

드라이아이스를 이용한 딸기재배 온실의 이산화탄소 농도변화

백이^{1*}, 강석원², 장재경¹, 권진경¹
¹국립농업과학원 농업공학부 에너지환경공학과, ²농촌진흥청

Variations of Carbon Dioxide Concentration in a Strawberry Greenhouse Using Dry Ice

Yee Paek^{1*}, Suk-Won Kang², Jae-Kyung Jang¹, Jin-Kyung Kwon¹

¹Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju 54875, Korea

²Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea

요약 최근에 딸기, 파프리카 등 시설과채류 재배에서 수확량 증대를 위하여 탄산가스를 시비하는 추세로 변화하고 있다. 본 연구에서는 석유화학, 주정공장 등에서 부산물로 발생하는 이산화탄소를 포집하여 정제한 후 작물재배온실에 이용하는 것이 목표이다. 이 목표를 달성하기 위한 방법으로는 드라이아이스 저장 및 탄산가스 공급이 주요하게 적용되고 있다. 드라이아이스 특성은 삼중점 이하의 온도와 압력에서 CO₂는 고체나 기체가 되며 고체는 -78.5℃와 대기압에서는 액체 상태를 거치지 않고 바로 기체로 승화되며 강력한 냉각효과를 볼 수 있다. 온도에 따른 드라이아이스의 소비량은 온도가 5℃, 10℃, 15℃, 20℃일 때 각각 0.983kg/일, 2.358kg/일, 5.102kg/일, 7.035kg/일 소비가 되었고 CO₂의 농도는 1,102ppm, 1,481ppm, 1,677ppm, 1,855ppm으로 나타났다. 시험온실에서의 드라이아이스 소모량은 시간당 약 0.9kg이 감소하는 것으로 나타났고 드라이아이스를 공급하기 전 9시에 온실내부의 CO₂농도는 517ppm이었으며, 공급 후 10시 1,519ppm, 11시 1,651ppm, 12시 1,690ppm으로 증가한 후 일정한 수준을 유지하였다. 향후, 본 연구결과를 기반으로 작물에 필요한 탄산가스 공급 영역을 확장하여 공급조건을 도출하여 농가소득을 높이는데 기여하고자 하였다.

Abstract This study aimed to collect the carbon dioxide generated as a by-product from petrochemicals and liquor factories and use it in a crop breeding greenhouse. This was applied mainly to the storage of dry ice and the supply of carbon dioxide to achieve this target. Dry ice has a strong cooling effect because CO₂ becomes a solid or gas at temperatures and pressures below the triple point, and the solid sublimates at -78.5℃ and atmospheric pressure. The consumption of dry ice according to temperature was 0.983kg/day, 2.358kg/day, 5.102kg/day, and 7.035kg/day when the temperature was 5℃, 10℃, 15℃, and 20℃, respectively, which corresponded to 1,102ppm, 1,481ppm, 1,677ppm, and 1,855ppm. Dry ice consumption in the test greenhouse decreased by approximately 0.9kg/h, and the CO₂ concentration in the greenhouse at 9 a.m., before supplying dry ice increased to 517ppm, 1,519ppm at 10 a.m., 1,651ppm at 11 a.m., and 1,651ppm at 12 p.m., before maintaining this level of activity. Overall, this study attempted to contribute to increasing farm income by deriving the supply conditions through an expansion of the supply of carbon dioxide gas for crops

Keywords : Greenhouse Horticulture, Greenhouse, Carbon Dioxide, Dry Ice, Strawberry

