

고온기 스마트온실 조건에서 딸기 조기 화아분화를 유도하기 위한 광주기·온도 제어 기술

(Photo-Period and Temperature Control Technique for Inducing Early Flower Bud Differentiation of Strawberry under High-Temperature Smart Greenhouse Conditions)

홍영신¹, 권진경³, 윤성욱², 백정현²

(Youngsin Hong, Jinkyung Kwon, Sungwook Yun, Jeonghyun Baek)

요약

본 연구는 여름철 고온기에도 한철 딸기(‘설향’)의 조기 화아분화를 유도할 수 있는 광주기와 온도 제어기술을 개발하기 위하여 수행되었다. 반밀폐형 스마트온실 내에 단일(Short-Day, SD) 차광 시스템을 구축하고, 8시간(SD-8hr)과 10시간(SD-10hr) 광주기 처리와 야간 온도제어를 병행하였다. 실험 결과, SD-8hr와 SD-10hr 처리구 모두에서 1화방 출현 시기가 대조구보다 약 2개월 이상 빨랐으며, 특히 SD-10hr 처리구가 가장 빠른 화아분화 유도를 나타냈다. 냉방기에는 SD-8hr의 야간 온도가 대조구보다 0.9℃ 낮았으나, 비냉방기에는 차광 보온 효과로 16~21℃ 범위의 안정적인 온도 유지가 가능하였다. 생육 특성에서 대조구는 초장과 관부 직경 등 영양생장이 우세하였고, 단일처리구는 광합성률, 기공전도도, 증산율이 유의하게 높아 생식생장 촉진에 유리하였다. 과실 특성에서는 대조구의 과중과 당도가 다소 높았으나, 단일처리구에서도 상품성이 유지되었다. 결과적으로, 8~10시간 단일처리와 야간 온도제어를 결합한 스마트온실 제어기술은 고온기에도 딸기의 조기 화아분화와 조기 수확이 가능함을 확인하였다. 향후에는 당도 향상, 적과 관리, 에너지 효율 최적화를 포함한 통합 환경제어 알고리즘 개발을 통해 현장 적용 연구가 필요하다.

■ 중심어 : 광주기 제어 ; 단일처리 ; 첨단온실 ; 한철딸기 ; 화아분화

Abstract

This study conducted to develop a photo-period and temperature control technique to induce early flower bud differentiation of June-bearing strawberry (‘Seolhyang’) under high-temperature smart greenhouse conditions. A semi-closed greenhouse equipped with an automated shading tunnel was designed to provide short-day (SD) treatments of 8 hours (SD-8hr) and 10 hours (SD-10hr) combined with night-time temperature regulation. Results showed that both SD treatments advanced the first flower cluster emergence by more than two months compared to the control, and SD-10hr exhibited the highest effectiveness for early flower bud induction. During the cooling period, the average night temperature of SD-8hr was 0.9℃ lower than that of the control, while the shading tunnel maintained stable temperatures of 16~21℃ during the non-cooling period. Although the control plants showed more vigorous vegetative growth with greater plant height and crown diameter, SD-treated plants exhibited higher photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate, favoring reproductive growth. Fruit weight and soluble solid content were slightly lower in SD treatments but remained within a marketable range. These findings demonstrate that combining short-day (8~10 hr) photoperiod control with night-time temperature management is an effective technique for promoting early flower bud differentiation and harvest of June-bearing strawberries under high-temperature conditions. The developed control method provides a practical approach for extending strawberry production seasons and improving farm income in smart greenhouse systems.

■ keywords : flower bud differentiation ; june-bearing strawberry ; photo-period control ; short-day treatment ; smart greenhouse

I. 서론

한국 농촌에서 친환경 에너지 생산·이용 시스템 확

¹ 정회원, 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 전문연구원

² 정회원, 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 농업연구사

³ 정회원, 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 농업연구관

이 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호:RS-2021-RD010195)의 지원에 의해 이루어진 연구입니다.

접수일자 : 2025년 10월 30일

게재확정일 : 2025년 11월 07일

교신저자 : 백정현 e-mail : butterfly@korea.kr

용 요구가 증대되고 있으며, 대규모 비닐하우스, 스마트 온실 등 밀집 지역 내에서 소요되는 전기와 열에너지를 친환경에너지로 공급할 수 있는 기술 개발이 필요하다. '클라우드 기반 2세대 스마트팜 요소기술 융합시스템[1,2]'과 '스마트팜 적정관리를 위한 빅데이터 활용법[3]'을 통하여 클라우드와 빅데이터를 기반으로 한 주요 온실 재배 작물(딸기, 토마토 등)의 환경 및 생육 간의 분석을 수행하였으며, 신재생에너지 기반 3세대 스마트팜 구축을 위해 국내 환경에 맞는 알고리즘 및 플랫폼 개발이 시급하다[4]. 현재 농촌 지역 농민들의 대다수는 저렴한 농사용 전기요금으로 인하여 신재생에너지로 전환 필요성을 느끼지 못하고 있으며, 농촌 지역의 재생에너지 보급 확산에 따라 이를 효율적으로 운영·관리하는 친환경 에너지 시스템이 요구되며, 현재 보급중인 농가의 1, 2세대 스마트팜 환경제어 시스템과 연계하여 농가 에너지 효율성, 생산량 및 에너지 공유를 고려한 지능형 통합 환경제어시스템 연구가 필요하다. 또한, 스마트 온실 최적 환경 조건 제시를 위한 온실 환경 제어 알고리즘이 필요하다.

딸기는 낮은 온도에서도 재배할 수 있기 때문에 겨울철 재배 시 연료비 부담이 적고, 수익성이 높아서 재배면적이 꾸준히 증가해 왔다. 국내 딸기 재배면적은 2020년 5,683ha, 생산량은 163.6천 톤으로 약 99%가 시설재배에서 생산되고 있다[5]. 국산 딸기는 맛과 품질이 우수해서 동남아 지역을 중심으로 인기가 높아져 수출량이 증가하는 추세이며, 채소류 수출량의 4.5%, 수출 금액의 17%를 차지하는 수익성 높은 수출 품목이다[6].

