

## 겨울과 봄철의 CO<sub>2</sub> 시비 토마토 온실에서 온도에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 구명

최수현<sup>1</sup> · 우영회<sup>3</sup> · 장동철<sup>4,5</sup> · 정영애<sup>1</sup> · 윤서아<sup>1</sup> · 김대현<sup>5,6</sup> · 서호석<sup>7</sup> · 최은영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국방송통신대학교 대학원 농업생명과학과 연구원, <sup>2</sup>한국방송통신대학교 대학원 농업생명과학과 교수,  
<sup>3</sup>국립한국농수산대학교 원예환경시스템학과 교수, <sup>4</sup>강원대학교 원예학과 교수, <sup>5</sup>강원대학교 스마트농업융합학과 교수,  
<sup>6</sup>강원대학교 에너지공학과 교수, <sup>7</sup>㈜시드웨어 대표

## Determination of Carbon Dioxide Concentration in CO<sub>2</sub> Supplemental Greenhouse for Tomato Cultivation during Winter and Spring Seasons

Su-Hyun Choi<sup>1</sup>, Young-Hoe Woo<sup>3</sup>, Dong-Cheol Jang<sup>4,5</sup>, Young-Ae Jeong<sup>1</sup>, Seo-A Yoon<sup>1</sup>,  
Dae-Hyun Kim<sup>5,6</sup>, Ho-Seok Seo<sup>7</sup>, and Eun-Young Choi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Department of Agriculture and Life Science, Korea National Open University, Seoul 03087, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Agriculture and Life Science, Korea National Open University, Seoul 03087, Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Horticulture Environment System, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

<sup>4</sup>Department of Horticulture, College of Agriculture and Life Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

<sup>5</sup>Department of Interdisciplinary Program in Smart Agriculture, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

<sup>6</sup>Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture and Life Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

<sup>7</sup>Seedware Ltd. Huseok-ro 420 beon-gil 7, Chuncheon-si, Gangwon-do, Republic of Korea

**Abstract.** This study was aimed to determine the changes in CO<sub>2</sub> concentration according to the temperatures of daytime and nighttime in the CO<sub>2</sub> supplemental greenhouse, and to compare calculated supplementary CO<sub>2</sub> concentration during winter and spring cultivation seasons. CO<sub>2</sub> concentrations in experimental greenhouses were analyzed by selecting representative days with different average temperatures due to differences in integrated solar radiation at the growth stage of leaf area index (LAI) 2.0 during the winter season of 2022 and 2023 years. The CO<sub>2</sub> concentration was 459, 299, 275, and 239  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , respectively at 1, 2, 3, and 4 p.m. after the CO<sub>2</sub> supplementary time (10:00-13:00) under the higher temperature (HT, > 18°C daytime temp. avg. 31.7, 26.8, 23.8, and 22.4°C, respectively), while it was 500, 368, 366, 364  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , respectively under the lower temperature (LT, < 18°C daytime temp. avg. 22.0, 18.9, 15.0, and 13.7°C, respectively), indicating the CO<sub>2</sub> reduction was significantly higher in the HT than that of LT. During the nighttime, the concentration of CO<sub>2</sub> gradually increased from 6 p.m. (346  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) to 3 a.m. (454  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) in the HT with a rate of 11  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  per hour (240 tomatoes, leaf area 330m<sup>2</sup>), while the increase was very lesser under the LT. During the spring season, the CO<sub>2</sub> concentration measured just before the start of CO<sub>2</sub> fertilization (7:30 a.m.) in the CO<sub>2</sub> enrichment greenhouse was 3-4 times higher in the HT (>15°C nighttime temperature avg.) than that of LT (< 15°C nighttime temperature avg.), and the calculated amount of CO<sub>2</sub> fertilization on the day was also lower in HT. All the integrated results indicate that CO<sub>2</sub> concentrations during the nighttime varies depending on the temperature, and the increased CO<sub>2</sub> is a major source of CO<sub>2</sub> for photosynthesis after sunrise, and it is necessary to develop a model formula for CO<sub>2</sub> supplement considering the nighttime CO<sub>2</sub> concentration.

**Additional key words:** dark respiration, daytime temperature, leaf area index, nighttime temperature

## 서 언

이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 작물의 생육, 수량 및 품질을 촉진시킨다고 알려져 있어(Bowes, 1993), 해외 토마토 시설재배 농가에서는 일반적으로 CO<sub>2</sub> 시비를 한다(Nederhoff와 De Graaf,

\*Corresponding author: ch0097@knou.ac.kr

Received October 9, 2023; Revised October 26, 2023;

Accepted October 26, 2023

1993). CO<sub>2</sub> 시비에 의한 생육, 수량 및 식물 생리적 반응에 관한 연구는 많이 수행되어왔지만 CO<sub>2</sub> 시비와 주·야간 온도와 의 연관성에 관한 연구는 부족한 실정이다. Behboudian과 Lai(1994)는 CO<sub>2</sub> 시비가 낮이나 오후 시간대보다 오전 시간대에 더 효과적인데 그 이유는 광합성율이 일정한 환경 조건에서 오전 중에 최대로 높은 것과 관련이 있다고 하였다. 최근 연구 결과에서 여름철 오이 온실의 주야간 온도[주간/야간 35/10°C(LT) 또는 25/20°C(HT)]와 CO<sub>2</sub> 농도[대조구{atmospheric CO<sub>2</sub>(aCO<sub>2</sub>): 400 – 600 μmol·mol<sup>-1</sup> 또는 고농도 {elevated CO<sub>2</sub>(eCO<sub>2</sub>): 800 – 1,000 μmol·mol<sup>-1</sup>} 처리를 하였을 때 eCO<sub>2</sub> 처리로 탄소 동화작용 및 동화산물의 축적이 증가되었고 과실의 건물중 비율이 높아졌으며, 낮은 야간온도(LT; 35/10±2°C, day/night) 처리는 높은 야간온도(HT; 25/20±2°C, day/night)보다 잎의 호흡 억제로 광합성 산물의 전류가 증가된 것으로 나타나 CO<sub>2</sub> 시비와 온도 환경의 관계성이 중요하다는 것을 알 수 있다(Namizaki 등, 2022).

