

플라스틱 온실 내 이산화탄소 시비에 따른 토마토 생육과 생체 반응 및 Plant-induced Electrical Signal 간 관계 분석

구희웅^{1†} · 이규원^{2†} · 송욱진² · 김도현² · 박현준³ · 박경섭^{1,4*}

¹지역특화작목산업화센터 연구원, ²국립목포대학교 원예학과 대학원생, ³(주)푸름바이오 대표, ⁴국립목포대학교 원예학과 교수

Analysis of Relationship between Tomato Growth, Vital Response, and Plant-induced Electrical Signal in a Plastic Greenhouse due to Carbon Dioxide Enrichment Treatment

Hee Woong Goo^{1†}, Gyu Won Lee^{2†}, Wook Jin Song², Do Hyeon Kim²,
Hyun Jun Park³, and Kyoung Sub Park^{1,4*}

¹Researcher, Regional Crop Research Institute, Muam 58554, Korea

²Graduate Student, Department of Horticulture, Mokpo National University, Muam 58554, Korea

³Representative, Soil Research Institute, Prumbio Co. Ltd., Suwon 16386, Korea

⁴Professor, Department of Horticulture, Mokpo National University, Muam 58554, Korea

Abstract. Tomatoes in greenhouse are a widely cultivated horticultural crop worldwide, accounting for high production and production value. When greenhouse ventilation is minimized during low temperature periods, CO₂ enrichment is often used to increase tomato photosynthetic rate and yield. Plant-induced electrical signal (PIES) can be used as a technology to monitor changes in the biological response of crops due to environmental changes by using the principle of measuring the resistance value, or impedance, within the crop. This study was conducted to investigate the relationship between tomato growth data, vital response, and PIES resulting from CO₂ enrichment in greenhouse tomatoes. The growth of tomato treated with CO₂ enrichment in the morning was significantly better in all items except stem diameter compared to the control, and PIES values were also higher. The growth of tomato continuously applied with CO₂ was better in the treatment groups than control, and there was no significant difference in chlorophyll fluorescence and photosynthesis. However, PIES and SPAD values were higher in the CO₂ treatment group than control. CO₂ enrichment have a direct relationship with PIES, growth increased, and transpiration increased due to the increased leaf area, resulting in increased water absorption, which appears to be reflected in PIES, which measures vascular impedance. Through this, this study suggests that PIES can be used to monitor crops due to environmental changes, and that PIES is a useful method for non-destructively and continuously monitoring changes of crops.

Additional key words: CO₂ application, crop stress, photosynthesis, PIES, *Solanum lycopersicum*

서 론

국내 토마토(*Solanum lycopersicum*)는 파프리카, 딸기, 오이 등과 같이 대표적인 시설원에 작물로 높은 재배면적과 생산량을 가지고 있으며(KOSIS, 2020), 무한생장을 하는 직립성 작물로 재배환경과 영양상태가 적합하면 연중 토마토 생산이 가능하다. 저온기 온실의 보온 스크린은 방열을 줄이기 위해 필요하고, 온실 내 환기로 인해 급격한 온도 변화를 줄이기

위해 측창 개폐를 최소화한다(Nam과 Shin, 2015). 이로 인해 온실 내 작물 광합성에 활용되는 CO₂가 한정되어 광합성 속도가 감소할 수 있다. 따라서 온실 내 CO₂ 시비는 겨울철 광합성 속도를 증가시키기 위한 방법으로 그 종류로 액화 CO₂, 연소식 CO₂, 고체 CO₂, 드라이아이스 등을 이용해 온실에 CO₂를 시비한다. 이 중에서도 액화 CO₂ 방식은 CO₂ 제어가 용이하고, 불순물이 없어 정확한 농도로 제어하고 싶은 대형 온실에서 주로 사용한다(Paek 등, 2020; Park 등, 2010).

CO₂는 광합성 원료로 광에너지를 이용하여 식물체 내에서 물과 결합하여 포도당을 생성하는 데 사용된다(Makino과 Mae, 1999). 생성된 포도당은 식물체의 생명 유지에 필요한

†These authors contributed equally to this work

*Corresponding author: unicos75@mokpo.ac.kr

Received October 19, 2023; Revised October 30, 2023;

Accepted October 30, 2023

에너지를 얻는 과정인 호흡에 사용되고, 또한 잎, 줄기, 뿌리와 같은 기관의 영양기관 생장과 꽃, 과실 형성과 같은 생식기관 생장에 사용된다(Heuvelink과 Marcelis, 1989). 이러한 이유로 광합성 속도를 향상시키기 위한 연구가 진행되었고, 광합성을 분석하기 위한 다양한 모델이 존재한다(Farquhar 등 1980; Kim과 Lee, 2001b).