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ012518)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Yee Paek(National Institute of Agricultural Sciences)

email : paekyee@korea.kr

Received December 27, 2019

Revised February 6, 2020

Accepted February 7, 2020

Published February 29, 2020

1. 서론

국내 딸기재배는 노동력 절감 및 생력화를 위하여 토경재배에서 고설재배로 변화하고 있으며 단위면적당 생산량도 증가하는 추세에 있다. 국내의 딸기재배면적은 7,090ha('00)에서 5,978ha('16)로 1,112ha 감소하였으며 딸기 생산량은 180,501톤('00)에서 191,218톤('16)으로 10,717톤 증가하였다(농림부, 2017)[1]. 딸기재배는 주로 수막을 이용하여 재배하였으나 고설재배증가로 인하여 난방기 사용으로 에너지 소비가 요구되고 있는 실정이다. 최근에 딸기, 파프리카 등 시설과채류 재배에서 수확량 증대를 위하여 탄산가스를 시비하는 추세로 변화하고 있다. 과실의 고품질 원예작물 생산을 위해서는 탄산가스시비는 광합성작용에 가장 중요한 요인 중의 하나이다. 탄산가스 사용은 보통 보온개시 후 또는 축성재배시 정식 30일 후부터 사용을 하며 사용시간은 일출 후 30분부터 환기 시까지 2~3시간 공급을 하고 있다. 정식 후 사용을 할 경우 영양생장이 왕성하여 과번무가 되거나 암꽃이 개화가 되지 않는 현상이 발생한다. 탄산시비에 대한 연구로서는 최 등(2017)[2]에 의하면 탄산가스 시비는 딸기 재배시 1,000ppm 시비시 당도, 산도, 경도가 높고 수량이 증가한다고 보고하였다. 강 등(2007)[3]에 의하면 착색단고추 생육에서 탄산가스 농도 및 공급 시기에 대한 연구로서 겨울철에는 광도 제한으로 탄산가스 농도보다는 사용시간이 길수록 생육이 양호하다고 보고하였다. 탄산가스는 광합성의 주요 구성요인으로서 CO₂ 처리 효과는 품종, CO₂ 농도, 성숙상태, 처리 온도와 시간에 따라 다양하고 광합성에 관여하는 효소들의 활성을 결정하기 때문에 Sink-Source 균형에 영향을 미치는 주요한 환경요인이라고 보고하였다(Arp, 1991)[4]. 대부분의 원예 작물은 CO₂ 포화점이 대기 중 CO₂ 농도보다 높기 때문에 CO₂ 시비는 온실에서 일반적으로 사용된다. 딸기 시설 재배에 대한 CO₂ 시비는 과당과 자당의 함량을 증가시키고 생산량을 30~40%를 증가시키는 것으로 보고하였다(Jeong et al. 1996)[5]. Mortensen (1987)[6]은 딸기 재배를 위한 적절한 CO₂ 시비량으로 겨울과 초봄에는 최대 700~900ppm의 CO₂ 시비량을 적용할 수 있다고 제안했다. 그리고 일부 연구는 높은 CO₂로 시비할 경우 광합성 촉진과 수확량 증진 효과는 있지만 장기간 시비할 경우 수확량과 과일 품질을 감소시킨다고 하였다. 딸기 품종 'Bebugioe'와 'Frاند'를 CO₂ 2,000ppm 으로 재배했을 때 'Benihoppe' 품종의 순광합성율을 12.4% 억제시켰다고 보고하였다(Yu et

al., 2015)[7]. 토마토를 CO₂ 800ppm으로 재배했을 때 처리 후 30일 후에는 광합성율이 증가하였으나, 그 이후에는 큰 차이는 보이지 않았다(Lee and Lee, 1994)[8]. 조 등(2011)[9]은 실내공간을 대상으로 여러 지점에서 이산화탄소의 농도를 측정된 결과 환기를 하지 않을 경우 상부의 공간에서 하부보다 이산화탄소가 높게 나타났다. 이는 공기가 상부로 올라가 천장벽을 통하여 사방으로 확산되기 때문이며 하부는 틈새 등으로 외부공기의 유입으로 인하여 낮게 나타났으며 이는 주변의 희석된 공기가 냉각하면서 하부로 모이기 때문으로 나타났다고 보고하였다. 본 연구에서는 화력발전소 등에서 발생한 부산물인 이산화탄소를 포집하여 시설온실에 이용방법을 모색하고 탄산가스 시비방법에 따른 탄산가스 농도 분포와 딸기 생육특성 분석을 통하여 시설농가에 고품질 농산물을 생산하여 소득을 높이는 데 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

