

생육상과 온실에서 개발선인장 ‘핑크듀’의 엽상경별 CO₂ 흡수율 비교

정서희¹ · 조아람² · 김윤진^{3*}

¹서울여자대학교 원예생명조경학과 대학원생, ²서울여자대학교 원예생명조경학과 박사후 연구원,

³서울여자대학교 원예생명조경학과 교수

Comparing Net CO₂ Uptake of *Schlumbergera truncata* ‘Pink Dew’ Phylloclades in a Growth Chamber and a Greenhouse

Seo Hee Jung¹, Ah Ram Cho², and Yoon Jin Kim^{3*}

¹Graduate Student, Department of Horticulture, Biotechnology and Landscape Architecture, Seoul Women's University, Seoul 01797, Korea

²Postdoctoral Researcher, Department of Horticulture, Biotechnology and Landscape Architecture, Seoul Women's University, Seoul 01797, Korea

³Professor, Department of Horticulture, Biotechnology and Landscape Architecture, Seoul Women's University, Seoul 01797, Korea

Abstract. Crassulacean acid metabolism (CAM) plants use surplus CO₂ generated by cooling and heating at night when ventilation is not needed in a greenhouse. *Schlumbergera truncata* ‘Pink Dew’ is a multi-flowering cactus that needs more phylloclades for high-quality production. This study examined photosynthetic characteristics by the phylloclade levels of *S. truncata* in a growth chamber and a greenhouse for use of night CO₂ enrichment. The CO₂ uptake rate of the *S. truncata*'s top phylloclade in a growth chamber exhibited a C₃ pattern, and the second phylloclade exhibited a C₃-CAM pattern. The CO₂ uptake rate of the top phylloclade in a greenhouse showed a negative value both day and night, but those of the second phylloclade exhibited a CAM pattern. The stomatal conductance and water-use efficiency (WUE) of *S. truncata* at both the top and second phylloclades were higher in a growth chamber than in a greenhouse. The WUE of *S. truncata* in a growth chamber and a greenhouse was higher at the second phylloclade, which is a CAM pattern compared with those of the top phylloclade. The daily total net CO₂ uptake of *S. truncata* was higher in a growth chamber than in a greenhouse. The daily total net CO₂ uptake of *S. truncata* at the second phylloclade had the highest value of 155 mmol·m⁻²·d⁻¹ in a growth chamber. The night total CO₂ uptake of *S. truncata* at the second phylloclade was 3-fold higher in a growth chamber than in a greenhouse. *S. truncata*'s second phylloclade exhibited a CAM pattern that uptake CO₂ at night, and the second phylloclade, was more mature than the top phylloclade. A multi-flowering cactus *S. truncata* ‘Pink Dew’ efficiently uptake night surplus CO₂ in the proper environmental condition with matured phylloclade.

Additional key words: cactus, crassulacean acid metabolism pattern, day/night temperature, photosynthesis

서 론

CO₂ 시비는 식물의 생육과 품질을 향상시키는 방법으로, 주로 채소 재배에서 이용한다(Yun 등, 2018). C₃ 식물인 파프리카 ‘Scirocco’의 CO₂ 흡수율은 900 μmol·mol⁻¹ CO₂ 시비 시, 5.0 μmol·CO₂·plant⁻¹·s⁻¹로 대조구 2.2 μmol·CO₂·plant⁻¹·s⁻¹에 비하여 2배 이상 증가했으며, 수확일은 일주일 빨라졌다(Shin 등, 2022). 온실에서는 식물 재배를 위한 냉·난방 시 많

은 양의 CO₂가 발생하며, 이를 포집하여 식물 재배에 재이용하는 시스템이 개발되었다(Cho 등, 2022; Lee 등, 2015). 온실 온도 조절을 위하여 가동하는 가스히트펌프에서 CO₂를 포집하여 호접란 ‘Jupiter’에 650 μmol·mol⁻¹ CO₂ 시비 시, CO₂ 흡수율은 대조구에 비하여 2배 이상 증가했으며 꽃눈과 가지 개수가 많아져 출하 품질이 향상되었다(Cho 등, 2020b).

식물은 광합성 경로에 따라 C₃, C₄, Crassulacean acid metabolism(CAM) 등으로 분류되며, CAM 식물은 주간에 기공을 닫고, 야간에 여는 특성이 있다(Kim 등, 2016). 본 연구팀의 이전 연구에서 CAM 식물인 호접란과 칼라코에에 야간 800 - 1,600 μmol·mol⁻¹ CO₂ 시비 시 식물의 생육 및 야간

*Corresponding author: yj1082@swu.ac.kr

Received January 9, 2023; Revised January 28, 2023;

Accepted January 31, 2023

의 CO₂ 흡수가 향상되었다(Cho 등, 2020a, 2020c; Song 등, 2019; Yun 등, 2018). 신엽 출현 시기는 영양생장기의 호접란 ‘만천홍’에 야간 800, 1,600 μmol·mol⁻¹ CO₂ 시비 시 대조구인 400 μmol·mol⁻¹ 처리를 받은 식물에 비하여 10일 이상 빨라졌고, 잎 개수는 각각 7.4, 7.7개로 대조구인 6개에 비하여 증가해 고농도 CO₂ 시비 시 엽생장이 증대되었다(Yun 등, 2018; Song 등, 2019). 칼랑코에 ‘Lion’에 800 μmol·mol⁻¹ CO₂ 시비 시, 마디수는 16.7–18.0개로 대조구인 14.8–16.3개에 비하여 증가했으며 잎 개수가 44.7개로 대조구인 37.2개에 비하여 많아 영양생장기의 품질이 향상되었다(Cho 등, 2020a). 개화소요일수는 생식생장기의 호접란 ‘만천홍’에 야간 800 μmol·mol⁻¹ CO₂ 시비 시 대조구인 400 μmol·mol⁻¹ 처리에 비하여 10일 이상 단축되었으며 꽃 수는 유의하게 증가하였다(Cho 등, 2020c).

