

# 대형 밀폐 챔버를 이용한 파프리카(*Capsicum annumm* L.) 개체의 이산화탄소 소비량 측정 및 정량화

신종화<sup>1,2</sup> · 안태인<sup>1,2</sup> · 손정익<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 식물생산과학부, <sup>2</sup>서울대학교 농업생명과학연구원

## Quantitative Measurement of Carbon Dioxide Consumption of a Whole Paprika Plant (*Capsicum annumm* L.) Using a Large Sealed Chamber

Jong Hwa Shin<sup>1,2</sup>, Tae In Ahn<sup>1,2</sup>, and Jung Eek Son<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

<sup>2</sup>Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

**Abstract.** This study was carried out to clarify precise CO<sub>2</sub> demands of paprika plants (*Capsicum annumm* L.) by measuring photosynthesis rates of the leaves in high, low positions, and the CO<sub>2</sub> consumption of a whole plant in a large sealed chamber. A photosynthesis measuring system (LI-6400) was used to measure the photosynthetic rates of the leaves located in different positions. A large sealed chamber that can control inside environmental factors was developed for measuring CO<sub>2</sub> consumption by a whole paprika plant. With increase of radiation, photosynthetic rates of the leaves in higher position became larger than those in lower position. The CO<sub>2</sub> consumption by the plant was estimated by using decrement of CO<sub>2</sub> concentration from initial level of 1500  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  in the chamber with increase of integrated radiation. A regression model for estimating CO<sub>2</sub> consumption by the plant (leaf area = 7,533.4 cm<sup>2</sup>) was expressed with integrated radiation (x) and was suggested as  $y = -0.06234 + 3.671 \cdot x / (2.589 + x)$  ( $R^2 = 0.9966^{***}$ ). The photosynthetic rate of the whole plant measured in the chamber was 3.4  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  under 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  light intensity, which is in-between photosynthetic rates of the leaves in high and low positions. For this reason, some differences between required and supplied CO<sub>2</sub> amounts in greenhouses might occur when depending too much on photosynthetic rates of leaves. Therefore, we can estimate more accurately CO<sub>2</sub> amount required in commercial greenhouses by using CO<sub>2</sub> consumption model of a whole plant obtained in this study in addition to leaf photosynthetic rate.

**Additional key words:** CO<sub>2</sub> supply, leaf position, model, photosynthetic rate

### 서 언

우리나라에서 파프리카는 대형온실에서 고품질, 고수익을 목적으로 최근 재배 면적이 증가하고 있는 인기 작물 중의 하나이다. 고품질 파프리카를 생산하기 위하여 많은 농가에서는 광합성량 극대화를 위한 CO<sub>2</sub> 시비를 하고 있다. 일반적으로 식물에서의 순광합성량은 0-1,000  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  범위에서 CO<sub>2</sub> 농도가 높아질수록 증가하는 것으로 알려져 있다(Mortensen, 1987). 파프리카를 재배하는 대형 시설 농가에서도 광합성량을 증가시키기 위해 주간에 환기를 하지

않는 상태에서 CO<sub>2</sub>를 1,000  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  수준으로 유지하고자 한다(Heissner, 1997; Nederhoff and Vegter, 1994). 그러나 환기는 시설 작물재배에 적합한 온습도 조절을 위해 필수적이며, 환기 시에 시설내의 CO<sub>2</sub>가 외부로 유출되어 CO<sub>2</sub> 농도가 감소하고 광합성량도 감소한다(Ohyama et al., 2008; Tartachnyk and Blanke, 2007). 따라서 적정 CO<sub>2</sub> 공급에 의한 광합성 효율 극대화를 위해서 특정 환경 하에서 작물에 공급되는 CO<sub>2</sub> 량과 실제 작물이 광합성에 이용하는 CO<sub>2</sub> 량이 구분되어야 한다. 또한 광합성 효율 극대화를 위한 최적의 CO<sub>2</sub> 시비를 위해 환경의 변화에 대한 작물체의 CO<sub>2</sub> 소

\*Corresponding author: sjeenv@snu.ac.kr

※ Received 28 December 2010; Accepted 12 April 2011. 이 논문은 농촌진흥청 아젠더 과제(식물생산공장)의 지원으로 수행되었음.

비량이 정밀하게 추정되어야 한다.