작물은 병해충과 같은 다른 생물체 또는 온도, 수분, 염류와 같은 환경에 의해 스트레스를 받는다. 환경 스트레스로 인해 작물 내의 방어체계가 손상되면 병원균에 의한 감염이 더욱 쉽게 발생할 수 있다(Gaspar 등, 2002; Lee 등, 2020). 이러한 이유로 생물적 스트레스와 비생물적 스트레스가 동시에 발생하는 복합 스트레스는 작물에 매우 큰 피해를 입힐 수 있다(Yoo과 Sang, 2017). 작물은 스트레스를 받을 때 내부와 외부에서 변화가 나타나고, 이러한 식물의 변화는 온실 내 물리적 환경의 변화를 유추하는데 활용될 수 있다. 식물의 광합성, 엽록소형광, 엽록소 함량 지수(SPAD) 등으로 작물의 비정상적인 생리 활동을 간헐적으로 감지할 수 있다(Jiang 등, 2017; Kim 등, 2004; Park 등, 2018b). 반면에 주기적으로 작물의 변화를 비파괴적으로 측정할 수 있는 기술로 plant-induced electrical signal(PIES), 수액흐름 속도, 영상 촬영 등을 이용해 작물의 생리적인 변화를 모니터링하는데 활용이 가능하다(De Swaef 등, 2012; Kim 등, 2020; Park 등, 2018a). PIES는 줄기의 수분, 이온함량에 따른 영향을 받기 때문에 작물의 수분과 염류 농도 변화와 관련이 있다. 식물의 변화를 모니터링할 수 있는 기술은 스트레스를 받는 시점을 파악하여 원인을 유추하는데 도움이 되며, 활용 가능한 범위가 점점 늘어나고 있다.

작물의 스트레스는 누적되면 광합성 속도가 저하되고, 결국 작물의 생육 부진과 생산량 감소로 이어질 수 있다. 그러므로 일시적인 작물 스트레스 측정보다 환경 변화에 의한 토마토의 생체 반응을 모니터링할 수 있는 PIES를 통해 수치화하고자 한다. 따라서, 본 연구는 온실에서 재배되는 토마토에 CO₂ 시비를 하였을 때 엽록소 함량 지수, 엽록소 형광반응, 광합성 속도, PIES 등의 생체반응과 작물의 생육을 조사하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

1. 재배환경

실험은 전라남도 무안군 목포대학교 부속농장 내 이중 PE 플라스틱하우스에서 진행되었다. 공시작물은 적색계 토마토 품종인 ‘대프니스’(Syngenta, Basel, Schweiz)를 사용하였다. 배지는 코이어 배지(Pelemix, Israel)를 사용하였고, 양액

은 아마자키 토마토 배양액을 이용하여 생육단계에 따라 EC 2.5–3.0dS·m⁻¹, pH 6.0을 기준으로 급액하였고 외부 일사량 기준으로 70J·cm⁻²당 100–150cc 관수하였다. 광합성 효율을 높이기 위해 토마토 하엽을 제거하였고, 적엽 기준은 색과 형태가 변화한 잎을 제거함으로써 재배자의 개입을 최소화하였다. 또한 온실 내 온도가 26°C 이상이면 측창이 열리고, 20°C 이하이면 측창이 닫히도록 제어하였다.

2. 온실 내 CO₂ 시비 방법

CO₂ 시비에 따른 작물의 반응을 모니터링하기 위해 CO₂ 시비구와 무처리구(대조구)로 처리하였고, CO₂ 시비를 위해 식음료용 액화탄산을 사용하였다. 실험은 조건을 다르게 설정하여 두 개의 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 광합성이 이루어지는 오전에 한시적으로 시비를 하는 것으로 05시부터 11시까지로 시비하였다. 2023년 3월 26일에 정식을 하고, 4월 14일에 CO₂ 시비를 하였고, 정식 후 54일인 날부터 3일간 생체 정보와 생육 조사를 진행하였다. 두 번째 실험은 연속 CO₂ 시비구는 400μmol·mol⁻¹ 이하에서 시비를 하고, 500 μmol·mol⁻¹ 이상에서 시비를 정지하여 무처리구인 대조구보다 항상 CO₂ 농도가 높은 상태에 노출하여 토마토 생체정보를 모니터링하였으며 2023년 5월 10일에 정식을 하였고, 6월 1일부터 CO₂ 시비를 하였고, 정식 후 42일부터 7일간 작물 반응을 모니터링하였다. 온실 내 CO₂ 농도는 CO₂ 측정기(T7001, Telaire, PA, USA)을 이용해 측정하여 데이터 로거(CR1000x, Campbell Sci., UT, USA)에 기록하였다.

3. 작물 생육조사

하우스 내부 상황에 의한 토마토 재배와 실험 종료에 맞춰 작물의 생육 정도를 조사하였다. 생육조사 항목으로는 초장, 경직경, 엽수, 열매수, 엽면적, 생체중, 건물중을 조사하였다. 초장은 지제부부터 생장점까지의 길이를 측정하였고, 경직경은 최상위 화방의 아래 마디에서 가장 굵은 부분을 측정하였다. 엽수는 위에서 첫 번째 화방 아래의 잎을 대상으로 셈하였고 엽면적은 개체에서 나온 잎을 엽면적측정기(LI-3100C, Li-Cor Inc, Nebraska, USA)을 이용해 구하였다. 생체중은 전자저울(IB-3100, InnoTem, Yangju, Korea) 통해 잎과 줄기의 무게를 측정하였으며, 건물중은 생체중을 구한 잎과 줄기를 70°C로 설정한 강제대류식 건조기(JSOF-250T, JSR, Gongju, Korea)에서 3일 이상 건조 후 측정하였다.