개발선인장은 엽상경(잎 모양 줄기, *phylloclade*) 단위로 성장하며 엽상경 한 마디가 성장하는데 30–60일이 소요된다(GARES, 2020). 보검선인장의 2주 된 엽상경은 주간에 기공을 열었으나, 6개월 된 엽상경에서는 야간에 기공을 여는 CAM 특성을 보여(Acevedo 등, 1983), 생육단계에 따라 CO₂ 흡수 시간의 차이가 있었다. 선인장과인 *Opuntia elatior*은 7일 된 유묘의 경우, 낮에 CO₂ 흡수를 하는 C₃ 특성이 나타났으나, 14일 차부터 야간에 CO₂ 흡수를 시작하여 주/야간 모두 CO₂ 흡수를 하는 C₃-CAM 특성이 나타났다(Winter 등, 2011). 대표적인 CAM 식물로 알려진 선인장과 식물에서도 생육단계에 따라 CO₂ 흡수 형태가 다양하게 나타나(Nobel과 Hartsock, 1990), 생육단계별 광합성 특성을 파악하기 위하여 엽상경별 광합성 특성 조사가 필요하다.

CAM 식물은 생육단계뿐만 아니라 환경조건에 따라 CO₂ 흡수 형태가 다양하다(Cushman과 Bohnert, 1999). 선인장과인 *O. polyacantha*는 주/야간 20/15°C에서 야간에 CO₂ 흡수를 하지 않았으나, 35/15°C에서 야간에 CO₂ 흡수를 하여 CO₂ 흡수 시간은 온도에 의한 영향이 큰 것으로 파악된다(Gerwick과 Williams, 1978). 호접란 ‘만천홍’은 광도에 따라 야간 CO₂ 흡수율의 차이는 미미하였으나, 고광도 260±40 μmol·m⁻²·s⁻¹과 1,200 μmol·mol⁻¹ CO₂ 복합 처리 시 꽃눈이 약 25개로 나타났고, 저광도 90±10 μmol·m⁻²·s⁻¹과 1,200 μmol·mol⁻¹ CO₂ 처리를 받은 식물의 꽃눈은 7개로 고광도 재배 시 개화 품질이 향상되었다(Cho 등, 2019). 지구온난화로 인한 여름철 기온상승은 선인장과 식물을 포함한 다육식물에 생리장해를 야기하고, 상품성이 저하된다(Kim 등, 2020). 개발선인장의 영양생장기 생육 적온은 주간 24–27°C, 야간 18–21°C로 알려져 있다(GARES, 2020). 하지만, 실제 개발선인장 농가에서는 냉방시설이 없어 환기, 차광막을 이용하여

온도조절을 한다. 선인장은 생육단계와 환경변화에 따라 CO₂ 흡수 형태가 다르므로 야간 CO₂ 이용을 위하여 생육 적온 환경 및 농가 환경에 따른 광합성 특성 조사가 필요하다.

본 연구는 개발선인장의 생육단계와 환경변화에 따른 기초 광합성 특성 파악을 위하여 생육상과 온실의 서로 다른 환경 조건에서 개발선인장의 엽상경별 광합성 특성을 조사하였다.

재료 및 방법

1. 식물재료

식물재료는 삼목 후 10개월 차 개발선인장(*Schlumbergera truncata*) ‘핑크듀(Pink Dew)’ 품종이며, 경기도 파주시에 위치한 흥철 농가에서 2022년 7월 22일에 구입하였다. 개발선인장은 모주에서 채취한 삼수를 8cm 플라스틱 화분에 8개씩 삼목한 후, 7개월 후에 삼수를 포함한 엽상경을 3개 남기고 적심하였으며, 8개월 후에 15cm 화분으로 이식되었다. 연구가 수행된 농가는 냉방시설이 없는 온실로, 여름철 온도 하강을 위하여 차광막과 환기로만 환경조절을 하였다. 구입한 묘는 서울여자대학교 Information and Communication Technologies (ICT) 융합 스마트형 유리온실로 이동해서 한 화분당 수돗물(전기전도도 0.18±0.2 dS·m⁻¹, pH 6.6–6.7)을 일주일에 한번 1L씩 관수 하였다.

2. 실험 환경 조건

생육상(HP-301MP, Hanbaek Scientific Technology, Korea)의 내부 온도와 상대습도는 데이터 로거(AM-21A, Wise Sensing, Korea)를 이용하여 측정하였으며 광도는 광양자센서(FieldScout light meter, Spectrum Technologies, USA)를 이용하여 광합성광량자속밀도(photosynthetic photon flux density, PPF) 400 μmol·m⁻²·s⁻¹로 설정하였다. 온실의 내부 온도와 상대습도는 센서와 트랜스미터가 부착된 장치(SH-VT250, Soha Tech, Korea)를 이용하여 측정하였으며, 광도는 광양자센서(SQ-215, Apogee, USA)를 이용하여 온실 바닥으로부터 116cm 높이에서 측정하였다. 생육상과 온실의 온도센서의 정밀도는 각각 ±0.4, ±0.3°C이며, 상대습도 센서의 정밀도는 각각 ±3, ±2%였다. 농가의 재배환경을 따른 본 실험의 온실에서는 제어시스템을 통하여 환경 조절이 이루어졌다. 측창 및 천창은 25°C 이상일 때, 차광막은 광도가 500 μmol·m⁻²·s⁻¹ 이상일 때 작동하도록 설정하였다. 온실의 유동팬과 환기팬은 22°C를 기준으로 가동되었다. 개발선인장의 생육 적온은 주간 24–27°C, 야간 18–21°C으로(GARES, 2020), 생육상의 주/야간 평균 온도는 생육 적온인 25/20°C로 유지되었다(Fig. 1A). 온실의 주간 최고, 최저 온도는 각각 31,

