고온기 대형 단동하우스를 이용한 파프리카 품종별 재배실증

여경환^{1*} · 박석호² · 유인호³ · 이희주¹ · 위승환¹ · 조명철³ · 이우문³ · 허윤찬⁴

¹국립원예특작과학원 채소과 연구사, ²국립원예특작과학원 시설원예연구소 연구관,

³국립원예특작과학원 채소과 연구관, ⁴국립원예특작과학원 약용작물과 연구관

Cultivation Demonstration of Paprika (*Capsicum annuum* L.) Cultivars Using the Large Single-span Plastic Greenhouse to Overcome High Temperature in South Korea

Kyung-Hwan Yeo^{1*}, Seok Ho Park², In Ho Yu³, Hee Ju Lee¹, Seung Hwan Wi¹,
Myeong Cheoul Cho³, Woo Moon Lee³, and Yun Chan Huh⁴

¹Researcher, Vegetable Research Division, NIHHS, RDA, Wanju 55365, Korea

²Senior Researcher, Protected Horticulture Research Institute, NIHHS, RDA, Haman 52054, Korea

³Senior Researcher, Vegetable Research Division, NIHHS, RDA, Wanju 55365, Korea

⁴Senior Researcher, Herbal Crop Research Division, NIHHS, RDA, Eumseong 27709, Korea

Abstract. During the growing period, the integrated solar radiation inside the greenhouse was $12.7\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, and which was 90% of the average daily global radiation outside the greenhouse, $14.1\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. The 24-hour average temperature inside the greenhouse from July to August, which has the highest temperature of the year, was 3.04°C lower than the outside temperature, and 4.07°C lower after the rainy season. Before the operation of fog cooling system, the average daily RH (%) was lowered to a minimum of 40% (20% for daytime), making it inappropriate for paprika cultivation, but after the operation of fog system, the daily RH during the daytime increased to 70 to 85%. The average humidity deficit increased to a maximum of $12.7\text{g}/\text{m}^3$ before fog supply, but decreased to $3.7\text{g}/\text{m}^3$ between July and August after fog supply, and increased again after October. The daytime residual CO_2 concentration inside the greenhouse was 707 ppm on average during the whole growing period. The marketable yield of paprika harvested from July 27th to November 23rd, 2020 was higher in 'DSP-7054' and 'Allrounder' with $14,255\text{kg}/10\text{a}$ and $14,161\text{kg}/10\text{a}$, respectively, followed by 'K-Gloria orange', 'Volante' and 'Nagano'. There were significant differences between paprika cultivars in fruit length, fruit diameter, soluble solids ($^{\circ}\text{Brix}$), and flesh thickness (mm) of paprika produced in summer season at large single-span plastic greenhouse. The soluble solids content was higher in the orange cultivars 'DSP-7054' and 'Naarangi' and the flesh thickness was higher in the yellow and orange cultivars, with 'K-Gloria orange' and 'Allrounder' being the thickest. The marketable yield of paprika, which was treated with cooling and heating treatments in the root zone, increased by 16.1% in the entire cultivars compared to the untreated ones, increased by 16.5% in 'Nagano', 10.3% in the 'Allrounder', 20.2% in the 'Naarangi', and 17.3% in 'Raon red'.

Additional key words : fog system, greenhouse climatic condition, large single-span plastic greenhouse, marketable yield, root zone cooling and heating

서론

파프리카는 수출을 목표로 국내에 도입되어 유리온실 보급과 함께 재배면적(728ha, 2019년) 및 생산액(2,530억 원, 2019년)이 크게 증가하였고, 전체 생산량(80,770톤)의 43.7%를

수출하고 있다. 여름철 평지의 온실에서 파프리카를 재배할 경우, 온실내 복사열로 인해 내부온도는 35°C 이상 올라 적정 온도 관리에 어려움이 많으며, 화분활력이 감소하고 정상적인 착과가 진행되지 못하여 착과율과 과실품질이 저조하고, 병해충 발생률이 증가하며, 일소과 및 배꼽썩음과 발생 비율이 높다(Lee 등, 2008; Cho 등, 2009). 2020년 9월 파프리카 상품 도매가격은 9,965원/kg으로 7월의 3,387원/kg에 비해 2.9배 높았으며, 이는 여름철 온실의 고온으로 인해 정상적 생

*Corresponding author: khyeo@korea.kr

Received October 5, 2021; Revised October 25, 2021;

Accepted October 26, 2021

육이 불가능함으로써 온실의 휴경 증가 및 수확량 감소가 주된 원인이다. 우리나라 파프리카 전체 수출액의 99.7%는 일본으로 수출하고 있으며, 일본시장 내 한국산 점유율은 79%(Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation, 2018) 수준이다. 파프리카는 8-10월에 월평균 1,389톤(2020년)을 수출하였는데, 4-7월 월평균 수출량(3,803톤)의 37%수준이다. 일본에서는 8-10월에 한국에서 생산되는 파프리카 물량이 부족하여 네덜란드산 또는 뉴질랜드산을 수입하고 있어, 고온기 고품질 파프리카의 안정적인 공급에 의한 연중 수출체계가 구축되어야 할 필요가 있다.

여름철 원예작물의 화분 활력저하와 수량감소를 극복하기 위해 차광(Sethi와 Sharma, 2007; Ha 등, 2012), 강제 환기(Na 등, 2011), 포그시스템(Nam 등, 2012; Rhee 등, 2015; Park 등, 2020), 근권냉방(Choi 등, 2014) 등으로 온실 환경을 개선함으로써 고온을 극복하려는 시도들이 진행되어왔다. 고온기 온실 내부온도를 외기온도보다 낮출 수 있는 냉방기술은 히트펌프 냉방과 포그/미스트, 팬애펀드(fan-pad), 지붕살수 등과 같은 증발냉각이 대표적이며(Sethi와 Sharma, 2007), 이중 효율성과 냉방효과를 극대화할 수 방식은 포그 & 환기방식이 가장 유리한 것으로 보고되어 있다(Arbel 등, 2003; Toida 등, 2006; Park 등, 2020). Rhee 등(2015)은 여름철 파프리카 재배에서 포그 및 유동팬 이용 시 무처리 보다 시설 내 온도가 2-3°C 낮았고, 최고 온도 35°C 이하, 실내습도 80% 내외로 조절이 가능하고 상품수량도 유의하게 증가하였다고 보고했다. 국내에서는 온실을 차광하지 않은 상태에서 온실 기온을 32°C 이하로 유지할 수 있는 포그 냉방시스템 및 제어 장치가 개발되었고, 특히 고온기에 포그 냉방과 공기 순환팬을 함께 가동할 때 기온을 최대 6-7°C 하강시킬 수 있었다(RDA, 2018; Park 등, 2020). 고온기 히트펌프 등을 이용하여 온도를 하강시키는 냉방은 초기 설치 비용과 에너지 소모량에 따른 운영 비중이 높아 야간에만 냉방을 실시하거나(RDA, 2018) 온도 하강이 필요한 부분에 냉방하는 국소냉방을 이용

하는 방식이 연구가 되었다(Dodd 등, 2000; Lee 등, 2002; Choi 등, 2014). Choi 등(2014)은 여름 파프리카 수경재배 시, 근권 냉방시간에 따른 배지 온도 하강과 파프리카 ‘Orange glory’의 생리적 반응 연구에서 근권 냉방으로 배지온도의 하강효과(1.8-5.0°C)는 있으나, 고온기 생육과 착과를 위해서는 지상부 온도를 낮추는 방식이 병행되어야 함을 보고했다.