4. 작물 생체정보 조사

탄산가스 처리가 작물 반응에 미치는 영향을 조사하기 위해

PIES, 광합성속도, 엽록소 형광반응, 엽록소 함량 지수를 측정하였다. PIES는 유관속을 전기가 통하는 전도체라 가정하였을 때 일정 주파수를 흘려 구한 임피던스 값으로 Junsmeter II(Prumbio, Suwon, Korea)을 이용해 측정하였다. 측정값은 아래의 식을 이용해 전기전도도로 변환하여 사용하였다(Cha 등, 2020). Eq. 1은 유관속 저항(R, Ω)이며, 토마토 줄기의 지름(D, mm), 삽입된 바늘의 길이(L, mm), 바늘의 지름(d, mm), 그리고 상수(k)를 이용하였다(Kim 등, 2023).

$$PIES = k \frac{1}{R} \times \frac{D-L}{L \times d} \quad (1)$$

광합성속도는 휴대용 광합성 측정기(LI-6800, Li-Cor Inc., NE, USA)를 이용하여 무처리구와 정상적 CO₂ 시비구를 조사하였다. 다른 환경에서 자란 개체의 광합성속도 차이를 파악하기 위해 CO₂ 농도를 제외한 다른 항목은 동일하게 설정하였다. 챔버 내 환경은 유동량 600 μmol·s⁻¹, 엽온 25°C, 상대 습도 55%, CO₂ 400 μmol·mol⁻¹, 광합성유효광량자속 밀도는 1,500 μmol·m⁻²·s⁻¹으로 설정하였고 A-Ci curve를 구하기 위해 CO₂ 농도를 조절하며 측정하였다(Park 등, 2016). 엽록소 형광은 광계에서 흡수한 광 중 흡수하지 않고 방출되는 형광을 측정하는 것으로 정상적인 개체에서는 극히 일부의 형광 방출하지만 작물이 스트레스를 받거나 생육 반응이 낮을 때는 많은 양의 빛을 방출하는 원리로 휴대용 엽록소 형광반응 측정기(FP100, PSI, Drásov, Czech Republic)를 이용해 측정하였다(Al-aghaby 등, 2005; Zribi 등, 2009). 엽록소 함량 지수는 비파괴 엽록소 측정기(SPAD-502 PLUS, Konica Minolta, Tokyo, Japan)를 이용해 측정하였으며, 엽록소가 높아지면 잎의 질소 함량이 증가하는 원리를 이용하여 잎의 녹색의 정도를 측정하는 기기이다(Fontes과 de Araujo, 2006; Jiang 등,

2017).

5. 데이터 수집 및 통계 분석

작물 생육에 관한 통계분석과 상관분석은 오픈소스 프로그래밍 프로그램인 R software(4.2.3, R Foundation)을 사용하였고 회귀분석과 그래프 작성은 시그마 플롯(Sigmaplot 14.5, SYSTAT, California, USA)을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 오전 CO₂ 처리구와 무처리구의 온실 환경 비교

실험 기간 동안 온실 내 온도와 CO₂ 농도를 조사한 그래프(Fig. 1)이다. 온도는 야간온도는 약 18°C, 주간온도는 약 30°C로 두 처리 간 차이를 보이지 않았다. 온실의 전기온풍기의 난방개시온도를 18°C로 설정하였기 때문에 야간에 18°C를 유지할 수 있었고 주간에는 태양 복사열의 영향을 받아 온도가 상승하였다(Jeon 등, 2022).

온실 내 CO₂ 농도는 시비가 이루어지는 05시부터 11시까지는 큰 차이를 보였지만, 이외의 시간에는 처리간 CO₂ 농도 차이가 없었다. 야간에는 온실의 측창을 닫아 놓아 기체교환이 거의 이루어지지 않으면서 작물은 호흡을 통해 생명 활동을 유지하기 때문에 해가 뜨기 전까지 꾸준히 상승하였다. 일출 후의 무처리 구는 탄소동화작용으로 인해 온실 내 CO₂ 농도가 감소하였고 측창 개방 이후 400ppm을 유지하다 측창 폐쇄 이후 다시 상승하는 양상을 반복하였다. CO₂ 처리구는 05시부터 CO₂ 시비를 하였기 때문에 광합성이 가장 활발한 일출 후 2-3시간 동안 온실 내 환경의 급격한 변화를 최소화할 수 있었다(Hicklenton과 Jolliffe, 1978).