25°C였고, 야간 최고, 최저 온도는 각각 28, 25°C로 생육 적온에 비하여 높았다. 생육상과 온실의 주/야간 평균 상대습도는 각각 64/68%와 78/87%로 온실은 생육상에 비하여 고온 다습하였다(Fig. 1B). 계발선인장 재배에 적정 광도는 277.5 – 555.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로(GARES, 2020), 생육상의 광도(PPFD)는 실험 기간 설정한 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 유지되었으나, 온실 주간 평균 광도는 94 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 나타났다(Fig. 1C).

3. 광합성 측정 조건 및 조사 항목

계발선인장의 광합성 특성은 생육상과 온실에서 2022년 8월 3일부터 10월 21일까지 측정하였다. 생육상과 온실에서 휴대용 광합성 측정기(LI-6400XT, Li-Cor Inc., NE, USA)를 이용하여 이산화탄소 흡수율(net CO₂ uptake rate), 기공전도도(stomatal conductance), 증산율(transpiration rate)을 측정하였다. 일일 총 CO₂ 흡수율은 24시간 CO₂ 흡수율을 통합하여 나타냈으며(Nobel과 la Barrera, 2002), 수분이용효율

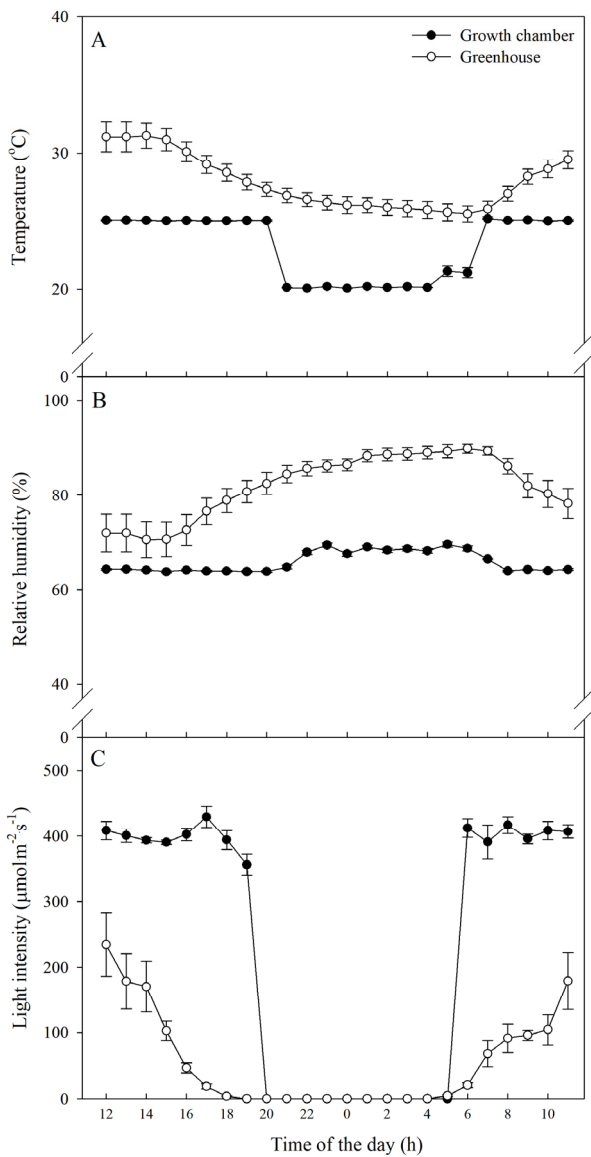


Fig. 1. The temperature (A), relative humidity (B), and light intensity (C) were measured by the inner environmental sensors in a growth chamber and a greenhouse from 3 August to 21 October 2022. Vertical bars represent the standard error of the mean [n = 32 (growth chamber) and n = 9 (greenhouse)].