최근 여름철 기온 상승에 따른 시설재배 온실의 고온기 환경 관리에 대한 필요성이 요구됨에 따라 농촌진흥청에서는 동고 가 최대 17m에 이르는 고측고 대형하우스 ‘사계절하우스(Kooling House)’의 성능을 검증하고자 테스트베드를 구축하여 국산 장미의 생산성·품질 향상 및 주년 안전생산을 위한 고온기 환경관리, 겨울철 보광 기술 등의 연구를 진행하였다(Rural Development Administration, 2019). 사계절하우스는 포그, 히트펌프, 유동팬, 근권부 냉방 등 고온기 온실환경을 제어하기 위한 시설을 갖추고 있지만 이들의 제어기준이 제대로 설정되어 있지 않다. 또한 온실의 측고 및 동고가 높기 때문에 관행 온실에 비해 광 환경, 환기 및 냉방성능이 유리할 것으로 판단되지만 실제 작물의 재배 검증이 필요한 실정이다. 본 연구는 고온기 고품질의 파프리카 안정생산을 위해 고측고 대형단동하우스를 활용 시 내부 기상환경의 변화를 조사하고, 적품종 선발을 위해 품종 간 생육과 생산성을 비교하고, 근권 냉난방 처리의 효과를 구명하여 실용적인 온실 모델 개발을 위한 기초자료 수집을 위해 수행하였다.

재료 및 방법

1. 파프리카 품종 및 재배 환경

본 실험은 전북 완주군에 위치(N35° 50' 23", W127° 01' 48", 해발 27m)한 대형 단동 비닐하우스(측고 5m, 동고 14m, 폭 40m × 길이 135m) (Fig. 1)에서 2020년 5월 8일부터 11월 30까지 수행되었다. 파프리카 적색계 3품종 [‘Sirocco’ (Enza Zaden, The Netherlands), ‘Nagano’ (Rijk Zwaan, The

Fig. 1. The large single-span plastic greenhouse plastic greenhouse used for the demonstration of cultivation (5,400m²). A, front & side of the high-eaves plastic greenhouse; B, fogging of the greenhouse; C, inside of the greenhouse.

Netherlands), ‘Minerva red’ (Jeonbuk ARES, Korea)], 황색계 3품종 [‘Volante’ (Enza Zaden, The Netherlands), ‘Allrounder’ (Rijk Zwaan, The Netherlands), ‘K-Gloria yellow’ (Araon, Korea)], 오렌지색계 3품종 [‘DSP-7054’ (De Ruiter, The Netherlands), ‘Naarangi’ (Enza Zaden, The Netherlands), ‘K-Gloria orange’ (Araon, Korea)], 및 소과종 3품종 [‘Raon red’, ‘Raon yellow’, ‘Raon orange’ (Gyeongnam ARES, Korea)] 총 12품종을 2020년 3월 26일에 40공 플러그 트레이에 파종하고 44일간 육묘한 후, 5월 8일 펠라이트로 충전된 스티로폼 베드(W280 × H440mm)에 25cm 간격, 재식밀도 2.58 plants/m²로 정식하였다. 파프리카는 비순환식 펠라이트 배지경(펠라이트 1호 및 3호 혼합)으로 재배되었으며, 유럽에서 개발된 그로단 파프리카 배양액을 기본 조성으로 양액을 조제하여 사용하였다. 공급액의 EC는 생육초기에 2.3–3.0 dS·m⁻¹로 관리하다가 고온기 과실 착과 후 배액의 적정 EC수준(3.5–4.5 dS·m⁻¹)을 고려하여 3.0–4.3 dS·m⁻¹의 범위에서 관리하였고, 배양액의 일일 공급량은 생육초기에 주당 1.4–1.9 L/plant 수준에서 1그룹 수확기 이후 고온기에 최대 3.9 L/plant까지 공급되었다. 시설내 온도는 정식 후 생육초기에 배지 내로 뿌리가 활착된 후 주간온도를 23–28°C, 야간온도를 20°C 내외로 관리하였고, 고온기에는 차광을 하지 않고 포그와 공기열 히트펌프(AG020KSVAHH1, Samsung Co. Ltd, Korea)를 가동시켜 하우스 내부 목표 온도를 주간 32°C, 야간 18°C로 설정하였다. 시설 내 포그는 설정온도가 24 ± 2°C로 시설내 온도가 26°C가 넘으면 포그가 시작되고 온도가 24°C로 내려가거나 습도가 80%가 되면 포그가 정지되도록 설정되었다. 정식 후 온실내 탄산가스 시비는 일출 직전에 2,000 ppm으로 공급한 후, 낮 동안 500–600 ppm 농도로 공급되었다. CO₂ 공급 제어는 온실 외부의 CO₂ 탱크에 전자밸브(NR 230A, VELIMO, Switzerland)를 설치하여 온실 내부 중앙의 CO₂ 센서(SH-VT260, SOHA TECK, South Korea)의 기동으로 전자밸브를 개폐하도록 하였으며, CO₂ 편차는 50 ppm으로 설정하였다. 온실 내부의 광량 및 온습도는 일사량 센서(SP-214, Apogee Instruments Co. Ltd, USA), 온습도 센서(STH-CP-01, Systronics Co. Ltd, Korea)를 이용하여 10분 간격으로 측정하여 복합환경제어장치(SYSnet X4 manager, Systronics Co. Ltd, Korea)에 연결된 서버에 저장되도록 하였다.

2. 파프리카 품종별 생산성 및 과실 품질 조사

파프리카는 주당 2줄기를 V자형으로 유인하였고, 1그룹 착과는 3분지에서 시작하고 측지는 제거하였으며, 이후 4분지부터 측지의 잎 3매와 꽃을 1개 남겨 정지하였다. 즉, 측지엽 3

매, 결가지 1착과, 원가지 1착과 방식으로 착과수를 조절하였다. 품종별 생육특성을 조사하기 위해 초장, 경경, 화방높이, 엽면적, 기관별 생체중 및 건물중 등을 각 품종 당 5–7주를 2–4주 간격으로 조사하였다. 품종별 생산성과 과실 품질 평가를 위해 10주씩 3반복(총 30주)으로 상품수량(kg/10a), 상품과율(%), 주당 과실수, 과중(g), 과고, 과폭, 경도(N), 당도(°Brix), 과육두께 등을 조사하였다. 경도(N)는 Texture analyzer (LLOYD Instrument BG/TA plus, Ametek, Inc., Fareham, UK)를 이용하여 측정하였으며, 파프리카 1개 시료당 표면의 적도 중간 부위 3곳을 프로브 Φ 5mm, 테스트 속도 2.5 mm/s, depression limit 10mm의 조건으로 분석하였다. 당도(°Brix)는 파프리카 이물질을 제거하고, 반으로 잘라 태좌와 씨를 제거한 후 약 30g을 취하여 일정한 크기(0.5 × 0.5 cm)로 자른 후 착즙액을 디지털 당도계(PAL-1, Atago Co., Tokyo, Japan)를 사용하여 측정하였다. 또한 과실의 중간부위를 잘라 심실수를 조사하고, 과육부위의 두께를 측정하였다.