시험온실의 면적은 175m²로서 시스템의 구성은 Fig. 1과 같이 드라이아이스를 저장하는 저장조, 기화된 탄산가스와 외부에서 유입한 탄산가스를 혼합하는 혼합조, 외부공기를 유입할 수 있는 조절판퍼, 혼합된 탄산가스를 비닐하우스 내부로 보낼 수 있는 팬코일 유닛, 혼합된 탄산가스를 비닐하우스내부로 보내는 유도 배관 및 덕트, 탄산가스를 공급할 수 있는 시스템 가동을 제어하기 위한 제어장치와 모니터링 시스템으로 구성하였다. Fig. 2와 3은 탄산가스 공급장치이며 시험온실의 전경을 나타내고 있다.

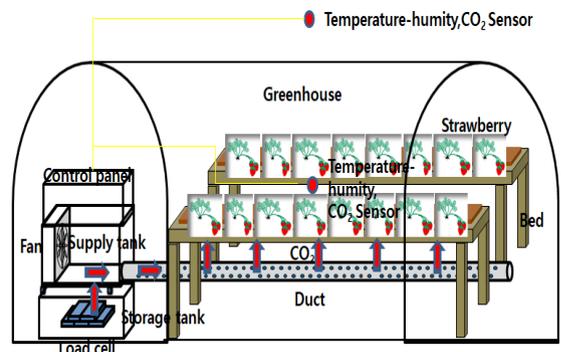


Fig. 1. Configuration diagram of carbon dioxide supply system



Fig. 2. Carbon dioxide supply system

Table 1은 탄산가스 공급장치 형식 및 제원을 나타내었다. 탄산가스 공급방식은 일사량에 따라 비닐하우스 내부에 탄산가스 농도를 측정하여 작물에 필요한 탄산가스 농도에 따라 외부의 신선한 공기와 혼합하여 탄산가스 농도를 맞추어 작물의 광합성을 잘할 수 있는 탄산가스 농도를 조절하여 탄산가스를 온실 내의 작물 아래 위치에서 공급하도록 하였다.



Fig. 3. Strawberry test greenhouse

Table 1. Specifications of carbonated gas supply system

Items		Format and specifications
Storage tank	Standard	L×W×H(100×100×90cm)
Feeder	Standard	L×W×H(100×100×90cm)
Fan	Power consumption	200W
	Rotation count	1130rpm
	Power	220V, Single phase
Load cell	Range	100kg
Control device	Control method	Automatic temperature

시험온실의 내외부 온습도 및 탄산가스농도에 대한 시험은 전주시 국립농업과학원 시험온실에서 2018.12.1.~12.31기간 동안 실시간으로 측정하였다. 탄산가스센서, 온도와 습도센서(T&D, TR-72ui)를 시험구와 대조구 온실 중앙에 각각 설치하였으며, 드라이아이스는 일출 후 30분부터 공급하였으며 대조구는 관행방법으로 하였다.

3. 본론

3.1 딸기 재배면적 및 생산량 조사

3.1.1 딸기 재배 면적 현황조사

최근 국내의 시설재배와 노지재배에 따른 딸기재배면적은 통계자료(농림부,2017)를 통하여 조사분석하였다. Fig. 4는 시설재배와 노지재배면적을 나타내고 있다. 조사분석기간은 17년('00~'16)으로 노지재배 면적은 535ha('00)에서 134ha('16)로 401ha(74.9%) 감소하였다. 시설재배 면적은 6,555ha('00)에서 5,844ha('16)로 711ha(10.8%) 감소하였다. 딸기재배면적은 '00년 이전에는 노지재배면적이 많았으나 이후부터 시설재배 면적이 많은 것으로 나타났다. 이는 주로 하절기 노지재배방식에서 탈피하여 동절기 온실재배를 통한 생산량이 높았음을 시사한다.

