

온실 난방 개시온도와 CO₂ 시비 농도가 애호박의 생육과 수량에 미치는 영향

구희웅¹ · 김은지¹ · 나해영² · 박경섭^{2*}

¹목포대학교 원예학과 대학원생, ²목포대학교 원예학과 교수

Effects of Heating Initiative Temperature and CO₂ Fertilizing Concentration on the Growth and Yield of Summer Squash in a Greenhouse

Hei Woong Goo¹, Eun Ji Kim¹, Hae Yeong Na², and Kyoung Sub Park^{2*}

¹Graduate Student, Department of Horticulture, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

²Professor, Department of Horticulture, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

Abstract. This study was conducted to find out the efficiency of heating initiative temperature and carbon dioxide fertilization in summer squash (*Cucurbita moschata* D.). The heating start temperature experiment was performed at 9°C, 12°C, and 15°C using an electric heater and operated when the temperature was lower than the target temperature. The CO₂ fertilization concentration experiment was performed from 7 to 12 with the control, 500 μmol·mol⁻¹, and 800 μmol·mol⁻¹ using liquefied carbon dioxide. Investigation items were plant height, stem diameter, number of leaves, leaf area, fresh weight, dry weight, also economic analysis was conducted by surveying only fruits exceeding 100 g. Photosynthesis was measured for the upper leaf position to calculate the saturation point according to the control. The photo saturation point was 587 μmol·m⁻²·s⁻¹, and the CO₂ saturation point was 702 μmol·mol⁻¹. A_{max} values by carbon dioxide were 13.4, 17.8, 17.2, 19.6, and 17.5 μmolCO₂·m⁻²·s⁻¹ in the order of 9°C, 12°C, 15°C, 500 μmol·mol⁻¹, and 800 μmol·mol⁻¹. In the temperature experiment, 9°C in growth did not grow normally and no fruiting was performed. 12°C and 15°C were higher than 9°C, but there was no significant difference in growth and production. The CO₂ fertilization experiment showed no significant difference between the treatment in growth, but the productivity of 800 μmol·mol⁻¹ was the best. Comprehensively, the heating initiative temperature of 15°C was good for crop growth and production, but there is no significant difference from 12°C, so it is good to set the heating start temperature to 12°C economically, and maintaining of 800 μmol·mol⁻¹ is effective in increasing production.

Additional key words: carbon dioxide fertilization, *cucurbita mochata* D., heating initiative temperature, photosynthesis

서론

애호박은 국내에서 주로 미숙과 상태로 이용되는 호박으로 둥근 형태의 풋호박과 함께 대표적인 동양계 호박(*Cucurbita moschata* D.) 중의 하나이다. 폐포종인 ‘주키니’와 동양종 호박인 ‘서울마디’의 중간교잡 후대로부터 1974년에 육성한 애호박 최초의 품종은 ‘불암사철애호박1호’이고, 최근 애호박 품종들은 과일의 표피 색깔이 연하고 밝은 방향으로 육성되고 있다(Ko와Cho, 2013). 애호박은 주키니 호박에 비해 물성이 강해 찌개와 전에 사용하여도 형태를 유지함에 탁월하여 국내 식탁에서 많이 사용된다(Park 등, 2010). 2020년 호박의 재배

면적은 773.5ha이고 애호박은 593.3ha 그중 시설 애호박의 재배면적은 228.1ha이다(KOSIS, 2020).

호박은 22 – 23°C가 생육 적온이며 35°C 이상의 고온에서는 화이분화에 이상이 생겨 착과 불량이 유발될 수 있다. 호박은 같은 박과 작물인 오이에 비해 단위결과가 매우 낮은 편이라 인공수분 또는 호르몬제를 이용한 착과처리가 필요하다. 다른 박과 작물에 비해 낮은 10°C에서 저온에서 수정은 가능하지만, 원활한 수정을 위해서는 16°C 이상의 조건 유지해주는 것이 좋다고 알려져 있다(NeSmith, 1997). 온실의 온도는 CO₂ 농도, 광량, 수분과 함께 광합성에 중요한 요소이다. 높은 온도에서는 호흡량 증가 및 광합성량 저하, 낮은 온도에서는 증산량과 효소반응이 더뎌져 정상적인 생육이 어렵다. 작물에 적합한 최적 환경제어 기술은 작물의 생육과 수확물 품질에 매우 중요한 요인이다(Dorais, 2003; Heuvelink와Challa,

*Corresponding author: unicos75@mokpo.ac.kr

Received October 14, 2022; Revised October 25, 2022;

Accepted October 26, 2022

1989).