지금까지 일사, 온도, 습도 환경과 광합성효율과의 관계에 대한 연구가 보고된 바 있지만(Bruggink and Heuvelink, 1987; Nguyen et al., 2010), 주어진 환경조건에서 식물이 광합성에 이용하는 CO<sub>2</sub>의 정량화에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 일반적으로 작물체 잎의 일부분을 광합성 측정장치로 측정하여 작물체 전체의 광합성량을 추정하는 방법이 광범위하게 이용되어 왔다(Chang et al., 2009; Flexas et al., 2007; Kaipainen and Pelkonen, 2007; Shipp et al., 1998). 그러나 파프리카와 같이 재배기간이 길고 영양생장과 생식생장을 반복하는 생육 특성을 가진 식물체의 경우는 노엽인 하위엽과 신엽인 상위엽 간에 같은 환경조건에서도 광합성능력의 차이가 있어 현재의 측정방법으로는 식물개체의 전체 광합성량을 측정하는데 한계가 있다. 또 다른 광합성 측정 방법으로 환경데이터를 수집하고 추정식을 이용하여 광합성량을 추정하는 방법이 있다(Hogewoning et al., 2010; Koller and Samish, 1964; Thongbai et al., 2010). 이 방법에 의한 광합성 측정 또한 제한된 규모의 실험공간에서는 측정의 정확도가 비교적 높게 나타나지만 대단위 파프리카 재배농가와 같은 대형규모의 온실에는 환기, 확산 등과 같은 이유로 추정 데이터의 신뢰도가 떨어지는 문제점이 있다. 따라서 대단위 파프리카 농가에서 보다 정밀한 CO<sub>2</sub> 소비량 계산을 위해 파프리카 전체의 CO<sub>2</sub> 흡수량이 정밀하게 측정 되어야 한다. 일사에 대한 광합성량 변화에 근거하여 적정 CO<sub>2</sub> 시비를 실시하면 광합성 효율의 극대화는 물론, 과잉 CO<sub>2</sub> 시비에 의한 CO<sub>2</sub> 낭비를 방지할 수 있고 온실가스인 CO<sub>2</sub>의 과다 배출을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 파프리카의 상하위엽의 광합성 속도 차이를 광합성 측정장치를 이용해 조사하고, 광합성 측정용 챔버를 이용한 광합성량 측정치와의 차이를 비교하여 보다 정밀한 파프리카 생육시의 CO<sub>2</sub> 요구도를 추정하고자 하였다. 또한 대형 밀폐 챔버를 이용하여 일사량의 변화에 따른 광합성량 변화를 분석하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 작물재배 및 실험조건

실험은 서울대학교 부속농장(수원, 동경 127°, 위도 37.3°)의 벤로형의 유리온실 내에서 수행되었다. 서울대학교 부속농장의 유리온실에서 암면배지(90cm × 15cm × 7cm)에 정식 후 15주 재배한 파프리카(*Capsicum annuum* L. 'Fiesta')가 실험재료로 사용되었다. 상하위엽의 광합성효율 측정 실험은 온실내의 파프리카 전체 50개체 중 생육을 대표하는

초장, 마디수, 엽수가 유사한 3개체를 선발하여 측정 하였다. 이 중 1개체를 선발하여 아크릴 밀폐 챔버에 넣고 2010년 12월13일부터 16일 까지 4일간 연속하여 식물개체의 CO<sub>2</sub> 소비량 측정 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 파프리카는 초장 163.0cm, 엽수 82, 엽면적 7,533.4cm<sup>2</sup> 이었다.

### 밀폐 챔버를 이용한 CO<sub>2</sub> 소비량 측정장치

파프리카 개체의 CO<sub>2</sub> 소비량 측정을 위하여 광투과율이 96%인 1cm 두께의 투명아크릴을 사용하여 너비 × 폭 × 높이가 100cm × 100cm × 200cm가 되도록 밀폐 챔버를 제작하였다(Fig. 1). 챔버 내의 CO<sub>2</sub>를 1,500μmol·mol<sup>-1</sup> 수준으로 주입 후 식물체의 유무에 따른 CO<sub>2</sub> 농도의 감소를 3시간 동안 측정하여 환기 정도를 확인하였다. 식물체를 기준으로 70cm, 150cm 높이에 RTD 온도센서(PT100, 유니텍상사, Korea)설치 하였고, 공기순환에 의해 챔버 내의 습도를 대표할 수 있는 위치를 선정하여 습도센서(THT-N161, Shinyei, Japan)를 부착하였다. 태양 복사열에 의한 온도상승을 고려하여 챔버의 하부 80cm 높이까지 외벽을 따라 냉각용 동파이프를 설치하였다. 냉각기(DH-003A, 대호냉각기, Korea)를 이용하여 실험기간 중 챔버 내부의 온도를 26°C로 유지하였다. Kitaya et al.(2003)의 연구와 같이 2m<sup>3</sup> 체적의 챔버 내의 공기 순환을 위해 250mm 팬 두 대를 식물체의 아래쪽에서 바깥쪽으로 바람이 불어 챔버 벽을 타고 상승하여 순환이 가능하게 설치하고 공기의 와류를 방지하기 위하여 팬의 속도를 가변저항을 이용하여 조절하였다. 식물의 증산과 호흡에 의한 습도 상승은 순환팬과 제습제(실리카겔)을 이용하여 실험기간 동안 상대습도 70% 수준을 유지하도록 조절하였다. 챔버의 최상단에 일사센서(SQ-110-L10, Apogee, USA)를 설치하여 실험기간 동안 일사량을 측정하였다. CO<sub>2</sub>

