서 유량이 500 mL·min⁻¹인 경우는 각 설정 수온에서 LED 표면온도의 편차가 크게 나타나 유량이 적은 것으로 판단되므로 적정 운전 조건에서 제외하면, 유량 1,000 mL·min⁻¹, 1,500 mL·min⁻¹에 입구측 수온을 각각 22.0°C, 22.6°C로 설정할 수 있을 것이다. 표면온도와 출구측 수온과의 편차가 거의 없음을 고려하여 출구측 수온이 표면온도와 같다고 가정하면 수냉식 LED 램프 1개당 열교환량은 각각 100.48 kJ·h⁻¹, 105.51 kJ·h⁻¹로 산출된다. 한편, 주어진 수냉식 시스템에서 수온과 유량 변화는 결과적으로 표면온도의 변화로 나타나는데, 본 연구에서 표면 온도가 증가함에 따라 열교환량이 선형 관계를 이루며 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 8).

폐쇄형시스템의 내부 기온과 LED 램프의 표면온도 차가

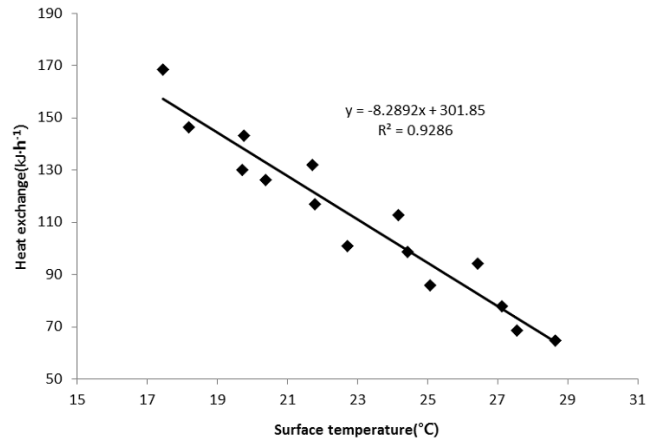


Fig. 8 Heat exchange as affected by surface temperature of LED lamp for water cooling system.

적기 때문에 LED 램프의 표면과 주위 공기 사이의 대류열전달은 무시할 만큼 작게 된다. 따라서 LED 램프에서 발열된 열량의 대부분이 열교환에 의해서 냉각되는 것으로 가정할 때 발열량 환산계수를 구할 수 있다. 예측된 운전 조건에 해당하는 설정 수온 22.0°C, 유량 1,000 mL·min⁻¹과 설정 수온 22.6°C, 유량 1,500 mL·min⁻¹인 경우에서의 열교환량을 계산하면, 본 연구에서 사용된 35.2 W의 LED 램프 발열량은 약 103.0 kJ·h⁻¹로 산출되며, 발열량 환산계수는 2.926 kJ·h⁻¹·W⁻¹에 해당한다. 실내조명의 발열량 예측에 대한 실험 연구(Choi et al., 2010)를 토대로 형광등의 발열량 환산계수를 구하면 1.555 kJ·h⁻¹·W⁻¹로 실험용 LED 램프에 비해 낮게 산출된다. 하지만, 실제 실험용 재배선반의 배지면에서 동일한 광량을 구성하기 위해 LED 램프는 5개를 사용한 반면 36 W인 형광등은 12개가 설치되었으므로, 동일 광량을 유지하는 LED 램프의 발열량과 형광등의 발열량은 각각 514.98 kJ·h⁻¹와 671.62 kJ·h⁻¹로 산출된다. 따라서 본 실험에 사용된 LED 램프를 설치하여 운용할 경우 형광등을 이용하는 것에 비하여 발열량이 23.3% 줄어들 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 LED 램프의 발열을 해결하고자 폐쇄형시스템에서의 자연냉각식과 수냉식 LED 램프의 차이점을 분석하고, 수냉식 LED 램프의 적정 운전조건 즉, LED 램프의 표면온도 및 열교환량에 따른 냉각수의 유량과 수온을 결정하고자 수행되었다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 폐쇄형시스템의 기온과 습도를 각각 24°C, 70%로 유지한 가운데 자연냉각식 LED 램프와 수냉식 LED 램

프를 설정 수온 22.5±1.2℃, 유량 1,521±3.3 mL·min⁻¹에서 운전한 결과, 자연냉각식은 수냉식에 비하여 처리구내의 주위 온도를 약 1℃정도 높였으며, 광양은 10 μmol·m⁻²·s⁻¹ 정도 낮게 나타났다.

