

RESEARCH ARTICLE

시설 내 탄산가스 시비 시 시설 대기환경의 변화가 알스트로메리아(*Alstroemeria*) 생육에 미치는 영향에 대한 고찰

이선진, 성원석*, 박동욱, 정필수
(주)다운알에스

A Study on the Variation of Atmosphere in Greenhouse during CO₂ Fertilization and the Effect of CO₂ Fertilization on *Alstroemeria* Growth

Seonjin Lee, Wonsuk Sung*, Donguk Park, Pilsoo Jeong

DAONRS Inc., Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea

*Corresponding Author: wssung@daonrs.kr

Abstract

CO₂ fertilization is very critical for plants in a greenhouse because CO₂ is insufficient after sunrise due to the photosynthesis. This study reported the variation of CO₂ concentration in greenhouse and the effect of greenhouse plants on CO₂ fertilization. *Alstroemeria* were cultivated in CO₂ fertilization greenhouse and non- CO₂ fertilization greenhouse (Control house). To supply CO₂, we set a catalyst-type CO₂ generator at fertilization greenhouse and it generated 0.36kg/h CO₂. The CO₂ concentration at CO₂ fertilization greenhouse was maintained about 640 ppm from 6:00 to 10:00. The result reported that CO₂ fertilization significantly increased the weekly yield and shoot length. There was slightly increase at total number of flowers and stem thickness despite of no statistical significance. According to these positive results, we considered that future studies would be aimed at experiments with bigger scale and more details.

Keywords: *Alstroemeria*, CO₂ fertilization, Horticulture, Photosynthesis, Data acquisition

Introduction

시설 재배에 있어 CO₂를 공급해주는 것을 ‘탄산가스 시비’라 하며 이는 식물 생장에 긍정적 효과가 있다(Mortensen, 2012). 식물의 생리학적 물질 대사에 중요한 효소인 Rubisco의 탄소고정반응은 식물 내부와 주변 CO₂ 농도 차에 직접적인 영향을 받는다. 시설 작물의 경우 광합성이 시작되면 시설(Greenhouse) 내의 CO₂ 농도는 약 150~200 ppm까지 감소하여 충분한 광합성이 이루어지지 않는



OPEN ACCESS

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.20220007>

Received: November 15, 2022

Revised: December 09, 2022

Accepted: December 12, 2022

Copyright: © 2022 Journal of Agricultural Machinery Engineering



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다(Chen et al., 2019). 따라서 시설의 특성인 밀폐와 밀식재배를 위한 탄산가스시비 농법이 보급되고 있으며, 이에 따른 시설 내의 CO₂ 관리 및 공급에 대한 연구가 이루어지고 있다.

일반적으로 알려져 있는 탄산가스 시비의 이점은 탄산가스 시비 시 광합성이 촉진되어 엽 뿐만 아니라 뿌리, 줄기, 과일의 생장 속도가 빨라 지기 때문에 개화 시기와 과실 수확기간 단축되고 줄기의 길이, 엽의 면적, 과실의 중량 등이 증가한다는 것이다. 예를 들어 딸기의 경우 탄산가스 시비 시 꽃 수가 증가하며 과실의 크기와 중량이 증가한다고 보고되었다(Ryu, 2018; Tagawa et al., 2022). 비슷하게, 토마토 재배 시 탄산가스 시비 처리를 할 경우 과실 수량과 중량이 증가하였다(Lee et al., 2008; Pan et al., 2019). 화훼류의 경우 탄산가스 시비 시 광합성율, 꽃의 개수와 잎의 면적이 증가하고 절화 수명도 등의 효과들을 볼 수 있었다(Pan et al., 2008; Xu et al., 2014; Zhang et al., 2012). 또한 종에 따라 개화시기를 앞당기는 효과도 증명되었다(Springer and Ward., 2007). 따라서 적절한 탄산가스 시비는 작물 생산성을 높여주며 결국 농가에 경제적 도움을 줄 수 있기 때문에 지속적인 연구가 필요하다.