국내 딸기는 한철 딸기로, 보통 9~10월에 정식, 11~12월부터 수확하여 다음 해 4~5월까지 생산하는 것이 일반적이다. 여름철과 같이 고온 장일 조건에서도 화아분화가 되는 사철 딸기와 다르게 한철 딸기는 저온 단일 조건에서 화아분화가 이루어지기 때문에 여름철에 생산이 제한되는 기간이 발생한다[7]. 그러나, 딸기에 대한 소비가 연중 이루어지기를 희망하는 소비자가 증가하면서 수확시기를 확대하고자 하는 농가가 증가하고 있다. 그러나, 여름철에 재배된 딸기는 당도가 낮고 산도가 높아[8] 소비자의 기호에 맞지 않

기 때문에 일부 연구에서는 여름철에도 상품성 있는 딸기를 재배하기 위한 딸기 품종 개발이 진행되고 있다[9,10].

딸기의 광합성은 엽령, 엽면적, 엽수 등의 생리적 요인과 온도, 습도, 일사량 등의 환경적 요인에 영향을 받는다[11]. 특히, 엽면적지수(Leaf area index, LAI)는 광을 이용하는 딸기의 광합성, 증산, 호흡에 매우 큰 영향을 미친다[12-14]. 국내에서 한철 딸기를 재배할 때 화아분화를 유도하기 위하여 저온 단일처리를 하거나, 양액의 EC농도를 조절한다[15-17], [18]은 딸기의 광주기와 온도에 따른 화아분화 연구에서 13℃ 이하와 20℃ 이상에서 화아분화가 안되는 반면 13~20℃에서 화아분화가 되고, 광주기 14~16시간에서 화아분화가 된다고 보고하였다. [19]는 사철 딸기 품종 개발 연구에서 한철 딸기의 화아분화 전인 8월 하순부터 일장을 조절해 주는 것이 사철 딸기 선발에 효과가 있다고 하였다. 딸기 잎수가 증가하면 화방의 분화가 빨라지고, 꽃의 수가 많아지면서 과실의 수가 증가한다[11,20,21]. 딸기는 착과 수가 많으면 뿌리의 양분과 수분 흡수가 줄어들면서 초세가 약해지고, 이후 화아분화가 지연되는 현상이 발생하면서 연속적인 수확이 어려워진다[22,23]. 딸기 적과는 화방 출퇴 시기를 당기고, 과실 크기가 커지면서 상품과가 증가한다고 하였다[23-25]. 그러나, 첨단온실이 보급되면서 여름철 온실 내부 환경인 온도, 습도, 광환경 등을 자유롭게 조절할 수 있게 되었다. 또한, 딸기의 도장을 억제하고 묘소질을 향상하는 효과가 있는 메트코나졸 액상 수화제[26]와 배지 수분 조절이 용이한 코이어 배지[11, 27-30] 등의 이용이 많아지면서 딸기 재배 관리의 편의성이 증대되었다. 게다가, 코이어배지가 뿌리의 수분을 적절히 관리할 수 있고 양분 흡수도 도와서 딸기 과실 발달에 도움이 된다고 하였다[31,32]. 고온기 한철 딸기 재배 환경 조성이 가능해지고, 광주기를 조절하여 화아분화를 유도할 수 있다면 한철 딸기의 연중 생산을 기대할 수 있다.

따라서, 본 연구는 고온기에 일장과 온도 조절이 가능한 첨단온실에서 한철 딸기 재배 환경 조성을 위한 시설을 구축하고, 코이어배지를 활용한 초기 화아분화 유도와 축진을 알아보기 위하여 실시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 시험재료 및 재배조건

가. 재배 및 온실 환경 시스템

본 실험은 전북 완주군 이서면 국립원예특작과학원에 구축된 반밀폐형 첨단디지털 온실에서 수행하였다. 플라스틱 벤로형 온실로 동고 8.3m, 측고 7.0m, 넓이 24m, 길이 40m, 6개의 천창으로 구성되었고, 면적은 960m²이다. 840kW 히트펌프(ACHH040LET2, LG, Korea)와 300톤 축열조로 냉난방을 하였고, 정식일은 냉방 주기였고, 10월 18일에 난방으로 전환하였다. 한철 딸기 품종은 '설향'(Fragaria ananassa Duch.)으로 칩과 더스트 비율을 7:3으로한 코이어배지(길이 1m x 폭 20cm x 높이 10cm, Daeyoung GS, Malaysia)에 2023년 6월 15일에 정식하였다. 육묘는 엽이 4~5개, 관부 굵기는 0.5~0.7cm였다(그림 1).

딸기는 비순환식 수경재배시스템으로 정식 전에 코이어배지는 5일 동안 물로 포습시켰으며, 각 처리구 마다 200주 총 1,800주를 정식하였다(그림 2).

양액은 비순환식 딸기 전용 배양액으로 관리하였다(표 1). 양액농도(EC)는 0.8~1.8dS·m⁻¹, pH는 6.0으로 관리하고, 양액공급량은 0.8~1.5L/일/주 범위에서 처리별로 동일하게 공급하였다. 재배기간 일평균 온실 내부 온도는 9.0~25.1℃, 온실 내부 습도는 67~94%(그림 3), CO₂농도는 383~510ppm, 누적광량은 0.06~2.28MJ·m⁻²이었다(그림 4).



그림 1. Transplanting strawberry in the greenhouse.

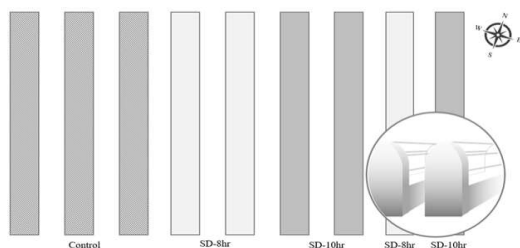


그림 2. Treatments of the study in the greenhouse.