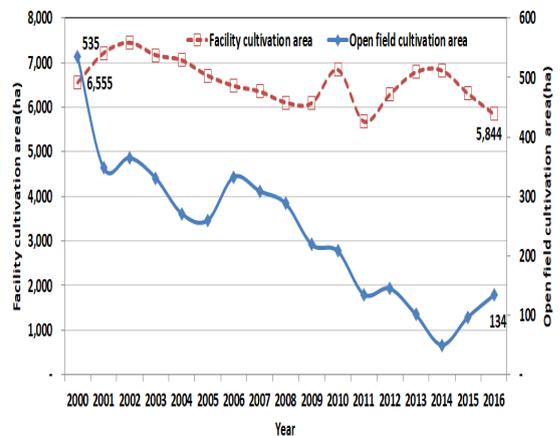


Fig. 4. Strawberry facility cultivation area and open field cultivation area by year

3.1.2 딸기재배면적과 딸기생산량 조사

Fig.5는 국내의 딸기재배면적과 딸기생산량을 통계자료(농림부,2017)를 이용하여 조사분석하였다. 조사분석

기간은 17년('00~'16)으로 재배면적은 7,090ha('00)에서 5,978ha('16)로 1,112ha 감소하였으며 딸기 생산량은 180,501톤('00)에서 191,218톤('16)으로 10,717톤 증가하였다. 재배면적에 대한 상관관계식은

$$y = -80.704X + 7538 \quad (1)$$

으로 나타났으며, 생산량에 대한 상관관계식은

$$y = 8.7647X + 200834 \quad (2)$$

으로 나타났다. 딸기재배면적은 15.6% 감소하였고 딸기 생산량은 5.9% 증가하였다. 특히 '11년 급속히 재배면적이 감소한 것은 4대강사업으로 인하여 하천주변의 시설 재배단지가 감소한 것으로 사료된다. 전반적으로 딸기재배면적은 감소하였으나 생산량은 재배관리기술 향상 및 온실재배로 인하여 생산량이 높은 것으로 판단되었다.

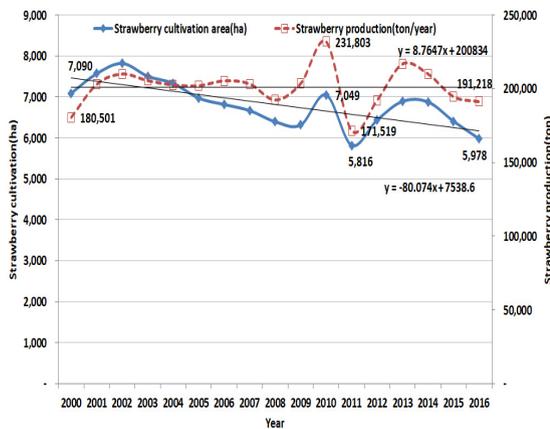


Fig. 5. Strawberry cultivation area and strawberry production by year

3.1.3 시설재배와 노지재배 딸기 생산량조사

Fig.6은 시설재배와 노지재배에 따른 딸기생산량을 통계자료(농림부,2017)를 이용하여 조사분석하였다.

조사분석기간은 17년('00~'16)기준으로 노지재배에서의 생산량은 7,878톤('00)에서 2,454톤('16)으로 5,424톤 감소하였으며 상관관계식은 $y = -274.83X + 6165$ 로 나타났다. 시설재배에서의 생산량은 172,623톤('00)에서 188,673톤('16)으로 16050톤 증가하였으며 상관관계식은 $y = 283.59X + 194668$ 로 나타났다. 노지재배에서의 생산량은 68.8% 감소하였고 시설재배에서는 9.2% 증가하였다. 딸기생산량은 노지재배에서는 감소하였으나 시설재배에서는 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 이는 재배기술의 고도화 및 동절기 수확에 따른 생산량과 가격상승이 높았기 때문으로 판단되었다.

