

탄산 시비 농도와 시비 시간이 착색단고추 생육에 미치는 영향

강윤임^{1*} · 이시영² · 김학주² · 전희² · 정병룡³

¹원예연구소 원예토양관리팀, ²원예연구소 시설원예시험장, ³경상대학교 농업생명과학대학

Effects of CO₂ Enrichment Concentration and Duration on Growth of Bell Pepper (*Capsicum annuum* L.)

Yun Im Kang^{1*}, Si Young Lee², Hak Joo Kim², Hee Chun², and Byoung-Ryong Jeong³

¹Horticultural Soil Management Team, NHRI, RDA, Suwon 441-440, Korea

²Protected Horticulture Experiment Station, NHRI, RDA, Busan, 618-800, Korea

³Department of Horticulture, Division of Plant Resources and Environment, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

Abstract. We investigated effects of concentration and duration were investigated in order to promote efficiency of CO₂ enrichment in winter. The treatments were conducted with two levels of CO₂ concentration, namely 400 ppm, 700 ppm, two levels of duration, 3 h (9:00-12:00), 6 h (9:00-15:00), and control (non-enrichment CO₂). Fresh weight of leaves increased under longer exposure to CO₂ and higher CO₂ concentration. Fresh weight of stem and root increased under longer exposure to CO₂, but decreased under higher CO₂ concentration. Total dry weight increased under longer exposure to CO₂ and higher CO₂ concentration. Combination treatment of longer exposure to CO₂ and higher CO₂ concentration showed the largest decrease of Root:Shoot dry weight ratio. The 700 ppm×6 h treatment showed higher fruit number and yield than control. The results suggested that the growth under longer exposure to 400 ppm CO₂ was better than that under higher CO₂ concentration.

Key words : CO₂ fertilizer, greenhouse, sink, source

*Corresponding author

서 언

겨울철 온실재배는 보온과 난방에너지 절감을 위해 환기를 최소화하기 때문에 낮 동안 작물에 의해 탄산가스가 소모되어 밀폐된 온실 내 탄산가스 농도는 150ppm이하로 떨어지기도 한다(Nelson, 1998). 탄산가스에서 유래된 탄소는 작물의 기본적인 필수 원소이며(Resh, 1995), 대기 중 낮아진 탄산가스 농도는 루비스코의 카르복실화 과정의 제한요소로 직접적으로 작용하여 광합성을 저해하고 간접적으로는 광호흡을 증가시켜 탄소 동화작용이 감소한다(Sage, 2001). 많은 연구에서 탄산가스 농도가 높아질 경우 순광합성량, 엽면적, 건물량 등이 증가하고 증산, 기공전도도는 감소하는 등 다양한 식물 생리 반응에 영향을 미치며, 근권부와 지상부의 비, 수확기수 등에 변화를 일으키며

작물에 따라 차이를 보인다고 보고되었다(Cure, 1986; Nederhoff, 1992). 작물의 탄산가스 이용 특성은 정오까지 증가하는 경향을 보이고 정오 이후에는 감소한다고 보고되었다(Hennessey 와 Field, 1991).

탄산 시비는 많은 비용을 수반하기 때문에 작물의 탄산가스 이용특성을 고려하여 경제적인 시비 방법을 구명할 필요가 있다. 이와 관련하여 이 연구는 탄산시비 농도와 시비 시간에 따른 작물의 생육반응을 검토하였다.

재료 및 방법

시험작물은 착색단고추(*Capsicum annuum* L. cv. Special)를 이용하여 2005년 8월 29일에 240공 암면 플러그 트레이에 파종하였으며, 9월 20일에

100×100×65mm 암면큐브에 이식하였다. 11월 9일에 직경 21cm, 높이 20cm의 화분에 입상 암면과 펠라이트를 1:1(v/v)으로 혼합하여 채운 후 정식하였다. 2가지 유인을 하였으며, 각 줄기마다 열매를 4개씩 남기고 적과하였다. 각각의 화분에는 dripper를 설치하고 500ml·day⁻¹를 관수하였다. 양액 조성은 네덜란드에서 개발된 착색단고추 전용 조성표를 이용하였다. 정식 전 배양액의 관리 EC는 1.5mS·cm⁻¹였으며, 정식 후에는 2.5mS·cm⁻¹로 관리하였고, 배양액의 pH는 5.5로 관리하였다.