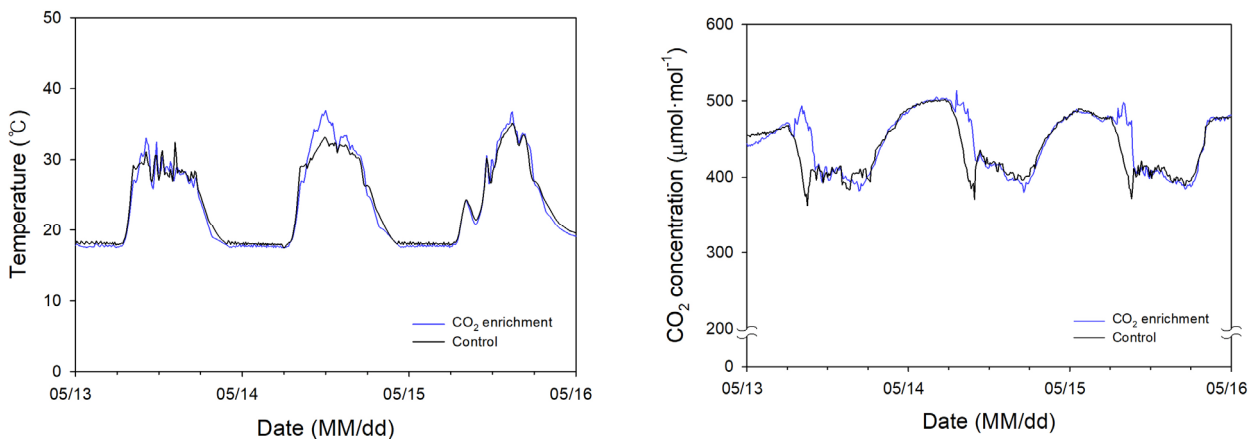


Fig. 1. The temperature and CO₂ concentration environment in the greenhouse under temporary CO₂ enrichment treatment.

2. 오전 CO₂ 시비에 따른 작물 생육 및 생체 반응 비교

실험처리에 따른 작물의 생육을 비교하였을 때, 육안상으로 잎의 풍성함과 줄기 굵기가 차이가 나타났다(Fig. 2). 생육조사 결과 모든 조사항목에서 CO₂ 시비구가 무처리구보다 좋은 생육을 보였다(Table 1). t-test 결과 줄기 직경을 제외한 다른 항목 중 엽면적과 생체중은 유의한 차이를 보여 초장, 엽수, 열매수, 건물중은 유의한 차이가 나타나 일출 후 CO₂ 시비가 작물 생육에 유의미한 효과 있는 것을 알 수 있었다.

PIES는 작물 내 줄기 내부의 전기전도도를 수치화한 값으로 CO₂ 시비구에서 높은 수치를 가졌다(Fig. 3). 이는 CO₂ 시비로 인한 작물의 생장이 수치에 영향을 미친 것으로 보인다. 하루 중 PIES의 변화를 보면 온도가 높아짐에 따라 PIES도 상승했는데, 이는 기온 상승에 의해 PIES와 연관성이 높은 증산량이 증가했기 때문으로 보인다(Park 등, 2019). 첫 번째 실험에서 CO₂ 시비가 작물의 빠른 성장을 가능케 한다는 결과가 나왔지만, PIES의 변화가 단순 CO₂ 시비에 의한 영향이라 보기 어렵다고 판단하여 정확한 원인을 구명하기 위해 항상 높은 CO₂ 농도를 유지하였을 때 토마토 생체반응을 측정하는 실험을 수행하였다.



Fig. 2. Temporary CO₂ enrichment on the tomato. (A) Control and (B) CO₂ enrichment.

Table 1. Effect of CO₂ enrichment in the morning on the growth of tomato.

Treatment	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	Number of leaves	Number of fruits	Leaf area (cm ²)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Control	207.1±9.8	5.9±0.5	12.3±0.9	8.7±1.8	2995±359	648.8±65.1	146.6±11.5
CO ₂ enrichment	256.3±2.9	6.2±2.0	15.8±0.5	19.0±1.2	6786±203	1136.5±47.8	201.2±1.2
Significance	*	ns	*	*	**	**	*

Asterisks indicates significant differences via Student's t-test, **p* < 0. 05; ***p* < 0. 01; ns, non-significant.

3. 연속적인 CO₂ 시비에 따른 온실 환경

두 번째 실험은 하루 중 특정 시간이 아닌 항상 높은 농도를 유지하였을 때 토마토의 반응을 조사하였다. 다음 그래프(Fig. 4)는 항상 처리구와 대조구 간의 온실 내 온도와 농도를 조사한 그래프이다. 온실 내 온도는 주간에는 약간 다르지만 거의 유사한 변화를 보였다. 온실 내 CO₂ 변화는 첫 번째 실험과 같이 야간에 증가하고 주간에 감소하는 양상을 반복하였다.

4. 연속적인 CO₂ 시비에 따른 작물 생육 및 생체 반응 비교

항시적으로 CO₂ 시비하였을 때 토마토의 생육은 실험처리구에서 줄기 굵기와 잎과 같은 영양생장 향상에 효과가 있음(Fig. 5)을 알 수 있었다(Lee 등, 2008). 생육조사 결과 모든 조사항목에서 CO₂ 처리구가 높은 성장을 한 것을 알 수 있었다(Table 2). 건물중의 차이에서 CO₂ 시비가 실질적인 바이오매스 향상에 많은 영향이 있음을 알 수 있었다(Heuvelink, 1999). 두 처리구의 평균을 비교하기 위해 실시한 t-test 모든 항목에서 시비구에서 영양생장이 촉진된 것을 알 수 있었고, 과실수를 제외한 나머지 항목에 유의한 차이를 보였다.

