

## 온실 환경요인의 공간적 및 수직적 특성 분석과 온실 종류에 따른 이산화탄소 농도 비교

정영애<sup>1</sup> · 장동철<sup>2</sup> · 권진경<sup>3</sup> · 김대현<sup>4</sup> · 최은영<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>한국방송통신대학교 농업생명과학과 대학원생, <sup>2</sup>강원대학교 원예학과 박사후연구원,

<sup>3</sup>국립농업과학원 에너지환경공학과 연구사, <sup>4</sup>강원대학교 바이오시스템공학과 교수,

<sup>5</sup>한국방송통신대학교 농업생명과학과 교수

### Analysis of Spatial and Vertical Variability of Environmental Parameters in a Greenhouse and Comparison of Carbon Dioxide Concentration in Two Different Types of Greenhouses

Young Ae Jeong<sup>1</sup>, Dong Cheol Jang<sup>2</sup>, Jin Kyung Kwon<sup>3</sup>, Dae Hyun Kim<sup>4</sup>, and Eun Young Choi<sup>5\*</sup>

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

<sup>2</sup>Postdoctoral Researcher, Department of Horticulture, College of Agriculture and Life Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

<sup>3</sup>Researcher, Department of Agricultural Engineering, Energy and Environmental Engineering Division, National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju 54875, Korea

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

<sup>5</sup>Professor, Department of Agricultural Science, Korea National Open University, Seoul 03087, Korea

**Abstract.** This study was aimed to investigate spatial and vertical characteristics of greenhouse environments according to the location of the environmental sensors, and to investigate the correlations between temperature, light intensity, and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration according to the type of greenhouse. Temperature, relative humidity (RH), CO<sub>2</sub>, and light sensors were installed in the four-different vertical positions of the whole canopy as well as ground and roof space at the five spatial locations of the Venlo greenhouse. Also, correlations between temperature, light intensity, and CO<sub>2</sub> concentration in Venlo and semi-closed greenhouses were analyzed using the Curve Expert Professional program. The deviations among the spatial locations were larger in the CO<sub>2</sub> concentration than other environmental factors in the Venlo greenhouse. The average CO<sub>2</sub> concentration ranged from 465 to 761  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  with the highest value (646  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) at the Middle End (4ME) close to the main pipe (50 $\varnothing$ ) of the liquefied CO<sub>2</sub> gas supply and lowest (436  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) at the Left Middle (5LM). The deviation among the vertical positions was greater in temperature and relative humidity than other environments. The time zone with the largest deviation in average temperature was 2 p.m. with the highest temperature (26.51°C) at the Upper Air (UA) and the lowest temperature (25.62°C) at the Lower Canopy (LC). The time zone with the largest deviation in average RH was 1 p.m. with the highest RH (76.90%) at the LC and the lowest RH (71.74%) at the UA. The highest average CO<sub>2</sub> concentration at each hour was Roof Air (RF) and Ground (GD). The coefficient of correlations between temperature, light intensity, and CO<sub>2</sub> concentration were 0.07 for semi-closed greenhouse and 0.66 for Venlo greenhouse. All the results indicate that while the CO<sub>2</sub> concentration in the greenhouse needs to be analyzed in the spatial locations, temperature and humidity needs to be analyzed in the vertical positions of canopy. The target CO<sub>2</sub> fertilization concentration for the semi-closed greenhouse with low ventilation rate should be different from that of general greenhouses.

**Additional key words :** carbon dioxide fertilization, coefficient of determination, infrared leaf temperature sensor, semi-closed greenhouse, Venlo greenhouse

\*Corresponding author: [ch0097@knou.ac.kr](mailto:ch0097@knou.ac.kr)

Received June 29, 2022; Revised July 26, 2022;

Accepted July 26, 2022

## 서 론

우리나라 시설 면적은 2021년 현재 82,810ha로 전년 대비 2.7% 증가하였다(MAFRA, 2021). 이 중 시설채소 면적은 2020년 기준 52,444ha로 꾸준히 증가하고 있으며(MAFRA, 2020a) 피복재 사용 현황은 2020년 현재 비닐하우스(플라스틱 필름 온실) 52,055ha, 경질판 온실 67ha, 유리온실 321ha로 조사되었다(MAFRA, 2020b). 농산물 소득조사에서 2020년 소득률은 43.4%로 전년 대비 3.1% 증가한 반면 경영비는 전년 대비 9.1%가 증가하였다(RDA, 2021). 이러한 경영비의 증가는 가온 시설 면적의 급격한 증가와 최근 이상기후에 의한 냉난방비의 증가 및 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 가스 수급 불균형으로 인한 단가 상승이 원인으로 분석된다.

CO<sub>2</sub> 시비는 일반적으로 액화 탄산가스를 충전하여 기화기를 통해 공급하는 설비를 활용하고 있으며 난방겸용 CO<sub>2</sub> 시비는 온실재배 작물에 취약한 환경인 저온기에 작물의 품질과 수량을 증가시키는 데 도움이 되고 농가 경영비의 절감이 가능하다. 작물의 광합성 CO<sub>2</sub> 포화점은 대기 중 농도의 3배 이상이므로 적절한 온도와 광조건에서 CO<sub>2</sub>를 시비할 경우 과채류 뿐만 아니라 엽채류와 화훼류에서도 품질 향상과 수량 증대 효과가 있다. 국화에서는 CO<sub>2</sub> 시비 농도 700 – 1,200ppm에서 고온 적응성이 향상되어 고온 스트레스로 인한 화색 퇴화, 개화 지연, 기형화 발생 등의 문제점을 개선할 수 있다는 연구 결과가 있고(Woo 등, 2005), 적절한 양액 EC 조건에서 650 ppm의 CO<sub>2</sub> 시비가 팔레놉시스의 개화 품질을 높였다고 하였다(Cho 등, 2020). 딸기 시설재배에서 CO<sub>2</sub> 시비를 한 경우 과실 내 sucrose 함량이 증가하였고 생산량이 30 – 40% 증수되었으며 20°C 온도 조건에서 CO<sub>2</sub> 시비 농도를 900mg·L<sup>-1</sup>로 제시하였다(Jeong 등, 1996).