시설 내에 CO₂ 공급 방법은 고체 이산화탄소나 액화 탄산가스를 이용하는 방법과 탄화수소계열 연료를 연소시켜 CO₂를 공급하는 연소식 탄산가스발생기를 이용하는 방법이 있다(Table 1). 실제 농가에서 많이 찾고 있는 연소식 탄산가스발생기는 백등유, 액화석유가스(LPG) 등 탄화수소 계열 연료를 태워 CO₂를 얻는다. Lee et al. (2018)은 LPG 연소식 탄산가스 발생장치를 이용하여 시설에서 딸기를 재배하여 탄산가스 시비의 효과를 보여주었다. 하지만 국내외 LPG 사용 연소식 탄산가스발생기 운전 시 유해배출가스가 높게 검출(CO : 100 ppm 이상, NOx : 100 ppm 이상) 되었고(Park et al., 2010) 이러한 유해가스(CO, NOx, SOx)는 사용자의 건강에도 문제가 될 뿐만 아니라 기공 세포가 닫히고 엽 내의 루비스코 활성도의 감소 등 식물의 생리학적 물질 대사에 영향을 미친다(Muneeer and Lee., 2018). 또한 열풍기와 같은 운전방식으로 배출가스의 온도가 높아 열풍으로 인해 작물이 말라버리는 현상도 일어난다(Fig. 1). 이러한 문제점을 해결하기 위하여 촉매를 이용하여 LPG를 이산화탄소로 전환시키는 탄산가스발생기(촉매형 탄산가스발생기)가 개발되었다(Fig. 2).

알스트로메리아(*Alstroemeria*)는 알스트로메리아과(Alstroemeriaceae)에 속하는 구근류로 꽃이 화려하고 다양하다. 일반적으로 저온의 토양환경에서 작물의 생장과 꽃눈 분화가 촉진된다(Heij, 2002). 몇몇 품종의 경우 20°C 이상일 때 개화하지 못하여 생산성이 감소한다(Heij, 2002). Van Labeke and Dambre (1998)은 5가지 종류의 알스트로메리아 ('Barbara', 'Fiona', 'Helios', 'Mona Lisa' and 'Tiara')에 탄산가스 시비 시 작물 생산량이 증가하며 줄기의 무게가 증가한다는 것을 보였다. 그러나 국내 알스트로메리아 품종과 국내 생육환경을 고려한 탄산시비 효과에 대한 연구는 부족하다.

이 논문은 촉매형 탄산가스발생기를 이용하여 알스트로메리아 국내 품종 '한헤라'('Hanhera')에 탄산가스 시비 처리를 하고 수확량 및 생육 상태(절화 줄기 길이, 줄기 두께)를 확인하여 탄산가스 시비의 효과를 분석하였다. 또한 시기별 촉매형 탄산가스발생기의 작동 시간을 달리하여 시비한 후 시설 내의 CO₂ 농도를 확인하고 겨울철 시설에 효율적인 탄산가스 시비 방법을 제안하였다.

Table 1. The method of CO₂ supplement

Type	Characteristic
Solid CO ₂	- Pure CO ₂ supplement
	- Annoying installation and maintenance
Liquid CO ₂	- Pure CO ₂ supplement
	- Expensive installation and maintenance fee
	- Unstable supplement
Fuel-burn type CO ₂ generator	- Expensive installation and maintenance fee
	- Concern about damage from harmful emission gas