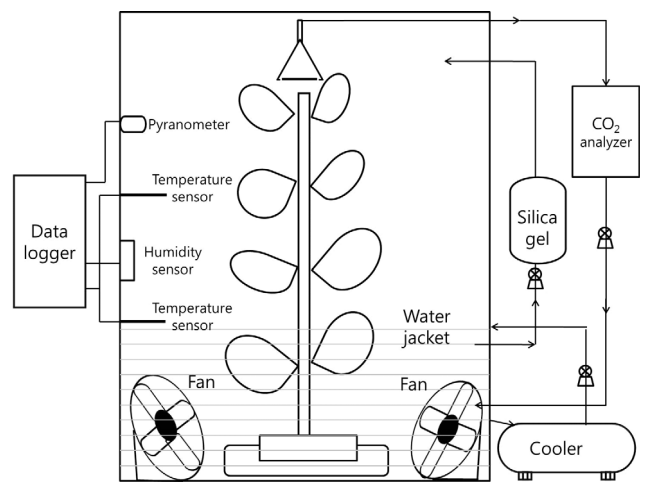
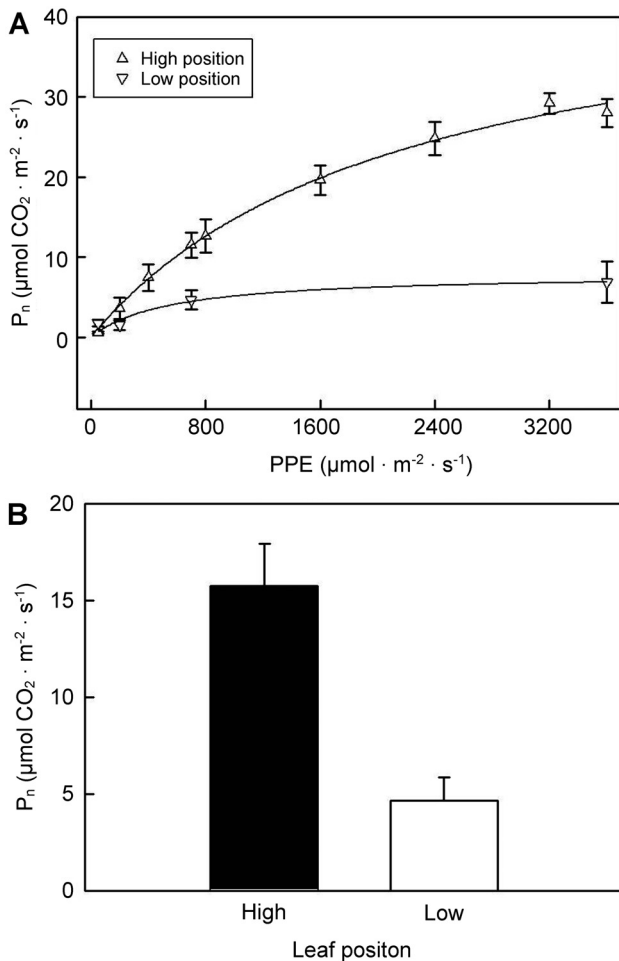


Fig. 1. A schematic diagram of a CO<sub>2</sub> consumption measurement system.

탱크와 자동 공급장치를 이용하여 챔버 내에  $1500\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  농도 수준까지  $\text{CO}_2$  폭로 후  $500\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 까지 적산광에 따른  $\text{CO}_2$ 의 농도감소를 측정하였다. 모든 측정 데이터는 데이터로거(CR1000, Campbell Scientific, USA)를 이용하여 5초 간격으로 수집하였다.

### 엽면적 및 광합성 측정

실험에 사용된 식물체의 엽면적은 실험 종료 후 엽면적 측정기(LI-3100C, LI-COR, USA)를 이용하여 파괴적 조사를 통해 측정하였다. 상하위엽의 광합성효율은 광합성 측정장치(LI-6400, LI-COR, USA)를 이용하여 3개체를 임의 선정 후 각 개체의 하부에서 3번째 마디, 상부에서 3번째 마디의 잎을 각각 3반복 측정 하였다. 광합성 측정장치를 이용하여 외부광에 의한 광합성 측정시  $\text{CO}_2$  농도와 엽온의 설정값은 각각  $0-3,200\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 와  $25.5^\circ\text{C}$  이었다. 밀폐 챔버를 이용한 식물개체의  $\text{CO}_2$  소모량 측정을 위해 챔버에



**Fig. 2.** Comparison of net photosynthesis rates with increase of light intensity (A) and at a light intensity of  $800\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (PPF) (B) between paprika leaves in high and low positions. Vertical bars represent standard error ( $n = 3$ ).