하지만 일부 연구 결과에서는 높은 CO<sub>2</sub> 농도가 과실 생산량과 품질을 오히려 감소시킨다고 하였다(Koch과Mooney, 1996; Lee와Lee, 1994). 토마토 재배에서 CO<sub>2</sub> 800ppm을 50일 이상 공급하였을 때 초기에는 광합성률이 증가하나 CO<sub>2</sub> 시비 처리 30일 이후에는 대조구와 비교하였을 때 광합성률에 차이가 없다고 하였다(Lee와Lee, 1994). 또한, CO<sub>2</sub> 600ppm 수준에서는 광합성이 촉진되지만 750ppm이나 900ppm 수준에서는 최적 양자수율(optimal quantum yield)이 감소하고 다량 원소 결핍 증상과 함께 순광합성률이 감소한다고 하였다(Keutgen 등, 1997). 고농도의 CO<sub>2</sub>를 장기간 시비하였을 때 나타나는 광합성률 감소에 대한 생화학적 기작은 명확하게 밝혀지지 않았으나 sink-source 불균형, 탄수화물 축적, negative feedback 대사 등이 원인으로 제시되었다(Bowes, 1991; Stitt, 1991). 최근 발표 자료에서 높은 CO<sub>2</sub> 농도 조건에서 잎에 탄

수화물이 과도하게 축적되면 오히려 광합성 능력이 저해된다고 보고하였다. 벼 잎집에서 전분 합성 조절에 관여하는 CO<sub>2</sub>-responsive CCT protein(CRCT) 발현을 감소시킨(RNAi-knockdown) 벼는 높은 CO<sub>2</sub> 농도에서 재배되었을 때 잎에 가용성당 함량과 전분 함량은 증가하고 광합성 속도는 상당히 감소하였다. 반대로 전분 합성 조절제인 CRCT를 과발현시켰을 때는 높은 CO<sub>2</sub> 조건에서 재배된 벼 잎집의 전분 합성에 대한 sink 용량이 향상되어 광합성 능력이 높아졌다(Morita 등, 2016).

따라서 적정 CO<sub>2</sub> 농도를 설정하여 시비해야 하며, 최근 CO<sub>2</sub>의 수급 불균형으로 인한 단가의 상승으로 효율적인 CO<sub>2</sub> 시비 방법에 대한 농가의 요구가 높아지고 있으므로 지역, 시기, 날씨, 온실 면적, 작물 및 생육단계별 적정 CO<sub>2</sub> 농도 설정이 필요하다.

또한, 온실 내부는 전체 공간이 균일한 온·습도 및 광도를 유지해야 하지만 실제로는 공간적 위치와 수직적 위치에서 환경 측정지점 간 편차가 크고 온실 내 CO<sub>2</sub> 농도 역시 공간 매트릭스 내에서 측정치의 편차가 큰 것으로 나타나 이는 온실 내부에 CO<sub>2</sub> 분포가 불규칙한 상태를 의미한다고 하였으며(Lee 등, 2020), 공기 순환 팬을 이용하는 단동 온실에서 계측지점에 따라 내부 온도는 3.36°C, 상대습도는 13.27%의 유의미한 편차가 보고되었다(Lee 등, 2017).

따라서 본 연구는 환경측정용 센서의 위치에 따른 온실 기상 환경의 공간 분포 특성을 조사하고 온실 종류에 따른 온도, 광도 및 CO<sub>2</sub> 농도의 상관관계를 구명하여 향후 온실 내부의 센서 위치 설정과 온실 종류에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 시비 기준을 수립하는 데 기초 자료를 제공하고자 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 1. 데이터 수집 환경

본 실험은 전라북도 완주군 이서면(35°50'29.1"N 127°01'45.3"E)의 반밀폐형 폴리올레핀필름(PO; 0.15mm) 온실과 충청북도 진천군 이월면(36°55'49.7"N 127°26'11.8"E)의 벤로형 유리온실(측면 polycarbonate; 5중 16mm, 상부 유리; 저철분 4mm)에서 2021년 9월 7일부터 2021년 11월 1일까지 수행하였다. 벤로형 온실은 최근 신축 온실을 중심으로 확대되고 있는 온실의 형태로 기존 유리온실의 형태에서 측면을 폴리카보네이트 재질로 변경한 형태였다. 조사 기간에 두 온실의 작물 상태는 반밀폐형 온실은 972m<sup>2</sup>(가로 24m, 세로 40.5m, 측고 7.3m, 둥고 8.5m)에 ‘TY 백집’ 대목으로 접목된 토마토 ‘스파이더’ 품종(*Solanum lycopersicum* cv. Spider)을 2021년 3월 14일에 정식하여 16개 거터에서 거터당 30개

의 코코피트 배지에 재배하고 있었으며 11월 초순에 34화방 착과 단계에 있었다. 벤로형 온실의 작물 상태는 6.825m<sup>2</sup>(가로 105m, 세로 65m, 측고 5.5m)에 파프리카를 2021년 9월 초순에 정식하여 10월에는 1그룹 착과기, 11월에는 1그룹 비대기에 있었다.

CO<sub>2</sub> 시비는 반밀폐형 온실에서 공기열식 액화탄산가스 시비기로 09:00 – 16:00에 800μmol·mol<sup>-1</sup>을 공급하였고, 벤로형 온실은 수열식 액화탄산가스 시비기로 착과 촉진기인 10월에는 700μmol·mol<sup>-1</sup>을 공급하고 그 외에는 600μmol·mol<sup>-1</sup>을 공급하였다. 복합환경제어기는 반밀폐형 온실은 Magma (GreenCS, Jeollanamdo, Korea), 벤로형 온실은 Connex (Priva, Zijlweg, The Netherlands)를 사용하였다. 벤로형 온실에 설치한 정밀 센서는 적외선 엽온 센서(SI-111-SS, Apogee, UT, USA), 공기 습도 센서(ATMOS-14, Meter, WA, USA), 그리고 CO<sub>2</sub> 센서(GMP252, Vaisala, Vantaa, Finland)였으며 측정값은 데이터로거(CR1000X, Campbell Scientific, UT, USA)로 수집되었다.