저온기 온실은 환기량이 적어 광합성이 활발한 시간에 CO₂ 농도가 낮아져 광합성 속도 저하로 생육이 느려질 수 있어 농가에서는 CO₂ 시비를 한다(Jeong 등, 2022). 토마토에서 CO₂와 온도 상승이 수량과 과실 특성에 영향을 준다는 연구(Lee 등, 2008)가 있었고 토마토 묘 생산시 24.7°C와 CO₂ 동시 처리 시 다른 처리구에 비해 생육이 촉진되는 것을 알 수 있었지만(Ahn 등, 2003), 하우스 애호박 재배에서 난방온도와 CO₂ 시비에 관한 연구는 시도되지 않았다. 애호박의 경우 CO₂ 시비와 난방 개시 온도에 대한 데이터가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 난방 개시 온도와 CO₂ 시비에 따라 애호박의 생육과 생산량에 미치는 영향을 조사하여 저온기 애호박 재배환경을 정량화하였다.

재료 및 방법

1. 재배 조건

본 실험은 목포대학교 부속농장 내 2중 PE 필름 플라스틱 하우스(1중: 19.5×8.2×5.0m; 2중: 17.5×7.5×4.5m)에서 진행하였고 온실 안에 분리된 공간(4×3×3m)을 조성하여 2019년 12월부터 2020년 4월까지 실험을 진행하였다. 공시작물은 애호박 ‘농우애’(Nongwoo-ae, Nongwoo-Bio, Icheon, South Korea)를 사용하여 50공 플러그트레이에 파종 후 28일째에 코코피트 슬라브(110×20×10cm)에 정식하였다. 양액은 서울시립대 애호박 배양액을 기준으로 EC 3.0mS·cm⁻¹, pH 5.5를 기준으로 관수하였다. 관수 주기는 적산일사량이 100J·cm⁻² 일 때 생육초기 100mL, 생식생장 이후는 200mL를 급액하였다. 온실 내부 온도는 환기창 제어 방식을 이용하여 시간대에 따른 목표 온도를 설정하여 목표 온도보다 실내 온도가 높아지면 환기창이 열리도록 하였다.

2. 난방개시온도 실험

저온기 난방 개시 온도 조절을 위해 전기 온열장치(SWE-15F, Shinwoo Automatic, Daegu, Korea)를 사용하였다. 전기 온열장치의 난방 개시 온도를 9°C, 12°C, 15°C로 설정하여 목표 온도 이하에서만 작동하게 하였다. 일몰 후에 10°C 이하로 내려가기 때문에 야간 난방이 주목적이지만 주간에도 폭설과 한파로 광량이 적어지고 온실 열 손실이 클 때도 사용하였다(Jeon 등, 2022).

3. CO₂ 시비 농도 실험

온실에서 CO₂ 농도는 해가 뜨기 시작한 시점부터 감소하다 해가 진 후에 증가하는 양상을 반복한다. 주간에 환기를 통한

가스 교환으로 CO₂ 농도를 유지해 줄 수 있지만 저온기에는 환기가 원활하지 않아 CO₂ 고갈 상태가 되기 쉽다. 처리 조건으로 무처리구(15°C), 500μmol·mol⁻¹(15°C), 800μmol·mol⁻¹(15°C)로 설정하였고 시비 시간은 7시부터 12시까지 진행하였다. 가스는 공기 유동에 의해 흩어지기 쉽기 때문에 환기창이 30% 이상 열리면 시비를 정지하였다. CO₂는 식음료용 액화 탄소를 이용하였다.

4. 광합성 특성 조사

잎의 동화산물 생산 상태를 알아보기 위해 성장점 기준 5-7마디의 잎을 대상으로 광합성 측정기(Li-6800, Li-Cor Inc., Nebraska, USA)를 이용하여 측정하였다. CO₂ 반응 측정 시 CO₂ 농도는 100, 200, 400, 600, 800, 1200, 1600μmol·mol⁻¹으로 설정하였고 Light 반응 측정 시 광량을 1600, 1200, 800, 400, 200, 100, 0μmol·m⁻²·s⁻¹으로 측정하였다. 챔버 온도는 25°C, 상대습도 55%이다. 작물의 광포화점과 CO₂ 포화점은 무처리구(15°C)를 이용하여 산출하였다. 광합성 반응곡선은 점근선을 가진 지수 함수식(Eq. 1)을 사용하였다(Kume과 Ino, 1993; Kim과 Lee, 2001a).

$$A = A_{\max} \left(1 - \exp\left(-\frac{\phi I}{A_{\max}}\right)\right) - R \quad (1)$$