3. 근권 냉난방 처리 및 효과 분석

파프리카 펠라이트 배지경에서 근권 냉난방 효과를 구명하고자 스티로폼 베드 바닥면 20cm 지점에 16mm의 XL 파이프를 매설하고 온도조절기(ED6, Hanyoung Nux Co. Ltd, Korea)와 공기열 히트펌프(AG020KSVAHH1, Samsung Co. Ltd, Korea)를 사용하여 지하부 온도를 제어하였다. 근권 냉방 처리는 8월 1일부터 9월 16일까지 냉수(20.5 ± 0.5°C)를 공급하고, 근권 난방 처리는 10월 1일부터 11월 30일까지 온수(23.5 ± 0.5°C)를 24시간 순환시켜 공급하였다. 배지 온도는 작물과 작물 사이에 온도센서(STH-CP-01, systronics Co. Ltd, Korea)를 6–8cm 깊이로 꽂고 10분 간격으로 측정하였다. 시험 품종은 ‘Nagano’, ‘Allrounder’, ‘Naarangi’, ‘Raon red’ 4품종을 사용하였으며, 2020년 3월 26일 파종하여, 5월 8일 펠라이트로 충전된 스티로폼 베드(W280 × H440mm)에 25cm 간격, 재식밀도 2.58 plants/m²로 정식하였다. 시험구 배치는 품종별로 근권 냉난방 처리구와 무처리구를 난괴법 3반복으로 배치하였다. 근권 냉난방 효과를 구명하기 위해 냉난방 처리구와 무처리구의 파프리카 품종별 처리구당 10주씩 3반복(n=30)으로 수량과 경도, 당도, 과육 두께 등의 과실 품질을 비교하였다. 수경재배 방식과 양액 조성, 공급량 등은 품종 선발 시험과 동일하게 처리하였다.

4. 통계분석

품종별 재배실증 시험의 생육조사는 품종별 5–7개체를 3반복으로 측정하였고 대과종 9품종 및 소과종 3품종(data not shown)을 10개체씩 3반복(n=30)으로 수량과 과실품질을 조

사하였다. 근권 냉난방 효과 구명 시험은 4품종별 무처리구와 처리구를 각각 10주씩 3반복(n=30)으로 수량과 과실품질을 조사하였다. 실험결과와 통계분석은 SAS 9.4(SAS Institute Inc., Cary, N.C., USA)을 사용하여 품종, 근권 냉난방 유무, 수확시기 요인별 평균을 비교하거나 상호작용 검증을 위해 분산분석(ANOVA)을 실시하였고, Duncan의 다중범위검정(DMRT)로 5% 유의수준에서 처리 평균간 비교를 하였다.

결과 및 고찰

1. 하우스 내 환경변화 분석

정식 후부터 재배종료 시점(5-11월)까지 시설내 평균 적산광량은 $12.7\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 로, 온실외부의 평균 광량인 $14.1\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 의 90% 수준으로 나타났다. 시설 내부의 적산광량은 정식 후 7월 중순까지 평균 $15.1\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 이었으나, 이후 장마기(7월 중순-8월 중순)에 $10.6\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 으로 감소하였다가 8월에 $13.6\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 으로 증가한 후 저온기로 접어들수록 다시 낮아지는 양상을 보였다(Fig. 2). 포그 등 냉방장치를 가동(6월 13일)하기 전 온실 온도는 외기 보다 최대 10°C 높게 나타나

하루 최고 39°C 까지 올라갔으나 포그 및 히트펌프 가동 후 8월말까지 24시간 평균온도는 평균 22.9°C (낮 최고 33°C)로 나타났다. 일 년중 가장 기온이 높은 7-8월의 온실내 24시간 평균온도는 외기보다 3.04°C 낮았고, 장마가 끝난 시점인 8월 12일부터는 외기온보다 평균 4.07°C 낮게 나타났다. 배지내 일평균 온도는 근권 냉방 기간 동안 20.7°C 로 나타났고, 근권 난방 기간 동안 23.4°C 로 나타났으며, 9월 25일 이후 저온기에 시설 내 24시간 평균온도는 공기열 히트펌프 난방을 통해 $19-24^{\circ}\text{C}$ 범위로 유지되었다.

Park 등(2020)은 온실 포그냉방 제어시스템의 냉방성능 분석 시, 외기 온도 대비 6°C 가 낮았음을 보고하였다. 포그 냉방은 포그장치의 설치방법, 기후조건 및 시설내 환기율 등에 따라 그 냉방효율은 다르나(Kim 등, 2001; Mahmoud, 2015; Nam 등, 2012), 일반적으로 고압의 $2-60\mu\text{m}$ 직경의 포그를 분사할 경우 외기온 보다 $3-8^{\circ}\text{C}$ 까지 낮출 수 있음이 보고되었다(Sethi와 Sharma, 2007). 또한 포그냉방은 팬-패드 시스템(fan-pad systems)보다 균일한 온도 분포와 높은 습도조건을 제공할 수 있는데, 시설내 높은 습도는 병원성 미생물의 생장을 촉진시켜 작물이 감염되기 쉬운 환경이 되기 때문에 외

Fig. 2. Changes in integrated solar radiation ($\text{MJ m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) and average daily temperature ($^{\circ}\text{C}$) inside and outside the large single-span plastic greenhouse during summer paprika cultivation.

Fig. 3. Changes in daily humidity deficit (HD, g/m^3) and daily relative humidity (%) inside and outside the large single-span plastic greenhouse during summer paprika cultivation.