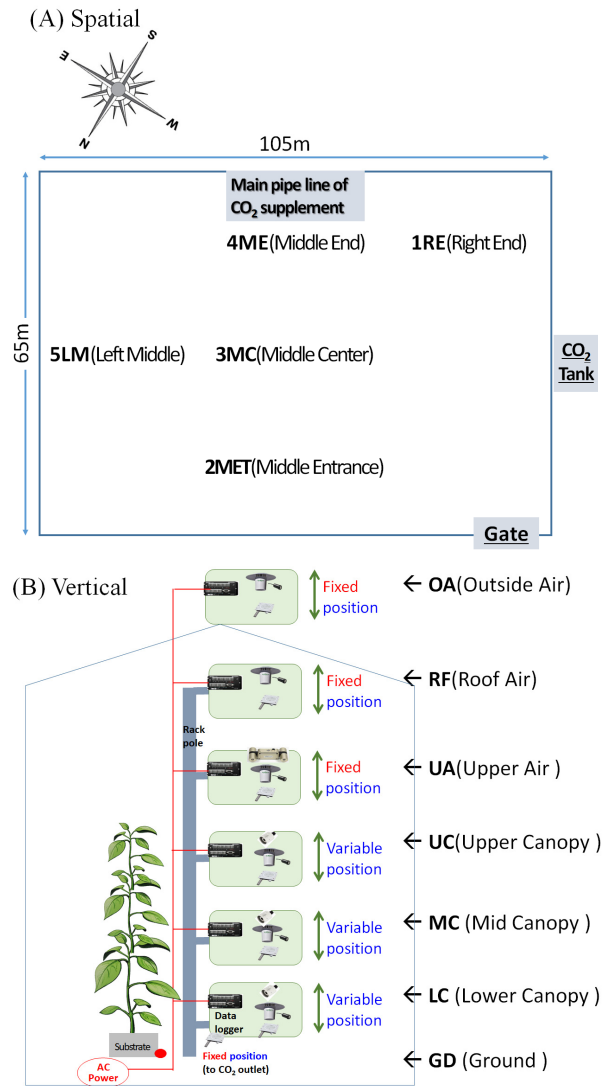
### 2. 정밀 센서의 설치 위치

벤로형 온실에서 온도, 상대습도 및 CO<sub>2</sub> 센서 위치는 온실 내부를 9등분하여 입구에서 시설을 바라보는 기준으로 우측 후부(Right End, 1RE), 중앙 전부(Middle Entry, 2MET), 중앙(Middle Center, 3MC), 중앙 후부(Middle End, 4ME)와 좌측 중앙(Left Middle, 5LM) 지점을 선정한 후 각 지점에서 대표적으로 선택된 작물의 하단부(Lower Canopy, LC), 중간부(Mid Canopy, MC), 상단부(Upper Canopy, UC) 및 차광 커튼 아래의 작물 위 공기층(Upper Air, UA)으로 나누어 설치하였다.

이 기본 설치 외에 CO<sub>2</sub> 센서는 차광 커튼 윗부분인 지붕 공간 공기층(Roof Air, RF)과 시설 내 지면(Ground, GD)에 추가로 설치하였고 일사량 센서는 중앙부 작물 위 공기층(3MC-UA)에 대표로 설치하였다. 온실 외부 기상환경은 지붕 위(Outside Air, OA)에 온도, 상대습도, CO<sub>2</sub> 및 일사량 센서가 각 1개씩 설치되었다(Fig. 1).

### 3. 데이터 수집 및 분석 방법

벤로형 온실의 환경 데이터는 2021년 9월 7일부터 2021년 11월 1일까지 5분 간격 평균 데이터를 수집하였고, 반밀폐형 온실의 환경 데이터는 같은 기간에 1분 간격 평균 데이터를 수집하였다. 공간 및 수직적 위치별 데이터 비교는 벤로형 온실에 설치한 정밀 센서 데이터의 각 시간 단위 평균과 평균 데이터의 위치별 표준편차를 비교하였고, 온도, 광도 및 CO<sub>2</sub> 농도의 관계성은 반밀폐형 온실과 벤로형 온실의 데이터 수집 기



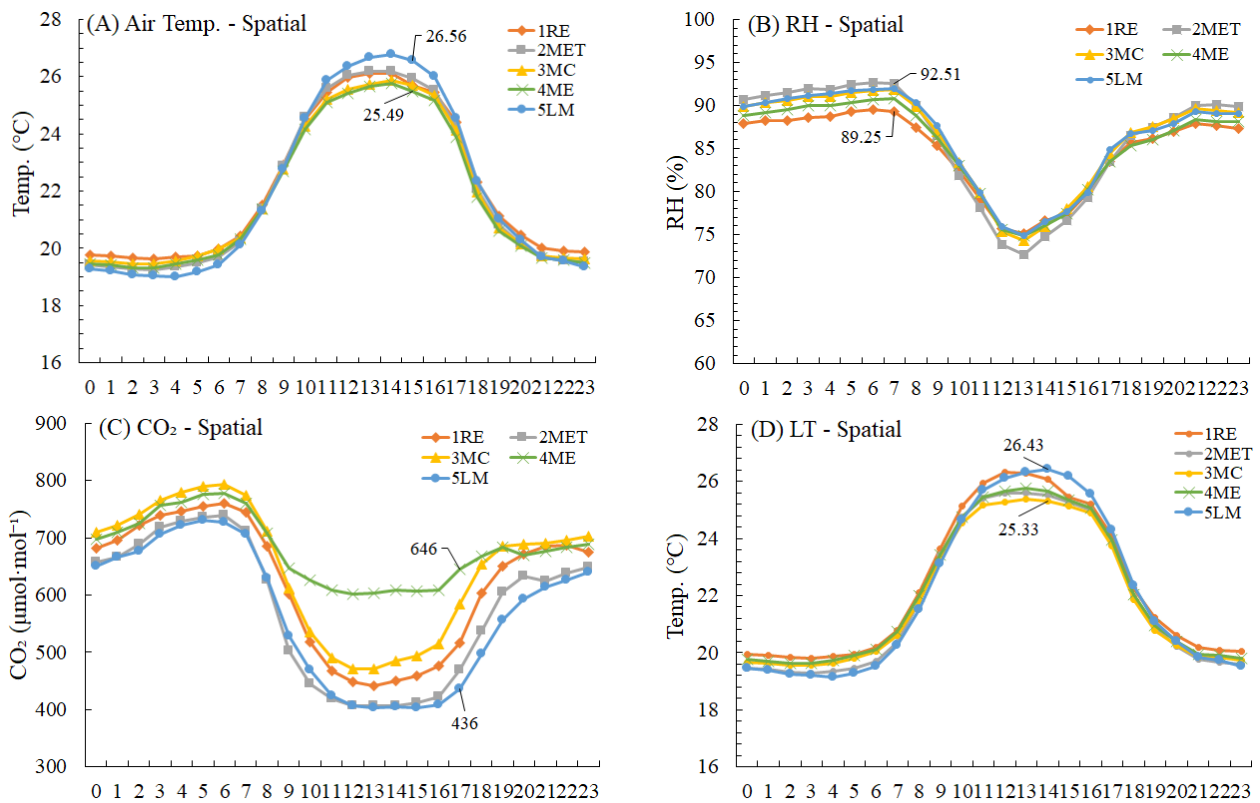
**Fig. 1.** Spatial (A) and vertical (B) locations of a Venlo greenhouse installed with sensors, including air temperature (Temp), relative humidity (RH), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), leaf temperature (LT) and light intensity (SI).