CO<sub>2</sub> 시비는 에너지 자원의 소모이므로 재배 시기에 따른 합리적 관리가 필요하다(Ayari 등, 2000). Tartachnyk와 Blanke(2007)는 1월의 온실 토마토 잎의 최대 광합성량은 6 – 8 μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 수준이었고, 광보상점은 PAR 26 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>이었는데 2월에는 광보상점이 39 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>로 1월보다 증가하였고 이 결과는 1월보다 2월에 증가한 광량과 광주기에 잎이 적응한 결과라고 하였다. 또한, 토마토 잎의 야간 호흡량은 1월에 약 2 μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>이었고 2월에 3 μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>이었다. 효과적인 CO<sub>2</sub> 시비와 관련하여 재배 온도에 따른 식물의 야간 호흡으로 인한 CO<sub>2</sub> 변화에 대한 연구는 많지 않은 상황이다. 본 연구는 겨울과 봄철의 CO<sub>2</sub> 시비 토마토 수경 온실에서 낮과 밤의 온도 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 관찰하고 그에 따른 계산된 CO<sub>2</sub> 공급량을 관찰하고자 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 1. 겨울철 CO<sub>2</sub> 시비 온실에서 온실 온도에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화(실험 1의 1, 2차 실험)

본 연구의 1차 실험은 2021년 11월 21일부터 2022년 3월 31일까지, 2차 실험은 2022년 10월 30일부터 2023년 1월 31일까지 제주시 구좌읍 김녕리 폴리올레핀[polyolefin, PO(0.15 mm), Dabong, IhshinChemical, Ansan-si, Korea] 단동형 비닐 복합환경제어 온실[면적 168m<sup>2</sup>, 규격 6m(W)×28m(L)×4.6m(H)]에서 실시하였다. 1차 정식은 여주육묘장에서 60일 재배된 토마토[*Solanum lycopersicum* L. ‘Minichal’ (scion), *S. lycopersicum* L. ‘Tankone’(rootstock)] 모종을 암면 블록(10×10×6.5cm, Rockwool, Grotop Expert, Grodan

Co., Roermond, The Netherlands)에 이식하여 코코피트 배지(100cm×20cm×10cm, chip:dust 5:5, Kyungnong, Seoul, Korea)에 2주씩 심어 총 240주를 정식하여 주지와 측지 1개를 유인하여 2줄기로 재배하였다. 2차 실험 정식은 여주육묘장에서 60일 재배된 토마토[*S. lycopersicum* L. ‘Betatini+’ (scion), *S. lycopersicum* L. ‘B.K.O’(rootstock)] 216주를 코코피트 배지(100cm×20cm×10cm, chip:dust 5:5, Kyungnong, Seoul, Korea)에 3주씩 정식하였다. 급액과 온실 내부 환경은 1, 2차 실험이 동일하게 수행되었다.

급액은 Yamazaki 토마토 배양액[KNO<sub>3</sub> 40.4kg, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 35.4kg, Fe-EDTA 1.53kg, KNO<sub>3</sub> 20.2kg, NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 7.6kg, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 24.6kg, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 114g, MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 81g, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 9g, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 4g, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 1g(1,000L, 100배)]으로 pH와 EC 수준을 각각 6.0, 1.8 – 2.4 dS·m<sup>-1</sup>로 생육 시기별로 조정하여 자동급액시스템(Koasis-5000, Seowon Co., Ltd., Bucheon, Korea)으로 공급하였다. 급액량은 누적 광량이 오전 7시30분부터 900 – 1,800kJ에 도달하였을 때 1회 급액량이 100 – 180mL가 되도록 설정하였고 급액 최대 대기시간을 2시간, 최소 대기시간을 30분으로 설정하여 오후 3시 전에 급액이 종료되도록 하였다. 난방은 공기열 히트펌프(SFC -120TFV, Mungsung Ref. and Heat Industrial Co., Ltd., Yangju, Korea)를 이용하여 열이 온실 내부에 덕트로 균일하게 분배되도록 하였으며 최저온도가 15°C가 되도록 설정하였다. CO<sub>2</sub> 시비는 LPG 연소형 CO<sub>2</sub> 발생기(KCH-21SV, KATSURA, Long An, Vietnam)를 이용하여 1차 실험은 2022년 1월 18일부터 3월 12일까지 오전 10시부터 13시에, 2차 실험은 2022년 11월 3일부터 2023년 1월 28일까지 오전 10시부터 13시에 목표 CO<sub>2</sub> 농도(600 μmol·mol<sup>-1</sup>)로 공급하였다. 전 실험 기간동안 시설 내·외부 기상환경(온도, 상대습도, 외부 일사량)은 스마트팜 복합환경제어반(HRT1000, Hyorimtech Co., Ltd., Jeju, Korea)에 기록되었고, 식물체 성장점 상단의 CO<sub>2</sub> 농도는 CO<sub>2</sub> 센서(SH-VT260, SOHA-TECH Ltd., Seoul, Korea)와 데이터로거(nodebox, ioCrops Inc., Seoul, Korea), 일사량은 광센서(S-LIB-M003, Logger H21-USB, Bourne, MA, USA), 엽온 센서(LT-1M, Bioinstruments S.R.L., Chişinău, Moldiva)와 데이터로거(CR300, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)로 측정하였다. 야간 호흡량과 공급량은 다음과 같이 계산하였다(Choi 등, 2023).