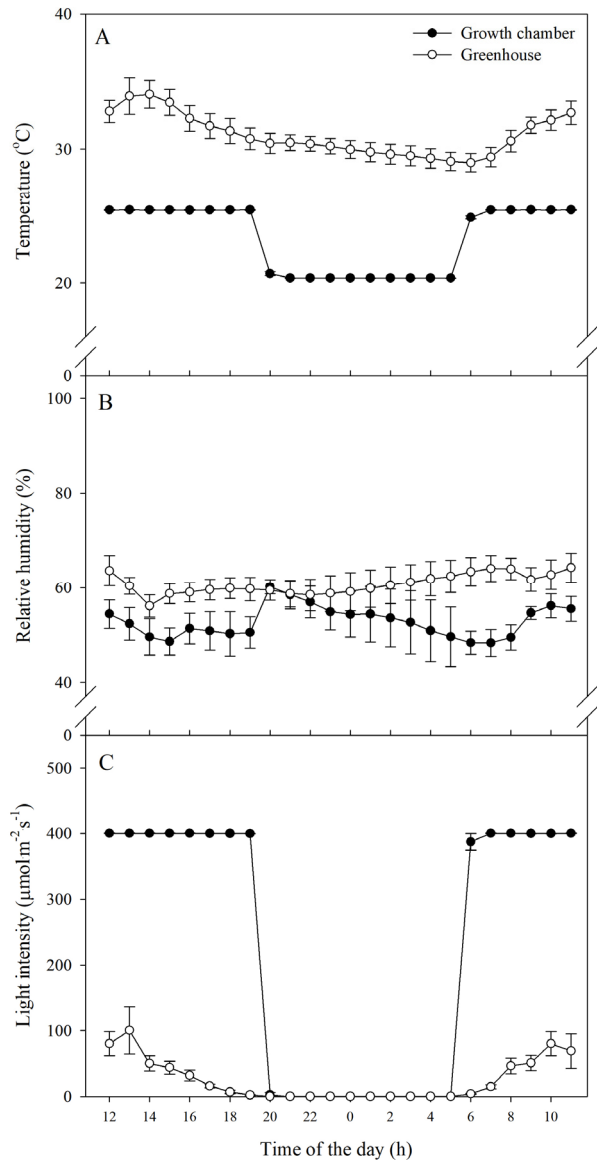


Fig. 2. The temperature (A), relative humidity (B), and light intensity (C) in a LI-6400XT were measured by the embedded environmental sensors of equipment from 3 August to 21 October 2022. Vertical bars represent the standard error of the mean (n = 3).

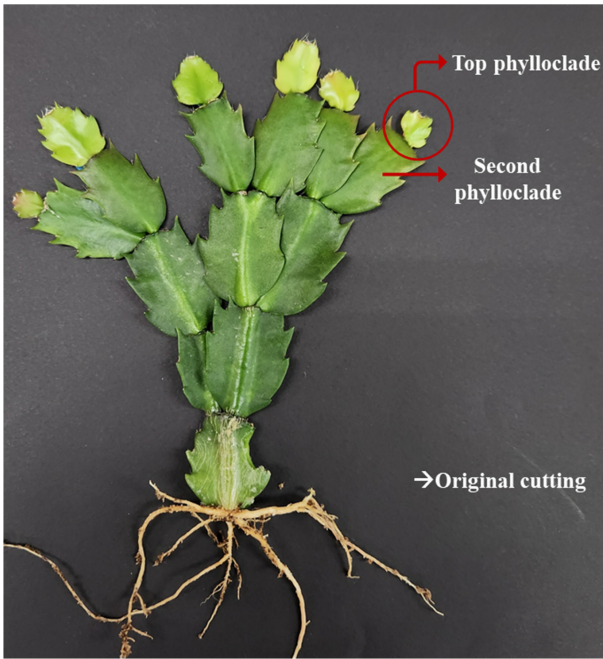


Fig. 3. The top and second phylloclade of *Schlumbergera truncata* ‘Pink Dew’.

(water-use efficiency, WUE)은 다음 식으로 계산하였다.

$$\text{WUE (water-use efficiency)} = \frac{\text{net CO}_2 \text{ uptake}}{\text{transpiration rate}}$$

광합성 측정 시 챔버는 생육상은 LED 챔버(6400-02B, Li-Cor Inc., NE, USA), 온실에서는 자연광 챔버(6400-08, Li-Cor Inc., NE, USA)를 사용하였다. 광합성 측정기의 광합성 측정 면적은 가로 3cm, 세로 2cm였다. 생육상에서 광합성 측정 조건은 공기 유속 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, CO₂ 농도 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 주/야간 온도 25/20°C, 광도 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 설정하였다. 온실에서 광합성 측정 조건은 공기 유속 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, CO₂ 농도 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 로 설정하였고 공기 온도와 광도는 설정하지 않고 온실의 변화하는 조건에서 측정하였다(Fig. 2).

광합성 측정은 상위 엽상경(top phylloclade)과 2차 엽상경(second phylloclade) 두 부위를 측정하였다(Fig. 3). 광합성 측정기 내 상위 엽상경과 2차 엽상경의 광합성 측정 면적은 생육상에서는 각각 3.45 \pm 0.27cm², 5.48 \pm 0.44cm²이며, 온실에서는 3.13 \pm 0.7cm², 5.96 \pm 0.06cm²로 나타났다. 엽상경의 면적은 Image J 소프트웨어(NIH, Bethesda, MD, USA)를 이용하여 측정하였다.

4. 통계분석

각 처리 간의 통계적 유의성은 R 프로그램(ver.4.2.0, Development Core Team, Vienna, Austria)을 이용하여 Duncan 다중검정법($p < 0.05$)으로 분석하였다. 그래프 작성은 Sigma Plot 10.0 프로그램(Sigma Plot Software, Systat Software Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하였다.

결과 및 고찰

개발선인장의 적정 생육조건인 생육상 내 CO₂ 흡수는 엽상경별로 다르게 나타났다. 개발선인장의 엽상경 중 가장 미성숙한 상위 엽상경의 CO₂ 흡수율은 야간보다 주간에 많아 최대 1.82 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 나타났으나, 보다 성숙한 2차 엽상경의 경우 주간보다 야간에 높았으며 최대 3.51 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 까지 증가했다(Fig. 4A). 선인장과인 *Opuntia elatior*은 7일 된 유묘에서는 낮에 CO₂ 흡수를 했으나, 14일 차부터 야간에 CO₂ 흡수를 시작하여 주/야간 모두 CO₂ 흡수를 했다(Winter 등, 2011). 돌나물과 식물인 *Kalanchoe pinnata*의 경우에도 12일 된 어린잎은 C₃ 특성을 보였으나, 23일 된 잎에서 야간 CO₂ 흡수가 증가하여 주/야간 모두 CO₂ 흡수를 하는 C₃-CAM 특성이 나타났다(Winter, 2019). 생육상에서 상위 엽상경은 주간에만 CO₂ 흡수를 하는 C₃ 특성이 나타났으며, 2차 엽상경은 주/야간 모두 CO₂ 흡수를 하는 C₃-CAM 특성이 나타났다. 따라서, 개발선인장은 엽상경이 성숙해질수록 야간 CO₂ 흡수가 증가하여 야간 CO₂ 시비 시 생육 과정에서 점차 야간 CO₂ 흡수증대가 가능한 식물이라 사료된다.