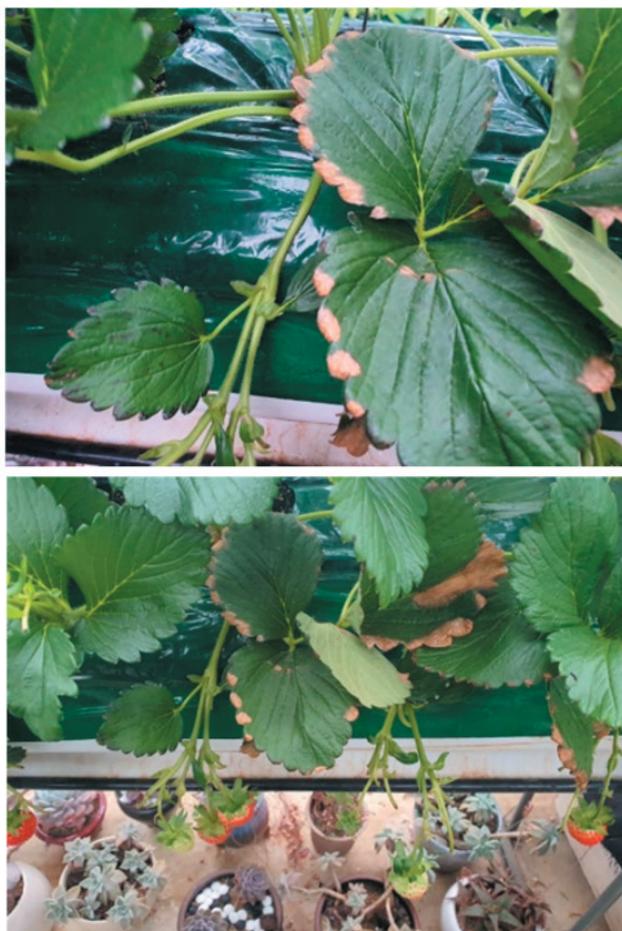


Fig. 1. Burned leaves by high temperature of emission gas from fuel-burn type CO₂ generator.



Fig. 2. The catalyst-type CO₂ generator.

Materials and Methods

실험 재료 및 재배 환경

실험에 사용된 공시재료는 알스트로메리아 ‘한헤라’이며 이를 2021년 8월 25일 98 m² 규모의 시설(Greenhouse) 두 개 동(대조구, 처리구)에 지상부를 제거한 후 110 cm 두둑에 20 cm 간격으로 3개씩 7줄(총 21주)씩 동일하게 각각 땅에 정식하였다. 2021년 9월 14일 절화망(1.2 m × 10 m)을 30 cm 높이에 설치하였고 2021년 10월 22일, 80 cm 높이에 설치하였다.

일주일당 5-7분씩, 2회 점적관수를 하였다. 겨울철 동결을 막기 위하여 이너-온실(Inner-Greenhouse)을 추가로 설치하였고(Fig. 3, Red arrow) 세라믹 전기 온풍기(Ceramic electric heater, Changsung boiler, Korea)를 설치하여 온실 온도가 15°C 이하 일 때 난방이 되도록 하였다. 이너-온실의 경우 8시~9시에 수동으로 개방하였으며 시설 내부 온도 20°C에 메인 시설의 측창이 자동 개방되도록 하였다(Fig. 3, Yellow arrow).

탄산가스 시비 처리구에 촉매형 탄산가스발생기(DAONiA, DAONRS Inc., Korea)를 설치하여 일정하게 CO₂ 를 공급하였고(Fig. 3, Blue arrow), 대조구에는 탄산가스 시비를 하지 않았다. 탄산가스 시비는 탄산가스 발생기의 운전방식에 따라 총 3개의 세션으로 구분하였다(Table 2). 세션1 실험 조건은 촉매형 탄산가스발생기의 특성과 일몰 시간을 고려하지 않아 18시까지 탄산가스 시비를 진행하며 15분씩 두 차례에 걸쳐 기기를 정지시켰다. 세션 2는 2021년 12월 일몰시간(약 17시 30분)을 반영하여 16시까지 시비하고 기기는 한 차례 15분 정지시켰다. 마지막 세션3에는 앞선 데이터를 바탕으로 이너-온실 및 측창 개방 후 CO₂ 농도가 낮게 유지된다는 점을 참고하여 12시30분까지 시비하였다.

Table 2. The schedule of CO₂ fertilization by the catalyst-type CO₂ generator

	Time (h)													
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 session 12.04.2021 ~ 12.14.2021	■			■			■							
2 session ¹⁾ 12.15.2021 ~ 01.10.2022 01.18.2022 ~ 01.23.2022	■						■							
3 session 01.24.2022 ~ 02.28.2022	■													

¹⁾ Repair the catalyst-type CO₂ generator on 01.11.2022 ~ 01.17.2022.