A : 광합성 속도

φ : 초기 기울기

I : CO₂ 농도

A_{max} : 최대 광합성 속도

R : 호흡속도

5. 생육조사 및 수확량 조사

애호박의 생육조사는 정식 후 29일차부터 진행하였고 초장, 엽수, 줄기굵기, 생체중, 건물중, 엽면적을 조사하였다. 엽면적은 엽면적측정기(LI-3100C, Li-Cor Inc, Nebraska, USA)를 이용하여 측정하였다. 개화 당일 수정능력이 가장 높은 오전에 생장조절제 토마토톤(4-CPA, FarmHannong, Seoul, Korea)을 이용해 수정하였고 7-10일 후 애호박 수확이 가능하였다. 애호박 생산량은 2020년 3월 23일부터 4월 6일까지 수확한 200g 이상의 과실을 대상으로 무게와 수량을 조사하였다.

6. 수확량에 대한 해석과 경제성 분석

수확량을 해석하기 위해 생육도일 온도(growing degree days, GDD)와 12°C, 15°C의 생산량을 이용하였고 회귀 분석

에는 3개의 매개변수를 가진 시그모이드 함수를 이용하였다 (Kim 등, 2018). Base temperature는 호박의 최저 한계온도인 8°C로 설정하였다(Lee 등, 2014; Wi 등, 2021). 생육도일 온도가 음수가 될 경우 0으로 처리하였다.

$$GDD = \sum \left(\frac{Max\ temp. + Min\ temp.}{2} - Base\ temp. \right) \quad (2)$$

Max temp. : 일 최고 기온

Min temp. : 일 최저 기온

Base temp. : 발육이 정지되는 최저온도

경제성 분석은 2020년 2월의 수익성과 지출에 따른 순이익을 구하였다. 수익은 2020년 2월의 애호박의 평균 가격을 이용하였고 지출은 기간난방부하에 따른 연료소비량과 CO₂ 소비량을 산출하였다.

7. 데이터 수집 및 통계 분석

온실 환경 계측은 데이터로거(CR1000X, Cambell Sci., USA)를 이용하여 측정, 수집하였다. 내부 환경과 작물 생육에 관한 통계분석은 통계 프로그램 R(4.2.1, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria)을 사용하여 일일 배치 분산분석을 수행하였고, 사후분석으로 DMRT(Duncan's multiple range test)를 사용하였다. 회귀분석과 그래프 작성에는 시그마 플롯(Sigmaplot 14.5)을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 온실 내 환경 분석

실험 장소인 2중 PE 플라스틱하우스의 1월부터 3월까지 온실 외·내부의 PPFd 변화를 조사하였다(Fig. 1). 온실 밖의 PPFd는 꾸준히 상승하였지만 온실 내의 PPFd는 2월까지

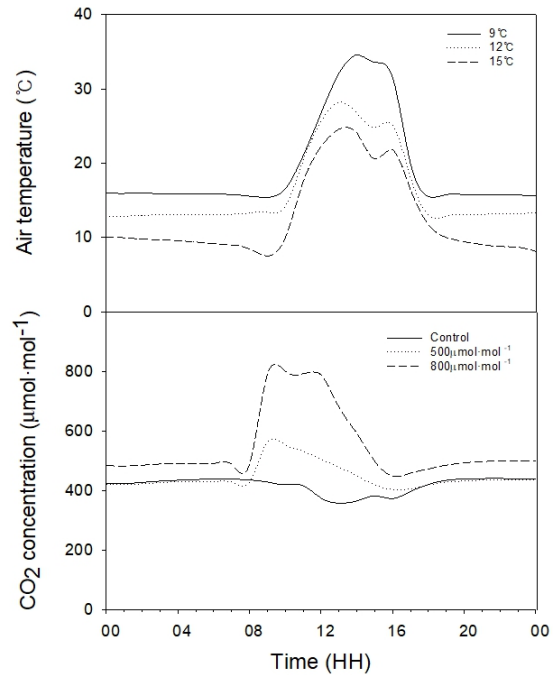


Fig. 2. Daily change of temperature and CO₂ concentration in greenhouse at the January 23th, 2020.