개발선인장의 CO₂ 흡수율은 상위 엽상경과 2차 엽상경 모두 생육 적정 온도 조건이 유지되는 생육상 내 식물에서 온실 내 식물의 값보다 높았다(Fig. 4A, 4B). 생육상 내 개발선인장 상위 엽상경의 주간 CO₂ 흡수율은 7시부터 19시까지 0.82 – 1.82 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 양수 값으로 주간 CO₂ 흡수가 활발하였다(Fig. 4A). 하지만 생육상 내 개발선인장에 비하여 고온 다습 환경인 온실에서 상위 엽상경의 주간 CO₂ 흡수율 범위는 주간 -0.91에서 -0.40 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 야간 -1.02에서 -0.15 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 식물이 CO₂ 흡수를 거의 하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 4B). 재배기간이 10 – 12개월인 개발선인장은 여름철 재배가 필수적이거나, 고온 다습 환경에서는 모든 엽상경의 CO₂ 흡수율이 저하되어 여름철 냉방이 필수적인 것으로 사료된다. 선인장과인 용과(*Hylocereus undatus*)의 CO₂ 흡수율은 주/야간 30/20°C에서 6 – 8 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 였으나, 40/30°C에서 0 – 2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 감소했다(Nobel과 la Barrera, 2002). 본 연구에서 주/야간 평균온도가 29/26°C인 온실 내 개발선인장 2차 엽상경의 최대 광합성 속도는 0.98 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

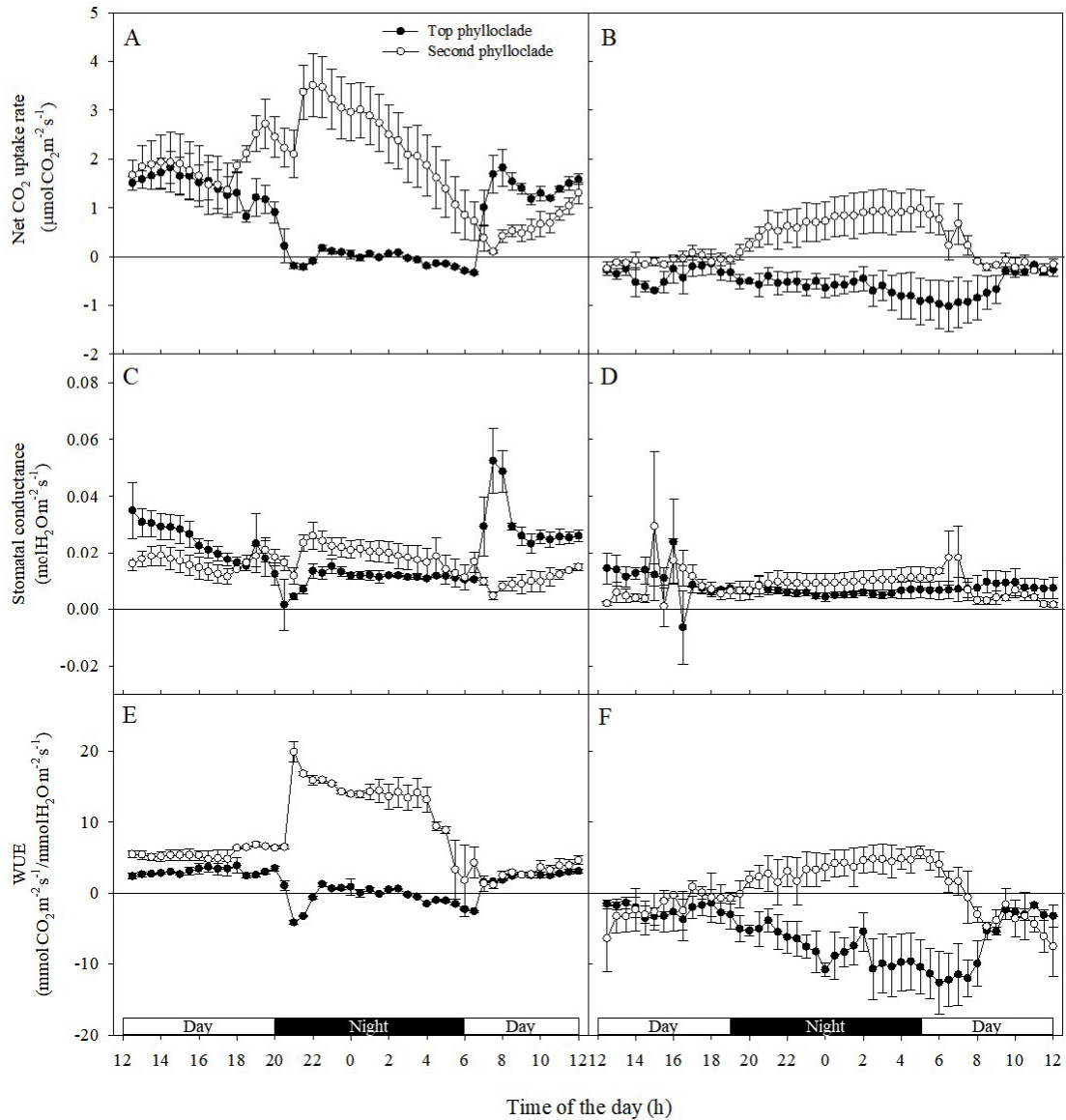


Fig. 4. The net CO₂ uptake rate (A and B), stomatal conductance (C and D), and water-use efficiency (E and F) are measured in the top and second phylloclade of *Schlumbergera truncata* ‘Pink Dew’. The photosynthetic characteristic of *Schlumbergera truncata* ‘Pink Dew’ was measured in a growth chamber (A, C, and E) and a greenhouse (B, D, and F). Vertical bars represent the standard error of the mean (n = 3).