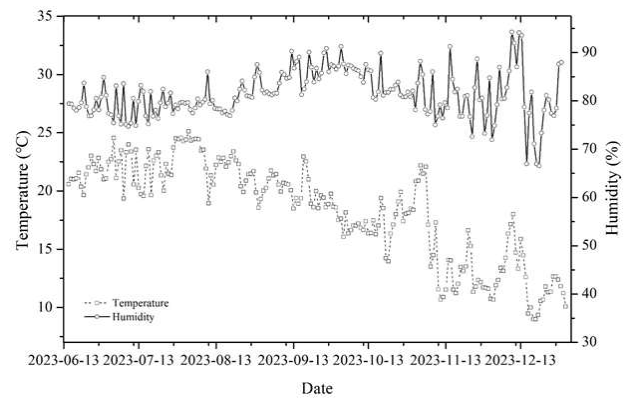


그림 3. Average temperature and humidity of strawberry greenhouse in the study.

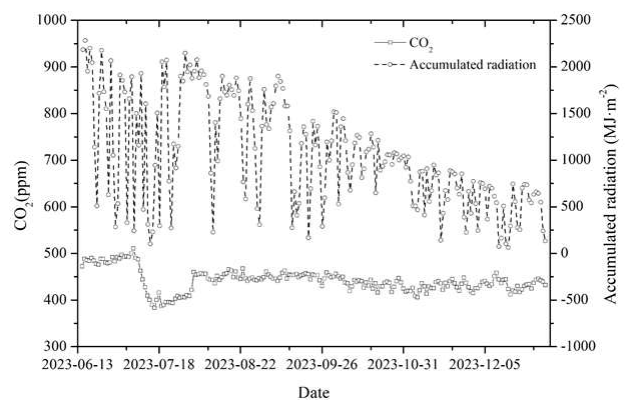


그림 4. Average CO₂ concentration and accumulated radiation of strawberry greenhouse in the study.

표 1. Composition of the nutrient solution for hydroponics of strawberry.

Macroelement (me·L ⁻¹)	N	12.5
	P	3.0
	K	5.5
	Ca	6.5
	Mg	2.5
	SO ₄	3.0
Microelement (mg·L ⁻¹)	Fe	1.17
	B	0.27
	Mn	0.55
	Zn	0.46
	Cu	0.05
	Mo	0.05

나. 단일처리

단일처리를 위하여 재배베드를 완전히 차광할 수 있는 시설을 갖추어 광주기를 무처리, 단일(Short day, SD) 8시간, 10시간으로 하였다. 총 3개

의 처리구는 무처리(Control), 8시간 단일(SD-8hr), 10시간 단일(SD-10hr)이다. 단일처리를 할 수 있는 차광장치는 바닥에서 높이 100cm와 길이 30m의 재배베드에 높이 185cm, 폭 76cm, 동고 40cm로 작은 터널을 만들고 흑백 PO필름으로 덮어서, 2023년 6월 15일부터 광주기에 따라 시간 설정 17시~9시(SD-8hr), 18시~8시(SD-10hr)에 차광하였다(그림 5). 이때, 11월 1일부터 12월 20일까지는 SD-10hr에 대하여 탄력적으로 시간을 조정하여 관리하다 일출과 일몰시간이 10시간이되는 12월 20일에 작동을 멈췄다. 또한, SD-8hr는 시험 종료일 2023년 12월 31일까지 계속해서 차광하였다.

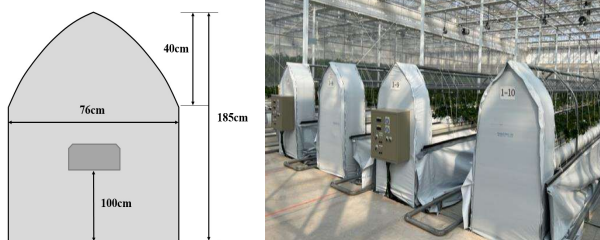


그림 5. Blackout curtain system for the photo-period.

2. 화아분화와 생육특성

가. 야간 온도 조사

냉·난방과 광주기에 따라 차광을 하는 터널 내부의 야간 온도와 대조구를 비교하기 위하여 온·습도 센서(HOBO weather station data logger, Onset, USA)를 재배베드 위에 설치하고, 2023년 7월 23일부터 12월 31일까지 5분 간격으로 수집하였다. 대조구와 SD-8hr의 야간 온도는 17시부터 다음날 9시까지였고, SD-10hr는 18시부터 다음날 8시까지 데이터를 평균하여 비교하였다.

나. 화방 출현 조사

화방 출현 여부는 3~4일마다 딸기를 관찰하여 화방이 나오는 일자를 Control, SD-8hr, SD-10hr 처리구에 난괴법으로 3배지를 3반복하여, 모든 개체(270주)에 대하여 8월 10일부터 11월 20일까지 조사하였다.

다. 생육 및 광합성 특성

정식 후 34주가 지난 2023년 3월 3일에 3개 처

리구에서 총 27주를 생육 조사하였다. 측정항목은 초장, 엽장, 엽폭, 엽병장, 엽수, 엽록소함량, 엽면적, 관부직경, 줄기와 엽의 생체중이었다. 주당 엽은 6~7매, 적과는 화방마다 3~5개로 생육 상태에 따라 관리하였고, 기형과는 제거하였다.

측정 기기는 엽록소 측정기(SPAD-502PLUS, Konica Minolta, Japan), 엽면적 측정기(LI-3100, LI-COR Inc., USA)를 사용했으며, 각 처리구마다 광합성측정기(LI-6800, LI-COR Inc., USA)를 사용하여, 어린잎 기준으로 세 번째 잎을 대상으로 오전 10~12시에 측정하였다. 라이트 챔버(Light chamber) 내부 측정 조건은 온도 20℃, 습도 60%, CO₂농도 500ppm, 광도(PPFD) 400μmol·m⁻²·s⁻¹이었다.