기 습도가 높은 우기에는 비효율적이다(Arbel 등, 1999; Sethi와 Sharma, 2007). 따라서 포그냉방 시 환기율을 높일 수 있는 적절한 환기가 필요하다(Arbel 등, 2003; Nam 등, 2012; Rhee 등, 2015). 시설내 30–33°C의 온도 범위에서 작물 재배에 적합한 상대습도는 70–85% 수준으로 보고되었는데(RDA, 2018), 시설 내 포그 냉방 가동(6월 13일) 이전 일평균 상대습도는 최저 40%(주간 20%) 수준까지 떨어져 작물재배에 적합하지 않은 상태였으나 포그를 가동한 이후 주간 상대습도는 70–85% 수준으로 증가된 것으로 나타났다(Fig. 3). 시설내 평균 수분부족분(HD, humidity deficit)은 현재 온도의 포화수증기량(SMC)에서 절대 수증기량(AH)을 뺀 값으로 포그 공급전에는 최고 12.7g/m^3 까지 상승하여 매우 건조한 조건이었으나, 포그 공급 후 고온기(7–8월)에 평균 3.7g/m^3 으로 감소하였고, 저온기(10–11월)로 갈수록 다시 증가되는 경향이였다(Fig. 3). 전체 재배기간동안 수분부족분은 평균 4.0g/m^3 으로 나타났으며, 대체적으로 고온기에 안정적이었고, 저온기로 갈수록 변화폭이 크게 나타났다. 파프리카 재배현장에서 습도 관리는 식물의 성장과 병저항성을 증진시키기 위해 낮 동안 수분 부족분을 3– 7g/m^3 (VPD 0.42–0.97kPa) 기준으로 제어하도록 추천하고 있다(BCMAFF, 2005). 시설내 습도가 높을 경우 증산이 원활하게 이루어지지 않으며 광합성 효율이 떨어지므로 수분부족분을 3.0g/m^3 이상 유지되도록 환경관리가 필요하다.

시설 내 주간 잔존 CO_2 농도는 전체 재배기간동안 평균 707ppm으로 나타났으며, 정식 이후 5–6월 613ppm, 7월–9월 731ppm, 10월–11월 759ppm 수준으로 나타났(Fig. 4). 정식 후 8월 중순까지 온실내 탄산가스 시비는 일출 전 2,000ppm으로 공급한 후, 주간에 환기가 이루어지는 시간 동안 500–600ppm 농도로 공급되었기 때문에 CO_2 농도의 변화폭은 크게 나타났으나, 저온기에 환기량이 감소되면서 시

Fig. 4. Changes in daytime residual CO_2 concentration (ppm) inside the large single-span plastic greenhouse during summer paprika cultivation.

설 내부는 750ppm 수준에서 안정적인 변화를 보였다. 고온기(8월) 사계절하우스 파프리카의 탄산가스 농도에 따른 광합성률을 조사하였을 때, 최대 포화점은 600ppm 수준이었으며, 포그 공급 시 광합성률은 $15\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 내외로 나타났다(data not shown). Jeong 등(2009)에 따르면 네덜란드 Bleiswijk의 온실 시설내부 주간 CO_2 농도는 평균 748ppm으로 정식 초기와 엽면적지수가 높은(LAI 6 이상) 시기에 높은 CO_2 농도가 공급되었는데, 한국에 비해 낮은 광량이지만 높은 농도의 탄산가스 시비를 통해 작물의 광이용효율과 시설 내부 CO_2 시용 효율이 우리나라에 비해 높다고 하였다. 내부 적산 광량에 따른 시설 내부의 주간 잔존 평균 CO_2 농도를 분석한 결과, 광량 대비 농도는 감소하는 경향이였으나 CO_2 농도의 편차가 매우 심하게 나타났다(Fig. 5). 광량이 크게 증가하는 고온기에는 환기량도 동시에 증가하여 CO_2 의 손실이 많아 시용 효율은 떨어진다. 본 시험에서는 시설 내 광량이나 환기량에 따른 경제적인 탄산가스 시비 및 관리가 이루어지지 않았으나, 향후 사계절하우스를 활용한 고온기 파프리카 생산 시 생육시기, 내부 광량, 환기량, 수분조건 등에 따른 효과적인 탄산시비 전략의 수립이 필요할 것으로 판단된다. 내부 적산 광량 대비

Fig. 5. Changes in average daily temperature ($^{\circ}\text{C}$) and daytime residual CO_2 concentration (ppm) by increase of integrated solar radiation ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$) inside the large single-span plastic greenhouse during summer paprika cultivation.

Fig. 6. Changes in air temperature (°C), relative humidity (%), light intensity (W/m^2), and humidity deficit (g/m^3) inside the large single-span plastic greenhouse on August 13 in 2020.

시설 내부의 24시간 평균온도를 분석한 결과, 적산광량 $100\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}$ 당 0.2°C 씩 증가하였으나, 24시간 평균온도의 편차는 크게 나타났다(Fig. 5). 고온기 포그시스템 사용 전 온실 온도는 외기의 영향으로 크게 상승하여 목표 평균온도인 24°C 이상이었으나, 포그 냉방 후 24°C 이하로 감소되었고, 광량 대비 온도의 상승도 좀더 안정적인 것으로 나타났다. 일반적으로 광합성률은 광환경에 따른 CO_2 농도, 온도 조절로 최적화할 수 있는데, 광량이 높은 환경에서 24시간 평균온도를 높게 관리하여 호흡량을 증가시키고, 광합성산물의 이용효율을 높여 새로운 세포 생성을 활성화시킬 수 있다(Heuvelink, 1996; Lee 등, 2011). 그러나 높은 일사량, 고온, 고습도 조건의 극한의 기후에서는 적절한 환기나 냉방을 통해 광합성 효율을 증가시킬 수 있도록 온도를 최적화해야 한다. 일반적으로 파프리카에서 개화와 착과에 적합한 온도는 16°C 인 반면 생산성을 위한 최적의 24시간 평균온도는 약 21°C 로 알려져 있다(Bakker, 1989; Pressman 등, 1998).

파프리카 고온기 시설 내부 환경의 일변화를 분석하기 위해 8월 중 외기온이 34.4°C 로 가장 높았던 날(8월 13일)의 시설 내부 온도($^\circ\text{C}$), 상대습도(%), 광도(W/m^2), 수분부족분(g/m^3)

등을 조사하였다(Fig. 6). 시설 내 주간 기온은 외기온보다 최대 8.9°C , 평균 4.6°C 낮게 나타났으며, 습도는 평균 84.9% 수준이었다. 우리나라 여름철 고온 강광기의 시설 내부의 상대습도는 평균 50% 수준의 매우 낮은 편으로 수분스트레스 발생이 우려되는데, 파프리카 재배 현장에서 낮 동안 상대습도는 $70\sim 85\%$ 수준에서 관리하고, 85% 이상일 경우 제습이 필요하다(Lee 등, 2011; Nam 등, 2012). 8월 13일 파프리카 사계절하우스의 시설 내부 평균 수분부족분은 3.8g/m^3 로 나타났으며, 낮 동안 5.6g/m^3 로 적정 수준에 있었다(Fig. 6). 사계절하우스 시설 내부로 입사되는 광도(W/m^2)는 낮 동안 외부 광도의 83% 수준이었으며, 이러한 광도의 저하는 피복 필름 및 포그 분무처리에 의한 영향으로 판단된다.