였으나, 25/20°C인 생육상 내 식물에서는 3.51 μmol·m⁻²·s⁻¹으로 온실 내 식물에 비하여 3배 이상 큰 값이 나타나 온도는 CO₂ 흡수율에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 주로 야간에 CO₂ 흡수를 하는 선인장은 주간 온도에 비하여 야간 온도가 CO₂ 흡수에 더 중요하다(Nobel과 la Barrera, 2004). 본 연구에서 실제 계발선인장 농가의 환경을 따른 온실의 야간 온도 범위는 25–28°C로 야간 생육 적온인 18–21°C에 비하여 높았다(Fig. 1A). 용과(*H. undatus*)의 일일 총 CO₂ 흡수율은 주/야간 30/20°C에서 약 250 mmol·m⁻²·d⁻¹였으나, 15/5, 40/30

°C에서 각각 100, 50 mmol·m⁻²·d⁻¹ 이하로 감소하였으며 45/35°C에서 24시간 동안 식물의 CO₂ 흡수율보다 배출량이 많았다(Nobel과 la Barrera, 2004).

생육상과 온실 내 계발선인장의 기공전도도는 각각 0.05 mmol·H₂O·m⁻²·s⁻¹, 0.03 mmol·H₂O·m⁻²·s⁻¹로 생육상 내 식물에서 높았다(Fig. 4C, 4D). 여름철의 극고온에서 식물은 체내 보호를 위한 대사 과정으로 기공을 닫아 과다한 증산작용을 억제한다(Woo과 Kim, 2015). 계발선인장의 수분이용효율은 생육상과 온실 내 모든 식물에서 2차엽상경의 값이 상위

엽상경의 값보다 높았다(Fig. 4E, 4F). 생육상과 온실 내 계발선인장 2차 엽상경의 최대 수분이용효율은 $19.9\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}/\text{mmolH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 $5.7\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}/\text{mmolH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 생육상 내 식물에서 유의하게 높았다. 수분이용효율은 고온과 같은 스트레스 하에서 감소하며(Oh 등, 2014), CAM 식물은 C₃, C₄ 식물에 비하여 2–5배 높은 수분이용효율을 나타낸다(Nobel과 la Barrera, 2004). 본 연구에서도 고온 환경인 온실 내에서 생육한 계발선인장은 CO₂ 흡수율뿐만 아니라 수분이용효율이 낮아져 건조 스트레스 발생 및 생육 저하의 가능성이 보였다.

여름철 식물 재배 시 온도 하강을 위하여 차광이 필수적이거나, 겨울철 보온을 위한 보온용 부직포 사용 또는 냉방비 절약을 위한 지나친 차광은 온실 광도를 낮춰 순광합성량 감소로 식물 생육과 수량에 영향을 준다(Cheong 등, 2015). 본 연구의 생육상에서는 최적으로 온도 조절이 가능하여 재배 광도를 $400\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 까지 증가시켰다. 실험 재료를 구입한 농가에서는 온도 조절을 위해 환기 및 차광 시간을 재배자의 판단에 의해 유동적으로 조절하며 차광 시에 별도의 보광은 하지 않았다. 본 연구에서 차광막은 광도가 $500\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이상일 때 작동하도록 설정하여 온실의 광도 범위가 $3-234\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었고, 이는 계발선인장의 적정 광도인 $277.5-555.0\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 차이가 있었다. 계발선인장의 생육과 분화 고품질화를 위하여 온도 및 광도를 포함한 최적 범위의 환경 조절이 필수적이다. *Chusia minor* L.에서는 광도에 상관없이 주/야간 온도가 30/30°C일 때는 C₃ 특성을 보이나, 30/25°C일 때 $30-50\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 광도에서는 CAM 특성을 보였고, $260-300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도에서는 C₃-CAM 특성을 보였다(Haag-kerwer 등, 1992). CAM 식물로 알려져 있는 칼라코에 ‘Fikalrudak’은 8시간 일장에 비하여 12시간 일장에서 개화소요일수가 단축되어(Cho 등, 2020a), 식물 재배 시 광도뿐만 아니라 일장 및 적산 광량 조건도 고려되어야 한다.

계발선인장 상위 엽상경과 2차 엽상경의 주간 총 CO₂ 흡수율과 일일 총 CO₂ 흡수율은 모두 생육상 내 식물에서 온실 환경 조건에 있던 식물에 비하여 유의하게 높았다(Figs. 5, 6). CAM 특성을 보였던 계발선인장 2차 엽상경의 야간 총 CO₂ 흡수율은 온실 내 식물의 경우 $25\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}/14\text{h}$ 였으나 생육상 내 식물에서는 $87\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}/14\text{h}$ 로 값이 3배 이상 높았다(Fig. 5). 생육상 내 계발선인장 상위 엽상경은 C₃ 특성이 나타났으나, 2차 엽상경은 C₃-CAM 특성을 보였다. 온실 내 계발선인장 상위 엽상경은 CO₂ 흡수를 하지 않았으나, 2차 엽상경은 CAM 특성을 보였다. 계발선인장은 환경조건 및 생육단계에 따라 CO₂ 흡수가 다르게 나타나며 적정 환경 조건에서 CO₂