라. 과실 품질 특성

과실 특성은 각 처리구에서 수확되는 과실의 과장, 과폭, 과중을 측정하였으며, 당도와 산도는 당산비 측정기(PAL-BX/ACID4, Atago Inc., Japan)를 사용하였다. 각 처리구마다 수확된 과실수는 Control 186개, SD-8hr 107개(1화방)와 177개(2화방), SD-10hr 93개(1화방)와 189개(2화방)였다. SD-8hr와 SD-10hr의 1화방 과실수 차이는 기형과 제거 유무이다.

마. 통계분석

Control, SD-8hr, SD-10hr 처리구의 생육, 광합성, 과실 특성을 분석했으며, 평균간 유의성은 분산분석(analysis of variance, ANOVA)을 SAS 프로그램(SAS V. 9.2, SAS Institute inc., USA)을 이용하여 95% 신뢰수준에서 Duncan's Multiple Range Test(DMRT) 검정을 했다.

III. 결 과

본 연구에서는 고온기 스마트온실 환경에서 '설향' 딸기의 조기 화아분화를 유도하기 위한 광주기와 야간 온도제어를 하여 생육 특성을 조사하였다.

가. 야간 온도 특성

차광장치 내부의 야간평균온도를 8월부터 12월까지 조사한 결과 SD-8hr의 8~9월의 야간 평균온도가 0.96℃로 대조구와 SD-10hr보다 낮았으며, 10~12월은 0.03~0.29℃로 대조구가 SD-8hr와 SD-10hr보다 높았다(표 2).

표 2. Average temperature during the night-time affected by photo-period treatments.

Month	Control(℃)	SD-8hr(℃)	SD-10hr(℃)	Difference 1 (℃)	Difference 2(℃)
8	19.92	18.97	19.25	-0.96	-0.67
9	18.02	17.19	17.43	-0.83	-0.59
10	15.21	15.25	14.59	+0.03	-0.62
11	12.57	12.84	12.20	+0.27	-0.37
12	11.56	11.84	11.28	+0.29	-0.28

Control: non-treatment, SD-8hr: short day 8hour, SD-10hr: short day 10hour.
Difference 1: average temperature difference of control - SD-8hr.
Difference 2: average temperature difference of control - SD-10hr.

이 결과는 여름철 냉방이 차광장치 내부 온도를 대조구보다 평균 1℃ 낮추고, 야간 평균온도를 16~21℃ 정도 유지시켰다. 여름철 냉방 기간의 광처리구 야간 평균온도가 대조구보다 낮게 나타나다가 냉방을 하지 않은 시기에는 SD-8hr의 야간 평균온도가 대조구보다 높게 나타났다. 이는 대조구보다 오후에 일찍 차광장치를 닫고, 오전에 늦게 차광장치를 열기 때문에 보온효과가 나타난 것으로 보인다. 이와 비교하여, SD-10hr는 대조구와 비슷한 시간에 차광장치를 열고 닫기 때문에 야간 평균온도가 낮게 나타났다(그림 6).

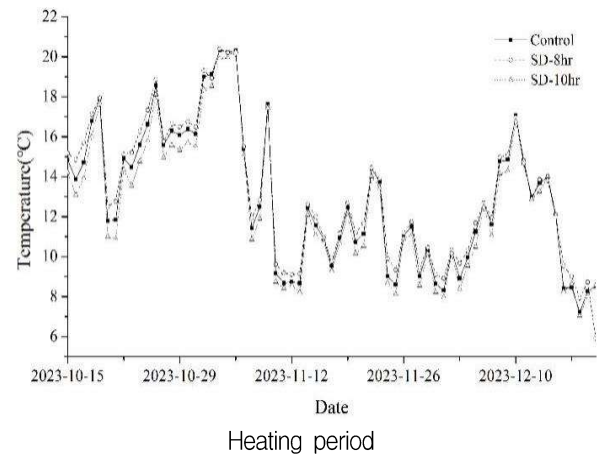
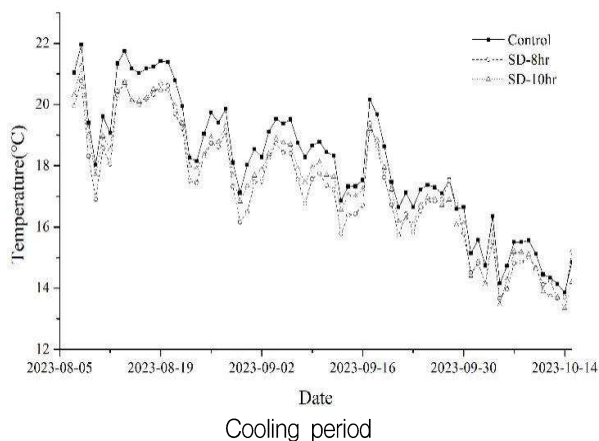


그림 6. Average temperature of night-time in the treatments compared with cooling and heating period.

나. 화방 출현 특성

화방 출현시기를 조사한 결과 SD-8hr와 SD-10hr의 1화방 출현이 8월 10일을 시작으로 대조구 10월 17일보다 2달 이상 빠르게 나타났다(표 3). 광처리구의 3화방 출현도 대조구의 1화방 출현시기에 나타났다. 여름철 광주기가 늘어나면서 온실 내부온도도 상승함으로 딸기의 영양생장이 강하고, 생장길이 길어지는 경향이 나타나게 되는데, 하루 광주기를 8~10시간으로 처리한 딸기가 대조구보다 2달 이상 빠르게 화방이 출현되어 광주기처리가 영향을 미치는 것으로 나타났다. [33]은 사철 딸기가 한철 딸기보다 2화방 출현이 빨랐으며, 3화방 출현은 2달 이상 빠르게 나타났고, 사철 딸기인 썸머베리의 연속적 화방 출현성이 한철 딸기보다 좋은 결과가 있었다. 한철 딸기의 화방 출현은 온도, 광주기, 수분 스트레스, 질소 비료에 의해서 조절되고 이른 정식 시기가 중요하다[34]고 한 것과 같이 6월 중순 정식과 첨단온실 내부의 온도를 일평균 9.1~25.1℃ 정도로 낮게 관리되었고, 8~10시간 광주기 처리가 화방 출현에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, [18]이 12~14시간 광주기를 했을 때 화아분화가 나타난다고 한 것과 같은 결과이다. 또한, 10시간 광주기 처리구가 8시간 처리구보다 화방이 일찍 출현하고 개화도 빠르게 나타나 일장 처리 시간에 대한 효과가 있는 것으로 판단된다.