2. 파프리카 품종별 생산성 및 품질

사계절하우스에서 5월 정식 작형 대과종 파프리카 재배 시 '20년 7월 27일부터 11월 23일까지 수확한 품종별 과실 수량 특성을 조사하여 LSD로 검정한 결과 상품수량과 상품과율에 있어서 품종에 따른 유의성이 인정되었으나, 주당 과중 및 과실수는 유의적인 차이가 나타나지 않았다(Table 1). 품종별

상품수량(kg/10a)의 경우, 주황색 품종 ‘DSP-7054’와 황색 품종 ‘Allrounder’이 각각 14,255kg/10a와 14,161kg/10a로 다른 품종에 비해 높았고, 다음으로 주황색 ‘K-Gloria orange’, 황색 ‘Volante’, 적색 ‘Nagano’ 품종 순으로 나타났다. 본 시험에서는 적색 계통 ‘Sirocco’와 ‘Minerva red’ 품종의 상품 수량(kg/10a)이 낮게 나타났다. 본 시험이 수행된 7-8월은 예년에 비하여 강우가 잦아 광환경이 좋지 않았는데, 저광도 조건하에 ‘Sirocco’, ‘Minerva red’ 품종이 다른 품종에 비해 착과수가 적었던 것으로 판단된다. ‘Minerva red’ 품종은 상품 수량이 12,527kg/10a로 다른 품종에 비해 낮았으나, 상품 과율은 97.9%로 가장 높게 나타났다.

사계절하우스에서 '20년 7월 27일부터 11월 23일까지 수확한 대과종 파프리카의 시기별 주당 수량을 조사한 결과 주황색 품종을 제외한 나머지 품종들은 생육 초기에 높은 수량을 보였으며, 이후 10월초 수량의 상승이 있었으나, 전체적으로 생육 중기로 갈수록 수확량은 감소하였다(Fig. 7). 적색 및 황색 품종들의 월별 총 주당 수량은 8월에 가장 높았고, 다음으로 9월의 수량이 높았으며, 적산광량과 기온이 낮아지기 시작하는 10월 이후 생산량이 감소되어 11월에 가장 낮게 나타났다. 10월 중순 이후 생산량의 감소는 주황색 품종에서도 나타났다. 사계절하우스에서 재배한 파프리카는 광량이 높은 5월에 정식을 하여(Fig. 2) 1그룹 착과와 과실비대에 유리한 환경이 조성되어 생육초기 많은 착과군을 형성하였지만, 높은 착과 부하와 7-8월의 잦은 강우로 인한 저일조 조건으로 9월 이후 초세가 약화되고 착과가 감소되는 경향이었고, 저온기

Fig. 7. Changes in fruit production (g/plant) for in the large single-span plastic greenhouse during summer paprika cultivation.

Table 1. The yield characteristics of 9 different paprika cultivars for 20 weeks (Jul.27~Nov.23 in 2020) in the large single-span plastic greenhouse.

Color	Cultivar	Marketable yield (kg/10a)	Marketable fruit ratio (%)	Fruit weight (kg) / Plant (n=30)	No. of harvested fruit / Plant (n=30)
Red	Sirocco	12,760 de ^y	93.3 bcd	5.32 ab	30.3
	Nagano	13,187 bcd	95.3 abc	5.37 ab	28.7
	Minerva red	12,527 e	97.9 a	4.98 b	29.3
Yellow	Volante	13,461 bc	95.5 abc	5.51 ab	29.7
	Allrounder	14,161 a	94.2 abcd	5.90 a	30.3
	K-Gloria yellow	13,017 cde	90.5 d	5.48 ab	29.3
Orange	DSP-7054	14,255 a	93.6 bcd	5.88 a	31.0
	Naarangi	13,372 bcd	96.4 ab	5.37 ab	28.3
	K-Gloria orange	13,766 ab	92.1 cd	5.76 ab	32.3
Significance ^z					
Color (C)		***	NS	NS	NS
Cultivar (CV)		***	**	NS	NS

^zProbability of significant F values: NS, *, **, *** : non-significant or significant at $p \leq 0.05$, 0.01, or 0.001, respectively.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test at the 5% level.

로 접어들며 흰가루병 발생이 조장되어 생산량이 감소한 것으로 판단된다. 파프리카에서 고온, 건조, 저광도 등은 낙과를 야기하는 중요한 요인으로(Aloni 등, 1996; Marcelis 등, 2004), 특히 낮은 광도는 꽃의 당 축적을 감소시켜 낙화를 야기할 수 있는데, sink-잎의 당 축적은 저광도에서도 가능하기 때문에 낮 동안 인접한 화아보다 sink-잎으로의 더 많은 당축적이 이루어진다(Aloni 등, 1996). 결과적으로 낮 동안 생식기관으로의 당과 전분의 축적은 착과의 중요한 요소이다. 본 실험에서와 같이 광량이 높은 시기에 정식하여 재배하는 작형은 초기 생육과 광합성 능력을 높게 유지할 수 있는 이점은 있지만 이로 인한 높은 착과 부화와 낮은 광량의 조건은 다음 착과의 지연과 낙화를 유발할 수 있다(Jeong 등, 2009). 또한 영양생장과 생식생장 간의 균형이 이루어지지 않을 경우 과실 생산시기에 수확량이 불균일해져 온실 경영 측면에서 불리할 수 있다.

사계절하우스에서 고온기(8월)에 생산된 대과종 파프리카의 품종별 과실품질 특성을 조사하여 LSD 검정을 한 결과(Table 2), 과실 당도는 파프리카 색깔 계통간에도 유의성 있는 차이를 보였는데, 주황색 계통이 가장 당도가 높았고, 다음으로 적색 계통, 황색 계통 순이었다. 당도는 주황색 품종인 ‘DSP-7054’와 ‘Naarangi’에서 가장 높게 나타났고, 황색 품종인 ‘K-Gloria yellow’와 ‘Volante’에서 낮았다. 과고는 ‘Nagano’에서 가장 크고, 다음으로 ‘K-Gloria orange’, ‘Naarangi’ 순이었고, 과폭은 ‘DSP-7054’에서 가장 컸다. 평균 과중은 ‘DSP-7054’가 가장 높았고, 다음으로 ‘Nagano’, ‘Naarangi’, ‘K-Gloria orange’ 순이었고, ‘Minerva red’가 과중이 가장 낮았다. 과실의 심실수, 경도는 색깔 계통간, 품종간 유