내부의 공기를  $200\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 의 속도로 샘플링 하여  $\text{CO}_2$  농도측정기(LI-820, LI-COR, USA)를 통해 측정하였다.

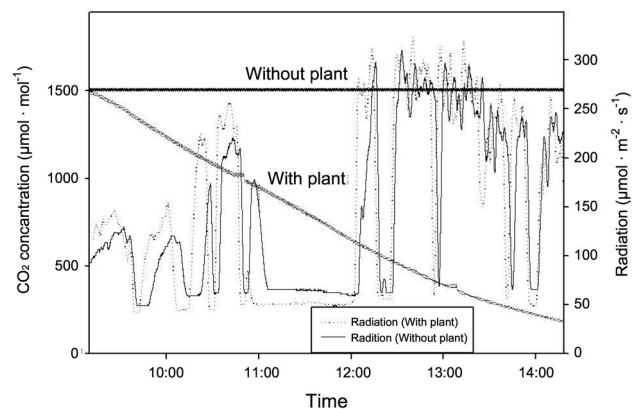
## 결과 및 고찰

### 식물체 높이에 따른 광합성효율 차이

파프리카의 상위엽과 하위엽에서 광도증가에 따른 광합성속도 상위엽에서 증가량이 상대적으로 크게 나타났다. 노엽인 하위엽의 경우  $1,000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 순광합성량이 포화에 이르렀지만 신엽인 상위엽은 광도의 증가에 따른 순광합성량의 증가가 측정 범위인  $3,000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  이상에서도 계속적으로 증가하였다(Fig. 2a). 이와 같은 결과는 Boyer (1970)에 의해 옥수수와 콩에서 상위엽에 비해 하위엽의 광합성효율이 떨어진다는 연구결과와 일치하였다. 파프리카의 경우는 기저부와 최상단부로부터 3마디 떨어진 위치에서의 잎의 광합성량은  $700\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  광도에서 상위엽과 하위엽이 각각  $15\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와  $5\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 3배 차이를 보였다(Fig. 2b). 실험에 사용한 파프리카의 상·하위엽 간 광합성 효율은  $800\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  이하의 광도에서 Fig. 2에서 확인한 측정 결과와 동일한 비율을 보였지만, 그 이상의 광도에서는 하위엽의 광합성량이 감소하여 광량의 증가에 따라 순광합성량의 차이는 더욱 크게 나타났다.

### 파프리카 식물 개체의 $\text{CO}_2$ 소비량 측정

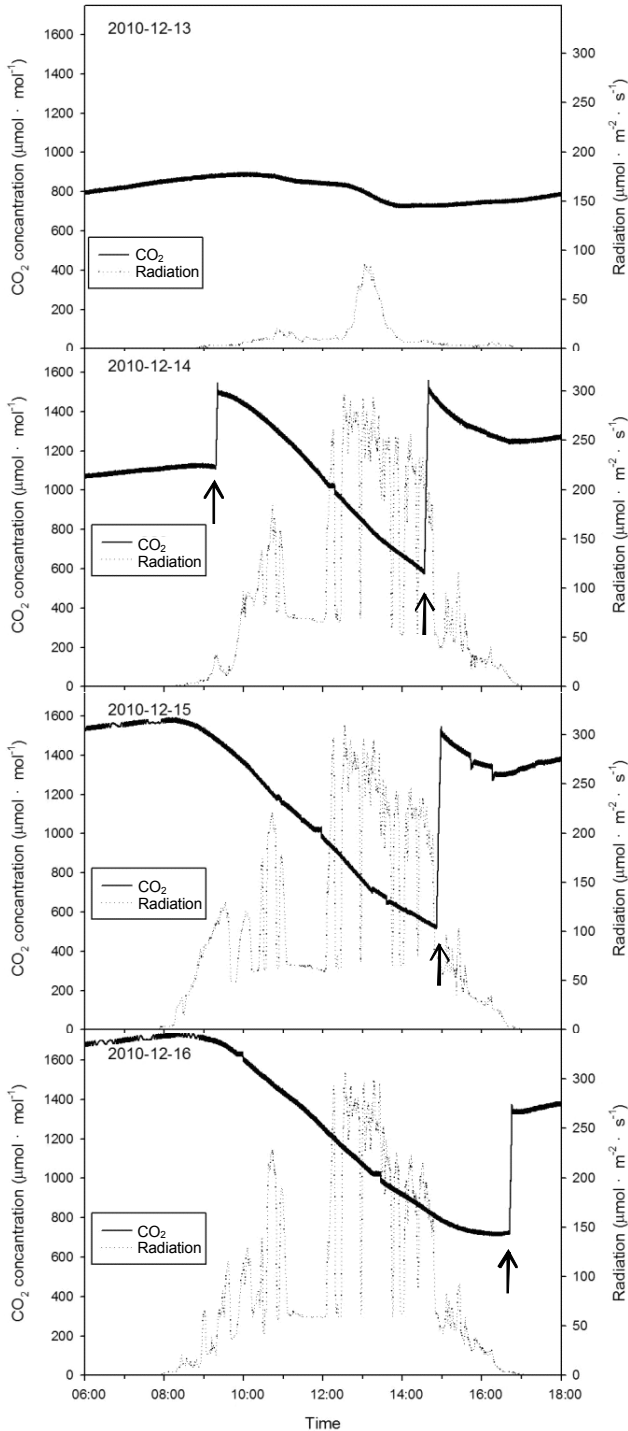
실험에 사용한 밀폐 챔버의 환기 정도를 측정하기 위하여 챔버 내부에  $\text{CO}_2$  농도를  $1,500\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  수준으로 설정한 후 동일한 온도, 습도 조건과 유사한 광조건에서 식물체의 유무에 따른  $\text{CO}_2$  농도 감소율을 측정한 결과 식물체를 넣지 않고 챔버 내부의 공기를 순환 시켰을 경우  $\text{CO}_2$  농도가  $1,500\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  수준으로 유지되었다(Fig. 3). 이 결과에 근거하여 챔버의 환기횟수를 0으로 가정하고, 광합성이 가