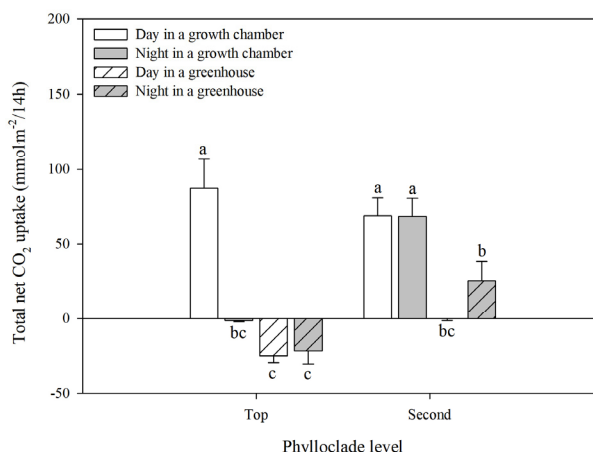


Fig. 5. The day and night total net CO₂ uptake in the top and second phylloclade of *Schlumbergera truncata* ‘Pink Dew’ in a growth chamber and a greenhouse. Values followed by different letters are significantly different according to Duncan’s multiple range test at $p < 0.05$. Vertical bars represent the standard error of the mean ($n = 3$).

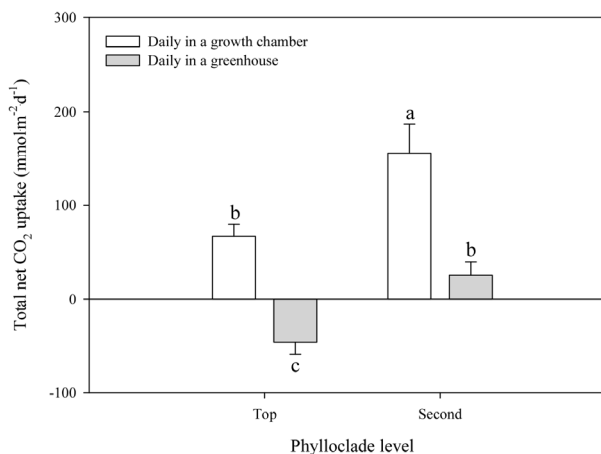


Fig. 6. The daily total net CO₂ uptake in the top and second phylloclade of *Schlumbergera truncata* ‘Pink Dew’ in a growth chamber and a greenhouse. Values followed by different letters are significantly different according to Duncan’s multiple range test at $p < 0.05$. Vertical bars represent the standard error of the mean ($n = 3$).

흡수가 증가한다.

본 연구는 계발선인장의 야간 CO₂ 시비를 위한 기초적인 엽상경별 광합성 특성 조사로, 추후 CO₂ 시비 시 생육환경에 따른 생육에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 계발선인장은 엽상경이 성숙할수록 야간 CO₂ 흡수가 증가하여, 환기하지 않는 야간에 잉여 CO₂를 광합성에 활용할 수 있다. 하지만, 생육적온을 벗어난 환경에서는 CO₂ 흡수가 저하되어 적정 환경 조건에서 효율적인 야간 CO₂ 흡수가 가능한 식물이다.

적 요

CAM 식물은 야간에 기공을 열어 CO₂를 흡수하는 식물로 환기하지 않는 야간에 시설 내 발생한 잉여 CO₂를 광합성에 이용할 수 있다. 개발선인장은 다화성으로, 엽상경 수가 많을수록 상품성이 높아진다. 본 연구는 개발선인장의 야간 CO₂ 시비 적용 가능성을 파악하기 위하여 생육 적정 환경인 생육상과 실제 농가의 환경에 따른 온실에서 엽상경별 광합성 특성을 조사하였다. 생육상 내 개발선인장 상위 엽상경은 주간에만 CO₂ 흡수를 하는 C₃ 특성을 보였으며, 2차 엽상경은 주/야간 모두 CO₂ 흡수를 하는 C₃-CAM 특성을 보였다. 온실에서 상위 엽상경은 CO₂ 흡수를 하지 않았으나, 2차 엽상경은 야간에 CO₂ 흡수를 하는 CAM 특성을 보였다. 생육상 내 개발선인장의 기공전도도와 수분이용효율은 온실 내 식물에 비하여 모든 엽상경에서 높은 값을 나타냈다. 개발선인장의 수분이용효율은 생육상과 온실에서 모두 CAM 특성이 나타나 2차 엽상경에서 상위 엽상경에 비하여 높았다. 일일 총 CO₂ 흡수율은 온실 내 식물에 비하여 생육상 내 식물에서 더 높게 나타났으며, 생육상 내 개발선인장의 2차 엽상경에서 값이 155mmol·m⁻²·d⁻¹로 가장 높았다. 개발선인장 ‘핑크듀’는 성숙한 엽상경에서 야간에 CO₂ 흡수가 활발히 일어나는 CAM 특성을 나타낸다. 다화성으로 시장성이 높은 개발선인장 ‘핑크듀’는 적정 환경과 성숙한 엽상경에서 효율적인 야간 탄소 흡수가 가능한 식물이다.

추가 주제어: 광합성, 선인장, 주/야간 온도, CAM 특성

사 사

본 연구는 한국연구재단(NRF-2018R1A2B6007834)과 2022년도 서울여자대학교 산학협력 특별연구비(2022-0075)의 지원으로 수행되었음.