$$R_d = 0.015 \times 78.2 \times f(T) \times fH(T) \quad (1)$$

Eq. (1)에서 R<sub>d</sub>은 암호흡(μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)이고 f는 아래

니우스 함수,  $Tl$ 은 엽온,  $fH$ 는 비활성에너지(deactivation energy)( $J \cdot mol^{-1}$ )이다(Farquhar 등, 1980; Choi 등, 2021).

$$Q = V(C_g - C_i) + P_n \quad (2)$$

Eq. (2)에서  $Q$ 는 첫  $CO_2$  공급량( $Q$ ) ( $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )이며  $V$ 는 환기율(ventilation rate),  $C_g$ 은  $CO_2$  사용 목표농도( $g \cdot m^{-3}$ ),  $C_i$ 는 온실 내 센서로 측정되는 현재  $CO_2$  농도( $g \cdot m^{-3}$ ),  $P_n$ 은 바닥면적  $1m^2$  위에 있는 작물의 순광합성량( $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )이다.

겨울철 1차 실험(2022년)의 재배기간 중 온도는 온실 내부의 경우 최저  $8.8^\circ C$ , 최대  $38.1^\circ C$ 이고 외부는 최저  $-0.1^\circ C$ , 최대  $23.6^\circ C$ 였으며 내부 상대습도(relative humidity, RH)는 최저 21.8%, 최대 97.7%, 외부 RH는 최저 28.0%, 최대 93.4%를 보였다(data not shown). 온실 외부 광도의 최대값은 1월에  $807W \cdot m^{-2}$ , 2월에  $953W \cdot m^{-2}$ , 3월에  $1,030W \cdot m^{-2}$ 이었고, 온실 내부  $CO_2$  일평균값은 1월에  $444\mu mol \cdot mol^{-1}$ , 2월에  $413\mu mol \cdot mol^{-1}$ , 3월에  $405\mu mol \cdot mol^{-1}$ 이었다. 2차 실험(2023년)의 재배기간 중 온도는 온실 내부의 경우 최저  $7.6^\circ C$ , 최대  $31.7^\circ C$ 이고 외부는 최저  $-4.9^\circ C$ , 최대  $24.5^\circ C$ 였으며 내부 RH는 최저 20.4%, 최대 97.3%, 외부 RH는 최저 33.7%, 최대 97.5%를 보였다. 온실 외부 광도의 최대값은 11월에  $802W \cdot m^{-2}$ , 12월에  $817W \cdot m^{-2}$ , 1월에  $800W \cdot m^{-2}$ 이었다. 온실 내부  $CO_2$  일평균값은 1월에  $501\mu mol \cdot mol^{-1}$ , 2월에  $509\mu mol \cdot mol^{-1}$ , 3월에  $505\mu mol \cdot mol^{-1}$ 이었다(data not shown).

## 2. 봄철 $CO_2$ 시비 온실에서 온실 온도에 따른 $CO_2$ 농도 변화(2차 실험)

본 연구는 2023년 2월 24일부터 2023년 5월 30일까지 강원도 춘천시 사농동에 위치한 상업용 폴리에틸렌(polyethylene)으로 피복된 토마토 재배 온실(면적:  $540m^2$ , 규격:  $6m(W) \times 90m(L) \times 3.0m(H)$ )에서 실시하였다. 정식은 육묘장에서 60일 재배된 토마토(*S. lycopersicum* L. 'Nonari'(Daenong Seed Co., Ltd.)) 2,100주를 2 거터에 코코피트 배지[( $100cm \times 20cm \times 10cm$ , chip:dust 5:5(v:v), jiffy Grow, The Netherlands)]에 6주씩 정식하였다. 급액은 네덜란드 PBG 토마토 배양액 조성을 따라 A 탱크[ $5\{Ca(NO_3)_2 \cdot 2H_2O, NH_4NO_3\}$ ] 89.4kg,  $KNO_3$  23.3kg,  $NH_4NO_3$  1.3kg,  $HNO_3$  0.15kg, DTPA-6% 3.3L)와 B 탱크[ $KH_2PO_4$  20.3kg,  $KNO_3$  47.4kg,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  45.1kg,  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  1.1kg,  $HNO_3$  0.3kg,  $H_3BO_3$  300g,  $MnSO_4 \cdot H_2O$  200g,  $ZnSO_4$  141g,  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  20g,  $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$  12g]]로 고농도 저장용액을 나누어 담고 자동급액시스템을 이용하여 pH와 EC 수준을 각각 6.0, 1.8–2.4dS·m<sup>-1</sup>로 정식 후 7일까지 6번 80mL씩, 이후 100mL씩 2