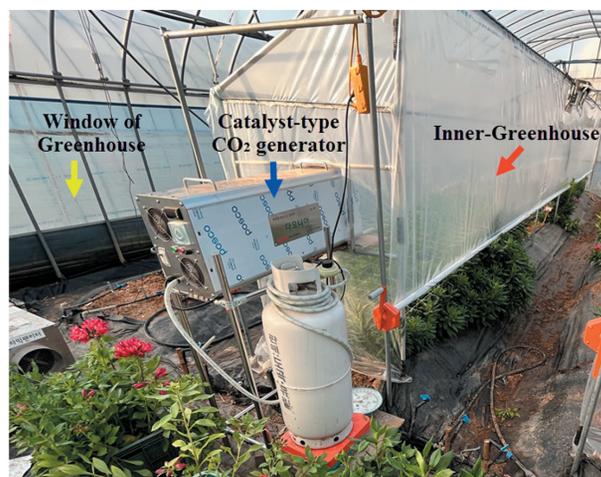


Fig. 3. The greenhouse. The yellow arrow points at the window of the greenhouse; The red arrow points at the mini-greenhouse; The blue arrow points at the catalyst-type CO₂ generator.

시설 환경 데이터 측정 및 저장

시설 내 온도는 온도 센서(PT100 RTD, DEAJIN SENSOR ELECTRIC WORKS, Korea)를 이용하여 측정하였고 시설 내 CO₂ 농도는 CO₂ 측정 센서(CM1107, CUBIC, China)를 이용하여 측정하였다. 온도 및 탄산가스 측정 데이터는 데이터 저장 장치(DAONi-con, DAONRS Inc., Korea)를 통하여 저장하였으며, 데이터는 1분마다 저장된다.

생육조사 및 절화 수확량 조사

생육조사는 일주일에 2회씩 실험 139일차까지 조사하였다. 줄기 두께(Shoot thickness)는 화서 바로 밑을 기준으로 측정하고 줄기 길이(Shoot length)는 지면부터 식물 정단부까지의 길이로 측정하였다(Fig. 4). 약(Anther)이 터졌을 때 꽃의 개수를 조사하였다. 주차 별 절화 수확량은 첫 개화 후부터 일주일에 한 번씩 7주동안 두 개 동을 조사하였다.



Fig. 4. The measurement points of Alstroemeria 'Hanhera'.

통계분석

실험 결과는 엑셀(version 16, Microsoft 365, USA)을 이용하여 5% 절삭평균 처리하였다.

Results and Discussion

시설 내 CO₂ 농도 데이터를 노이즈 제거하고 10분 간격으로 그래프로 나타냈다(Fig. 5). 모든 그래프에서 처리구의 CO₂ 농도는 탄산가스 시비 시작 후 증가하다 이너-온실을 개방(Fig. 5, Red arrow)하면서 급격하게 감소하는 양상이 보인다. Fig. 5a와 5b를 살펴보면, 측창이 열린 상태에서 탄산가스발생기의 휴식 후 재가동은 CO₂ 농도 상승을 일으키지 못한다. 하지만 재가동한 상태에서 측창을 닫게 되면 농도가 오르는 것을 확인할 수 있다. 측창이 닫힌 후 CO₂ 농도가 세션 1에서 더 크게 치솟은 이유는 측창이 닫힌 시점으로부터 탄산가스 시비 되는 시간이 더 길고, 작물의 초기 성장기로 엽 수가 충분히 많지 않아 CO₂ 소비량이 많지 못한 것으로 판단된다.

시설 내 온도 조절을 위한 환기를 고려할 때, 탄산가스 시비효과는 상대적으로 시설 내의 이산화탄소가 농후한 6시~10시(Fig. 5)에 집중되었을 것으로 판단된다. 해당 구간에서 처리구의 전체 평균 CO₂ 농도는 644.68 ppm이고 대조구의 CO₂ 평균 농도는 391.06 ppm으로 처리구 약 250 ppm 높은 환경이 조성되었음을 확인하였다(Table 3).