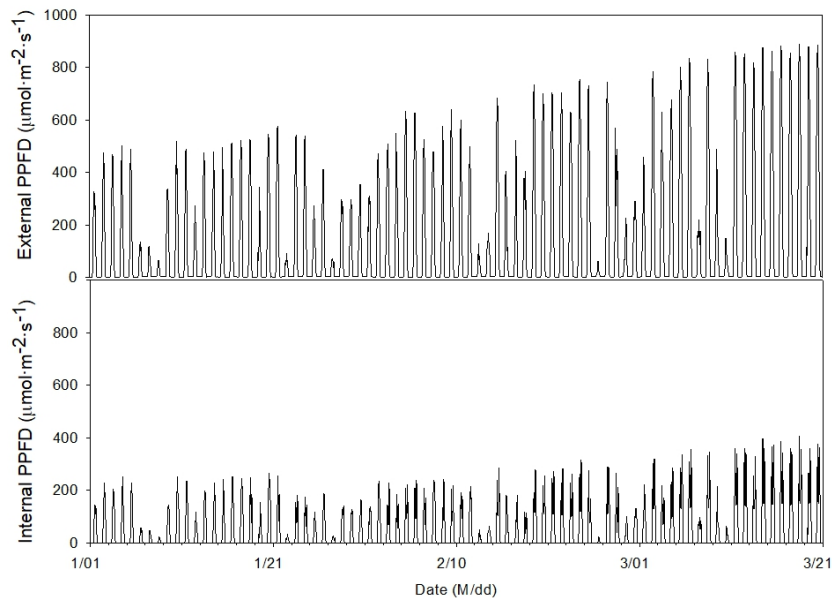


Fig. 1. Change of photosynthetic photon flux density (PPFD) during experimental period in greenhouse.

170 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 유지되다 3월부터 상승하기 시작하였다. 1월 23일 중 온도와 CO₂ 변화는 Fig. 2와 같다. 전기 온열장치로 인한 난방 설정 온도는 9°C, 12°C, 15°C이지만 야간 최저기온은 9.5°C, 13.1°C, 15.8°C로 설정 온도와 0.5°C, 1.1°C, 0.8°C 차이가 나타났다. 대조구의 CO₂는 환기장이 거의 열리지 않아 8-14시까지 감소하였다. 이는 일반적인 저온기 온실에서 관찰할 수 있는 특징이다. CO₂ 농도는 8시부터 상승하여 목표 농도에 도달까지 약 1시간 30분 정도 걸렸고, 시비가 종료되는 12시부터 CO₂가 천천히 감소하는 것을 알 수 있다.

2. 처리 간 광합성 분석

애호박 단엽에 대한 광합성 측정은 일출 1시간 후부터 측정하였다. 광 포화점(Fig. 3)과 CO₂ 포화점은 난방 개시 온도가 15°C인 대조구의 데이터를 이용하여 산출하였는데 광포화점은 587 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO₂ 포화점은 702 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 이었다(Park 등, 2016). 난방 개시 온도에 따른 광합성률을 비교하였을 때 9°C는 다른 처리에 비해 낮은 광합성 속도(Fig. 4)를 보였다(Rowan과 Davod, 2007). 이는 온도가 효소 활성에 영향을 준다는 선행연구와 비교했을 때 광합성은 효소의 관여를 받는 기작으로 저온에서 효소의 활성이 낮아진 것으로 보인다(Lakso와 Kliewer, 1975).

CO₂ 시비에 따른 광합성률은 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 이 가장 높았다(Fig. 4). 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 은 저농도에서 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 과 고농도에서 대조구와 유사한 경향을 보였다. 대조구에 비해 CO₂ 시비구의 광합성률이 높은 것은 높아진 CO₂ 농도에서 식물 엽내의 CO₂ 분압 상승에 의하여 광합성이 촉진되기 때문이다(Kim과 Lee, 2001b).

3. 애호박의 생육 및 생산량 분석

야간 난방 개시 온도에 따른 실험에서 9°C 처리는 거의 생육이 진행하지 않았다(Fig. 5). 15°C와 12°C는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았지만 15°C에서 생체중, 건물중을 제외한 다른 항목에서 수치가 더 높았다(Table 1). 난방 개시 온도가 9°C일 때는 착과가 이루어지지 않아 수확량 그래프에서 제외하였고, 12°C와 15°C는 각각 5.1kg과 5.3kg을 수확하여 0.2kg 차이가 나타났다(Fig. 6). 호박의 생육 적온은 낮 온도는 22-25°C이고 밤 온도는 13-15°C이다. 난방 개시 온도