**Fig. 3.** Change in  $\text{CO}_2$  concentrations with and without plant in the  $\text{CO}_2$  consumption measurement chamber.

능한 조건에서 파프리카 식물체를 삽입한 챔버 내의 CO<sub>2</sub> 농도 감소를 파프리카에 의한 CO<sub>2</sub> 소비량으로 사용하였다.

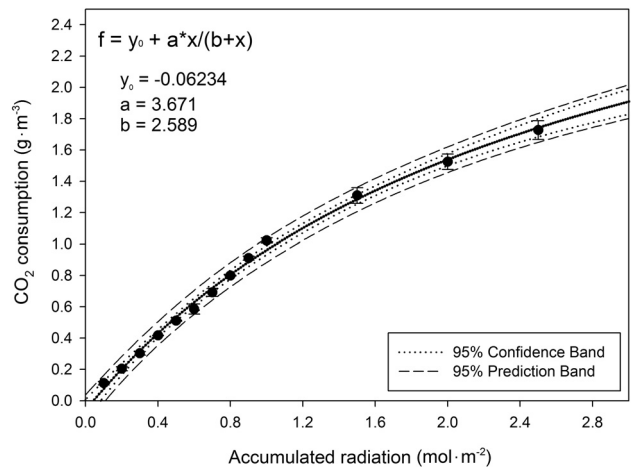
광합성이 가능한 주간에 일사량 변화에 대한 챔버 내의 CO<sub>2</sub>의 농도 변화는 Fig. 4와 같다. 광합성에 필요한 충분한 광이 조사되지 않는 일출 전, 일몰 후에는 식물체의 호흡에



**Fig. 4.** Change in CO<sub>2</sub> concentrations under different radiation for four days in the CO<sub>2</sub> consumption measurement chamber. CO<sub>2</sub> concentration was maintained above 500 μmol·mol<sup>-1</sup> in the chamber. Arrow means CO<sub>2</sub> enrichment.

의해 의해 챔버 내의 CO<sub>2</sub> 농도가 오히려 증가하는 경향을 보였다. 하지만 일출 후 파프리카의 광보상점 이상의 광이 조사되기 시작하면서 챔버 내의 CO<sub>2</sub> 농도는 일사량의 변화에 따라 감소하였다. 2010년 12월 13일 실험의 경우 오전에 광조건의 열악하여 챔버 내의 CO<sub>2</sub> 농도는 감소하지 않았으나 12시 이후 광량이 다소 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 농도가 감소되었다. 실험 결과에서 오전 11시부터 12시 사이에 광도가 일정하게 감소하는 이유는 실험 기간이 겨울이고 태양 고도가 낮아 실험이 이루어지는 위치에서 시설에 의한 차양 때문으로 사료된다. 이 기간 동안의 CO<sub>2</sub> 농도 감소 속도 또한 광에 비례하여 감소하는 경향을 보였다. Mortensen(1987)에 의한 결과에서 CO<sub>2</sub> 농도가 500μmol·mol<sup>-1</sup> 이하로 떨어질 경우 광합성효율도 함께 감소하는 경향이 있다는 점을 고려하여 실험 기간 중 챔버 내부의 CO<sub>2</sub> 농도는 550μmol·mol<sup>-1</sup> 이하가 되지 않도록 적정 시점에서 다시 공급해 주었다.