간 내 각 시간의 평균 데이터를 CurveExpert Professional(ver 2.7.3)(Hyams Development, TN, USA) 프로그램을 이용하여 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 온실의 공간적 위치에 따른 환경요인의 편차

벤로형 온실의 공간적 위치(Fig. 1A)에 따른 편차는 CO<sub>2</sub> 농도가 다른 요인보다 큰 것으로 나타났다(Fig. 2). 온실의 하루 중 평균 기온은 19.34 – 26.14°C 범위를 유지하였고, 공간적 위치에 따른 편차가 가장 큰 시간대는 오후 3시로 나타났으며,



**Fig. 2.** Air temperature (air temp., A), relative humidity (RH, B), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>, C), leaf temperature (LT, D) in the spatial location of a Venlo greenhouse (Fig. 1A). Data were hourly collected from September 7 to November 1, 2021. The indicated numbers are the maximum and minimum values among the spatial locations.

최고 온도는 5LM에서 26.56°C, 최저 온도는 4ME에서 25.49°C였다(Fig. 2A). 온실의 하루 중 상대습도는 평균 74.38 – 91.29% 범위를 유지하였고, 공간적 편차가 가장 큰 시간대는 오전 7시였으며, 최고 상대습도는 2MET에서 92.51%, 최저 상대습도는 1RE에서 89.25%였다. 선행 연구에서는 PE 필름의 이중 단동 온실(길이: 95m, 폭: 6m, 측고: 1.2m, 동고: 2.3m)에서 공기 순환 팬을 사용하지 않았을 때 온실 지점 간의 최대 온도차는 3.36°C, 최대 상대습도차는 13.27%였으며 공기 순환 팬을 사용한 경우는 지점 간 최대 온도차가 2.66°C, 최대 상대습도차가 7.10%로 관찰되어(Lee 등, 2017) 본 연구에서 조사한 베로형 온실보다 온 습도 편차가 큰 것을 알 수 있고 이는 베로형 온실의 측고가 5.5m로 단동 온실보다 높기 때문으로 보인다(Fig. 2B).

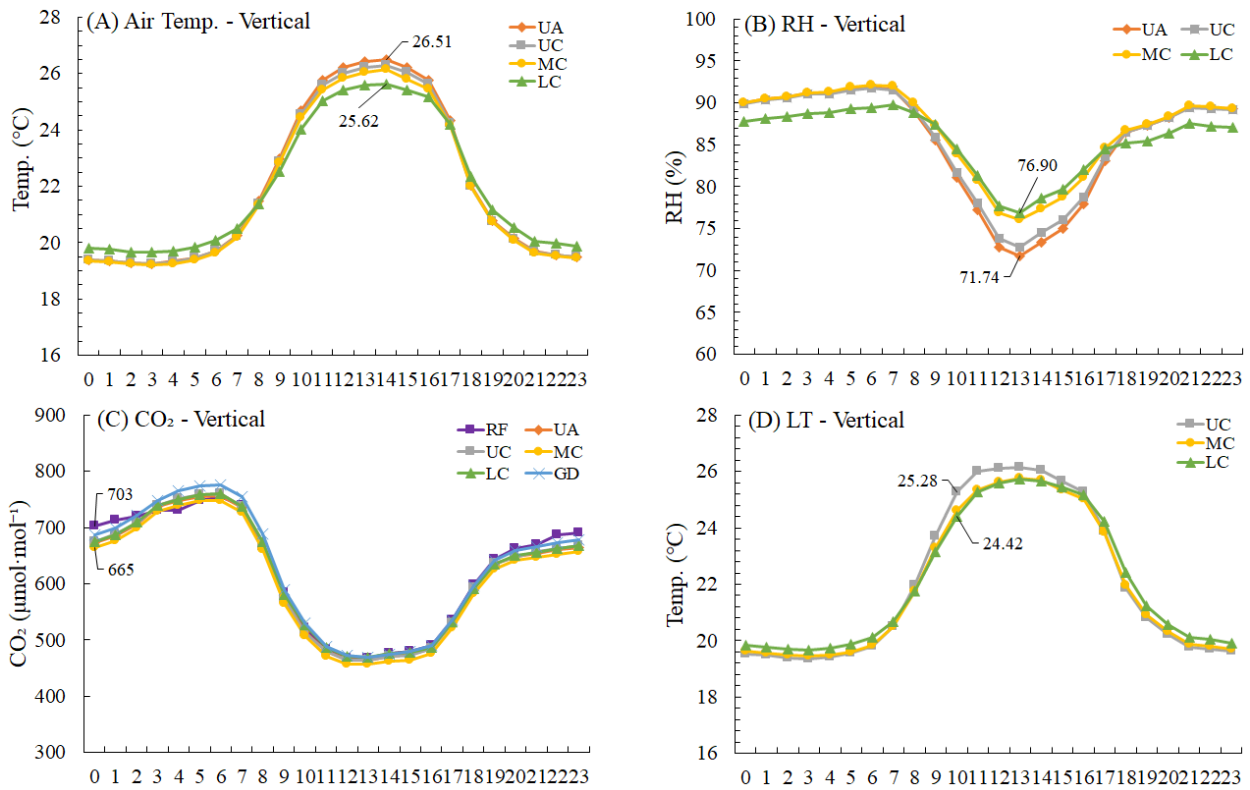
CO<sub>2</sub> 농도는 평균 465 – 761 μmol·mol<sup>-1</sup> 범위였고, 편차가 가장 큰 시간대는 오후 5시였으며, 최고 농도는 4ME에서 646 μmol·mol<sup>-1</sup>, 최저 농도는 5LM에서 436 μmol·mol<sup>-1</sup>이었다(Fig. 2C). 편차가 가장 컸던 4ME는 액화 탄산가스 공급 장치의 메인 배관(50∅)과 가까운 위치이며 공급 배관에 압력 보상 단추가 설치되어 있지만 온실 내 균일한 CO<sub>2</sub> 분포를 위

하여 수평적 공기 유동이 필요한 것을 알 수 있다(Hong과Lee, 2014).