표 3. Initial budding day and accumulated budding numbers for the first-second cluster as affected by photo-period treatments.

Treatment	Control			SD-8hr			SD-10hr		
Repeat	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Aug 10	-	-	-	-	-	-	1	2	-
Aug 11	-	-	-	-	1	2	5	3	2
Aug 14	-	-	-	3	3	3	5	7	6
Aug 18	-	-	-	11	10	12	7	12	8
Aug 22	-	-	-	26	24	27	30	30	30
Aug 26	-	-	-	30	29	30	-	-	-
Sep 1	-	-	-	-	30	-	-	-	-
Sep 5	-	-	-	-	-	-	1	3	-
Sep 22	-	-	-	9	10	-	10	15	2
Sep 26	-	-	-	16	18	14	23	28	15
Oct 6	-	-	-	28	30	27	30	30	27
Oct 10	-	-	-	30	30	30	30	30	27
Oct 17	2	-	1	-	-	-	-	-	-
Oct 20	8	1	3	-	-	-	-	-	-
Oct 24	10	3	6	-	-	-	-	-	-
Oct 27	13	3	6	-	-	-	-	-	-
Oct 31	18	4	13	-	-	-	-	-	-
Nov 3	19	11	18	-	-	-	-	-	-
Nov 7	28	22	28	-	-	-	-	-	-
Nov 10	28	30	30	-	-	-	-	-	-
Nov 14	29	30	30	-	-	-	-	-	-

Control: non-treatment, SD-8hr: short day 8hour, SD-10hr: short day 10hour.

다. 생육특성

딸기 생육특성을 조사한 결과 엽수, 엽폭, 엽록소, 엽면적은 유의성이 없었으며, 초장, 엽장, 엽병장, 관부직경에 대해서 유의성($p>0.05$)이 나타났다(표 4). 초장은 대조구가 SD-8hr와 SD-10hr보다 8.4~10.2cm 길었으며, 엽장은 대조구가 SD-8hr와 SD-10hr보다 1.2~1.3cm 길었으며, 관부직경은 대조구가 SD-8hr와 SD-10hr보다 2.4~3.8mm 짧게 나타났다. 엽폭은 SD-8hr와 SD-10hr이 대조구보다 짧게 나타났으며, 엽록소는 모든 처리구가 비슷하였다. 엽면적은 대조구가 1,691cm²/plant로 가장 넓고, SD-10hr는 1,457cm²/plant, SD-8hr는 1,230cm²/plant였다(표 4). LAI는 딸기의 광합성에 큰 영향을 주는 요인[12-14]인데, 대조구의 높은 엽면적이 초장, 엽병장, 엽장, 엽폭 등을 SD-8hr와 SD-10hr보다 길고, 넓게 나타난 것으로 보인다. 또한, 엽의 생체중에서도 대조구가 가장 많이 나타난 것도 엽면적이 가장 넓어서 광합성속도가 다른 처리구보다 빨라졌기 때문일 것이다(표 5). 광처리구의 짧은 일장이 딸기 생육을 저하시키고, 잎 발달이 느려지며 영양 생

장에 부정적이지만[35,36], 화아분화가 된 점은 생식 생장에 긍정적 효과가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 딸기 생육이 광처리구보다 대조구의 초장, 엽병장, 관부직경, 엽의 생체중에 영향을 주는 것으로 나타난 점은 여름철 고온기 광주기를 관리하면, 한철 딸기 생식생장에 영향을 주는 것으로 판단된다.

표 4. Growth characteristics of strawberry as affected by photo-period treatments.

Treatment	Plant height (cm)	No. of leaves (ea/plant)	Petiole length of leaf (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Crown diameter (mm)	Chlorophyll content (SPAD)	Leaf area (cm ² /plant)
Control ^a	39.9a ^y	7.2a	14.9a	10.7a	9.0a	19.6a	41.9a	1,691a
SD-8hr	31.5bc	8.1a	12.1c	9.4c	8.3b	15.8c	41.7a	1,230a
SD-10hr	29.7c	8.1a	12.6c	9.3c	8.2b	17.2b	42.7a	1,457a

^aControl: non-treatment, SD-8hr: short day 8hour, SD-10hr: short day 10hour.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test ($p\leq 0.05$).

표 5. Fresh and dry weight of strawberry as affected by photo-period treatments.

Treatments	Fresh weight(g/plant)				Dry weight(g/plant)			
	Leaf	Stem	Fruit	Total	Leaf	Stem	Fruit	Total
Control ^a	43.30a ^y	36.28a	8.20c	87.78	12.56a	7.40a	1.70a	21.66
SD-8hr	34.12c	26.25c	21.59a	81.96	8.37c	5.12c	2.39a	15.88
SD-10hr	32.89c	25.56c	14.10b	72.55	8.38c	5.24c	1.61a	15.23

^aControl: non-treatment, SD-8hr: short day 8hour, SD-10hr: short day 10hour.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test ($p\leq 0.05$).