실험 기간 동안의 일사량을 적산하고 적산광에 대한 파프리카의 CO<sub>2</sub> 소모량은 이전의 다른 연구 결과와 같이 증가하는 경향을 보였다(Choudhury, 1987; Cohen and Fuchs, 1987). 실험에 사용된 파프리카와 같은 생육단계에서 적산광에 따른 CO<sub>2</sub> 소모량은 측정된 일사량과 CO<sub>2</sub> 농도 데이터로부터 광합성량 추정 모델(Johnson and Thorne, 1984)에 따라 다음과 같이 곡선 회귀적( $y = -0.06234 + 3.671 * x / (2.589 + x)$ ,  $R^2=0.9966^{***}$ )으로 증가하는 경향을 보였다(Fig. 5). 실험의 결과로부터 적산광의 증가에 따라 광합성량이 직선적으로 증가하는 것이 아님을 알 수 있었다. 적산광량이 3.0 mol·m<sup>-2</sup> 이상이 되면 파프리카 개체의 광합성량의 증가율이 현저히 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 실제 파프리카의 재배농가에 적용시 CO<sub>2</sub> 소비량과 보광량의 결



**Fig. 5.** Relationship between CO<sub>2</sub> consumption and accumulated radiation in the CO<sub>2</sub> consumption measurement chamber. Vertical bars represent standard error (n = 3).

정에 유용하게 활용될 수 있는 기초자료가 된다.

### 광도에 따른 식물 상·하위엽의 광합성효율과 식물개체 전체의 광합성량 비교

실험에 사용한 파프리카 개체를 파괴적 조사를 통해 엽면적 측정기(LI-3100C)로 측정된 결과 엽면적은 7,533.4cm<sup>2</sup> 이었다. 위의 생육단계에서 광합성측정기를 이용한 상위엽의 광합성율, 하위엽의 광합성율, 그리고 밀폐 챔버를 이용한 광합성율을 실제 파프리카 재배 시설내의 평균 광도인 300μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 수준에서 비교한 결과는 각각 5.5, 2.6, 3.4 μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 이었다(Fig. 6). 300μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 광도에서 상위엽과 하위엽의 광합성율은 52% 이상의 차이를 보였고, 하위엽의 광포화점이 낮으므로 광도가 증가하면 상·하위엽 간의 광합성을 차이는 더욱 증가하는 경향을 보였다. 파프리카와 같이 영양생장과 생식생장을 병행하며 연속적으로 성장하는 식물체의 경우 길이 성장을 많이 하는 생육 특성을 가진다. 따라서 파프리카의 경우 엽면적지수를 이용해 생육단계를 구분한다(González-Dugo et al., 2007). 이번 실험의 결과는 동일한 식물개체에서도 상위엽과 하위엽의 광합성 능력에 차이가 있고, 식물체의 높이에 따른 차이는 직선적인 경향을 보이지 않는다는 Seemann et al.(1987)에 의한 연구 결과와 일치한다. 이러한 이유로 실제 농가에서 CO<sub>2</sub> 시비 시에 단위엽의 광합성 측정에 의해 CO<sub>2</sub> 시비량을 결정하면 큰 오차가 생기게 된다.

300μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 광도범위에서 챔버 내 파프리카의 광합성속도는 3.4μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 이었고, 상위엽과 하위엽에서의 광합성측정기에 의한 데이터와 비교하여 중간 값을 나타내었다. 챔버를 이용한 광합성속도 측정값이 개별 상위엽

보다 하위엽의 광합성속도에 가까운 것은 파프리카 개체가 성장함에 따라 상위엽에 비해 하위엽의 광적응성이 둔감해져 파프리카 개체 전체의 광합성효율이 떨어지기 때문이다. 초장이 커지고 엽면적이 증가할수록 파프리카 개체 전체의 광합성속도는 개별 하위엽의 광합성속도에 가까워진다.