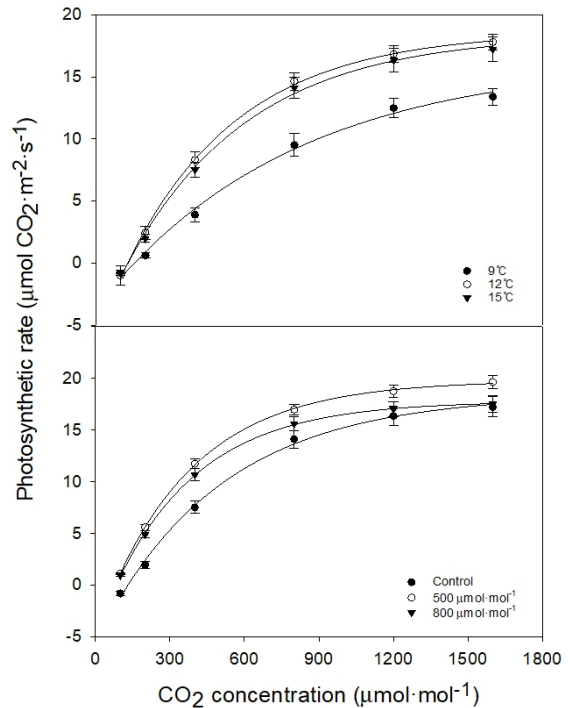


Fig. 4. The CO₂ response curve of photosynthetic rate for summer squash after heating starting temperature and CO₂ enrichment concentration treatments.

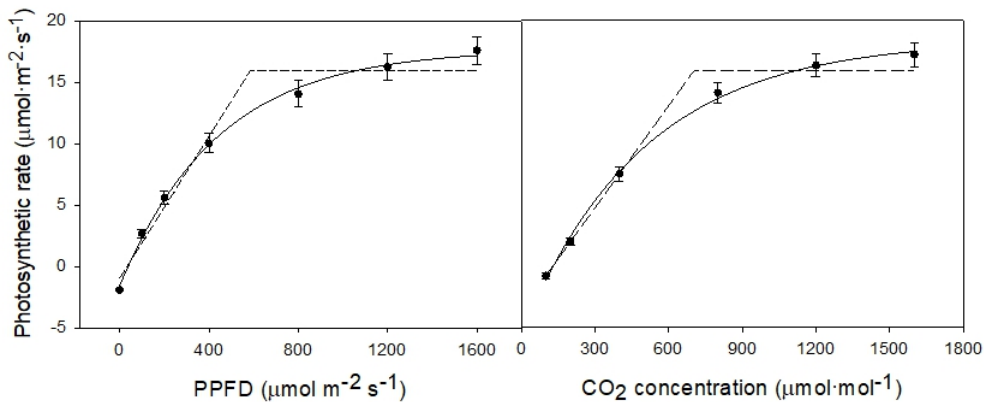


Fig. 3. The graphs of photosynthetic rate of summer squash according to photosynthetic photon flux density and CO₂ concentration.



Fig. 5. Photographs of summer squash shoot due to heating starting point treatment of 9 (left), 12 (middle), and 15°C (right).

Table 1. Effects of temperature on the growth characteristics of summer squash grown in a greenhouse.

Temperature (°C)	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	No. of nodes	Leaf area (cm ²)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
9	52.8 b ^z	7.0 c	22.3 b	1,489 b	99.0 b	10.2 b
12	240 a	11.0 b	33.5 a	7,021 a	670 a	99.5 a
15	249 a	12.3 a	35.5 a	7,058 a	649 a	94.4 a

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

Table 2. Effects of CO₂ concentration on the growth characteristics of summer squash grown in a greenhouse.

CO ₂ concentration (μmol·mol ⁻¹)	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	No. of nodes	Leaf area (cm ²)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Control (15°C)	249 a ^z	12.3 a	35.5 a	7,058 a	649 a	94.4 a
500	252 a	11.4 a	37.3 a	7,072 a	638 a	88.0 a
800	289 a	12.3 a	41.5 a	7,318 a	764 a	104.0 a