- (2) LED 램프로부터 조사되는 광양은 LED 램프의 표면 온도에 따른 구동전압의 영향을 받는 것으로 나타난 가운데 표면온도가 높아질수록 구동전압은 낮아졌고 이에 따라 광양도 비례적으로 감소하였다.
- (3) 수냉식 LED 램프에서 5수준(14℃, 17℃, 20℃, 23℃, 26℃)의 수온과 3수준(500 mL·min⁻¹, 1,000 mL·min⁻¹, 1,500 mL·min⁻¹)의 유량이 LED 램프의 표면온도와 열교환량에 미치는 효과를 검토하였다. 수온이 낮고 유량이 증가할수록 LED 램프의 열교환량이 증가한 가운데 열교환량은 유량보다 수온의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다. 유량이 1,000 mL·min⁻¹, 1,500 mL·min⁻¹인 조건에서 수온을 각각 22.0℃, 22.6℃로 설정할 때 표면온도가 주위기온과 동일한 수준인 24℃를 유지할 것으로 예측되었다.
- (4) 본 연구에 사용된 35.2 W의 LED 램프의 발열량은 약 103.0 kJ·h⁻¹로 산출되었다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ006510)의 지원에 의해 이루어진 것임.

참고 문헌

1. Brown, C.S., A.C. Schuerger and J.C. Sager. 1995. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 120(5):808-813.
2. Chan, S.I., and J.S. Jang. 2010. A Review of Accelerated Life Tests for High Power Phosphor Converted White LEDs. *J. of the Korean Institute of Plant Engineering* 15(3):147-148. (In Korean)
3. Choi, J.S., H.S. Lim, K.A. Kim, K.H. Lee, J.O. Koo, and G. Kim. 2010. The Performance of Generated Heating Energy from Interior Lighting Fixtures. *J. of the KIEAE* 16(6):27-32. (In Korean)
4. Dillard, C.M., A.M. Eldemire, O.A. Monje, and J.C. Sager. 2008. Comparison of Spectral Combinations of Light Emitting Diodes for Crop Production. ASABE Paper No. 083894.
5. Eun, J.S., Y.S. Kim, and Y.H. Kim. 2000. Effects of Light Emitting Diodes on Growth and Morphogenesis of in vitro Seedlings in *Platycodon Grandiflorum*. *Korean J. of Plant Tissue Culture* 27(1):71-75. (In Korean)
6. Hwang, S.H. and Y.L. Lee. 2011. Study on Thermal Performance of Multiple LED Packages with Heat Pipes. *J. of the Korean Society of Mechanical Engineers* B35(6):569-575. (In Korean)
7. Kim, Y.H. 1999. Plant Growth and Morphogenesis Control in Transplant Production System using Light-emitting Diodes (LEDs) as Artificial Light Source - Spectral Characteristics and Light Intensity of LEDs -. *J. of the Korean Society of Agricultural Machinery* 24(2):115-122. (In Korean)
8. Kim, Y.H. and H.S. Park. 2003. Graft-taking Characteristics of Watermelon Grafted Seedlings as Affected by Blue, Red and Far-red Light-emitting Diodes. *J. of the Korean Society of Agricultural Machinery* 28(2):151-156. (In Korean)
9. Kim, K.Y., and K.K. Ham. 2009. The Technical Trend of Heat Dissipation for High Power LED Flood Light. *Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Conference* 2009(5):214-217. (In Korean)
10. Lee, M.H., S.J. Shin, and K.D. Kwack. 2008. Lifetime Estimation of High Power White LED for Lighting Use. *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference* 2008(11):1343-1348. (In Korean)
11. Lee, H.I., J.S. Lee, J.H. Park, and Y.H. Kim. 2010. Growth Characteristics of Sweet Pepper Seedlings Nursed under illumination of Light Emitting Diodes and Fluorescent Lamps. *Proceedings of the Korean Society of Bio-Environment Control Conference* 19(1):175-176. (In Korean)
12. Lee, J.S., H.I. Lee, J.H. Park, and Y.H. Kim. 2010. Growth and Yield after Transplanting of Sweet Pepper Seedlings Nursed under Artificial Light. *Proceedings of the Korean Society of Bio-Environment Control Conference* 19(1):185-186. (In Korean)
13. Li, Q. and C. Kubota. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany* 67:59-64.
14. Oh, W. 2011. The Characteristic and Application of Artificial Lighting Source for Plant Growth. *World of Electricity of the Korean Institute of Electrical Engineers* 60(6):33-40. (In Korean)
15. Park, J.W., G.H. Kim, J.H. Kim, W.Y. Cheon, and S.B. Song. 2009. Comparison of Thermal Dissipation Properties for LED Lighting System Design. *Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Conference* 2009(5):252-255. (In Korean)
16. Park, Y.H., H.J. Jung, C.W. Lee, C.W. Kim, and B.S. Seo. 2010. Effect of Artificial Lights on the Growth and Yield of Tomato. *J. of Bio-Environment Control* 19(4):290-297. (In

- Korean)
17. Tibbitts, T.W., D.C. Morgan, and J.J. Warrington. 1983. Growth of lettuce, spinach, mustard, and wheat plants under four combinations of high-pressure sodium, metal halide and tungsten halogen lamps at equal PPFD. J. of Amer. Soc. Hort. Sci. 108:622-630.
 18. Um, Y.C., Y.A. Jang, J.G. Lee, S.Y. Kim, S.R. Cheong, S.S. Oh, S.H. Cha, and S.C. Hong. 2009. Effects of Selective Light Sources on Seedling Quality of Tomato and Cucumber in Closed Nursery System. J. of the Korean Society of Bio-Environment Control 18(4):370-376. (In Korean)