Fig. 6은 처리에 따른 PIES의 변화를 나타낸 그래프이다. 대

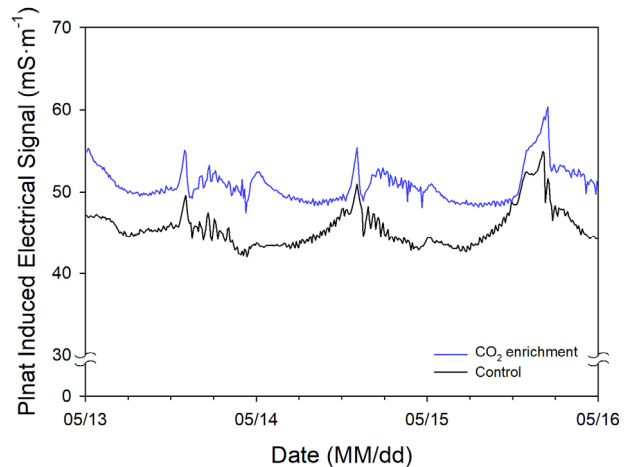


Fig. 3. Plant induced electrical signal of tomato under CO₂ application treatment in the morning.

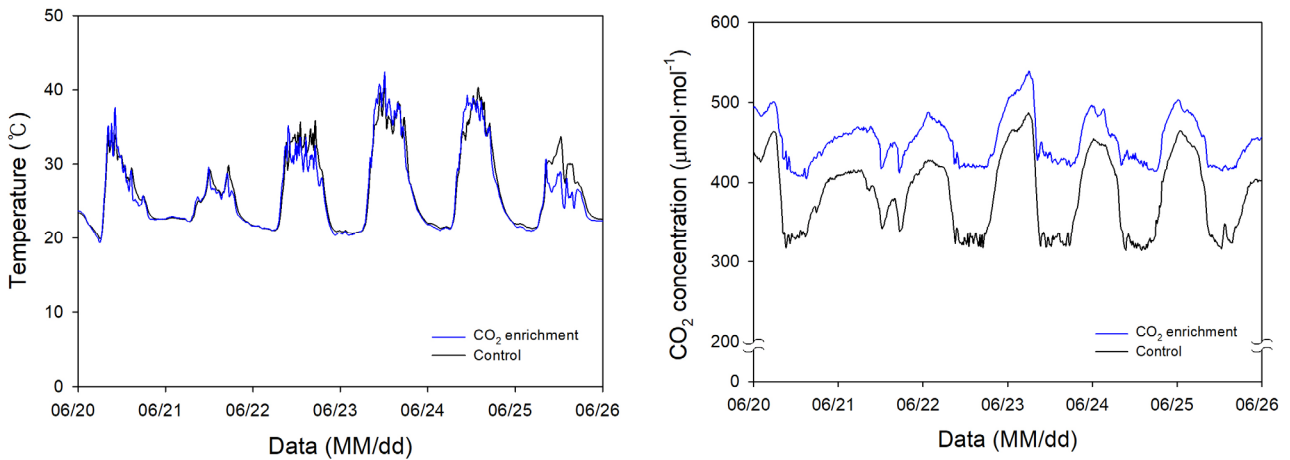


Fig. 4. The temperature and CO₂ concentration environment in the greenhouse under continuous CO₂ enrichment treatment.

Table 2. Effect of continuous CO₂ enrichment on the growth of tomato.

Treatment	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	Number of leaves	Number of fruits	Leaf area (cm ²)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Control	136.3±1.9	7.38±0.61	9.67±0.33	5±0.58	2424±239	292.7±3.1	86.5±0.9
CO ₂ enrichment	164.7±1.7	10.12±0.74	11.67±0.33	7±0.58	3428±184	503.2±5	101.6±2.7
Significance	***	*	*	ns	*	***	*

The asterisk indicates significant differences via Student's t-test, **p* < 0. 05; ****p* < 0. 01; ns, non-significant.



Fig. 5. Permanent CO₂ enrichment on the tomato. (A) Control and (B) CO₂ enrichment.

조구와 CO₂ 시비구는 약 5 – 15mS·m⁻¹의 차이가 있었다. 같은 시기의 온실 내 환경을 보면 온도 변화와 PIES가 유사한 변화 경향을 보인 것을 알 수 있었다(Cha 등, 2020; Park 등, 2019; Park, 2020). 항상 높은 CO₂ 농도는 PIES 간의 높은 연관성을 가진 것처럼 보인다. 하지만 Fig. 1과 Fig. 3의 그래프를 참고하였을 때 CO₂가 하루 중 한정된 시간에만 시비가 되

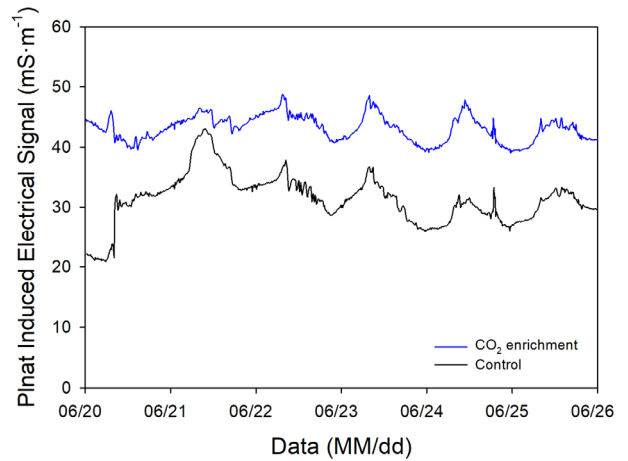


Fig. 6. Plant induced electrical signal of tomato under permanent CO₂ enrichment treatment.