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

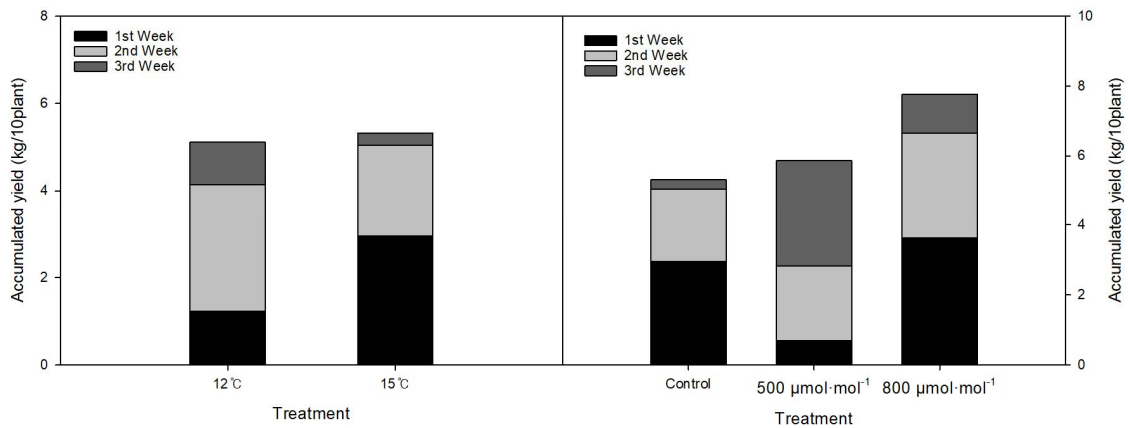


Fig. 6. The accumulated yields of summer squash due to heating starting temperature and CO₂ concentration treatments.

12°C와 15°C 처리구의 측정된 온도가 13.1°C, 15.8°C인 것으로 보았을 때 두 처리구는 저온 스트레스를 받지 않는 온도인 것을 알 수 있다. 이에 반해 9°C는 야간에 저온 스트레스에 노출되었고 수정 가능 최저 온도인 10°C보다 낮아 착과가 이루어지지 않은 것으로 보인다.

CO₂ 처리에 따른 실험은 모든 항목에서 800μmol·mol⁻¹, 500μmol·mol⁻¹, 대조구 순으로 높았지만 유의성을 보이지 않았다(Table 2). 수확량에서 7.8kg, 5.9kg, 5.3kg으로 대조구에 비해 46%, 10% 높은 수확량을 얻었다. CO₂ 시비가 토마토 생육과 생산량을 증가시켰다는 보고된 바와 같이 박과에서도 CO₂ 시비가 생육과 생산량을 증가시켰다(Peter와 Peter, 1978).

4. 생육도일 온도(GDD)와 누적수확량의 관계 및 경제성 분석

생육도일 온도와 누적 수확량과의 관계를 회귀 분석을 통해서 나타낸 것이다(Fig. 7). 애호박 수확 기간은 16일 동안 조사한 것으로 초기 15°C의 수확량이 많지만 조사 후기에는 거의 비슷한 수준으로 나타났다. 이는 개화부터 수확까지 난방 개시 온도 15°C 조건에서 8.3일(34.3g/일), 12°C 조건에서 9.6일(28.3g/일) 소요되었고, 온도에 따른 과실비대 속도로 인해 수확 시기에 차이가 발생한 것으로 추정된다.

난방 개시 온도에 따른 경제성 분석 결과 9°C는 착과가 이루어지지 않아 손해가 발생하였다(Table 3). 하지만 12°C와 15°C 처리구의 연소 소비량은 2,891L와 4,955L로 약 1.7배 차이로 나타났다. 난방 개시 온도 15°C 처리구의 생산량이 많았지만, 연료 소모량이 많아 순수익은 12°C가 높았다(Kwon 등,

2018). CO₂ 시비 농도에 따른 CO₂ 소모량은 500μmol·mol⁻¹ 3,320kg, 800μmol·mol⁻¹ 13,280kg 으로 4배의 차이가 났다. 천창 환기 시 높은 농도의 CO₂는 외부와 빠르게 누출되기 때문에 시비 정지 조건인 환기창 개폐 30%까지 더 많은 양의 CO₂를 사용하게 되었다. 그로 인해 CO₂ 구매 비용도 4배였지만 CO₂ 800μmol·mol⁻¹인 처리구에서 수확량이 대조구 대비 46% 정도 높아져 전체 순수익이 높은 결과를 얻었다. 이상의 결과를 종합적으로 보면 난방 개시 온도는 15°C인 것은 작물 생육과 생산에는 좋았지만 12°C와 유의적인 차이가 없어 경제적 측면에서 애호박 하우스 난방 개시 온도를 12°C로 설정하고, CO₂ 시비 농도 800μmol·mol⁻¹를 유지하는 게 생산량 증가에 효과적이라는 결론을 얻었다.

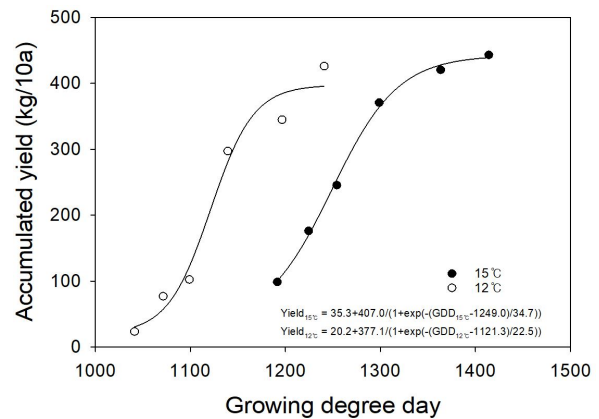


Fig. 7. Relations of accumulated yield and growing degree day (GDD) of summer squash grown in 12°C and 15°C treatment under plastic house.