3.2 드라이아이스의 물리적 특성

Fig. 7은 드라이아이스의 상변화 특성을 나타내고 있다. 물리적 특성은 비중 1.529, 승화점 -78.5°C , 기화열 368.9kJ/kg , 냉각효과가 639.7kJ/kg 으로 나타났다. 드라이아이스는 상평형선도에서와 같이 삼중점 이하의 온도와 압력에서는 CO_2 는 고체나 기체가 되며 고체는 -78.5°C 와 대기압에서는 액체상태를 거치지 않고 바로 기체로 승화된다.

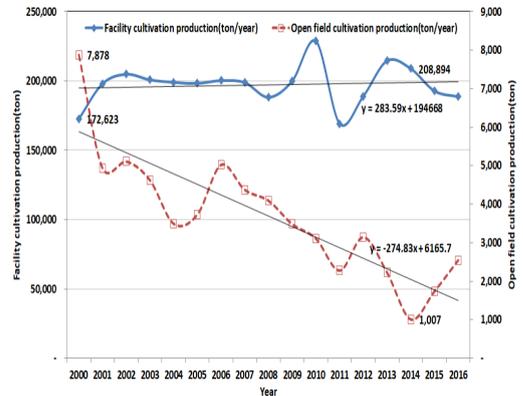


Fig. 6. Strawberry facility cultivation and open field cultivation production by year

이때 고체탄산(Dry Ice)은 승화열을 흡수하면서 강력한 냉각효과를 볼 수 있다. 드라이아이스가 대기압보다 낮은 압력으로 승화되면 온도는 더욱 낮게 될 것이며 삼중점 이상의 온도와 압력에서 그리고 31.1°C 아래에서는 CO_2 가 밀폐된 용기에서 액체와 기체가 균형 상태로 존재할 수도 있다. 또한 임계온도(31.0°C) 이상이 되면 CO_2 는 압력과 관계없이 액체 상태로 존재할 수 없다.

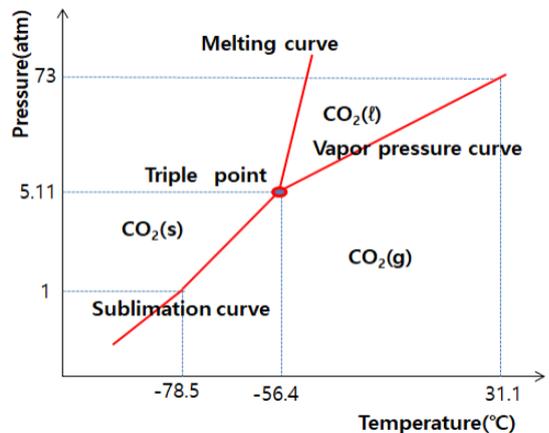


Fig. 7. Typical phase diagram of dry ice

3.3 챔버 내에서 드라이아이스 무게변화 및 탄산가스 농도 변화

Fig. 8은 챔버 내의 온도를 4수준(5℃, 10℃, 15℃, 20℃)으로 변화시키면서 드라이아이스의 무게변화를 나타내고 있다. 30kg의 드라이아이스는 챔버온도 5℃에서 31일간, 10℃에서 13일, 15℃에서 6일, 20℃에서 4일 유지하였다. 온도에 따른 드라이아이스의 소비량은 온도가 5℃, 10℃, 15℃, 20℃일 때 각각 0.983kg/일, 2.358kg/일, 5.102kg/일, 7.035kg/일 소비가 되었다. 챔버내 온도를 4수준(5℃, 10℃, 15℃, 20℃)으로 변화시키면서 CO₂의 농도변화를 측정하였다. Fig.9는 온도에 따른 드라이아이스의 소비량을 나타내고 있다. 챔버내의 온도가 5℃, 10℃, 15℃, 20℃ 일 때 각각 CO₂의 농도는 1,102ppm, 1,481ppm, 1,677ppm, 1,855ppm으로 나타났다.