회 공급하였다. 난방은 온풍기(FHS-001H018, Fine Energy Co., Ltd., Geumsan-gun, Chuncheongnam-do, Korea)를 이용하여 열이 온실 내부에 덕트로 균일하게 분배되도록 하였으며 최저온도가  $14^\circ C$ 가 되도록 설정하였다.  $CO_2$  시비는 2023년 3월 19일부터 2023년 5월 13일까지 LPG 연소형  $CO_2$  발생기(KCH-21SV, KATSURA, Long An, Vietnam)를 이용하여 목표  $CO_2$  농도를  $600\mu mol \cdot mol^{-1}$ 으로 설정하여 오전 7시 30분부터 11시까지 수행하였다. 봄철 실험기간 중 온실 내부 온도는 3월과 4월에 최저  $13.1^\circ C/12.6^\circ C$ 이고 최대  $34.3^\circ C/34.4^\circ C$ 이었다. 광도의 최대값은  $911W \cdot m^{-2}$ 였으며, 내부 RH는 15.1–97.2%,  $CO_2$  농도는  $290–610\mu mol \cdot mol^{-1}$ , 누적광량은  $68–1,576J \cdot m^{-2}$  범위였다(data not shown).

### 2.1 데이터 수집 및 분석

시설 내·외부 기상환경(온도, RH, 외부 일사량)은 스마트 팜 복합환경제어반(HRT1000, Hyorimtech Co., Ltd., Jeju, Korea)에 기록되었고, 식물체 생장점 상단의  $CO_2$  농도는  $CO_2$  센서(SH-VT260, SOHA-TECH Ltd., Seoul, Korea)와 데이터로거(nodebox, ioCrops Inc., Seoul, Korea), 일사량은 광센서(S-LIB-M003, Logger H21-USB, Bourne, MA, USA), 엽온은 센서(LT-1M, Bioinstruments S.R.L., Chişinău, Moldova)로 측정하였다. 봄철 실험에서는 시설 내부 기상 환경(온도, RH, 내부 일사량)은 광센서(ioCropsClima, ioCrops Inc., Seoul, Korea)와 센서 노드박스(nodebox, ioCrops Inc., Seoul, Korea), 외부 기상환경(온도, RH)은 외부기상센서(ATMOS14, METER Group Inc., WA, USA)와 노드박스(ZL6, METER Group Inc., WA, USA), 엽온은 센서(LT-1M, Bioinstruments S.R.L., Chişinău, Moldova),  $CO_2$ 는 센서(SH-VT260, SOHA-TECH Ltd., Seoul, Korea)와 노드박스(nodebox, ioCrops Inc., Seoul, Korea)로 측정하였다.

겨울철 실험 온실에서  $CO_2$  농도는 엽면적지수(leaf area index, LAI)가 2.0인 대표적인 날들 중 누적광량이 달라 평균 온도가 다른 날을 선정하여 분석하였다(Table 1). 겨울철 1차 실험은 higher temperature(HT) 온도(낮 기온의 평균이  $18^\circ C$  이상)로 측정된 날들 중 대표적으로 2월 8, 10, 11, 12일(4일)을 선정하고 lower temperature(LT) 온도(낮 기온의 평균이  $18^\circ C$  이하)로 측정된 날들 중 대표적으로 2월 4, 5, 7, 9일(4일)을 선정하여 평균 누적광량과 평균, 최고, 최저 온도를 나타냈다. 겨울철 2차 실험은 HT로 측정된 날들 중 대표적으로 2022년 12월 31일과 2023년 1월 1일(2일)을 선정하였고, LT는 2022년 12월 22일과 24일(2일)을 선정하였다. 봄철  $CO_2$  시비 토마토 농가 실험에서 야간  $CO_2$  농도 변화는 2023년 4월 3일부터 14일까지 측정하였고 야간온도가  $15^\circ C$  이상의 경우는

**Table 1.** Representative days in different average temperatures during daytime and nighttime due to differences in the integrated solar radiation (ISR) during the winter season of 2022 and 2023 years.

Observation	Nighttime temp. (°C)			Daytime temp. (°C)			ISR (J·cm <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> )
	Average	Min.	Max.	Average	Min.	Max.	Average
HT 2022 <sup>z</sup>	14.1	11.9	18.2	22.1	11.8	37.4	1,192
LT 2022 <sup>y</sup>	13.8	11.8	15.8	16.9	10.7	29.6	619
HT 2023 <sup>x</sup>	14.3	12.5	16.0	18.2	11.7	23.8	816
LT 2023 <sup>w</sup>	14.1	11.0	16.0	14.0	8.3	18.9	220

<sup>z</sup>February 8, 10, 11, and 12 (4 days) were selected for the higher temperature (HT, > 18°C daytime temp. avg.).

<sup>y</sup>February 4, 5, 7, and 9 (4 days) were selected for the lower temperature (LT, < 18°C daytime temp. avg.).

<sup>x</sup>December 31, 2022 and January 1, 2023 (2 days) were selected for the HT.

<sup>w</sup>December 22 and 24 (2 days) were selected for the LT.

HT로 15°C 이하의 경우는 LT로 선정하였다.

데이터 통계분석은 SAS 9.4 소프트웨어 패키지(SAS Institute, Cary, NC, USA)를 사용하여 t-test로 분석하였다.