의성 있는 차이가 나타나지 않았다. 과육두께는 황색과 주황색 품종에서 높게 나타났는데, ‘K-Gloria orange’와 ‘Allrounder’가 다른 품종에 비해 두꺼웠고, 다음으로 ‘DSP-7054’, ‘K-Gloria yellow’ 순으로 나타났으며, ‘Sirocco’ 품종이 가장 낮은 값을 나타내었다. 사계절하우스에서 10월에 생산된 대과종 파프리카의 품종별 과실품질 특성을 조사하여 LSD 검정한 결과, 평균과중, 과고에서 유의성이 인정되었으나, 당도, 경도, 과육두께 등에서는 유의성있는 차이가 나타나지 않았다(data not shown). 평균 과중, 과실의 당도에 있어서는 색깔 계통간 유의성이 인정되었는데, 평균 과중의 경우 주황색 계통의 품종들이 다른 품종들보다 높았으며, ‘DSP-7054’, ‘K-Gloria orange’, ‘Naarangi’ 순으로 나타났다. 8월의 품질 특성 결과와 마찬가지로 과고는 ‘Nagano’에서 가장 크고, 다음으로 ‘Naarangi’, ‘K-Gloria orange’로 나타났다. 10월 수확한 과실의 당도는 주황색 품종인 ‘Naarangi’에서 가장 높게 나타났고, 황색 품종인 ‘K-Gloria yellow’에서 가장 낮았다. 경도 측정 시 ‘Nagano’ 품종이 가장 높고, ‘K-Gloria orange’ 품종이 가장 낮았으나, LSD 검정결과, 통계적 유의성은 인정되지 않았다. 파프리카는 환경관리 및 재배기술을 통해 착과군 간의 간격을 줄여 줄 수 있으며, 전 생육기간동안 영양생장과 착과의 균형을 유지하며, 상품성과 수량이 좋고 재배 지역과 작형에 적합한 품종 선택이 중요하다(Won 등, 2009; Jang 등, 2016). 하계 동안 생육한 파프리카의 생산성 및 과실품질을 분석한 결과, 시험 품종 중 재배기간동안 상품수량이 다른 품종에 비해 높고 고온기에 경도가 높았던 ‘DSP-7054’, ‘Allrounder’ 품종이 사계절하우스에 적합한 품종으로 판단이 되었다. 또한 앞

Table 2. The characteristics of fruit quality of 9 different paprika cultivars in the large single-span plastic greenhouse in August 2020.

Color	Cultivar	Fruit weight (g)	Fruit length (cm)	Fruit diameter (cm)	Soluble solids (°Brix)	No. of loculus	Flesh thickness (mm)	Hardness (N)
Red	Sirocco	249.9 bc ^y	90.6 bc	91.2 abc	5.88 b	3.77 a	7.60 d	27.1 ab
	Nagano	271.8 ab	105.6 a	87.4 c	5.57 b	3.49 ab	8.03 bcd	26.8 abc
	Minerva red	240.2 c	89.0 bc	88.3 bc	5.60 b	3.43 ab	7.73 bc	27.5 ab
Yellow	Volante	251.4 bc	86.1 c	88.5 bc	4.71 c	3.57 a	8.02 bcd	28.1 a
	Allrounder	255.5 abc	89.3 bc	89.2 bc	4.98 c	3.47 ab	8.84 a	27.3 ab
	K-Gloria yellow	249.1 bc	87.8 bc	87.1 c	4.56 c	3.17 b	8.40 abc	25.2 bc
Orange	DSP-7054	284.9 a	87.8 bc	93.7 a	6.51 a	3.49 ab	8.53 ab	27.2 ab
	Naarangi	266.0 abc	92.7 bc	92.4 ab	6.56 a	3.40 ab	7.97 bcd	25.6 abc
	K-Gloria orange	259.2 abc	92.9 b	86.7 c	5.98 b	3.50 ab	9.07 a	24.2 c
Significance ^z								
Color (C)		*	**	NS	***	NS	**	NS
Cultivar (CV)		NS	***	*	***	NS	**	NS

^zProbability of significant F values: NS, *, **, *** : non-significant or significant at $p \leq 0.05$, 0.01, or 0.001, respectively.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test at the 5% level.

으로 여름철 안정적인 파프리카 생산을 위해서 사계절하우스에 적합한 신규 도입 품종들의 선발 및 검증시험이 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

3. 근권 냉난방 처리에 의한 생산성 및 과실 품질 분석

고온기('20.8.1~9.16) 냉수($20.5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)와 저온기('20.10.1~11.30) 온수($23.5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)를 XL파이프를 통해 24시간 순환시켜 공급하였을 때, 배지내 온도의 변화는 Fig. 8과 같다. 근권 냉방처리 기간동안 외부기상이 맑은 날 배지온도는 $19.5 - 23^{\circ}\text{C}$ (24h-평균 20.7°C)의 범위였고, 근권 난방 시 배지내 온도는 $22.5 - 24.5^{\circ}\text{C}$ (24h-평균 23.4°C) 범위로 나타났다(Fig. 8). 근권 냉방 시 무처리구보다 평균 $2.5 - 2.8^{\circ}\text{C}$ 낮았고, 근권

Fig. 8. Changes in the substrate temperature ($^{\circ}\text{C}$) with and without root-zone cooling and heating treatments in the large single-span plastic greenhouse.

Table 3. The characteristics of paprika yield affected with and without root-zone cooling & and heating treatments in the large single-span plastic greenhouse.

Treatment	Harvest time	Cultivar	Marketable yield (kg/10a)	Marketable fruit ratio (%)	Fruit weight (kg) / Plant (n=30)	No. of harvested fruit / Plant (n=30)
Control	August	Nagano	3,875 bcd	83.4 c	1,502 cd	7.4 defgh
		Allrounder	5,307 ab	83.4 c	2,057 ab	8.3 defg
		Naarangi	3,706 cde	90.6 abc	1,437 de	6.3 fgh
		Raon red	2,348 efghi	98.6 a	910 fghi	15.8 b
	September	Nagano	3,146 cdef	96.2 a	1,219 defg	7.0 efgh
		Allrounder	3,438 cde	95.8 ab	1,333 def	7.5 defgh
		Naarangi	2,409 defghi	94.9 ab	934 efghi	5.0 hi
		Raon red	1,021 j	96.2 a	396 k	8.3 defg
	October	Nagano	1,793 ghi	100.0 a	695 hij	4.3 i
		Allrounder	1,778 ghi	93.1 ab	689 hij	4.5 i
		Naarangi	2,430 defghi	92.3 abc	942 efghi	6.1 fgh
		Raon red	1,215 i	100.0 a	471 j	10.2 cd
Cooling & heating treatment	August	Nagano	5,502 a	89.9 abc	2,120 ab	10.6 cd
		Allrounder	5,472 a	86.2 bc	2,217 a	9.1 cde
		Naarangi	4,683 abc	90.6 abc	1,586 bc	7.9 defg
		Raon red	2,861 defg	99.5 a	1,113 defg	19.2 a
	September	Nagano	3,432 cde	98.5 a	1,330 def	7.5 defg
		Allrounder	3,996 abc	96.1 a	1,549 cd	8.7 cdef
		Naarangi	2,669 defgh	97.6 a	1,035 defgh	5.5 gh
		Raon red	1,247 hi	98.6 a	484 j	9.3 cde
	October	Nagano	1,762 ghi	99.4 a	683 hij	4.3 i
		Allrounder	1,985 fghi	98.6 a	770 ghij	5.1 hi
		Naarangi	2,997 def	98.5 a	1,162 defh	7.5 defgh
		Raon red	1,309 hi	99.2 a	507 ij	11.8 c
Significance ^z						
Root-zone treatment (T)			*	NS	*	**
Harvest time (H)			***	***	***	***
Cultivar (C)			***	**	***	***
T × H × C			NS	NS	NS	NS

^zProbability of significant F values: NS, *, **, *** : non-significant or significant at $p \leq 0.05$, 0.01, or 0.001, respectively.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test at the 5% level.

난방 시 평균 1.9–3.5°C 높게 나타났다.