Literature Cited

- Acevedo E., I. Badilla, and P.S. Nobel 1983, Water relations, diurnal acidity changes, and productivity of a cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. Plant Physiol 72:775-780. doi:10.1104/pp.72.3.775
- Cheong D.C., J.J. Lee, C.H. Choi, Y.J. Song, H.J. Kim, and J.S. Jeong 2015, Growth and cut-flower productivity of spray rose as affected by shading method during high temperature period. Hort Sci Technol 33:227-232. (in Korean) doi:10.7235/hort.2015.14154
- Cho A.R., H.J. Yang, E.N. Kim, and Y.J. Kim 2020a, Growth responses and flowering of *Kalanchoe* cultivars under elevated CO₂ concentration and varying daylength. Flower Res J 28:30-39. (in Korean) doi:10.11623/frj.2020.28.1.05
- Cho A.R., S.H. Choi, and Y.J. Kim 2020b, Flowering and photosynthetic responses of *Phalaenopsis* under elevated CO₂ and nutrient supply. Hort Sci Technol 38:595-607. doi:10.7235/hort.20200055
- Cho A.R., S.W. Chung, and Y.J. Kim 2020c, Flowering responses under elevated CO₂ and graded nutrient supply in *Phalaenopsis* Queen Beer ‘Mantefon’. Sci Hort 273:109602. doi:10.1016/j.scienta.2020.109602
- Cho A.R., S.J. Song, S.W. Chung, and Y.J. Kim 2019, CO₂ enrichment with higher light level improves flowering quality of *Phalaenopsis* Queen Beer ‘Mantefon’. Sci Hort 247:356-361. doi:10.1016/j.scienta.2018.12.030
- Cho A.R., S.W. Chung, and Y.J. Kim 2022, Shortening the vegetative growth stage of *Phalaenopsis* Queen Beer ‘Mantefon’ by controlling light with calcium ammonium nitrate levels under enriched CO₂. Horticulturae 8:157. doi:10.3390/horticulturae8020157
- Cushman J.C., and H.J. Bohnert 1999, Crassulacean acid metabolism: Molecular genetics. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol 50:305-332. doi:10.1146/annurev.arplant.50.1.305
- GARES 2020, *Schlumbergera* cultivation manual, Gyeonggi Agricultural Research & Extension Service Cactus & Succulent Research Institute, Goyang, Korea, pp 3-15. (in Korean)
- Gerwick B.C., and G.J. Williams 3rd 1978, Temperature and water regulation of gas exchange of *Opuntia polyacantha*. Oecologia 35:149-159. doi:10.1007/bf00344728
- Haag-Kerwer A., A.C. Franco, and U. Luttge 1992, The effect of temperature and light on gas exchange and acid accumulation in the C₃-CAM plant *Clusia minor* L., J Exp Bot 43:345-352.
- Kim H.J., S.J. Song, K.S. Park, and Y.J. Kim 2016, Standards for opened and closed stomata based on the levels of stomatal opening, stomatal area, and stomatal width in *Doritaenopsis* Queen Beer ‘Mantefon’. Flower Res J 24:124-130. (in Korean) doi:10.11623/frj.2016.24.2.07
- Kim Y.H., J.Y. Lee, J.H. Jung, S.Y. Sim, S.Y. Lee, H.S. Soh, and S.Y. Won 2020, Effect of air circulation fan and fog system of a succulents in high temperature period. Hort Sci Technol 38 (suppl II): 205. (in Korean)
- Lee S.M., Y.D. Lee, S.Y. Kim, C.U. Kim, and K.S. Park 2015, Study on GHP-based integrated energy generation system for horticulture. Korean Soc Agric Mach 20 (suppl I):393-394. (in Korean)
- Nobel P.S., and E.D. la Barrera 2002, High temperatures and net CO₂ uptake, growth, and stem damage for the hemiepiphytic cactus *Hylocereus undatus*. Biotropica 34:225-231.

- Nobel P.S., and E.D. la Barrera 2004, CO₂ uptake by the cultivated hemiepiphytic cactus, *Hylocereus undatus*. Ann Appl Biol 144:1–8. doi:10.1111/j.1744–7348.2004.tb00310.x
- Nobel P.S., and T.L. Hartsock 1990, Diel patterns of CO₂ exchange for epiphytic cacti differing in succulence. Physiol Plant 78:628–634. doi:10.1111/j.1399–3054.1990.tb05252.x
- Oh S.J., K.H. Moon, I.C. Son, E.Y. Song, Y.E. Moon, and S.C. Koh 2014, Growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of Chinese cabbage in response to high temperature. Hortic Sci Technol 32:318–329. (in Korean) doi:10.7235/hort.2014.13174
- Shin J.Y., I.H. Hwang, D.P. Kim, J.W. Kim, J.H. Kim, and J.E. Son 2022, Waning advantages of CO₂ enrichment on photosynthesis and productivity due to accelerated phase transition and source–sink imbalance in sweet pepper. Sci Hortic 301:111130. doi:10.1016/j.scienta.2022.111130
- Song S.J., D.L. Yun, A.R. Cho, and Y.J. Kim 2019, Photosynthetic and growth response of *Phalaenopsis* Queen Beer ‘Mantefon’ to variable CO₂ concentrations at different vegetative growth stages. Flower Res J 27:9–16.
- Winter K. 2019, Ecophysiology of constitutive and facultative CAM photosynthesis. J Exp Bot 70:6495–6508. doi:10.1093/jxb/erz002
- Winter K., M. Garcia, and J.A.M. Holtum 2011, Drought–stress–induced up–regulation of CAM in seedlings of a tropical cactus, *Opuntia elatior*, operating predominantly in the C₃ mode. J Exp Bot 62:4037–4042. doi:10.1093/jxb/err106
- Woo Y.H., and D.E. Kim 2015, The effect of photosynthesis, stomatal conductivity and sap flow on photorespiration alleviation by environmental control during protected cucumber cultivation at summer. Hortic Sci Technol 33 (suppl II):98. (in Korean)
- Yun D.L., H.J. Kim, and Y.J. Kim 2018, CO₂ enrichment increased leaf initiation and photosynthesis in *Doritaenopsis* Queen Beer ‘Mantefon’ orchids. Hortic Environ Biotechnol 59:159–165. doi:10.1007/s13580–018–0025–z