탄산가스 시비 시작 후 농도 증가 구간(Fig. 5, Green arrow)을 확대하여 추세선(Trend line)을 분석한 결과, 세션이 지날수록 시설 내 CO₂ 농도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6). 실험을 전반기(2021년 12월 04일 ~ 2022년 01월 10일)와 후반기(2022년 01월 18일 ~ 2022년 02년 28일)로 구분하여 6시 ~ 10시의 처리구 CO₂ 평균 농도를 구해본 결과(Table 3), 전반기 처리구 CO₂ 평균 농도는 694.36 ppm이고 대조구는 418.54 ppm이며 후반기 처리구 CO₂ 평균 농도는 654.73 ppm이고 대조구는 373.78 ppm으로 처리구와 대조구 모두 약 40 ppm 감소하였다. 이와 같은 현상은 작물이 점차 성장하고 엽이 자라면서 CO₂ 소비량이 증가하게 되어 시설 내 CO₂ 양이 줄어든 것으로 분석된다.

6시~9시 사이 CO₂ 농도변화 추세선을 보면(Fig. 6), 특이점(P1, P2, P3)를 전후로 기온이 급격하게 변한다. 특이점(P)가 일출시간(21년 12월 08일-7시28분; 22년 01월 19일-7시 40분; 22년 02월 22일-7시 12분) 근처라는 것을 고려해보면, 그 시점에 본격적인 광합성 활동이 시작되어 CO₂ 소비량이 늘어난 것으로 분석된다. 기온이 추세가 일출시간과 완벽하게 매칭되지 않는 것은 국부적 기상 차이에 의해 광환경 차이일 것으로 예측된다. 또한 실험 후반기로 접어들수록 기온이 낮아지는 것은 앞서 기술한바와 같이 작물이 성장하며 소모하는 CO₂ 소비량이 상대적으로 증가했기 때문으로 분석된다.

탄산가스 시비 처리구와 대조구 사이의 생육상태는 육안으로 확인하였을 때 풍성함에 있어 극명하게 차이가 났다(Fig. 7). 총 수확량은 처리구에서 515개, 대조구는 317개로 처리구 수확량이 대조구 대비 약 62% 더 많았다(Table 4). 대조구 절화 길이 대비 탄산가스 시비 처리구의 절화 길이가 약 82% 더 길었고 줄기 두께 역시 대조구 대비 처리구에서 약 0.74 mm 더 두꺼웠다(Table 4). 절화 당 총 꽃의 개수는 탄산가스 시비 처리구에서 평균 약 4개 더 많았다(Table 4).

특히, 탄산시비 시 절화 길이에 큰 효과를 보이는데 길이가 길수록 상품가치가 높아 농가의 이익 증대에 큰 영향을 끼칠 것으로 기대된다.