고온기 근권 냉방 및 저온기 난방 처리를 통한 과실 수량에 대한 영향을 조사하기 위해 LSD 검정을 한 결과, 상품수량, 주당 과중 및 주당 과실수에 있어서 근권 처리에 따른 유의성이 인정되었으나, 상품과율(%)에서는 유의적인 차이가 나타나지 않았다(Table 3). 8–10월 월별 상품수량은 무처리구에 비해 ‘Nagano’ 품종이 평균 16.5%, ‘Allrounder’ 10.3%, ‘Naarangi’ 20.2%, 및 ‘Raon red’ 17.3% 증가하였고, 품종 전체로는 16.1% 증가하였다. 주당 과중(kg/plant)도 무처리구 대비 평균 15.1% 유의하게 증가하였는데, ‘Nagano’ 품종이 평균 16.2%, ‘Allrounder’ 11.9%, ‘Naarangi’ 14.9%, 및 ‘Raon red’ 17.4% 증가하였으며, 주당 과실수도 무처리구 대비 16.4% 유의하게 증가하였다.

근권 냉난방 처리 시, 파프리카 과실의 품질을 조사한 결과, 과고, 경도에 있어서는 근권처리에 따른 유의성이 인정되었으나, 다른 품질 지표에서는 유의성이 없었다(data not shown). 냉난방처리에 의해 과실의 과고는 무처리 대비 4개 품종 평균 3.9% 증가하였다. 경도는 무처리 대비 평균 5.7% 증가하였는데, 품종별로 ‘Nagano’ 9.4%, ‘Allrounder’ 7.7%, ‘Naarangi’ 0.3%, ‘Raon red’ 6.0% 증가하였다. 고온기 근권부에 파이프를 매설하고 냉수를 순환시켜 부분냉방을 하는 것은 온실전체를 냉방하는 것보다 에너지 비용 측면에서 효율적이며, 생육, 뿌리활력, 수분포텐셜, 착과수 등이 증가하였음이 보고되어왔다(Dodd 등, 2000; Choi 등, 2014; Niam과 Suhardiyo, 2019). Lee 등(2002)은 8–9월 고온기에 토마토 펄라이트 재배 시 XL파이프를 사용하여 냉수를 순환시켜 근권의 온도를 22.8–24.7°C로 유지시켰을 때, 화방별 착과율이 대조구에 비해 유의하게 높았으며, 상품과율(%)도 75–81%로 나타난 반면, 무처리구에서는 67%로 낮았음을 보고하였다. Choi 등(2014)의 연구에서도 근권냉방 시 첫 개화시기가 4–5일 앞당겨지고 착과수도 유의하게 증가하였음을 보고하였다. 이전의 연구결과들은 고온기에 근권냉방을 통해 배지 온도를 약 2–5°C로 낮출 수 있었으나, 생육과 착과를 위해서는 차광, 환기 등의 주간 온도를 낮추는 냉방방식을 병행할 경우 냉방 효과를 더 높일 수 있다고 하였다. 본 시험에서는 포그, 히트펌프, 유동팬 등 고온기 환경 관리를 위한 시스템을 활용하였으며, 무처리구에 비해 상품수량, 주당 과중, 정도 등이 유의하게 증가되는 것을 확인하였다.

사계절하우스는 민간이 개발한 시설로서 고온기 파프리카 재배 시 기존의 일반 플라스틱하우스 환경과 차이가 있으며, 증산 등 작물의 생리반응도 상이할 것으로 판단되므로 후속 연구를 통해 여름철 안정생산을 위한 최적 환경관리기술의 확립이 필요하며 일반 재배농가와와의 경제성 분석 및 에너지 절

감형 환경제어기술 개발을 통한 경제성 확보가 필요할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 고온기 원예작물의 안정 생산을 위해 대형 단동하우스 ‘사계절하우스’를 파프리카 재배에 활용 시 시설 내부 기상 환경 및 파프리카 품종별 생육, 수량, 품질 등을 분석하고 근권냉방 효과 등을 구명하여 파프리카 재배환경 조건을 최적화 하기 위한 기초자료로 사용하고자 수행하였다. 정식 후부터 재배 종료 시점(2020년 5–11월)까지 시설내 평균 적산광량은 12.7MJ·m⁻²·d⁻¹로, 온실외부의 평균 광량인 14.1MJ·m⁻²·d⁻¹의 90% 수준으로 나타났다. 일 년중 가장 기온이 높은 7–8월의 온실내 24시간 평균온도는 외기보다 3.04°C 낮았고, 장마가 끝난 8월 12일 이후에는 평균 4.07°C 낮게 나타났다. 시설 내 포그 냉방 가동(6월 13일) 이전 일평균 상대습도는 최저 40% (주간 20%) 수준까지 떨어져 작물재배에 적합하지 않은 상태였으나 포그를 가동한 이후 주간 상대습도는 70–85% 수준으로 증가된 것으로 나타났다. 평균 수분부족분(humidity deficit)은 포그 공급전에는 최고 12.7g/m³ 까지 상승하여 매우 건조한 조건이었으나, 포그 공급 후 고온기(7–8월)에 평균 3.7g/m³으로 감소하였고, 저온기(10–11월)로 갈수록 다시 증가되는 경향이였다. 주간 잔존 CO₂ 농도는 전체 재배기간 동안 평균 707ppm으로 나타났다. ’20년 7월 27일부터 11월 23일까지 수확한 파프리카의 품종별 상품수량(kg/10a)은 주황색 품종 ‘DSP-7054’과 황색 품종 ‘Allrounder’이 각각 14,255kg/10a와 14,161kg/10a로 다른 품종에 비해 높았고, 다음으로 주황색 ‘K-Gloria orange’, 황색 ‘Volante’, 적색 ‘Nagano’ 품종 순으로 나타났다. 사계절하우스에서 고온기(8월)에 생산된 대과종 파프리카의 품종별 과실품질 특성을 조사한 결과, 과고, 과폭, 과실당도, 과육두께에서 품종 간 유의성이 인정되었다. 당도는 주황색 품종인 ‘DSP-7054’와 ‘Naarangi’에서 높게 나타났고, 과육두께는 황색과 주황색 품종인 ‘K-Gloria orange’와 ‘Allrounder’에서 높게 나타났다. 근권 냉방처리 기간 동안 배지내 일평균 온도는 20.7°C로 나타났고, 근권 난방처리 기간 동안 배지내 일평균 온도는 23.4°C로 나타났다. 근권부 냉난방 처리를 통해 상품수량은 무처리구에 비해 ‘Nagano’ 16.5%, ‘Allrounder’ 1.3%, ‘Naarangi’ 20.2%, 및 ‘Raon red’ 17.3% 증가하였고, 품종 전체로는 16.1% 증가하였다. 근권 냉난방처리에 의해 과실의 정도는 4개 품종 평균 5.7% 증가하였으나 다른 품질 지표에서는 유의성있는 차이가 나타나지 않았다.