어도 CO₂ 시비구에서 높은 PIES를 유지한 것을 보면 CO₂ 농도와 PIES의 간의 직접적인 연관성이 낮음을 알 수 있었다 (Kim 등, 2023).

Fig. 7은 실험처리를 한 토마토의 광합성 속도를 측정 한 그래프이다. 챔버 내 CO₂ 농도를 조절하였을 때 산출 광합성 속도와 엽육 내 CO₂ 농도를 비교한 것으로 200µmol·mol⁻¹이하

의 저농도에서는 두 처리가 비슷한 경향을 보였지만 $600\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 이상의 높은 농도에서는 CO_2 시비한 처리구에서 더 빠른 광합성속도를 가진 것을 알 수 있었다(Kim과 Lee, 2001a). 최대 광합성 속도는 무처리구는 약 $27.50\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이고 시비구는 약 $31.15\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 약 $4\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 차이가 났다. 측정 시 환경과 날씨에 영향을 많이 받는 광합성 측정 특성상 유의한 수치 차이는 아닌 것으로 보인다(Kaiser 등, 2015). 그러므로 CO_2 시비가 광합성 속도 증가에 영향을 주지 않지만 일출 후 광합성이 가장 활발한 시기에 충분한 탄소를 공급해 줌으로써 작물의 원활한 성장을 도모할 수 있던 것으로 보인다(Körner 등, 2009).

작물의 성장점 기준 5번째 잎을 대상으로 엽록소 형광과 엽록소 함량 지수를 측정하였다(Table 3). 토마토 잎의 엽록소 형광은 0.81 이상의 형광 수치가 측정되었을 때 정상적인 개체라고 하며 그 이하의 수치가 관찰되면 많은 형광이 방출되

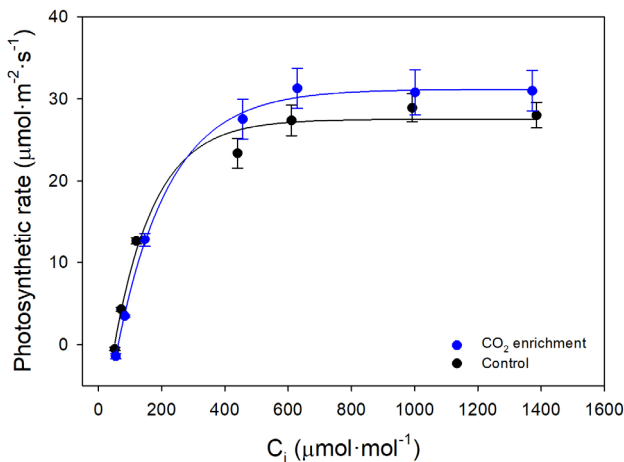


Fig. 7. The photosynthetic rate of tomato leaf due to continuous CO_2 enrichment treatment.

Table 3. Effect of continuous CO_2 enrichment on the tomato physiological information.

Treatment	PIES ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$)	Fv/Fm	SPAD	A_{max} ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Control	32.31±5.41	0.841±0.007	51.69±8.30	27.50
CO_2 enrichment	39.18±3.93	0.848±0.001	58.77±1.59	31.15

Table 4. Correlation analysis between PIES, growth, and vital response due to CO_2 treatment of tomato.

Treatment	Plant height	Stem diameter	Number of leaves	Number of fruits	Leaf area	Fresh weight	Dry weight	A_{max}	Stomatal conductance	Fv/Fm	SPAD
PIES	0.704*	0.753*	0.758*	0.460	0.826*	0.801*	0.563	0.878*	0.636	0.553	0.218

*Significant at $p < 0.05$ level of probability.

는 것으로 작물이 스트레스를 받거나 생육 반응이 낮다는 것을 유추할 수 있다(Mishra 등, 2012; Zribi 등, 2009). 엽록소 형광 측정 결과 두 처리 모두 약 0.84로 높은 수치를 가지고 있어 정상적인 생육을 하는 개체임을 알 수 있었다(Al-aghabary 등, 2005). 엽록소 함량 지수(SPAD)에 관한 선행연구를 보면 토마토 잎은 40 - 60 사이의 수준이다. 측정 결과 두 처리 모두 해당 범위에 속하였지만, 대조구에서 더 낮은 엽록소 함량 지수를 보였다(Jiang 등, 2017).

5. 연속적인 CO_2 시비에 따른 토마토 생육과 생체반응 및 PIES의 상관관계

Table 4는 토마토 생체반응과 PIES 간 상관분석 결과이다. 생육조사 항목과 PIES의 상관분석 결과 초장, 줄기 직경, 잎수, 엽면적, 생체중과 같이 작물의 영양생장과 관련된 항목에서 높은 양의 상관관계를 보였다. 그리고 생체반응과 PIES의 상관분석 결과 광합성 속도에서 높은 상관계수를 가졌다. 선행연구에서 PIES는 수분흡수와 관련이 높다는 결과와 비교하면(Park 등, 2018a), CO_2 시비구의 높은 엽수와 엽면적은 증산량을 증가시켜 근권부의 수분 흡수를 높인 것으로 보인다. 하지만 증산량과 관련이 높은 기공전도도에서 낮은 상관계수가 나타났는데, 개별 잎의 증산량이 아닌 총 증산량이 수분 흡수와 연관성이 있기 때문이다.