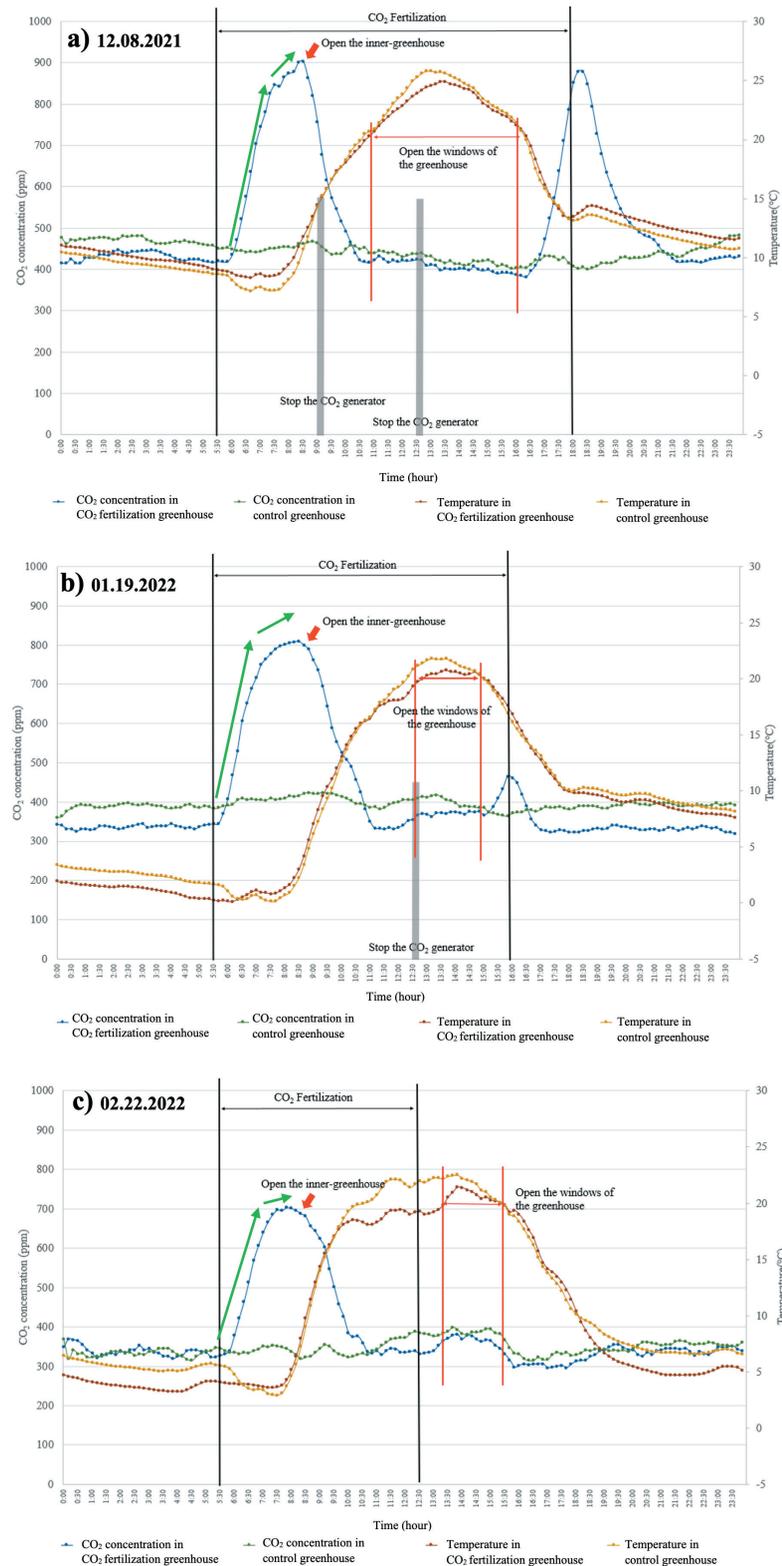


Fig. 5. The graphs of the CO₂ concentration and temperature in the CO₂ fertilization greenhouse and the control greenhouse. The data is marked every 10 min. The green arrow means the mark line of slop on the increase time from 5:30 to 9:00. a) Data on Dec. 08. 2021. This data represents '1 session' data. b) Data on Jan. 19. 2022. This data represents '2 session' data. c) Data on Feb. 22. 2022. This data represents '3 session' data.

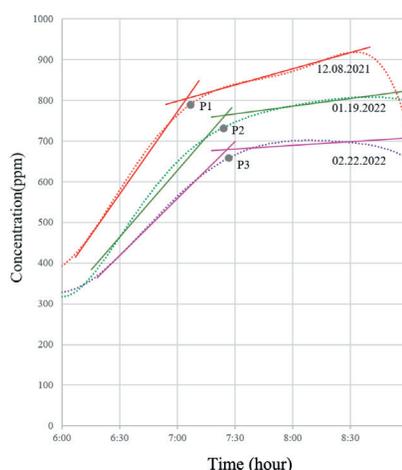


Fig. 6. The trend line(Dotted line) of increase time on CO₂ fertilization greenhouse from 6:00 to 9:00. Point P(1,2,3) are marked at the change point of gradient line.