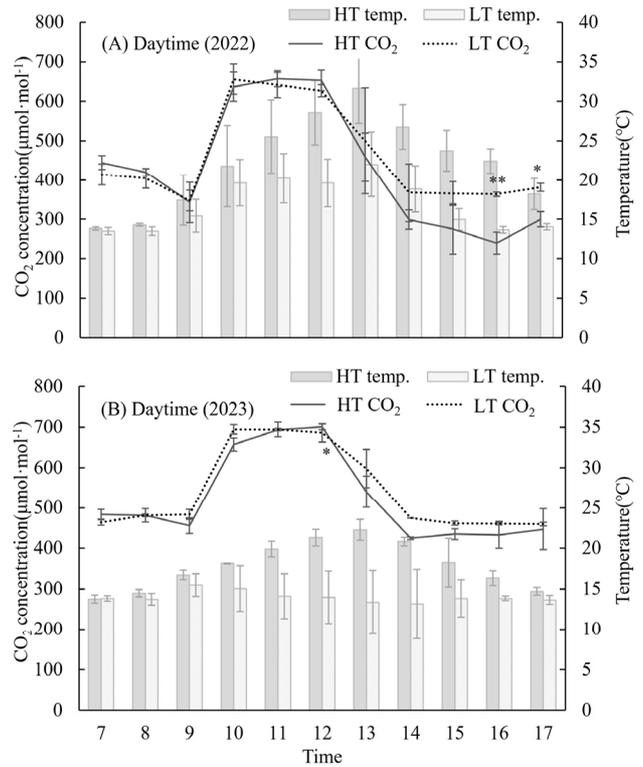
### 결과 및 고찰

#### 1. 겨울철 CO<sub>2</sub> 시비 온실에서 온도에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화

겨울철 실험 온실에서 CO<sub>2</sub> 농도는 오후 시간대(13:00 – 16:00)에 HT(higher temperature)에서 LT(lower temperature) 보다 유의적으로 낮았다. CO<sub>2</sub> 공급 시간대(10:00 – 13:00) 이후 오후 1, 2, 3, 4시에 HT가 각각 31.7, 26.8, 23.8, 22.4°C일 때 CO<sub>2</sub> 농도는 459, 299, 275, 239 μmol·mol<sup>-1</sup>이었고 LT가 22.0, 18.9, 15.0, 13.7°C일 때 각각 500, 368, 366, 364 μmol·mol<sup>-1</sup>으로 HT에서 CO<sub>2</sub> 감소량이 LT보다 컸고 16시 ( $p < 0.01$ )와 17시( $p < 0.05$ )에 통계적 유의차를 보였다(Fig. 1A). 2023년도 겨울철(1월) 실험 온실에서도 2022년과 유사한 경향을 보였다(Fig. 1B).

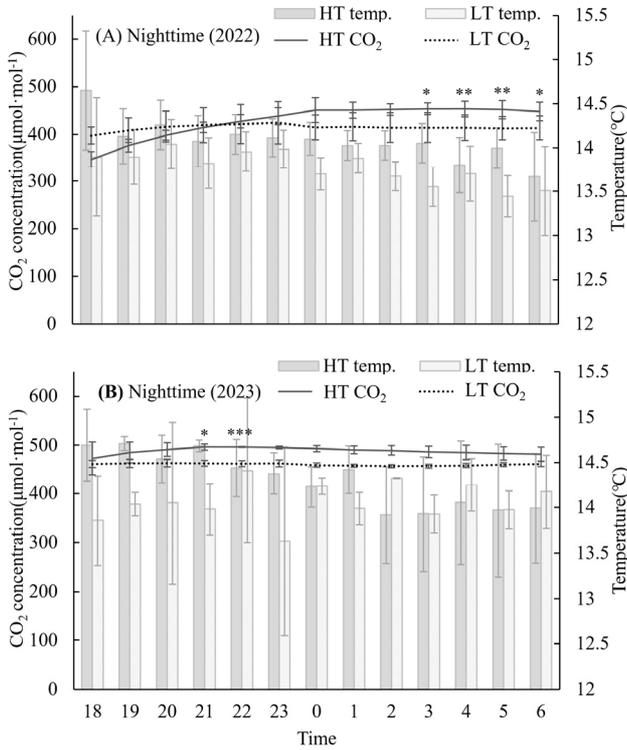
Fig. 2는 Fig. 1과 동일한 날의 야간 시간대(18:00 – 06:00)에 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 나타낸 것이다. 야간 CO<sub>2</sub> 농도는 HT의 경우 오후 6시(346 μmol·mol<sup>-1</sup>)부터 서서히 증가되어 오전 3시(454 μmol·mol<sup>-1</sup>)에 가장 높았으며 9시간 동안 약 100 μmol·mol<sup>-1</sup>이 증가하여 시간당 약 11 μmol·mol<sup>-1</sup>이 증가되었고 LT 조건에서는 그 증가폭이 매우 낮았다(Fig. 2A). 2023년도 야간 CO<sub>2</sub> 농도는 HT의 경우 오후 9시에 496 μmol·mol<sup>-1</sup>으로 LT의 463 μmol·mol<sup>-1</sup>보다 유의적으로 높았으며 9시간 동안 약 30 μmol·mol<sup>-1</sup>이 증가하였으며 그 증가폭은 2022년보다 낮았는데 이 결과는 2023년에 LAI 2.0인 생육단계가 1월로 2022년의 2월보다 온실 기온이 낮았던 것과 관련이 있다(Fig. 2B).

Fig. 3은 Fig. 1, 2에 표현된 동일한 날의 24시간 CO<sub>2</sub> 농도



**Fig. 1.** Changes in the CO<sub>2</sub> concentration at daytime (from 7:00 to 17:00) under higher temperature (HT) and lower temperature (LT) conditions during the winter cultivation period for 2 years, including 2022 and 2023. Observations were made for 4 days in the 2022 year (A) and for 2 days in the 2023 year (B). Means statistically significantly different at  $p < 0.05$  and  $p < 0.01$  are indicated by \* and \*\* respectively. Bars represent standard errors ( $\pm$ ) for the 4 replicates in the 2022 year and 2 replicates in the 2023 year.