요컨대 CO_2 시비가 토마토 총광합성량을 증가시키고, 그로 인해 생산된 광합성 동화산물은 잎과 줄기의 생장에 활용되어 토마토 생체량 증가에 사용되었고, 높아진 엽면적은 증산량을 증가시켜 뿌리에서 더 많은 물을 흡수하여 PIES에 영향을 미친 것으로 보인다. 따라서 PIES 기술을 활용하여 온실 내에서 환경이나 영양의 불균형에 의한 작물의 변화 모니터링과 작물 스트레스 정도의 수치화가 가능하다.

적 요

토마토는 전세계적으로 많이 재배되는 시설 원예작물로 높은 생산량과 생산액을 차지하고 있다. 저온기 온실 환기를 최소화하는 상황에서 CO₂ 시비는 토마토 광합성 속도와 수확량을 높이기 위해 많이 사용한다. PIES는 작물 내 저장값 즉 임피던스값을 측정하는 원리를 응용하여 환경 변화에 따른 작물의 생체 반응 변화를 모니터링하는 기술로 활용이 가능하다. 본 연구는 온실 토마토에서 CO₂ 시비에 따른 토마토의 생육 데이터와 생체정보 및 PIES 간의 연관성을 구명하기 위해 수행되었다. 오전에 CO₂ 처리한 작물의 생육은 무처리 구에 비해 경직경을 제외한 모든 항목에서 유의적으로 좋았고, PIES도 높게 나왔다. 연속적으로 CO₂ 시비한 작물의 생육도 처리구에서 좋았고 생체 반응 중 엽록소 형광과 광합성은 유의한 차이는 없었다. 하지만 PIES와 엽록소지수는 CO₂ 처리구에서 높은 수치를 보였다. CO₂ 시비가 PIES와 직접적인 관계가 있기보다는 시비를 통해 작물의 생육량이 상승하였고, 높아진 엽면적으로 인해 증산량이 증가되어 수분흡수가 많아졌고, 유관속 임피던스를 측정하는 PIES에 반영된 것으로 보인다. 이를 통해 본 연구는 PIES가 환경 변화에 따른 작물 모니터링에 활용할 수 있음을 시사하며, PIES가 작물의 변화를 비파괴적으로 연속적으로 모니터링할 수 있는 유용한 방법이다.