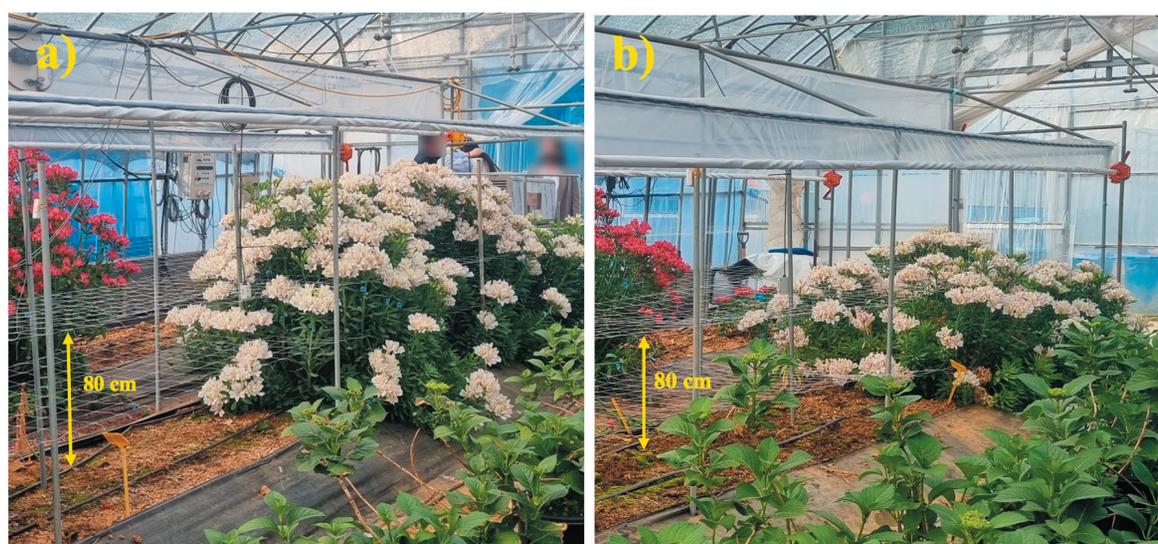


Fig. 7. The image of Alstroemeria 'Hanhera' in the CO₂ fertilization greenhouse and control greenhouse. The height of the second cut net is 80 cm (Yellow arrow). a) In the CO₂ fertilization greenhouse. b) In the control greenhouse

Table 3. The average of CO₂ concentration from 6:00 ~ 10:00 on the former time, the latter time and whole time.

Time	CO ₂ fertilization Greenhouse (ppm)	Control Greenhouse (ppm)
Whole time (12.04.2021 ~ 01.10.2022, 01.18.2022 ~ 02.28.2022)	644.68	391.06
The former time (12.04.2021 ~ 01.10.2022)	694.36	418.54
The latter time (01.18.2022 ~ 02.28.2022)	654.73	373.78

Table 4. The comparison of plant growth in Alstroemeria 'Hanhera' under different treatment: Control and CO₂ fertilization.

CO ₂	Total number of marketable plant	Shoot length of cut flower (cm)	Shoot thickness of cut flower (mm)	The number of flowers per flowering shoot
Control	317	65.05	6.00	11.92
Fertilization	515	111.62	6.74	16.03

Conclusion

본 연구는 시설 내에 탄산가스발생기를 이용하여 탄산가스 시비 시 시설 내 CO₂ 농도 변화와 알스트로메리아 '한헤라'의 절화 생산량 및 생육에 미치는 영향을 조사하였다. 처리구 시설 내 CO₂는 6시~10시 사이에 640 ppm 이상의 농도로 유지가 되었으며, 식물의 광합성 활동시기, 생장상태 등에 따라 농도의 변화를 분석하였다. 탄산가스 시비로 절화 생산량과 절화 길이는 대조구 보다 유의하게 증가(절화 생산량 : 약 62% 증가, 절화 길이 : 약 82% 증가)하여 효과가 유효하다는 것을 검증하였다.

시설 내 CO₂ 농도는 시설운영방식, 식물의 생장, 기상 상태에 따라 탄력적으로 변한다. 따라서 겨울철 경제적인 탄산가스 시비를 위해서는 시설 내 온도에 따른 측창 개폐에 맞춰 탄산가스 시비를 해야한다. 각 시기별 일출과 일몰 시간에 맞춰 탄산가스 시비 시간을 조절하여 효율적인 시설 운영을 할 필요가 있다. 특히 일출 전 충분한 탄산가스 시비를 통해 농후한 환경조성이 적절한 것으로 판단된다.