Table 3. Economical analysis by heating temperature and CO₂ fertilization concentration.

Treatment	Seasonal heating load ^f (kcal·m ⁻² ·mon)	Kerosene consumption ^y (L·10a ⁻¹)	CO ₂ consumption ^x (kg·10a ⁻¹)	Gross profit ^w (won·10a ⁻¹)	Kerosene charges ^v (won·10a ⁻¹)	CO ₂ charges ^u (won·10a ⁻¹)	Income (won·10a ⁻¹)
9°C	7,130,852	1,013	-	-	814,452	-	-814,452
12°C	20,350,526	2,891	-	11,722,232	2,324,364	-	9,397,868
Control (15°C)	35,167,067	4,995	-	12,193,808	4,015,980	-	8,177,828
500μmol·mol ⁻¹ (15°C)	35,167,067	4,995	3,320	13,446,913	4,015,980	996,000	8,434,933
800μmol·mol ⁻¹ (15°C)	35,167,067	4,995	13,280	17,796,555	4,015,980	3,984,000	9,796,575

^fSeasonal heating load was calculated from February 1st, 2020 to February 29th, 2020.

^yHeater was provided from February 1st, 2020 to February 29th, 2020.

^xPrice of summer squash fruit is 3016 won·kg⁻¹.

^wCO₂ was provided from February 1st, 2020 to February 29th, 2020.

^vAverage price of tax-free kerosene is 804 won·L⁻¹ for 2020.

^uPrice of CO₂ is 300 won·kg⁻¹.

적 요

본 연구는 난방 개시 온도와 CO₂ 시비의 효율을 알아보기 위해 수행되었다. 난방 개시 온도 실험은 9°C, 12°C, 15°C로 구분하여 목표 온도보다 낮아지면 전기 온열기구가 작동하게 하였다. CO₂ 시비 농도 실험은 액화탄산가스를 이용하여 무처리, 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 으로 7시부터 12시까지 처리하였다. 생육 특성으로 초장, 경경, 엽수, 엽면적, 생체중, 건물중을 조사하였고, 200g 넘는 과실만을 대상으로 수량을 조사하여 경제성 분석을 하였다. 상위엽에 대한 광합성 측정용 하여 처리에 따른 포화점을 산출하였다. 애호박의 광포화점은 587 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었고 CO₂ 포화점은 702 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 이었다. CO₂에 의한 A_{max}값은 9°C, 12°C, 15°C, 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 순으로 13.4, 17.8, 17.2, 19.6, 17.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었다. 온도 실험에서 9°C는 생육과 착과가 정상적으로 이루어지지 않았다. 12°C와 15°C는 9°C보다 높았지만 생육과 생산에서 유의미한 차이를 보이지 않았다. CO₂ 농도 실험은 생육에서 처리구간 유의한 차이를 보이지 않았지만 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 의 생산성이 가장 좋았다. 이상의 결과를 종합적으로 보면 난방 개시 온도는 15°C인 것은 작물 생육과 생산에는 좋았지만 12°C와 유의적인 차이가 없어 경제적 측면에서 난방 개시 온도를 12°C로 설정하는 것이 좋은 것으로 보이며, CO₂ 시비 농도 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 를 유지하는 것이 생산량 증가에 효과적이었다.

추가 주제어: CO₂ 시비, 광합성, 난방 개시온도, 애호박

사 사

본 결과물은 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연구개발사업단의 스마트팜다부처패키지혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(421003-04, 421041-03).