엽온은 평균 19.49 – 25.88°C 범위를 유지하였고 편차가 가장 큰 시간대는 오후 2시였으며 최고 엽온은 5LM에서 26.43°C, 최저 엽온은 3MC에서 25.33°C였다(Fig. 2D). 공간에 따른 엽온과 기온의 편차가 각각 최고 1°C 이상으로 나타났다.

## 2. 온실의 수직적 위치에 따른 편차

베로형 온실의 수직적 위치(Fig. 1B)에 따른 편차는 온도와 상대습도가 다른 요인보다 큰 것으로 나타났다. 평균 기온의 편차가 가장 큰 시간대는 오후 2시이며, 최고 기온은 UA에서 26.51°C, 최저 기온은 LC에서 25.62°C였다(Fig. 3A). 작물 위 공기층인 UA에서는 광도의 영향으로 온도가 높고, 작물 주변인 LC는 증산의 영향으로 온도가 낮았던 것으로 보인다. 평균 상대습도의 편차가 가장 큰 시간대는 오후 1시대로 나타났다, 최고 습도는 LC에서 76.90%, 최저 습도는 UA에서 71.74%였다(Fig. 3B). 이 결과는 기온과 반대 결과로 UA에서 기온이 높아짐에 따라 상대습도가 낮아진 것으로 보이며, 또한 이 시간대는 평균 엽온이 가장 높은 시간대로 작물의 증



**Fig. 3.** Air temperature (air temp., A), relative humidity (RH, B), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>, C), leaf temperature (LT, D) in the vertical location of a Venlo greenhouse (Fig. 1B). Data were hourly collected from September 7 to November 1, 2021. The indicated numbers are the maximum and minimum values among the vertical locations.

산이 활발해지면서 LC에서 상대습도가 높아진 것으로 판단된다. 따라서, 온습도 환경 데이터는 온실의 수직적 위치별 평균 데이터를 활용하여야 할 것으로 보인다.

수직적 위치의 시간대별 CO<sub>2</sub> 평균 농도의 편차가 가장 큰 시간대는 자정이며, 최고 농도는 RF에서 703 μmol·mol<sup>-1</sup>, 최저 농도는 MC에서 665 μmol·mol<sup>-1</sup>이었다(Fig. 3C). 각 시간대에 평균 CO<sub>2</sub> 농도가 가장 높은 수직적 위치는 RF와 GD였으며, 특히 지면부인 GD는 작물의 광합성이 활발한 낮 시간대에도 높았는데 이 결과는 CO<sub>2</sub> 공급 배관이 거터 아래에 설치된 것과 관련이 있는 것으로 보인다. Esmeijer 등(1999)은 공급 배관의 위치를 성장점 아래 50–75cm에 설치할 것을 권장하고 있으며, 본 연구에서도 CO<sub>2</sub> 농도가 GD 위치에서 높은 것으로 보아 CO<sub>2</sub> 효율을 높이기 위해서는 공급 배관의 위치를 작물 상단부로 조절할 필요가 있을 것으로 보인다. 따라서 공급 배관의 높이를 성장 단계별로 조절하면 효율적인 CO<sub>2</sub> 공급 관리가 될 것이라고 판단된다. 한편 엽온은 편차가 가장 큰 시간대인 오전 10시에 최고 온도는 UC에서 25.28°C, 최저 온도는 LC에서 24.42°C였다(Fig. 3D).

### 3. 온실 종류에 따른 온도, 광도 및 CO<sub>2</sub> 농도 결정계수 비교

반밀폐형 온실과 벤로형 온실에서 광도에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 분석한 결과, 하루 중 CO<sub>2</sub> 농도 변화폭은 벤로형 온실이 반밀폐형 온실보다 큰 것으로 나타났다. 온실 내 CO<sub>2</sub> 농도는 반밀폐형의 경우(Fig. 4A) 오전 8시 시간대에 442 μmol·mol<sup>-1</sup>로 가장 낮았고, 오전 10시 시간대에 569 μmol·mol<sup>-1</sup>로 가장 높았다가 오후 3시대까지 514 μmol·mol<sup>-1</sup>로 소폭 감소하였으며, 일중 평균 농도는 483 μmol·mol<sup>-1</sup>이었다. 조사 기간 동안 반밀폐형 온실에서는 09:00–16:00에 CO<sub>2</sub> 800 μmol·mol<sup>-1</sup>이 공급되고 밤시간대는 공조실을 통해 대기 중의 농도 수준으로 유지되고 있어서 낮 시간대의 농도가 야간보다 더 높게 나타났다. 반면 벤로형 온실(Fig. 4B)은 야간에 작물의 호흡 작용으로 CO<sub>2</sub> 농도가 높아져 오전 6시 시간대에 794 μmol·mol<sup>-1</sup>로 가장 높았고, 오후 1시에 472 μmol·mol<sup>-1</sup>로 가장 낮았으며 평균 농도는 649 μmol·mol<sup>-1</sup>이었다. 벤로형 온실은 조사 기간 동안 착과 유도를 위하여 10월 중 700 μmol·mol<sup>-1</sup>을 공급한 것을 제외하고 09:00–16:00에 CO<sub>2</sub> 600 μmol·mol<sup>-1</sup>이 공급되었다.

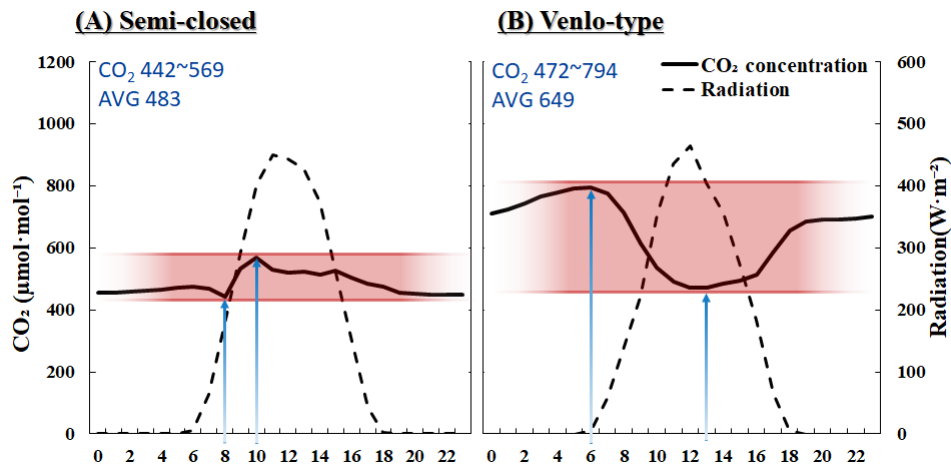


Fig. 4. Hourly changes of CO<sub>2</sub> concentration according to the radiation in the center location of semi-closed (A) and Venlo (B) greenhouses from September 7 to November 1, 2021.