지금까지 연구에 의한 내·외부의 CO<sub>2</sub> 농도차이에 의한 식물체의 CO<sub>2</sub> 소모량 측정 방법으로는 대규모 온실에서의 CO<sub>2</sub> 공급량 계산에서 식물체가 흡수하는 CO<sub>2</sub>와 환기에 의해 손실되는 CO<sub>2</sub>를 정량화하여 구분하기 어려운 단점이 있다. 선행 연구에 의한 식물체의 CO<sub>2</sub> 흡수량 측정방법과는 달리 이번 실험에서와 같은 대형 밀폐 챔버를 이용한 CO<sub>2</sub> 소비량 측정 방법으로 파프리카 개체의 CO<sub>2</sub> 소비량을 측정하면 실제 농가에서 CO<sub>2</sub> 시비 시 공급해야 될 CO<sub>2</sub> 량의 예측이 가능하다. 대형 밀폐챔버를 이용할 경우 파프리카 개체가 요구하는 실제 CO<sub>2</sub>량이 측정가능하므로 재식밀도와 균락에서의 광합성 효율 감소율을 이용하여 계산하면 재배면적에서의 실제 CO<sub>2</sub> 소모량을 예측할 수 있다. 또한 대형 밀폐 챔버에 의한 파프리카 식물개체의 CO<sub>2</sub> 흡수량과 환기율을 고려하여 CO<sub>2</sub> 공급량을 계산하면 최적의 CO<sub>2</sub> 시비량을 계산할 수 있다. 보다 정확한 CO<sub>2</sub> 시비량 추정을 위해 파프리카 생육단계에 따른 광합성량 추정 모델에 대하여 각각의 변수와 실제 농가의 균락상황에 적용 가능한 계수를 데이터베이스화하는 연구가 추가적으로 필요하다고 판단된다.

### 초 록

파프리카의 상하위엽의 광합성 속도 차이를 측정하고, 광합성 측정용 챔버를 이용한 광합성량 측정치와의 차이를 비교하여 보다 정밀한 파프리카 생육시의 CO<sub>2</sub> 요구도를 알아보고자 본 연구를 수행하였다. 광합성측정장치(LI-6400)를 이용하여 위치 별 파프리카의 광합성속도를 측정하였다. 또한 파프리카 개체의 CO<sub>2</sub> 소모량의 정량화를 위하여 환경조절이 가능한 밀폐 챔버를 제작하고, 챔버 내부의 CO<sub>2</sub> 농도의 감소량을 측정하여 식물이 이용한 CO<sub>2</sub>를 정량화하였다. 파프리카의 상위엽과 하위엽에서 광도증가에 따른 광합성속도 상위엽에서 증가량이 상대적으로 크게 나타났다. 제작한 챔버 내부의 CO<sub>2</sub> 농도를 1,500μmol·mol<sup>-1</sup> 수준으로 설정한 후, 일사량 변화에 따른 챔버 내부의 CO<sub>2</sub> 농도를 이용하여 식물체에 의해 소모된 양을 계산하였다. 엽면적이 7,533.4cm<sup>2</sup>인 파프리카의 경우, 적산광(x)에 따른 CO<sub>2</sub> 소모량은 다음과 같은 광합성량 추정 모델식으로 추정되었다:  $y = -0.06234 + 3.671*x/(2.589 + x)$  ( $R^2 = 0.9966^{***}$ ). 300μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 광도범위에서 챔버를 이용한 파프리카의 광합성속도는 3.4

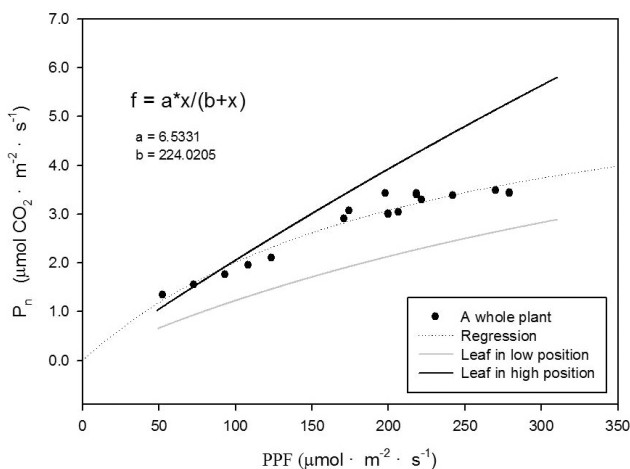


Fig. 6. Comparison of net photosynthesis rate among paprika leaves in high, low positions, and a whole paprika plant in the CO<sub>2</sub> consumption measurement chamber.

$\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  이었고, 상위엽과 하위엽에서의 광합성 측정기에 의한 데이터와 비교하여 중간 값을 나타내었다. 따라서 실제 대규모 농가에서 단위엽의 광합성 측정에 의하여  $\text{CO}_2$  시비량을 계산하면 실제 필요량과 공급량 간에 큰 차이가 발생할 수 있다. 따라서 엽 광합성속도 이외에도 본 연구에서와 같이 챔버를 이용하여 파프리카 식물체 개체가 소비하는  $\text{CO}_2$ 량을 정량화한다면 상업용 온실에 필요한  $\text{CO}_2$  시비량을 정확하게 추정할 수 있다.