추가 주제어: 광합성, 식물 내부 전기전도도, 탄산가스 사용, 작물 스트레스, 토마토

사 사

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(연구과제명: 채소류 양수분 효율증진을 위한 센서활용 생체정보 모니터링 시스템 개발, 연구과제번호: PJ015050)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Al-aghabary K., Z. Zhu, and Q. Shi 2005, Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *J Plant Nutr* 27:2101-2115. doi:10.1081/PLN-200034641
- Cha S.J., H.J. Park, J.K. Lee, S.J. Kwon, H. K. Jee, H. Baek, H.N. Kim, and J.H. Park 2020, Multi-sensor monitoring for temperature stress evaluation of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). *J Appl Biol Chem* 63:347-355. doi:10.3839/jabc.2020.046
- De Swaef T., K. Verbist, W. Cornelis, and K. Steppe 2012, Tomato sap flow, stem and fruit growth in relation to water availability in rockwool growing medium. *Plant Soil* 350:237-252. doi:10.1007/s11104-011-0898-4
- Farquhar G.D., S. von Caemmerer, and J.A. Berry 1980, A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149:78-90. doi:10.1007/BF00386231
- Fontes P.C.R., and C. de Araujo 2006, Use of a chlorophyll meter and plant visual aspect for nitrogen management in tomato fertigation. *J Appl Hortic* 8:8-11. doi:10.37855/jah.2006.v08i01.02
- Gaspar T., T. Franck, B. Bisbis, C. Kevers, L. Jouve, J.F. Hausman, and J. Dommes 2002, Concepts in plant stress physiology. Application to plant tissue cultures. *Plant Growth Regul* 37:263-285. doi:10.1023/A:1020835304842
- Heuvelink E. 1999, Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Ann Bot* 83:413-422. doi:10.1006/anbo.1998.0832
- Heuvelink E., and L.F.M. Marcelis 1989, Dry matter distribution in tomato and cucumber. *Acta Hort* 260:149-180. doi:10.17660/ActaHortic.1989.260.8
- Hicklenton P.R., and P.A. Jolliffe 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
- Jeon Y.H., E.J. Kim, S.H. Ju, D.J. Myeong, 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. doi:10.7235/HORT.20220036
- Jiang C., M. Johkan, M. Hohjo, S. Tsukagoshi, and T. Maruo 2017, A correlation analysis on chlorophyll content and SPAD value in tomato leaves. *HortResearch* 71:37-42. doi:10.20776/S18808824-71-P37
- Kaiser E., A. Morales, J. Harbinson, J. Kromdijk, E. Heuvelink, and L.F.M. Marcelis 2015, Dynamic photosynthesis in different environmental conditions. *J Exp Bot* 66:2415-2426. doi:10.1093/jxb/eru406
- Kim H.N., Y.J. Seok, G.M. Park, G. Vyavahare, and J.H. Park 2023, Monitoring of plant-induced electrical signal of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) according to urea fertilizer application. *Sci Rep* 13:291. doi:10.1038/s41598-022-26687-w
- Kim K.S., K.Y. Hong, H.J. Kim, G.H. Kim, K.C. Kim, and M.H. Lee 2020, Tomato growth rate measurement system using image processing. *J Korean Inst Commun Inf Sci* 45:1460-1471. doi:10.7840/kics.2020.45.8.1460
- Kim K.S., M.K. Kim, and S.W. Nam 2004, Optimization of growth environment in the enclosed plant production system using photosynthesis efficiency model. *J Bio-Environ Control* 13:209-216.
- Kim P.G., and E.J. Lee 2001a, Ecophysiology 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, Ecophysiology of photosynthesis 3: Photosynthetic responses to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature. Korean J Agric For Meteorol 3:238-243.
- Körner O., E. Heuvelink, and Q. Niu 2009, Quantification of temperature, CO₂, and light effects on crop photosynthesis as a basis for model-based greenhouse climate control. J Hort Sci Biotechnol 84:233-239. doi:10.1080/14620316.2009.11512510
- KOSIS 2020, Agriculture crop production survey: Fruit vegetable. Retrieved from https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=114&tblId=DT_114018_005&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=F1_AAA_010&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE
- 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. doi:10.5338/KJEA.2008.27.4.428
- Lee J.H., S.H. Kim, and H.Y. Yoo 2020, Future prospects for industrial application of abscisic acid, a stress-resistant phytohormone. Korean Chem Eng Res 58:514-523. doi:10.9713/kcer.2020.58.4.514
- Makino A., and T. Mae 1999, Photosynthesis and plant growth at elevated levels of CO₂. Plant Cell Physiol 40:999-1006. doi:10.1093/oxfordjournals.pcp.a029493
- Mishra K.B., R. Iannaccone, A. Petrozza, A. Mishra, N. Armentano, G. La Vecchia, M. Trtílek, F. Cellini, and L. Nedbal 2012, Engineered drought tolerance in tomato plants is reflected in chlorophyll fluorescence emission. Plant Sci 182:79-86. doi:10.1016/j.plantsci.2011.03.022
- Nam S.W., and H.H. Shin 2015, Development of a method to estimate the seasonal heating load for plastic greenhouses. J Korean Soc Agric Eng 57:37. doi:10.5389/KSAE.2015.57.5.037
- Paek Y., S.W. Kang, J.K. Jang, and J.K. Kwon 2020, Variations of carbon dioxide concentration in a strawberry greenhouse using dry ice. J Korea Acad-Ind Coop Soc 21:182-188. doi:10.5762/KAIS.2020.21.2.182
- Park H.J., J.H. Park, K.S. Park, and J.E. Son 2019, Evaluating plant stress conditions in paprika by comparing internal electrical conductivity, photosynthetic response, and sap flow. J Hort Sci Biotechnol 60:41-48. doi:10.1007/s13580-018-0105-0
- Park H.J., J.H. Park, K.S. Park, T.I. Ahn, and J.E. Son 2018a, Nondestructive measurement of paprika (*Capsicum annuum* L.) internal electrical conductivity and its relation to environmental factors. Hort Sci Technol 36:691-701. doi:10.12972/kjhst.20180069
- Park K.S., D.Y. Kwon, J.W. Lee, and J.E. Son 2018b, Comparing photosynthesis, growth, and yield of paprika (*Capsicum annuum* L. 'Cupra') under supplemental sulfur plasma and high-pressure sodium lamps in growth chambers and greenhouses. J Bio-Environ Control 27:332-340. doi:10.12791/KSBEC.2018.27.4.332
- Park J.H. 2020, Contrasting effects of Cr (III) and Cr (VI) on lettuce grown in hydroponics and soil: Chromium and manganese speciation. Environ Pollut 266:115073. doi:10.1016/j.envpol.2020.115073
- Park J.S., J.W. Shin, T.I. Ahn, and J.E. Son 2010, Analysis of CO₂ and harmful gases caused by using burn-type CO₂ generators in greenhouses. J Bio-Environ Control 19:177-183.
- 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. J Hort Sci Biotechnol 57:259-265. doi:10.1007/s13580-016-0027-7
- Yoo S.J., and M.K. Sang 2017, Induced systemic tolerance to multiple stresses including biotic and abiotic factors by rhizobacteria. Res Plant Dis 23:100. doi:10.5423/RPD.2017.23.2.99
- Zribi L., G. Fatma, R. Fatma, R. Salwa, N. Hassan, and R.M. Néjib 2009, Application of chlorophyll fluorescence for the diagnosis of salt stress in tomato "*Solanum lycopersicum* (variety Rio Grande)". Sci Hort 120:367-372. doi:10.1016/j.scienta.2008.11.025