추가 주제어 : 포그시스템, 온실 기상조건, 대형 단동하우스, 상품수량, 근권 냉난방

사 사

본 연구는 IPET 「1세대 스마트플랜트팜 실증 및 고도화사업(과제번호 320009-01)」의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Aloni B., L. Karni, Z. Zaidman, and A.A. Schaffer 1996, Changes of carbohydrates in pepper (*Capsicum annuum* L.) flowers in relation to their abscission under different shading regimes. *Ann Bot* 78:163-168. doi:10.1006/anbo.1996.0109
- Arbel A., M. Barak, and A. Shklyar 2003, Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosystems Engineering* 84:45-55. doi:10.1016/S1537-5110(02)00216-7
- Arbel A., O. Yekutieli, and M. Barak 1999, Performance of a fog system for cooling greenhouses. *J Agr Eng Res* 72: 129-136. doi:10.1006/jaer.1998.0351
- Bakker J.C. 1989, The effects of temperature on flowering, fruit set and fruit development of glasshouse sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *J Hort Sci* 64:313-320. doi: 10.1080/14620316.1989.11515959
- British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries (BCMAFF) 2005, Growing greenhouse peppers in British Columbia, pp 189. BC Greenhouse Grower's Association: www.bcgreenhouse.ca
- Cho I.H., W.M. Lee, K.B. Kwan, Y.H. Woo, and K.H. Lee 2009, Stable production technique of paprika (*Capsicum annuum* L.) by hydrogen peroxide treatment at summer. *J Bio-Env Con* 18:297-301. (in Korean)
- Choi K.Y., J.Y. Ko, H.J. Yoo, E.Y. Choi, H.C. Rhee, and Y.B. Lee 2014, Effect of cooling timing in the root zone on substrate temperature and physiological response of sweet pepper in summer cultivation. *Kor J Hort Sci Technol* 32:53-59. (in Korean) doi:10.7235/hort.2014.13123
- Dodd I.C., J. He, C.G.N. Turnbull, S.K. Lee, and C. Critchley 2000, The influence of supra-optimal root-zone temperatures on growth and stomatal conductance in *Capsicum annuum* L. *J Exp Bot* 51:239-248. doi:10.1093/jexbot/51.343.239
- Ha J.B., C.S. Lim, H.Y. Kang, Y.S. Kang, S.J. Hwang, H.S. Mun, and C.G. An 2012, Effect of shading methods on growth and fruit quality of paprika in summer season. *J Bio-Env Con* 21:419-427. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2012.21.4.419
- Heuvelink E. 1996, Tomato growth and yield: Quantitative analysis and synthesis. PhD. Thesis. Wageningen Univ., The Netherlands.
- Jang D.C., K.Y. Choi, J.Y. Heo, and I.S. Kim 2016, Comparison of growth and fruit setting characteristics for selecting the optimum winter-planted paprika cultivars. *Korea J Hort Sci Technol* 34:424-432. (in Korean) doi:10.12972/kjhst.20160043
- Jeong W.J., D.J. Myung, and J.H. Lee 2009, Comparison of climatic conditions of sweet pepper's greenhouse between Korea and the Netherlands. *J Bio-Env Con* 18:244-252. (in Korean)
- Kim M.K., K.S. Kim and H.J. Kwon 2001, The cooling effect of fog cooling system as affected by air exchange rate in natural ventilation greenhouse. *J Bio-Env Con* 10:10-14. (in Korean).
- Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation 2018, Trends in paprika's domestic production and overseas markets. KATI Agricultural and food export information. aT Export business office, Produce export department, Naju, Korea, pp 1-9.
- Lee J.H., J.K. Kwon, O.K. Kwon, Y.H. Choi, and D.K. Park 2002, Cooling efficiency and growth of tomato as affected by root zone cooling methods in summer season. *J Bio-Env Con* 11:81-87.
- Lee J.N., E.H. Lee, J.S. Im, W.B. Kim, and Y.R. Yeoung 2008, Fruit characteristics of high temperature period and economic analysis of summer paprika (*Capsicum annuum* L.) grown at different altitudes. *Kor J Hort Sci Technol* 26:230-233. (in Korean)
- Lee J.P., J.H. Lee, D.J. Myoung, and Y.B. Lee 2011, Greenhouse environmental control and Paprika cultivation technology. Research Center for common Technology of Export Fruit Vegetables, pp 190. (in Korean)
- Mahmoud M.S. 2015, Experimental study to evaluate mist system performance. *International Journal of Innovative Research in Advance Engineering (IJIRAE)* 9:41-48. https://www.researchgate.net/publication/305171644
- Marcelis L.F.M., E. Heuvelink, L.R. Baan Hofman-Eijer, J. Den Bakker, and L.B. Xue 2004, Flower and Fruit abortion in sweet pepper in relation to source and sink strength. *J Expt Bot* 55:2261-2268. doi:10.1093/jxb/erh245
- Na T.S., K.J. Choi, B.K. Yun, M.S. Cho, H.G. Kim, and H.J. Kim 2011, Cooling effect on bell pepper on glass house in summer. *Kor J Hort Sci Technol* 29:79. (Abstr.) (in Korean)
- Nam S.W., Y.S. Kim, I.M. Sung, and G.H. Ko 2012, Cooling efficiency of low pressure compressed air fogging system in naturally ventilated greenhouses. *J Korean Soc Agric Eng* 54:49-55 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2012.54.5.049
- Niam A.G. and H. Suhardiyanto 2019, Root-zone cooling in tropical greenhouse: a Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 557:012044. doi:10.1088/1757-899x/557/1/012044
- Park S.H., J.P. Moon, J. K. Kim and S.H. Kim 2020, Development of fog cooling control system and cooling effect in greenhouse.

- Protected Hort Plant Fac 29:265-276. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2020.29.3.265
- Pressman E., H. Moshkovitch, K. Rosenfeld, R. Shaked, B. Gamliel, and B. Aloni 1998, Influence of low night temperatures on sweet pepper flower quality and the effect of repeated pollinations, with viable pollen, on fruit setting. J Hort Sci Biotechnol 73:131-136. doi:10.1080/14620316.1998.11510955
- Rhee H.C., G.L. Choi, K.H. Yeo, M.W. Cho, and I.W. Cho 2015, Effect of fog-cooling on the growth and yield of hydroponic paprika in grown summer season. Protected Hort Plant Fac 24:258-263. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2015.24.3.258
- Rural Development Administration (RDA) 2018, Smart Greenhouse Environment Management Guidelines (2018). pp 26-35. (in Korean).
- Sethi V.P., and S.K. Sharma 2007, Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. Sol Energy 81:1447-1459. doi:10.1016/j.solener.2007.03.004
- Toida H., T. Kozai, and K. Ohyama 2006, Enhancing fog evaporation rate using an upward air stream to improve greenhouse-cooling performance. Biosystems Engineering 93:205-211. doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.11.003
- Won J.H., B.C. Jeong, J.K. Kim, and S.J. Jeon 2009, Selection of suitable cultivars for the hydroponics of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in the alpine area in summer. J Bio-Env Con 18:425-430. (in Korean)