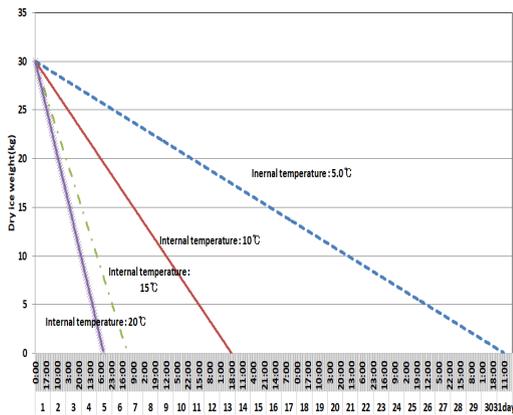


Fig. 8. Variation of dry ice weight according to the internal temperature of chamber

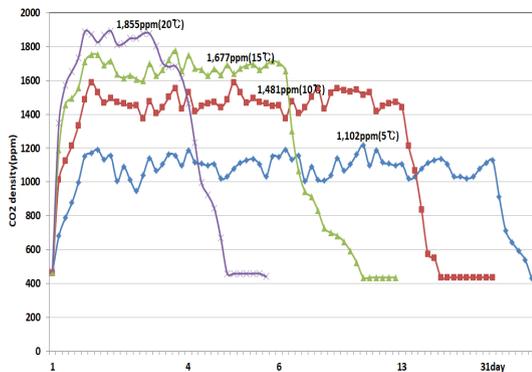


Fig. 9. Variation of carbon dioxide density by internal temperature of chamber

3.4 드라이아이스 소모에 따른 온실내부 온도변화

Fig. 10은 드라이아이스 이용 탄산가스 시비에 따른 온실 환경을 나타내고 있다. 재배온실은 폭×길이×측고(7m×25m×1.7m)로 단동온실이며 2중 비닐과 다겹보온커튼이 설치된 구조이다. 외부일사량은 해가 뜬 직후 9시에 64.2W/m² 이었으며 13시에 513.5W/m² 으로 증가하였으며 이후 시간이 경과하면서 감소하였다. 외부기온은 9시에 -5.9℃, 13시에 0.3℃로 증가한 이후 시간이 경과하면서 감소하였다. Fig. 10과 같이 드라이아이스를 공급한 온실의 내부온도는 9시 10.3℃, 13시 23.9℃, 18시 9.7℃로 증가한 이후 시간이 경과하면서 감소하였다. 상대습도는 9시에 66%, 13시 16%, 18시 73%로 시간이 경과할수록 감소하다가 13시 이후 다시 증가하는 것으로 조사되었다. 대조구 온실에서는 내부온도는 9시 10.6℃, 13시 25℃, 18시 9.5℃로 증가한 이후 시간이 경과하면서 감소하였고 상대습도는 9시 74%, 13시 33%, 18시 83%로 시간이경과할수록 감소하다가 13시 이후 다시 증가하는 것으로 조사되었다. 드라이아이스를 공급한 시험구와 대조구의 온도차이는 0.8℃로 큰 차이를 보이지 않았으며 상대습도는 13.2%로 대조구가 높게 나타났다.

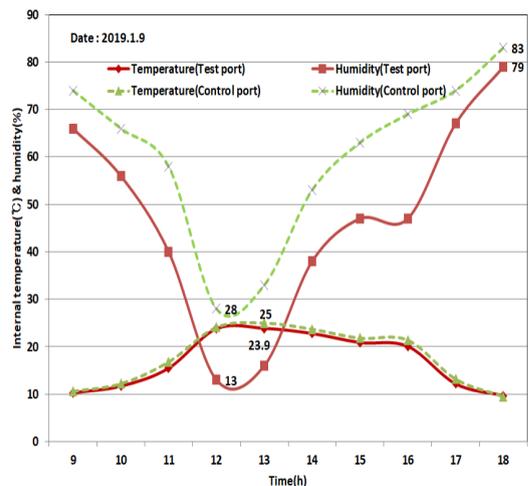


Fig. 10. Temperature and humidity of greenhouse according to the supply of carbon dioxide

3.5 온실 내 탄산가스 공급방법에 따른 드라이아이스 무게 및 탄산가스 농도 변화

드라이아이스 소모량 분석을 위해 전자저울(카스, pb-100)을 사용하였으며 드라이아이스는 30kg을 온실

증양에 두고 자연 상태에서 기화되는 양을 측정하였다. Fig.11과 같이 시험시작 9시에서는 29.55kg에서 18시에서는 21.35kg으로 8.2kg이 감소하여 시간당 약 0.9kg이 감소하는 것으로 나타났다.