변화를 나타낸 것이다. 온실 내 CO<sub>2</sub> 농도는 광이 입사되는 시간부터(오전 7시30분) 서서히 감소되기 시작하여 CO<sub>2</sub> 공급 시간대(10:00 – 13:00)에는 일정한 목표농도를 유지하다가

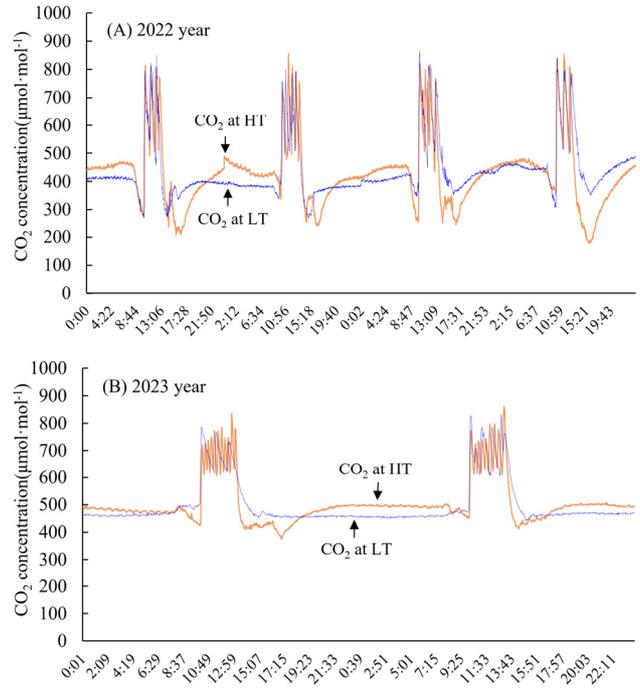


**Fig. 2.** Changes in the CO<sub>2</sub> concentration at nighttime (from 18:00 to 06:00) under higher temperature (HT) and lower temperature (LT) conditions during the winter cultivation period for 2 years, including 2022 and 2023. Observations were made for 4 days in the 2022 year (A) and for 2 days in the 2023 year (B). Means statistically significantly different at  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$  and  $p < 0.001$  are indicated by \*, \*\* and \*\*\* respectively. Bars represent standard errors ( $\pm$ ) for the 4 replicates in the 2022 year and 2 replicates in the 2023 year.

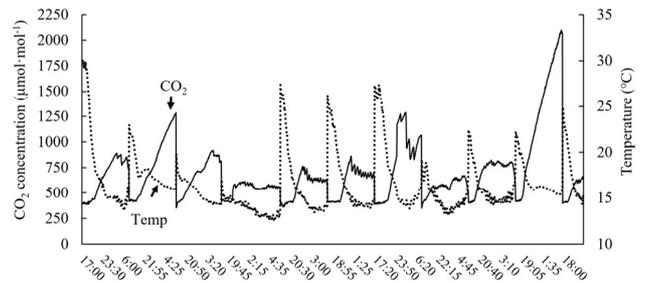
시비 종료 후(13시 이후)부터 감소되고 18시부터는 증가된다. CO<sub>2</sub> 농도는 HT의 경우 16시까지 급격히 감소하고 18시부터 증가되기 시작하여 오후 8시 이후엔 LT의 CO<sub>2</sub> 농도보다 높아지는 결과를 보였다(Fig. 3A, B).

## 2. 봄철 CO<sub>2</sub> 시비 온실에서 온도에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화

봄철 CO<sub>2</sub> 시비 온실에서 2023년 4월 4일부터 14일까지 야간 온도와 야간 CO<sub>2</sub> 농도를 관찰하였을 때 야간 CO<sub>2</sub> 농도는 평균온도가 13°C인 경우는 600 μmol·mol<sup>-1</sup>, 14°C는 800 μmol·mol<sup>-1</sup>, 15–16°C에서는 1,000 μmol·mol<sup>-1</sup> 이상의 수준을 보였다(Fig. 4). Table 2는 Fig. 4와 동일한 실험에서 HT와 LT 조건의 각각 대표적 2일을 선정하여 주간온도, 야간온도 및 CO<sub>2</sub> 시비 개시 직전의 측정된 CO<sub>2</sub> 농도와 계산된 CO<sub>2</sub> 공급량을 나타냈다. CO<sub>2</sub> 시비 개시 직전(오전 7:30)에 측정된 CO<sub>2</sub> 농도는 야간온도가 15°C 이상의 경우(HT)는 1,637과 2,065



**Fig. 3.** Diurnal changes in the CO<sub>2</sub> concentration under higher temperature (HT) and lower temperature (LT) conditions during the winter cultivation period for 2 years, including 2022 and 2023. Observations were made for 4 days in the 2022 year (A) and for 2 days in the 2023 year (B).



**Fig. 4.** Changes in the CO<sub>2</sub> concentration and temperature at nighttime (from 17:00 to 06:00) from April 3<sup>rd</sup> to 14<sup>th</sup>, 2023 (Experiment II) in a CO<sub>2</sub> supplemental greenhouse for commercially grown tomato during spring season.