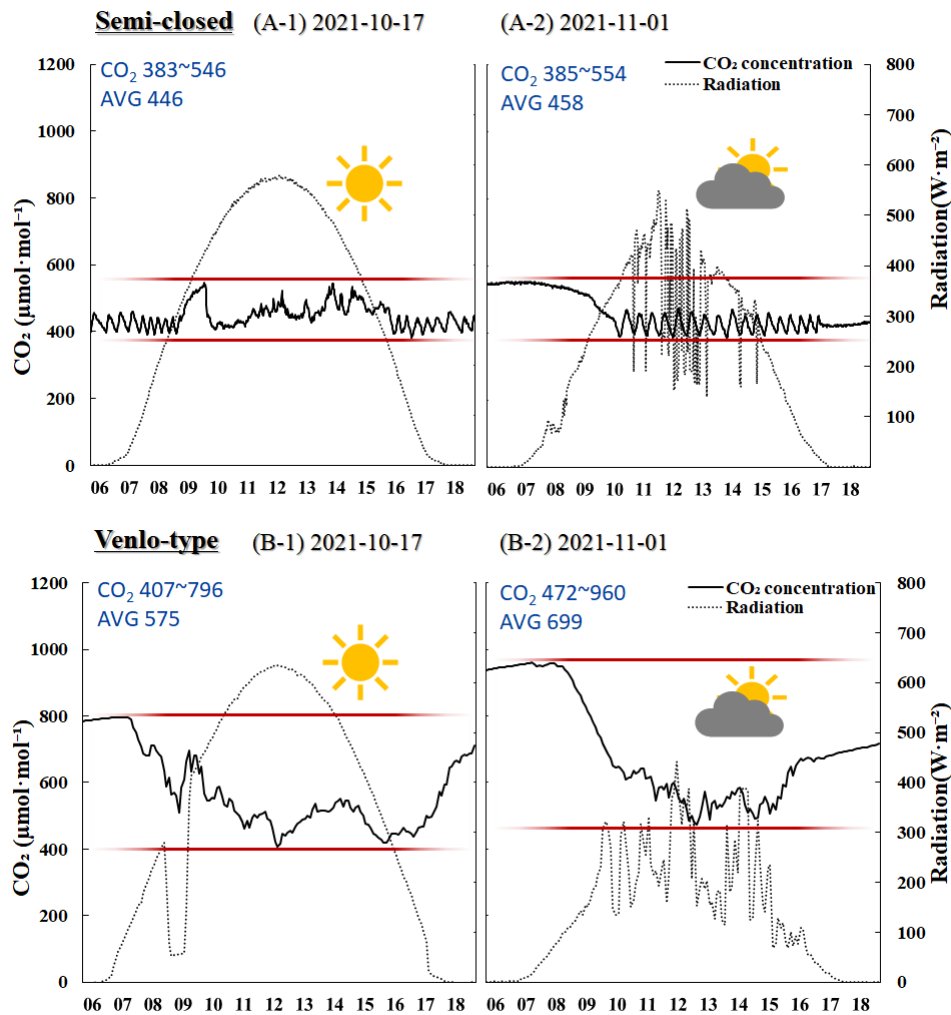


Fig. 5. Hourly changes of CO<sub>2</sub> concentration according to the radiation in the center location of semi-closed (A) and Venlo (B) greenhouses from September 7 to November 1, 2021. Data were collected on representative sunny (A-1, B-1) and cloudy (A-2, B-2) days.



두 온실의 낮 시간대 광도에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 비교하기 위해 두 지역의 기상이 맑은 날과 흐린 날을 선정하여 06:00 - 18:00의 광도와 CO<sub>2</sub> 농도를 각각 확인하였다(Fig. 5). 반밀폐형 온실의 맑은 날 CO<sub>2</sub> 농도 변화는 CO<sub>2</sub> 공급 시간대에만 평균 농도를 상회하여 최고 546 μmol·mol<sup>-1</sup> 수준을 보였으며, 오전 8시 이전과 오후 4시 이후에는 380 - 450 μmol·mol<sup>-1</sup> 범위였다(Fig. 5A-1). 반밀폐형 온실의 흐린 날 CO<sub>2</sub> 농도 변화는 CO<sub>2</sub> 공급 개시 전에 554 μmol·mol<sup>-1</sup> 수준이었고, 낮 시간대에는 380 - 470 μmol·mol<sup>-1</sup> 범위를 보였다(Fig. 5A-2). 벤로형 온실의 맑은 날 CO<sub>2</sub> 농도 변화는 야간에 최고 796 μmol·mol<sup>-1</sup> 이었다가 일출 후 농도가 낮아지고 낮 동안 평균 575 μmol·mol<sup>-1</sup> 농도를 나타냈다(Fig. 5B-1). 벤로형 온실의 흐린 날은 CO<sub>2</sub> 공급 개시 전에 960 μmol·mol<sup>-1</sup> 까지 높아졌으며 낮 동안에는 최저 472 μmol·mol<sup>-1</sup>, 평균 699 μmol·mol<sup>-1</sup> 로 높았다(Fig. 5B-2).

두 온실의 광도와 온도에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화의 상관관계는 시간대별 평균 데이터를 이용하였으며, Curve Expert plot에 데이터를 입력한 결과 반밀폐형 온실의 결정계수( $r^2$ )는 0.07, 벤로형 온실의 결정계수( $r^2$ )는 0.66이었다(Fig. 6). 반밀폐형 온실에서의 결정계수가 낮은 것은 광도가 증가하는 낮에 CO<sub>2</sub> 공급 후 환기로 인한 CO<sub>2</sub> 손실이 적어(Mortensen과 Ringsevjen, 2020) 낮 시간대의 농도가 야간보다 더 높았던 것과 관련이 있다. 외부 공기 유출입이 공조실을 통해 이루어지는 반밀폐형 온실의 경우 CO<sub>2</sub> 시비 효율이 높은 것으로 판단되며 목표 CO<sub>2</sub> 시비 농도가 일반 온실과 달라야 할 것으로 판단된다.