라. 광합성 특성

딸기 잎의 광합성을 측정한 결과 대조구가 전체적으로 Ci(Intercellular CO₂ concentration)를 제외한 모든 항목에서 가장 낮게 나타난 반면, 광처리구인 SD-8hr, SD-10hr에서 높게 나타났다. 광합성, 기공전도도, Ci에 대한 유의성이 나타났으며, 대조구의 광합성, 기공전도도, 증산율은 각각 13.42 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 0.21 $\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 2.1 $\text{mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 가장 낮았다. 또한, SD-8hr와 SD-10hr의 증산율이 대조구와 비슷하게 나타났으며, SD-8hr의 광합성이 가장 높은 것으로 나타났다(표 6). 광합성은 대기의 이산화탄소를 이용하여 식물의 성장과 발달에 필요한 화합물을 만드는 과정으로 온도, 습도, 광도(intensity), 광주기 등 다양한 요인의 영향을 받는다[36-37]. 딸기는 광주기가 길고 광도가 높으면 잎

의 분화와 같은 영양생식을 하고, 광주기가 짧고 광도가 낮으면 화아 분화, 과실 발달 같은 생식생장을 한다. 또한, 광도가 약하고 광주기가 짧아질수록 생육이 저하되고, 잎 발달에 부정적인 영향을 미치면서 광합성 속도도 느려지게 되고, 생산량도 떨어진 다[35,36]고 하였다. 그러나, 8~10시간 광주기 처리에서는 잎 발달과 광합성 속도에 부정적 영향을 미치지 않았으며, 대조구 보다 높은 광합성 속도를 보였다. 게다가, 기공전도도와 증산율은 광처리구에서 높게 나타난 것 또한 광합성 속도와 비슷한 경향을 보였다. Ci는 대조구에서 높게 나타났는데, 일반적으로 Ci가 낮으면 기공 개방이 유도되고 높으면 기공이 닫힘을 의미한다[38]. 본 실험의 결과는 모두 광합성 측정 시 설정한 400ppm보다 낮은 것으로 나타나 광합성이 이루어졌음을 나타냈다. 결과적으로, 8시간과 10시간 단일 처리시 광합성 속도가 유의하게 높은 것으로 나타났다.

표 6. Photosynthesis of strawberry as affected by photo-period treatments.

Treatment	Net photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Ci ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
Control ^z	13.42cy	0.21c	2.1a	385a
SD-8hr	15.10a	0.22b	2.2a	352c
SD-10hr	14.98a	0.23a	2.3a	360b

^zControl: non-treatment, SD-8hr: short day 8hour, SD-10hr: short day 10hour.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test ($p\leq 0.05$).

마. 과실 특성

대조구의 화방이 개화된 후 수확시기에 대한 적산온도는 약 500°C 였으며, 적산일사량은 약 $23\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 나타났다. 8~10시간 광처리와 대조구의 1화방 과실조사를 한 결과 과장, 과폭, 산도에 대한 유의성이 없었으며, 과중과 당도는 유의성이 있었다. 과장은 3.8~4.5cm, 과폭은 3.3~3.6cm, 산도는 0.5~0.8%로 나타났다. 이것은 코이어배지가 뿌리의 수분을 적절히 관리할 수 있고 양분 흡수도 도와서 딸기 과실 발달에 도움이 되었다[31-32, 39]. 또한, 설향은 12월~2월까지 수확시기와 관계없이 딸기의 산도가 0.5~0.6%였다[39]는 결과보다 다소 높게 나타났다. 처리구의 1, 2화방 수확시기에 대조구보다

2달 빠른 10, 11월이어서 산도가 높게 나타난 것으로 생각된다. 과중은 대조구가 24.2g으로 가장 무거웠으며, 광처리구는 1화방은 16.4~16.9g으로 가볍게 나타났고, 2화방은 20.1~20.8g으로 대조구보다 가벼웠다(표 7). 이것은 대조구가 긴 광주기와 낮은 야간 온도, 넓은 엽면적이 광합성을 촉진하면서 동화산물이 많이 생성되어 과실의 중량을 높이는 것으로 판단된다. 또한, 광처리구의 과실중량이 대조구보다 작게 나타난 것은 광처리구의 생식생장이 강하고 화아분화가 되면서 과실 발달에 부정적 영향을 끼친 것으로 판단된다[35-36]. 당도는 대조구가 10.0°Brix로 가장 높게 나타나고, 광처리구의 당도가 9.1~9.7°Brix로 유의성이 없는 것으로 나타났다(표 7). 따라서, 광주기가 당도에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 당산비는 대조구와 광처리구에서 유의성이 나타난 것은 수확시기뿐 아니라 광주기가 당산비에 영향을 주는 것으로 생각된다.

표 7. Characteristics of first-second cluster strawberry fruit as affected by photo-period treatments.

Treatment	Cluster	Fruit length (cm)	Fruit width (cm)	Fruit weight (g/ea)	Soluble solid content (°Brix)	Acid (%)	°Brix/Acid ratio
Control ^z	1	4.5a ^y	3.6a	24.2a	10.0a	0.5c	22.1a
SD-8hr	1	3.8a	3.3d	16.4f	9.1a	0.7b	13.2e
SD-10hr	1	3.8a	3.4c	16.9f	9.2a	0.8a	11.8f
SD-8hr	2	4.4a	3.4c	20.8c	9.6a	0.5c	20.4c
SD-10hr	2	4.3a	3.4c	20.1c	9.7a	0.5c	20.6c

^zControl: non-treatment, SD-8hr: short day 8hour, SD-10hr: short day 10hour.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test ($p\leq 0.05$).

IV. 결 론

본 연구는 고온기 스마트온실 환경에서 딸기('설향')의 초기 화아분화를 유도하기 위한 광주기와 온도 제어기술 개발을 목표로 수행되었다. 반밀폐형 첨단온실 내에서 단일 처리와 야간 온도 관리, 코이어 배지 기반 수경재배를 결합한 결과, SD-8hr와 SD-10hr 처리구 모두에서 1화방 출현이 대조구 대비 약 2개월 앞당겨졌다. 특히, SD-10hr가 화아분화

유도 효과가 가장 좋았으며, 고온기 조기 화아분화 기술의 실용 가능성을 확인하였다.

냉방기에는 SD-8hr의 야간 온도가 대조구보다 다소 낮았으나, 비냉방기에는 보온 효과를 통해 16~21℃ 범위의 안정적인 야간 온도 유지가 가능하였다. 생육 측면에서는 대조구가 영양생장이 우세하였으나, 단일처리구는 광합성률, 기공전도도, 증산율이 높게 나타나 생식생장 촉진에 유리한 반응을 보였다.