μmol·mol<sup>-1</sup>, 15°C 이하의 경우(LT)는 552와 574 μmol·mol<sup>-1</sup>으로 HT에서 LT보다 3–4배 높은 것으로 나타났다(Table 2). 계산된 공급 CO<sub>2</sub> 시비량은 HT에서 0–54 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 범위였고 LT에서는 24–69 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 범위로 HT에서 LT보다 적었다(Table 2).

본 연구결과에서 야간 CO<sub>2</sub> 농도는 재배 시기에 따른 온도의 영향을 받으며, 야간에 증가된 CO<sub>2</sub>는 일출 후 급격히 감소되어 광합성 작용의 주요 공급원이 된다는 것을 알 수 있었다.

**Table 2.** Nighttime and daytime temperatures, CO<sub>2</sub> concentrations prior to first supplement (7:30 a.m.), and calculated supplementary CO<sub>2</sub> concentration for 4 days in a CO<sub>2</sub> supplemental greenhouse for commercially grown tomato during spring season.

Observation	Nighttime temp. (°C)			Daytime temp. (°C)			CO <sub>2</sub> conc. prior to first supplement (μmol·mol <sup>-1</sup> )	Calculated CO <sub>2</sub> supplemental amounts (g CO <sub>2</sub> ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )		
	Average	Min.	Max.	Average	Min.	Max.		I	II	III
HT 1 <sup>z</sup>	19.5	17.8	23.7	24.9	17.8	33.2	1,637	0	13	54
HT 2 <sup>y</sup>	16.0	15.4	17.1	22.8	17.0	28.8	2,065	8	0	0
LT <sup>x</sup> 1 <sup>x</sup>	13.8	12.0	15.5	20.6	12.2	30.1	552	24	48	26
LT 2 <sup>w</sup>	14.3	13.1	16.7	19.5	14.7	29.1	574	63	69	32

<sup>z</sup>March 22 to 23 for the higher temperature (HT, > 15°C nighttime temp. avg.).

<sup>y</sup>April 13 to 14 for the HT.

<sup>x</sup>April 6 to 7 for the LT (LT, < 15°C nighttime temp. avg.).

<sup>w</sup>April 14 to 15 for the LT.

<sup>t</sup>I: 8–9 a.m., II: 9–10 a.m., III: 10–11 a.m.

Tartachnyk와Blanke(2007)는 겨울철 온실 조건(14–22°C, VPD 0.6–1.4kPa, PAR 84–700μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)에서 야간 CO<sub>2</sub> 증가량은 1월의 경우 시간당 15μmol·mol<sup>-1</sup>이었고 2월은 17μmol·mol<sup>-1</sup>으로 광량과 온도가 높았던 2월에 더 많이 증가한다고 하였다. 본 연구 결과에서도 겨울철 2월 실험에서 토마토 240개체(총엽면적 330m<sup>2</sup>) 재배에서 야간의 시간당 증가된 CO<sub>2</sub> 농도는 약 11μmol·mol<sup>-1</sup>이었다(Fig. 2A). 봄철 토마토 농가에서(토마토 1,050개체, 재배 면적 1,670m<sup>2</sup>), 야간 CO<sub>2</sub> 농도는 평균 600–800μmol·mol<sup>-1</sup>(Fig. 4)으로 겨울철 온실의 최대 454–496μmol·mol<sup>-1</sup>보다 높았으며, 시간당 증가량은 최대 135μmol·mol<sup>-1</sup>으로 관찰되었다(Fig. 2). 봄철 CO<sub>2</sub> 시비 개시 직전에 측정된 CO<sub>2</sub> 농도는 HT에서 LT보다 3–4배 높았으며 그날의 계산된 공급 CO<sub>2</sub> 시비량은 HT에서 LT보다 적었다(Table 2). 또한, CO<sub>2</sub> 농도가 일출 1시간 후에 급격히 감소되는 것을 관찰하였다(Fig. 3). Tartachnyk와 Blanke(2007)는 겨울철 오전의 광보상점 이하 조건에서 CO<sub>2</sub> 농도는 600~900μmol·mol<sup>-1</sup>으로 전날의 광량과 야간 온도에 따라 차이가 있으며, 1월 30일에 광보상점 이상에서 CO<sub>2</sub> 농도는 오전 9시에 840μmol·mol<sup>-1</sup>, 오후 2시에 500μmol·mol<sup>-1</sup>으로 시간당 58μmol·mol<sup>-1</sup> 감소했고(토마토 500개체, 엽면적 88m<sup>2</sup>) 그 중 시간당 23μmol·mol<sup>-1</sup>(약 50%)이 광합성으로 소요된 반면, 2월의 맑고 화창한 날은 8시에 906μmol·mol<sup>-1</sup>으로 1월보다 높았고, 13시에 336μmol·mol<sup>-1</sup>으로 시간당 110μmol·mol<sup>-1</sup>감소하여 시간당 51μmol·mol<sup>-1</sup>(46%)이 광합성으로 소요된 것으로 보고하였다. 따라서, 겨울 재배에서 주간 광량과 온도가 적절한 조건에서 야간 온도를 적정 수준으로 유지해주면 CO<sub>2</sub> 시비량을 줄일 수 있을 것으로 보인다. 본 연구팀은 최근 연구에서 CO<sub>2</sub> 시비 개시 시점의 온실 CO<sub>2</sub> 농도

(C<sub>i</sub>)가 목표 농도(C<sub>g</sub>)보다 낮을 때 이를 고려한 CO<sub>2</sub> 공급량을 예측하였다(Choi 등, 2023). 이 연구에서 C<sub>i</sub>는 야간 CO<sub>2</sub> 농도 변화까지 감지된 실측치로 향후 C<sub>i</sub>를 예측한 CO<sub>2</sub> 공급 모델식이 필요할 것으로 판단된다.