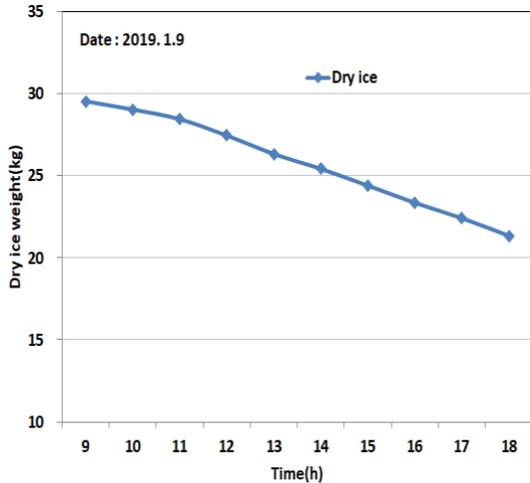


Fig. 11. Variation of dry ice weight over time in greenhouse

드라이아이스 감소량은 온실내부온도에 따라 다소 차이가 있을 수 있는 것으로 판단되었다. 드라이아이스 감소에 따른 온실내 CO₂농도변화는 Fig. 12와 같이 조사되었다.

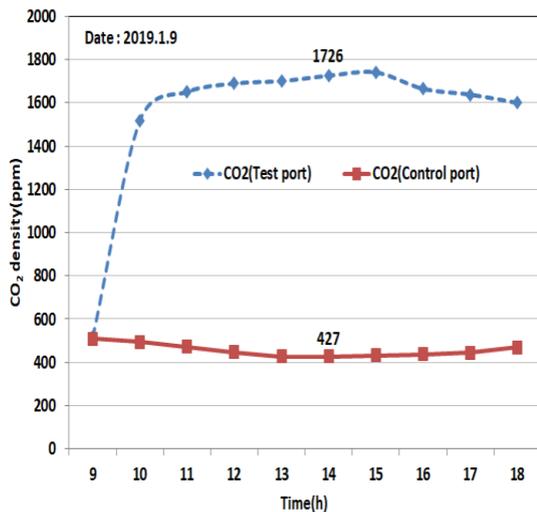


Fig. 12. Variation of carbon dioxide density over time in greenhouse

드라이아이스를 공급하기 전 9시에 온실내부의 CO₂ 농도는 517ppm, 10시 1519ppm, 11시 1651ppm, 12시 1690ppm으로 증가한 후 그의 일정한 수준을 유지하였다. 대조구에서는 평균 455ppm으로 일정하게 유지되었다. 이는 공기 중 농도와 비슷한 수준으로 나타났다.

4. 결론

최근 국내의 딸기노지재배 면적은 약 74.9% 감소하였으며 시설재배 면적은 711ha 감소하였으며 10.8% 감소하였다. 딸기노지재배생산량은 5,424톤(68.8%) 감소하였으며 시설재배에서의 생산량은 16,050톤(9.2%) 증가하였다. 드라이아이스의 물리적 특성은 비중 1.529, 승화점 -78.5℃, 기화열368.9kJ/kg, 냉각효과가 639.7kJ/kg으로 나타났다. 드라이아이스는 상평형 선도에서와 같이 삼중점 이하의 온도와 압력에서는 CO₂는 고체나 기체가 되며 고체는 -78.5℃와 대기압에서는 액체상태를 거치지 않고 바로 기체로 승화된다. 온도에 따른 드라이아이스의 소비량은 챔버 내부온도가 5℃, 10℃, 15℃, 20℃일 때 각각 0.983kg/일, 2.358kg/일, 5.102kg/일, 7.035kg/일 소비가 되었고 CO₂의 농도는 1,102ppm, 1,481ppm, 1,677ppm, 1,855ppm으로 나타났다. 시험온실에서의 드라이아이스 소모량은 시간당 약 0.9kg이 감소하는 것으로 나타났고 드라이아이스를 공급하기 전 9시에 온실내부의 CO₂농도는 517ppm, 10시 1519ppm, 11시 1651ppm, 12시 1690ppm으로 증가한 후 그의 일정한 수준을 유지하였다. 향후, 본 연구결과를 기반으로 작물에 필요한 탄산가스 공급 영역을 확장하여 공급조건을 도출하여 농가소득을 높이는데 기여하고자 하였다.