결과적으로, 광주기 단축과 야간 온도제어를 결합한 스마트온실 제어기술은 여름철 고온기 한철 딸기의 조기 화아분화와 조기 수확을 가능하게 하는 것으로 판단된다. 또한, 코이어 배지 기반의 양·수분 관리는 근권 안정성과 과실 품질 유지에 효과적이었다. 다만 단일처리에 따른 과중 감소 경향이 나타나, 향후에는 적과, 양액농도, 냉·난방 에너지 효율 및 당도 향상 기술을 통합한 최적 제어 알고리즘 개발이 필요하다. 추가로 광주기 변화에 맞춰 차광 장치의 소비전력을 최적화하는 자동제어 시스템을 적용한다면, 에너지 절감 효과를 얻을 수 있다.

본 연구 결과는 향후 고온기에도 안정적인 딸기 생산을 가능하게 하는 지능형 광주기·온도 복합 제어시스템 개발의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Rural Development Administration (RDA) "A study on the 2nd generation model in Korean smart farm," Junju, Korea, 2019.
- [2] 정지성, 이명훈, 박종권, "클라우드 컴퓨팅기반 가축 질병 예찰 및 스마트 축사 통합 관제 시스템," *스마트미디어저널*, 제8권, 제3호, 88-94쪽, 2019년
- [3] 농촌진흥청 (RDA) "스마트팜 적정관리를 위한 빅데이터 활용법," 전주, 한국, 2017-2018년
- [4] 오한별, 신창선, 임종현, 양승원, "머신러닝 기반 시설 재배 딸기 생산량 예측 연구," *스마트미디어저널*, 제11권, 제5호, 9-16쪽, 2022년
- [5] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) "Greenhouse status for the vegetable grown in facilities and the vegetable productions in 2020," ed. Sejong, Korea, 2021.
- [6] Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation (aT), Agriculture, 2020 Forestry and Fisheries Import & Export & Statistics. ed. Naju, Korea, 2021.
- [7] J.N. Lee, E.H. Lee, J.G. Lee, M.L. Lee, S.J. Hong, and Y.R. Yong, "Growth and yield by crown and truss regulate of 'Pechika' strawberry in highland," *Kor J Hort Sci Technol*, vol. 22(Suppl I), pp. 53, May 2004.
- [8] J.N. Lee, E.H. Lee, J.G. Lee, S.Y. Ryu, and Y.R. Yong, "Quality of everbearing strawberry according to harvesting time on in highland," *Kor J Hort Sci Technol*, vol. 22(Suppl I), pp. 53, May 2004.
- [9] J. N. Lee, J.G. Lee, E.H. Lee, H.J. Kim, and S.W. Jang, "Breeding of new ever-bearing strawberry 'Gangha' for summer culture," *Kor J Hort Sci Technol*, vol. 28, pp. 515-518, 2010.
- [10] H.J. Kim, J.N. Lee, K.S. Cho, H.S. Won, and J.T. Suh, "Genetic diversity and population structure analysis of ever-bearing and June-bearing strawberry cultivars using SSR markers," *Kor J Hort Sci Technol*, vol. 37, pp. 108-118, 2019.
- [11] J. Lee, H. Lee, S. Lee, G. Kim, K. Han, J. Baek, S. Rho, and Y. Hong, "Effects of environmental substrate composition on the grown and yields of hydroponically grown tomato," *J Environ Sci Int*, vol. 28, pp. 729-735, 2019.
- [12] J.P. Syvertsen, C. Goni, and A. Otero, "Fruit load and canopy shading affect leaf characteristics and net gas exchange of 'Spring' navel orange trees," *Tree Physiol*, vol. 13, pp. 899-906, 2003.
- [13] F.F. Blanco and M.V. Folegatti, "Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting," *Sci Agric*, vol. 62, pp. 305-309, 2005.
- [14] J.S. Jo, H.S. Sim, S.B. Jung, Y.H. Moon, W.J. Jo, U.J. Woo, and S.K. Kim, "Estimation and validation of the leaf areas of five June-bearing strawberry (*Fragaria x ananassa*) cultivars using non-destructive methods," *J Bio-Envir Cont*, vol. 32, pp. 98-103, 2022.
- [15] T. Fumiomi and N. Michael, "A method for increasing fall flowering in short-day 'Carmine' strawberry," *Hortscience*, vol. 41, pp. 480-481, 2006.
- [16] J.U. An, B.K. Park, S.Y. Lee, C.G. An, and Y.H. Hwang, "Flower bud differentiation and growth of strawberry daughter plants according to nutrients and short day treatment in later nursery period," *Hortic Sci Technol*, vol. 40, pp. 80-8, 2022.
- [17] L. Hwang, S. Yun, J. Kwon, M. Park, D. Lee, H. Lee, S. Lee, S. Lee, and Y. Hong, "Effects of coir substrate application and substrate volume on the growth and yields of strawberry in hydroponically cultured system," *J Bio-Envir Cont*, vol. 31, pp. 163-169, 2022.
- [18] M. Rantannen, T. Kurokura, P. Jiang, K. Mouhu, and T. Hytonen, "Strawberry homologue of terminal flower1 integrates photoperiod and temperature signals to inhibit flowering," *The Plant Journal*, vol. 82, pp. 163-173, 2015.
- [19] H.J. Jeong, J.W. Cheong, I.R. Roh, and H.B. Jeong, "Effect of day-length control for year-round selection