## 적 요

본 연구는 겨울과 봄철의 CO<sub>2</sub> 시비 토마토 온실에서 낮과 밤의 온도 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 구명하고 계산된 CO<sub>2</sub> 공급량을 비교하고자 수행하였다. 온실 내 CO<sub>2</sub> 농도는 2022년과 2023년의 겨울철 실험 온실에서 생육단계가 LAI 2.0인 대표적인 날들 중 누적광량 차이로 인한 평균 온도가 다른 날을 선정하여 분석하였다. 평균 온도 18°C 이상의 경우(고온, HT), CO<sub>2</sub> 공급 시간대(10:00–13:00) 이후 13, 14, 15, 16시에 각각 31.7, 26.8, 23.8, 22.4°C일 때 CO<sub>2</sub> 농도는 459, 299, 275, 239μmol·mol<sup>-1</sup>이었고 평균 온도 18°C 이하의 경우(저온, LT), 22.0, 18.9, 15.0, 13.7°C일 때 각각 500, 368, 366, 364μmol·mol<sup>-1</sup>으로 HT에서 CO<sub>2</sub> 감소량이 LT보다 유의적으로 높았다. 야간 CO<sub>2</sub> 농도는 HT의 경우 오후 6시(346μmol·mol<sup>-1</sup>) 부터 서서히 증가되어 오전 3시(454μmol·mol<sup>-1</sup>)에 가장 높았으며 9시간 동안 약 100μmol·mol<sup>-1</sup>이 증가되어 시간당 약 11μmol·mol<sup>-1</sup>이 증가되었고(토마토 240개체, 엽면적 330m<sup>2</sup>), LT에서는 그 증가폭이 낮았다. 봄철 CO<sub>2</sub> 시비 온실에서 CO<sub>2</sub> 시비 개시 직전(오전 7:30)에 측정된 CO<sub>2</sub> 농도는 야간 온도가 15°C 이상의 경우(HT)는 15°C 이하의 경우(LT)보다 3–4배 높은 것으로 나타났으며 그날의 계산된 공급 CO<sub>2</sub> 시비량도 HT에서 적었다. 본 연구결과에서 야간 CO<sub>2</sub> 농도는 재배 시기에 따른 온도의 영향을 받으며, 야간에 증가된 CO<sub>2</sub>

는 광합성 작용의 주요 공급원이 된다는 것을 알 수 있었다. 이를 고려한 CO<sub>2</sub> 공급 모델식 개발이 필요한 것으로 판단된다.

**추가 주제어:** 호흡, 주간온도, 엽면적지수, 야간온도

## 사 사

본 연구는 재단법인 스마트팜연구개발사업단(농림식품기술기획평가원 과제번호: 421040-04)의 지원을 받아 수행되었음.

## Literature Cited

- Ayari O., M. Dorais, and A. Gosselin 2000, Daily variations of photosynthetic efficiency of greenhouse tomato plants during winter and spring. *J Am Soc Hortic Sci* 125:235-241. doi:10.21273/JASHS.125.2.235
- Behboudian M.H., and R. Lai 1994, Carbon dioxide enrichment in 'Virosa' tomato plant: Responses to enrichment duration and to temperature. *HortScience* 29:1456-1459. doi:10.21273/HORTSCI.29.12.1456
- Bowes G. 1993, Facing the inevitable: Plants and increasing atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol. Biol.* 44:309-332. doi:10.1146/annurev.pp.44.060193.001521
- Choi E.Y., Y.A. Jeong, S.H. An, D.C. Jang, D.S. Lee, J.K. Kwon, and Y.H. Woo 2021, Comparison of measured and calculated carboxylation rate, electron transfer rate and photosynthesis rate response to different light intensity and leaf temperature in semi-closed greenhouse with carbon dioxide fertilization for tomato cultivation. *J Bio-Env Con* 30:401-409. doi:10.12791/KSBEC.2021.30.4.401
- Choi S.H., Y.H. Woo, D.C. Jang, Y.A. Jeong, D.H. Kim, H.S. Seo, and E.Y. Choi 2023, Model-based calculations of ventilation rate, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) absorption rate by plants, and amounts of ventilated and supplied CO<sub>2</sub> for tomato hydroponic greenhouse during a winter season. *Hortic Sci Technol* 41:379-389. (in Korean) doi:10.7235/HORT.2023.0035
- Farquhar G.D., S. von Caemmerer, and J.A. Berry 1980, A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta* 149:78-90. doi:10.1007/BF00386231
- Nederhoff E.M., and R. de Graaf 1993, Effects of CO<sub>2</sub> on leaf conductance and canopy of greenhouse grown cucumber and tomato. *J Hortic Sci* 68:925-937. doi:10.1080/00221589.1993.11516433
- Namizaki H., Y. Iwasaki, and R. Wang 2022, Effects of elevated CO<sub>2</sub> levels on the growth and yield of summer-grown cucumbers cultivated under different day and night temperatures. *Agronomy* 12:1872-1986. doi:10.3390/agronomy12081872
- Tartachnyk I.I., and M.M. Blanke 2007, Photosynthesis and transpiration of tomato and CO<sub>2</sub> fluxes in a greenhouse under changing environmental conditions in winter. *Ann Appl Biol* 150:149-156. doi:10.1111/j.1744-7348.2007.00125.x