References

- [1] MAFRA, Agriculture, the major statistics in agriculture, food and tatal affairs, Sejong, South Korea, 2017.
- [2] I. L. Choi, J. S. Yoon, H. S. Yoon, K. Y. Choi, I. S. Kim, H. M. Kang, "Effects of carbon dioxide fertilization on the quality and storability of strawberry 'Maehyang'", Protected Horticulture and Plant Factory, 26(2), 140-145, 2017.
DOI : <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2017.26.2.140>
- [3] Y. I. Kang, S. Y. Lee, H. J. L. Kim, H. Chun, B. R. Jeong, "Effects of CO₂ Enrichment Concentration and Duration on Growth of Bell Pepper (Capsicum

annuum L.)", Protected Horticulture and Plant Factory, 16(4), 352-357, 2007.

- [4] W. J. Arp, "Effects of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO₂", Plant, Cell & Environment, 14(8), 869-875, 1991.
DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01450.x>
- [5] C. S. Jeong, I. S. Kim, S. S. Kim, D. H. Cho, Y. R. Yeoung, "Effects of CO₂ enrichment on the net photosynthesis, yield, content of sugar and organic acid in strawberry fruits", Journal of the Korean Society for Horticultural Science (Korea Republic), 1996.
- [6] L. M. Mortensen, "CO₂ enrichment in greenhouses Crop responses", Scientia Horticulturae, 33(1-2), 1-25, 1987.
DOI : [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(87\)90028-8](https://doi.org/10.1016/0304-4238(87)90028-8)
- [7] J. Yu, M. Wang, C. Dong, B. Xie, G. Liu, Y. Fu, H. Liu, "Analysis and evaluation of strawberry growth, photosynthetic characteristics, biomass yield and quality in an artificial closed ecosystem", Scientia Horticulturae, 195, 188-194, 2015.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.009>
- [8] Y. B. Lee, B. Y. Lee, "Effect of long-term CO₂ enrichment on leaf temperature, diffusion resistance, and photosynthetic rate in tomato plant", Journal of The Korean Society for Horticultural Science, 1994.
- [9] Y. M. Cho, J. Y. Lee, S. B. Kwon, D. S. Park, J. H. Park, K. C. Cho, "The Distribution Characteristics of Carbon Dioxide in Indoor School Spaces", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(1), 117-125, 2011.
DOI : <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.1.117>

백 이(Yee Paek)

[정회원]



- 1997년 2월 : 경상대학교 농기계 공학과(공학박사)
- 2000년 6월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구사

<관심분야>

바이오매스, 지열, 신재생에너지

강 석 원(Suk-Won Kang)

[정회원]



- 1996년 8월 : 코넬대학교 생물환경공학(공학박사)
- 2002년 9월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구관

<관심분야>

태양광, 태양열, 농업공학

장 재 경(Jae-Kyung Jang)

[정회원]



- 2006년 2월 : 이화여자대학교 환경공학과(공학박사)
- 2008년 11월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구사

<관심분야>

미생물연료전지, 바이오에너지

권 진 경(Jin-Kyung Kwon)

[정회원]



- 2002년 9월 : 큐슈대학교 환경에너지공학(공학박사)
- 2000년 6월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구사

<관심분야>

시설온실, 유체전산, 열환경