차후 연구에서는, 탄산가스 시비 시 시설 내 CO₂ 농도를 일정하게 유지시키고 처리 시간을 오전 처리(5시30~12시), 오후 처리(12시 30분~17시), 종일 처리(5시30분~17시)로 구분하여 작물의 생육 상태와 광합성량 등을 조사할 필요가 있다. 또한 작물의 광합성량과 생육에 영향을 끼치는 요소는 CO₂ 농도 뿐만 아니라 온도, 조도, 수분 등 여러 환경 요인의 영향을 받기 때문에 교호작용을 고려한 연구가 필요하다.

Acknowledgement

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 기술사업화지원사업의 지원을 받아 연구되었음 (821046032SB010).

Reference

- Chen Z, Kang X, Nie H, Zheng S, Zhang T, Zhou D, Xing G, Sun, S. 2019. Introduction of Exogenous Glycolate Catabolic Pathway Can Strongly Enhances Photosynthesis and Biomass Yield of Cucumber Grown in a Low- CO₂ Environment. *Frontiers in Plant Science* 10:702.
- Heij G. 2002. *Alstroemeria* literature survey, A review of 10 years of Dutch applied research. Applied plant research. The Netherlands
- Lee IB, Kang SB, Park JM. 2008. Effect of Elevated Carbon Dioxide Concentration and Temperature on Yield and Fruit Characteristics of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Korean Journal of Environmental Agriculture*. 27(4):428-434.
- Lee JH, Lee JS, Park KS, Kwon JK, Kim JH, Lee DS, Yeo KH. 2018. Effect of Using Burn-type CO₂ Generators When Cultivation Strawberry in a Greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory* 27(2):111-116.

- Mortensen LM. 1987. Review: CO₂ Enrichment in greenhouses. Crop responses. *Scientia horticulturae* 33:1-25.
- Muneer S, Lee JH. 2018. Hazardous gases (CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈) released from CO₂ fertilizer unit lead to oxidative damage and degrades photosynthesis in strawberry plants. *Scientific Report* 8:12291.
- Pan T, Ding J, Qin G, Wang Y, Xi L, Yang J, Li J, Zhang J, Zou Z. 2019. Interaction of Supplementary Light and CO₂ Enrichment Improves Growth, Photosynthesis, Yield, and Quality of Tomato in Autumn through Spring Greenhouse Production. *HortScience* 52(2):246-252.
- Pan H, Zhang Q, Liu Q, Liang S, Kang H. 2008. Effects of Different CO₂ Enrichment Programs during the Day on Production of Cut Roses. *Acta Hort* 766:59-64.
- Park JS, Shin JW, Ahn TI, Son JE. 2010. Analysis of CO₂ and Harmful Gases Caused by using Burn-type CO₂ Generators in Greenhouses. *Journal of Bio-Environment Control* 19(4):177-183.
- Ryu HR. 2018. Changes of Photosynthetic Characteristics, Soluble Carbohydrate Content, and Plant Growth Grown under CO₂ Fertilization for Hydroponic Cultivation of Strawberry. Master Thesis, Korea national open university, Seoul, Korea.
- Springer CJ and Ward JK. 2007. Flowering time and elevated atmospheric CO₂. *New phytologist* 176:243-255.
- Tagawa A, Ehara M, Ito Y, Araki T, Ozaki Y, Shishido Y. 2022. Effects of CO₂ Enrichment on Yield, Photosynthetic Rate, Translocation and Distribution of Photoassimilates in Strawberry 'Sagahonoka'. *Agronomy* 12:473
- Van Labeke MC and Dambre P. 1993. Response of five *Alstroemeria* cultivars to soil cooling and supplementary lighting. *Scientia horticulturae* 56: 135-145
- Van Labeke MC and Dambre P. 1998. Effect of supplementary lighting and CO₂ enrichment on yield and flower stem quality of *Alstroemeria* cultivars. *Scientia horticulturae* 74(4): 269-278
- Xu S, Zhu X, Li C, Ye Q. 2014. Effects of CO₂ enrichment on photosynthesis and growth in *Gerbera jamesonii*. *Scientia Horticulturae*. 177:77-84
- Zhang FF, Wang YL, Huang ZZ, Zhu XC, Zhang FJ, Chen FD, Fang WM, Teng NJ. 2012. Effects of CO₂ Enrichment on Growth and Development of *Impatiens hawkeri*. *The ScientificWorld Journal*. 2012(3):9