선행 연구에서 반밀폐형 온실이 에너지 효율에서 새로운 가능성을 보여준다고 하였는데(Dannehl 등, 2014; Marcellis 등, 2014; Qian, 2017) 본 연구에서도 반밀폐형 온실의 CO<sub>2</sub> 시비 효율은 공조실을 통한 환기로 인해 CO<sub>2</sub>가 외부로 유출되지 않으면서 재사용되므로 일반 온실에 비해 효율이 높다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 반밀폐형 온실은 CO<sub>2</sub> 공급량과 공급횟수를 일반 온실과 다르게 조절할 필요가 있을 것으로 보인다. 벤로형 온실에서는 온실 내외부의 온·습도 및 내부 광량 데이터를 활용하여 환기율을 계산하였을 때(Geelen 등, 2018), 온실 온도가 17 - 24°C, 상대습도가 80 - 94%, 외부 온도가 17 - 26°C, 외부 상대습도가 59 - 92% 범위에서 계산된 환기율은 최소 3.7 m<sup>3</sup>·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>에서 최대 19.82 m<sup>3</sup>·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, 환기횟수는 0.7 - 3.6 회·h<sup>-1</sup> 범위를 보였다(자료 미제시). 이와 같이 일반 온실에서는 광도와 온도에 따라 환기를 조절하므로 환기에 의한 CO<sub>2</sub> 손실이 예상되고 이에 대한 능동적인 CO<sub>2</sub> 공급량 조절이 필요할 것으로 판단된다. 한편 반밀폐형 온실의 공조실을 통과하는 CO<sub>2</sub> 교환율을 분석하여 대규모 광합성 속도 측정의 가능성이 제시되었으며(Mortensen과 Ringsevjen,

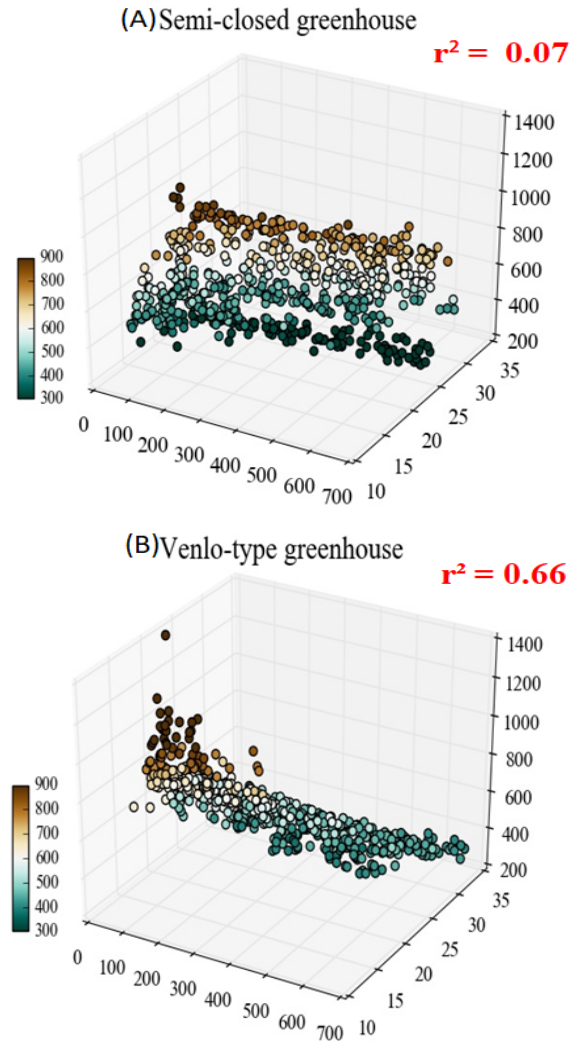


Fig. 6. Comparison of coefficients of determination for the effect of temperature and light intensity on CO<sub>2</sub> concentration between semi-closed (A) and Venlo (B) greenhouses.

2020) 이를 빠르게 분석하고 대응할 수 있다면 보다 높은 생산성을 확보할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구의 결과를 종합하여 볼 때, 온실 내 CO<sub>2</sub> 농도는 공간적 분포를 분석하고, 온도와 습도는 작물의 수직적 분포 차이를 측정하여 분석할 필요가 있으며 환기율이 낮은 반밀폐형 온실의 경우 목표 CO<sub>2</sub> 시비 농도가 일반 온실과 다르게 설정되어야 할 것으로 판단된다.

## 적 요

본 연구는 환경측정용 센서 위치에 따른 온실 환경의 공간·수직적 특성을 조사하고 온실 종류에 따른 온도, 광도 및 CO<sub>2</sub> 농도 간의 상관관계를 구명하고자 수행하였다. 벤로형 온실

의 공간적인 5 지점을 선정한 후 각 지점에서 대표적 작물의 수직적 높이 4 지점과 지면부, 지붕 공간에 온도, 상대습도, CO<sub>2</sub>, 엽온 및 광센서를 설치하였다. 벤로형 온실과 반밀폐형 온실에서 온도, 광도 및 CO<sub>2</sub> 농도 변화의 관계성을 Curve Expert Professional 프로그램을 이용하여 비교하였다. 벤로형 온실의 공간적 위치에 따른 편차는 CO<sub>2</sub> 농도가 다른 요인보다 큰 것으로 나타났다. CO<sub>2</sub> 농도는 평균 465 – 761 μmol·mol<sup>-1</sup> 범위였고, 편차가 가장 큰 시간대는 오후 5시였으며, 최고 농도는 액화 탄산가스 공급장치의 메인 배관(50∅)과 가까운 위치인 중앙 후부(Middle End, 4ME)에서 646 μmol·mol<sup>-1</sup>, 최저 농도는 좌측 중앙(Left Middle, 5LM)에서 436 μmol·mol<sup>-1</sup>이었다. 수직적 위치에 따른 편차는 온도와 상대습도가 다른 요인보다 큰 것으로 나타났다. 평균 기온의 편차가 가장 큰 시간대는 오후 2시대이며, 최고 기온은 작물 위 공기층(Upper Air, UA)에서 26.51°C, 최저 기온은 작물의 하단부(Lower Canopy, LC)에서 25.62°C였다. 평균 상대습도의 편차가 가장 큰 시간대는 오후 1시대로 나타났으며, 최고 습도는 LC에서 76.90%, 최저 습도는 UA에서 71.74%이다. 각 시간대에 평균 CO<sub>2</sub> 농도가 가장 높은 수직적 위치는 지붕 공간 공기층(Roof Air, RF)과 시설 내 지면(Ground, GD)이었다. 온실 내 온도, 광도 및 CO<sub>2</sub> 농도의 관계성은 반밀폐형 온실의 경우 결정계수(r<sup>2</sup>)가 0.07, 벤로형 온실은 0.66이었다. 결과를 종합하여 볼 때, 온실 내 CO<sub>2</sub> 농도는 공간적 분포, 온도와 습도는 작물의 수직적 분포 차이를 측정하여 분석할 필요가 있고 환기율이 낮은 반밀폐형 온실의 경우 목표 CO<sub>2</sub> 시비 농도가 일반 온실과 다르게 설정해야 할 것으로 판단된다.