- of everbearing trait on strawberry," *Kor J Hort Sci Technol*, vol. 23(Suppl I), pp. 56, May 2005.
- [20] E.S. Albregts, C.M. Howard, and C.K. Chandler, "Defoliation of strawberry transplants for fruit production in florida," *HorScience*, vol. 127, pp. 889-891, 1992.
- [21] F. Casierra-Posada, I.D. Torres, and M.M. Blanke, "Fruit quality and yield in partially defoliated strawberry plants in tropical highlands," *Gesunde Pflanzen*, vol. 65, pp. 107-112, 2013.
- [22] S.W. Ra, W.S. Kim, C.S. Moon, I.S. Woo, S.H. Oh, and T.H. Rho, "Yield and quality of 'samahberi' ever-bearing strawberry for off-season production by cultivated area," *RDA. J Agri Sci*, vol. 38, pp. 439-442, 1996.
- [23] S.W. Lee and Y.S. Chae, "Changes in fruit weight and soluble solids content of 'seolhyang' strawberry by fruit setting order of the flower cluster," *J Agri & Life Sci*, vol. 46, pp. 105-111, 2012.
- [24] W.S. Jang, S.G. Park, T.E. Kim, and H.S. Kim, "Improvement of marketability of 'Maeyang' strawberry fruit by flower thinning," *Conference of the Kor Soci for Hort Sci and Kor Soci for Bio-Envir Cont, Autum*, vol. 25, pp. 52, 2007.
- [25] H.J. Jeong, J.W. Cheong, I.R. Roh, and Y.S. Cho, "Effect of fruit thinning and axillary bud removal in strawberry cultivars 'Sunhong' and 'Maehang'," *Conference of the Kor Soci for Horti Sci and Kor Soci for Bio-Envir Cont, Autum*, vol. 25, pp. 49, 2007.
- [26] I.H. Lee, M.H. Nam, T.I. Kim, and E.M. Lee, "Effect of metconazole treatment for growth suppression of strawberry daughter plants during nursery season," *Kor J Hort Sci Technol*, vol. 33, pp. 58, 2015.
- [27] C.G. An, Y.H. Hwang, H.S. Yoon, G.M. Shon, C.S. Lim, J.L. Cho, and B.R. Jeong, "Effects of irrigation amount in rockwool and cocopeat substrates on growth and fruiting of sweet pepper during period," *Kor J Hort Sci Technol*, vol. 27, pp. 233-238, 2009.
- [28] C.G. An, Y.H. Hwang, J.U. An, H.S. Yoon, Y.H. Chang, S.J. Hwang, K.S. Kim, and H.C. Rhee, "Effects of irrigation methods for reducing drainage on growth and yield of paprika (*capsicum annum coletti*) in rockwool and cocopeat culture," *J Bio Env Con*, vol. 21, pp. 228-235, 2012.
- [29] Y. Hong, J. Lee, J. Baek, S. Lee, and S. Chung, "Growth characteristics and yields according to EC concentrations and substrates in paprika," *J Environ Sci Int*, vol. 30, pp. 605-612, 2021.
- [30] S.H. Hwang, H.W. Jeong, and S.J. Hwang, "Flowering and inflorescence development characteristics of Korean mint affected by different photoperiods," *J Bio-Envir Cont*, vol. 31, pp. 188-193, 2022.
- [31] H.J. Jun, J.G. Hwang, M.J. Son, M.H. Choi, and M.S. Cho, "Effect of substrates on the growth, yield and fruit quality of strawberry in elevated hydroponic system," *J Bio-Envir Cont*, vol. 15, pp. 317-321, 2006.
- [32] S.G. Lee, E.Y. Choi, G.H. Lim, and K.Y. Choi, "Yield and inorganic ion contents in drained solution by different substrate for hydroponically grown strawberry," *Kor J Hort Sci Technol*, vol. 36, pp. 337-349, 2018.
- [33] W.S. Kim, S.W. Ra, K.S. Seo, and W.M. Yoon, "Studies on late growing of everbearing strawberry 'Samahberi' cold storage during long period," *Kor J Hort Sci Technol*, vol.18(Suppl I), pp. 163, April 2000.
- [34] V. Winardiantika, Y.H. Lee, C.S. Yoon, J.Y. Heo, and Y.R. Yeoung, "Effects of ellepot on early growth, flowering and yield of June-bearing strawberry genotypes," *Kor J Hort Sci Technol*, vol. 33(Suppl I) pp. 67, May 2015.
- [35] C. Dong, Y. Fu, G. Liu, and H. Liu, "Low light intensity effects on the growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity, yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) at different growth stages in BLSS," *Advances in Space Research*, vol. 53, pp. 1557-1566, 2014.
- [36] H.G. Choi, B.Y. Moon, and N.J. Kang, "Correlation between strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) productivity and photosynthesis-related parameters under various growth conditions," *Frontiers in Plant Science*, 26 October, 2016.
- [37] A. Stirbet, D. Lazar, Y. Guo, and G. Govindjee, "Photosynthesis: basics, history and modelling," *Annals of Botany*, vol. 126, pp. 511-537, 2020.
- [38] E.L. Singaas, D.R. Ort, and E.H. Delucia, "Elevated CO₂ effects on mesophyll conductance and its consequences for interpreting photosynthetic physiology," *Plant Cell Envir*, vol. 27, pp. 41-50, 2004.
- [39] H.C. Lee, H.S. Kim, W.S. Jang, M.H. Nam, I.H. Lee, and H.D. Lee, "Changes of firmness, soluble solids contents, acidity, mineral nutrients contents about in various strawberry cultivars according to harvest time," *Kor J Hort Sci Technol*, vol. 29, pp. 73, 2011.

 저 자 소 개



홍영신(정회원)

2017년 충남대학교 농업기계공학과 석사 졸업.

2022년 충남대학교 농업기계공학과 박사 졸업.

2022년 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 전문연구원.

<주관심분야 : 스마트팜, 인공지능, 데이터분석>

**권진경(정회원)**

1999년 경북대학교 기계공학과 석사 졸업.

2002년 규슈대학교 총합이공학연구과 박사 졸업.

2023년 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 농업연구관.

<주관심분야 : 스마트 에너지·환경 관리>

**윤성욱(정회원)**

2007년 경상국립대학교 농공학과 석사 졸업.

2011년 경상국립대학교 농공학과 박사 졸업.

2021년 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 농업연구사.

<주관심분야 : 스마트팜, 시설환경, 농업에너지>

**백정현(정회원)**

2016년 군산대학교 컴퓨터정보공학과 박사 졸업.

2017년 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 전문연구원.

2020년 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 농업연구사.

<주관심분야 : 스마트팜, 클라우드컴퓨팅, 데이터분석>