**추가 주요어 :** 이산화탄소 공급, 엽위치, 모델, 광합성속도

## 인용문헌

- Boyer, J.S. 1970. Differing sensitivity of photosynthesis to leaf water potentials in corn and soybean. *Plant Physiol.* 46: 236-239.
- Bruggink, G.T. and E. Heuvelink. 1987. Influence of light on the growth of young tomato, cucumber and sweet pepper plants in the greenhouse: Effects on relative growth rate, net assimilation rate and leaf area ratio. *Sci. Hort.* 31:161-174.
- Chang, Z.Q., Q. Feng, J.H. Si, Y.H. Su, H.Y. Xi, and J.L. Li. 2009. Analysis of the spatial and temporal changes in soil  $\text{CO}_2$  flux in alpine meadow of Qilian Mountain. *Environ. Geol.* 58:483-490.
- Choudhury, B.J. 1987. Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. *Remote Sens. Environ.* 22:209-233.
- Cohen, S. and M. Fuchs. 1987. The distribution of leaf area, radiation, photosynthesis and transpiration in a Shamouti orange hedgerow orchard. Part I. Leaf area and radiation. *Agr. Forest. Meteorol.* 40:123-144.
- Flexas, J., A. Diaz-Espejo, J.A. Berry, J. Cifre, J. Galmes, R. Kaidenhoff, H. Medrano, and M. Ribas-Carbo. 2007. Analysis of leakage in IRGA's leaf chambers of open gas exchange systems: quantification and its effects in photosynthesis parameterization. *J. Exp. Bot.* 58:1533-1543.
- González-Dugo, V., F. Orgaz, and E. Fereres. 2007. Responses of pepper to deficit irrigation for paprika production. *Sci. Hort.* 114:77-82.
- Heissner, A. 1997.  $\text{CO}_2$  gas exchange of sweet pepper plants in dependence on irradiance,  $\text{CO}_2$  concentration, air temperature, and vapour pressure deficit: Measurements and model. *Gartenbauwissenschaft* 62:78-90.
- Hogewoning, S.W., G. Trouwborst, J. Harbinson, and W. Van Ieperen. 2010. Light distribution in leaf chambers and its consequences for photosynthesis measurements. *Photosynthetica* 48:219-226.
- Johnson, I.R. and J.H.M. Thornley. 1984. A model of instantaneous and daily canopy photosynthesis. *J. Theoretical Biol.* 107:531-545.
- Kaipainen, E.L. and P. Pelkonen. 2007. Requirements for obtaining maximum indices of photosynthesis and transpiration in attached leaves of willow plants grown in short-rotation forest. *Russ. J. Plant Physiol.* 54:309-313.
- Kitaya, Y., J. Tsuruyama, T. Shibuya, M. Yoshida, and M. Kiyota. 2003. Effects of air current speed on gas exchange in plant leaves and plant canopies. *Adv. Space Res.* 31:177-182.
- Koller, D. and Y. Samish. 1964. A null-point compensating system for simultaneous and continuous measurement of net photosynthesis and transpiration by controlled gas-stream analysis. *Botanical Gazette* 125:81-88.
- Mortensen, L.M. 1987. Review:  $\text{CO}_2$  enrichment in greenhouses. Crop responses. *Sci. Hort.* 33:1-25.
- Nederhoff, E.M. and J.G. Vegter. 1994. Photosynthesis of stands of tomato, cucumber and sweet pepper measured in greenhouses under various  $\text{CO}_2$ -concentrations. *Ann. Bot.* 73:353-361.
- Nguyen, H.T., J.S. Park, T.I. Ahn, J.H. Lee, D.J. Myoung, Y.Y. Cho, and J.E. Son. 2010. Analysis of relationship among growth, environmental factors and transpiration in soilless culture of Paprika plants. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 28:59-64.
- Ohyama, K., T. Kozai, and H. Toida. 2008. Greenhouse cooling with continuous generation of upward-moving fog for reducing wetting of plant foliage and air temperature fluctuations: A case study. *Acta Hort.* p. 321-326.
- Seemann, J.R., T.D. Sharkey, J. Wang, and C.B. Osmond. 1987. Environmental effects on photosynthesis, nitrogen-use efficiency, and metabolite pools in leaves of sun and shade plants. *Plant Physiol.* 84:796-802.
- Shipp, J.L., X. Hao, A.P. Papadopoulos, and M.R. Binns. 1998. Impact of western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae) on growth, photosynthesis and productivity of greenhouse sweet pepper. *Sci. Hort.* 72:87-102.
- Tartachnyk, I.I. and M.M. Blanke. 2007. Photosynthesis and transpiration of tomato and  $\text{CO}_2$  fluxes in a greenhouse under changing environmental conditions in winter: Research article. *Ann. Appl. Biol.* 150:149-156.
- Thongbai, P., T. Kozai, and K. Ohyama. 2010.  $\text{CO}_2$  and air circulation effects on photosynthesis and transpiration of tomato seedlings. *Sci. Hort.* 126:338-344.