**추가 주제어:** 결정계수, 반밀폐형 온실, 벤로형 온실, 적외선 엽온 센서, 탄산가스 시비

## 사 사

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

## Literature Cited

- Bowes G. 1991, Growth at elevated CO<sub>2</sub> : photosynthetic responses mediated through Rubisco. *Plant Cell Environ* 14: 795-806. doi:10.1111/j.1365-3040.1991.tb01443.x
- Cho A.R., S.H. Choi, and Y.J. Kim 2020, Flowering and photosynthetic responses of *Phalaenopsis* under elevated CO<sub>2</sub> and nutrient supply. *Hortic Sci Technol* 38:595-607. (in Korean) doi:10.7235/HORT.20200055
- Dannehl D., M. Josuttis, S. Huyskens-Keil, C. Ulrichs, and U. Smidt 2014, Comparison of different greenhouse systems and their impact on plant responses of tomatoes. *Gesunde Pflanz* 66:111-119. doi:10.1007/s10343-014-0322-0
- Esmeyjer M.H. 1999, CO<sub>2</sub> in greenhouse horticulture. *Applied Plant Research*, Aalsmeer/Naaldwijk, the Netherlands, pp 74-75.
- Geelen P.A.M., J.O. Voogt, and P.A. van Weel 2018, Plant empowerment: The basic principles. *plantempowerment academy*, the Netherlands.
- Hong S.W., and I.B. Lee 2014, Predictive model of micro-environment in a naturally ventilated greenhouse for a model-based control approach. *Protected Hort Plant Fac* 23:181-191. (in Korean) doi:10.12791/ksbec.2014.23.3.181
- Jeong C.S., I.S. Kim, K.C. Yoo, S.S. Kim, D.H. Cho, and Y.R. Yeung 1996, Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on the net photosynthesis, yield, content of sugar and organic acid in strawberry fruits. *J Korean Soc Hortic Sci* 37:736-740. (in Korean)
- Keutgen N., K. Chen, and F. Lenz 1997, Responses of strawberry leaf photosynthesis, chlorophyll fluorescence and macronutrient contents to elevated CO<sub>2</sub>. *J Plant Physiol* 150: 395-400. doi:10.1016/S0176-1617(97)80088-0
- Koch G.W., and H.A. Mooney 1996, Response of terrestrial ecosystems to elevated CO<sub>2</sub>: A synthesis and summary. In GH Koch, HA Mooney, eds, *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems*. Academic Press, Inc., San Diego, CA, USA, pp 415-429.
- Lee J.K., D.H. Kang, S.H. Oh, and D.H. Lee 2020, Strategies about optimal measurement matrix of environment factors inside plastic greenhouse. *Protected Hort Plant Fac* 29:161-170. (in Korean) doi:10.12791/ksbec.2020.29.2.161
- Lee T.S., G.C. Kang, H.K. Kim, J.P. Moon, S.S. Oh, and J.K. Kwon 2017, Analysis of air temperature and humidity distributions and energy consumptions according to use of air circulation fans in a single-span greenhouse. *Protected Hort Plant Fac* 26:276-282. (in Korean) doi:10.12791/ksbec.2017.26.4.276
- Lee Y.B., and B.Y. Lee 1994, Effect of long-term CO<sub>2</sub> enrichment on leaf temperature, diffusion resistance, and photosynthetic rate in tomato plant. *J Korean Soc Hortic Sci* 35: 421-428. (in Korean)
- Marcelis L.F.M., F. Buwalda, J.A. Dieleman, T.A. Dueck, A. Elings, A. de Gelder, S. Hemming, F.L.K. Kempkes, T. Li, and F. van Noort 2014, Innovations in crop production: A matter of physiology and technology. *Acta Hort* 1037:39-45. doi:10.17660/ActaHortic.2014.1037.1
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) 2020a, Greenhouse status of vegetables grown in facilities 2015-2020. Available via [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=114&tblId=DT\\_114018\\_009&conn\\_path=I2](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=114&tblId=DT_114018_009&conn_path=I2)
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) 2020b, Greenhouse status and production performance of



- vegetables grown in facility 2017-2020. Available via [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=114&tblId=DT\\_114018\\_011&conn\\_path=I2](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=114&tblId=DT_114018_011&conn_path=I2))
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) 2021, Agricultural area survey. Available via [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT\\_1ET0017&conn\\_path=I2](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0017&conn_path=I2)
- Morita R., K. Inoue, K.I. Ikeda, T. Hatanaka, M. Misoo, and H. Fukayama 2016, Starch content in leaf sheath controlled by CO<sub>2</sub>-responsive CCT protein is a potential determinant of photosynthetic capacity in rice. *Plant Cell Physiol* 57:2334-2341. doi:10.1093/pcp/pcw142
- Mortensen L.M., and F. Ringsevjen 2020, Semi-closed greenhouse photosynthesis measurements: A future standard in intelligent climate control. *Eur J Horti Sci* 85:219-225. doi:10.17660/eJHS.2020/85.4.2
- Qian T. 2017, Crop growth and development in closed and semi-closed greenhouses. PhD thesis, Wageningen Univ., Wageningen, The Netherlands. doi:10.18174/403466
- Rural Development Administration (RDA) 2021, Agricultural income survey 2013-2020. Available via [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=143&tblId=DT\\_143002\\_A000&conn\\_path=I2](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=143&tblId=DT_143002_A000&conn_path=I2)
- Stitt M. 1991, Rising CO<sub>2</sub> levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. *Plant Cell Environ* 14:741-762. doi:10.1111/j.1365-3040.1991.tb01440.x
- Woo Y.H., H.J. Kim, T.Y. Kim, K.D. Kim, E.Y. Nam, I.H. Cho, K.H. Hong, and K.H. Lee 2005, Effect of high temperature adaptable improvement of spray type chrysanthemum (*Dendranthema grandiflorum*) of greenhouse according to carbon dioxide treatment at summer. *J Bio-Env Con* 14:100-104. (in Korean)