Literature Cited

- Ahn C.K., Y.W. Choi, B.G. Son, and J.S. Kang 2003, Production of high quality tomato seedlings by CO₂ and temperature control in glass house. *Hortic Environ Biotechnol* 44:182-186. (in Korean)
- Dorais M. 2003, The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. *Can Greenhouse Conf* 9:1-8.
- Heuvelink E., and H. Challa 1989, Dynamic optimization of artificial lighting in greenhouses. *Acta Hort* 260:401-402. doi:10.17660/ActaHortic.1989.260.26
- Jeon Y.H., E.J. Kim, S.H. Ju, D.J. Myung, K.H. Kim, S.J. Lee, and H.Y. Na 2022, Comparison of climate between a semi-closed and conventional greenhouse in the winter season. *Hortic Sci Technol* 40:400-409. (in Korean) doi:10.7235/HORT.20220036
- Jeong Y.A., D.C. Jang, J.K. Kwon, D.H. Kim, and E.Y. Choi 2022, Analysis of spatial and vertical variability of environmental parameters in a greenhouse and comparison of carbon dioxide concentration in two different types of greenhouses. *J Bio-Env Con* 31:221-229. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2022.31.3.221
- Kim P.G., and E.J. Lee 2001a, Eco-physiology of photosynthesis 1: Effects of light intensity and intercellular CO₂ pressure on photosynthesis. *Korean J Agric For Meteorol* 3:126-133.
- Kim P.G., and E.J. Lee 2001b, Eco-physiology of photosynthesis 3: Photosynthetic responses to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature. *Korean J Agric For Meteorol* 3:238-243.
- Kim S.K., J.H. Lee, H.J. Lee, S.G. Lee, B.H. Mun, S.W. An, and H.S. Lee 2018, Development of prediction growth and yield models by growing degree days in hot pepper. *Protected Hort Plant Fac* 27:424-430. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2018.27.4.424
- Ko K.D., and I.H. Cho 2013, Protected horticulture of Korea. RDA, Jeonju, Korea, p 64. (in Korean)
- KOSIS 2020, Agriculture Crop Production Survey: Vegetable Production. <https://kosis.kr>. (in Korean)
- Kume A., and Y. Ino 1993, Comparison of eco-physiological responses to heavy snow in two varieties of *Acuba japonica* with different areas of distribution. *Ecol Res* 8:111-121. doi:10.1007/BF02348523
- Kwon J.K., I.H. Yu, K.S. Park, J.H. Lee, J.H. Kim, J.S. Lee, and D.S. Lee 2018, Supplemental lighting by HPS and PLS lamps affects growth and yield of cucumber during low radiation period. *Protected Hort Plant Fac* 27:400-406. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2018.27.4.400
- Lakso A.N., and W.M. Kliewer 1975, The influence of temperature on malic acid metabolism in grape berries. *Plant Physiol* 56:370-372. doi:10.1104/pp.56.3.370
- Lee I.B., S.B. Kang, and J.M. Park 2008, Effect of elevated carbon dioxide concentration and temperature on yield and fruit characteristics of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Korean J Environ Agric* 27:428-434. (in Korean) doi:10.5338/KJEA.2008.27.4.428
- Lee J.M., Y.S. Kim, I.S. Kim, J.G. Seo, H.H. Seo, Y.J. Yang, D.G. Oh, Y.R. Yeoung, H.W. Young, J.Y. Yoon, S.G. Lee, Y.B. Lee, J.M. Lee, H.J. Jeon, G.W. Choi, and J.M. Choi 2014, Vegetable Sciences General. Hyangmunsa, Seoul, Korea, pp 159-167. (in Korean)

- NeSmith D.S. 1997, Summer squash (*Cucurbita pepo* L.) leaf number as influenced by thermal time. *Sci Hortic* 68:219-225. doi:10.1016/S0304-4238(96)00952-1
- Park K.S., S.K. Kim, Y.Y. Cho, M.K. Cha, D.H. Jung, and J.E. Son 2016, A coupled model of photosynthesis and stomatal conductance for the ice plant (*Mesembryanthemum crystallinum* L.), a facultative CAM plant. *Hortic Environ Biotechnol* 57:259-265. doi:10.1007/s13580-016-0027-7
- Park K.S., Y.C. Huh, H.E. Lee, D.K. Park, and J.K. Kwon 2010, Effect of plastic bagging cultivation of summer squash (*Cucurbita moschata*) on improvement of quality and extension of storage period. *J Bio-Env Con* 19:372-376. (in Korean)
- Peter R.H., and A.J. Peter 1978, Effects of greenhouse CO₂ enrichment on the yield and photosynthetic physiology of tomato plants. *Can J Plant Sci* 58:801-817. doi:10.4141/cjps78-119.
- Rowan F.S., and S.K. David 2007, The temperature response of C₃ and C₄ photosynthesis. *Plant Cell Environ* 30:1086-1106. doi:10.1111/j.1365-3040.2007.01682.x
- Wi S.H., K.H. Yeo, H.S. Choi, I.H. Yu, H.J. Lee, and H.J. Lee 2021, Effects of low air temperature and light intensity on yield and quality of tomato at the early growth stage. *J Bio-Env Con* 30:448-454. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2021.30.4.448