시험시설은 2.0×2.5×2.5m(폭×높이×길이) 크기의 아치형 간이 하우스 5동을 제작, 설치하였으며, 각 시설마다 탄산가스 자동 시비 장치를 설치하였다. 탄산가스 자동 시비장치는 CO₂ 센서(GMW45, VAISALA, Helsinki, Finland), 농도 조절용 컨트롤러(DX9, HANYOUNG, Seoul, Korea), 전자 밸브로 구성되었고 ON-OFF 조절하였다. 탄산가스 공급원은 식음료용 액화탄산가스를 이용하였으며, 착색단고추 재식 위치에 PE 라인을 설치하여 탄산가스가 공급되도록 하였다. 실험 처리는 탄산가스의 공급 설정 농도 수준은 400ppm과 700ppm이었으며, 시비 시간은 09:00-12:00(3h)과 09:00-15:00(6h)로 농도와 시간을 조합한 4 수준과 무처리구로 5 처리하였고, 정식 후 55일간 탄산시비를 하였다. 실제 CO₂ 처리 농도는 CO₂ 센서(Telair 7001, GE, Billerica, MA, USA)를 이용하여 측정하였으며, 측정된 데이터는 데이터로거(HOBO, Onsetcomp, Bourne, MA, USA)를 이용하여 저장하였다. 각 처리별 측정된 CO₂ 농도는 Fig. 1에 나타내었다. 그러나 실제 측정된 탄산가스 농도는 ON-OFF 설정으로 인하여 설정 농도 보다 높게 나타나는 경향을 보였다(Fig. 1).

생육특성은 정식 55일 후 처리별로 4주씩 임의로 선택하여 조사하였다. 임의 추출된 착색단고추의 엽면적은 각 식물마다 LI-3000 엽면적 측정기(LI-COR., Lincoln, NE, USA)를 이용하여 측정하였다. 그리고 잎, 줄기, 과실, 뿌리로 나누어 생체중을 측정한 후 70°C로 72시간을 건조시킨 후 건물중을 측정하였다. 비엽중(Specific leaf weight, mg·cm⁻¹)은 엽면적에 대한 엽건물중의 비로 계산하였다. 또한, 지상부에 대한 근권부의 비율은 총 지상부(잎, 줄기, 과실) 건물중에 대한 뿌리 건물중의 비율로 계산하였다.

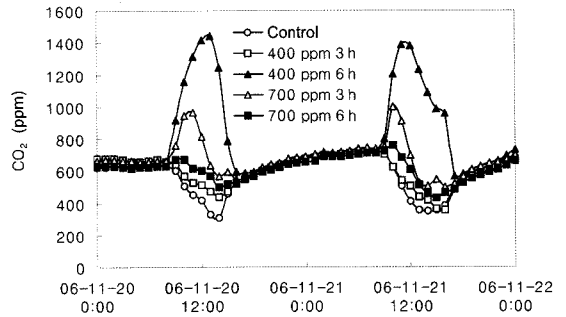


Fig. 1. Time course of average hourly CO₂ concentration. Five treatments included two levels of CO₂ concentration, namely 400 ppm, 700 ppm, two levels of duration, 3 h (9:00-12:00), 6 h (9:00-15:00) and control (non-enrichment CO₂).

측정된 데이터는 SAS(SAS EZ, 2005)를 이용하여 ANOVA 분석을 하였고, 탄산가스 농도와 시간에 대한 개별 효과와 교호 작용을 검토하였다.

결과 및 고찰

대기 중의 탄산가스 농도는 광합성에 직접적으로 영향을 준다. CO₂는 루비스코의 카르복실화 과정의 기질로써 다른 조건 즉, 광과 온도, 영양분 등이 충분한 경우에도 탄산가스가 부족할 경우 제한 요소로 작용하게 된다. 일반적으로 CO₂ 농도가 180ppm으로 떨어지게 되면 광합성 능력은 절반으로 감소한다(Sage, 2001). 낮 동안 겨울철 보온을 위하여 밀폐된 온실의 탄산가스 농도는 150ppm으로 떨어지기도 한다(Nelson, 1998). 본 실험에서 탄산가스를 시비하지 않은 온실에서는 일반 대기 농도 보다 낮은 300ppm까지 떨어지는 것으로 나타났으며(Fig. 1), 이것으로 밀폐된 온실에서 일어나는 자연환기로는 작물이 필요로 하는 탄산가스를 충분히 공급하지 못한다는 것을 알 수 있다.

탄산가스 시비 농도와 시비 시간에 따른 착색단고추의 총 건물생산량은 Fig. 2에 나타내었다. 많은 연구에서 높은 탄산가스 농도는 C₃ 작물의 RUBP carboxylase 활성을 높이고, 광호흡은 감소시켜 작물의 생육과 발달을 위한 탄소 동화산물의 합성을 향상시키는 것으로 나타났다(Mitchell 등, 2000). 탄산가스 처리 농도가 높아질수록 착색단고추의 총 건물생산이 대조구에 비하여 20% 증가하였다. 탄산가스 처리 시간에 따른

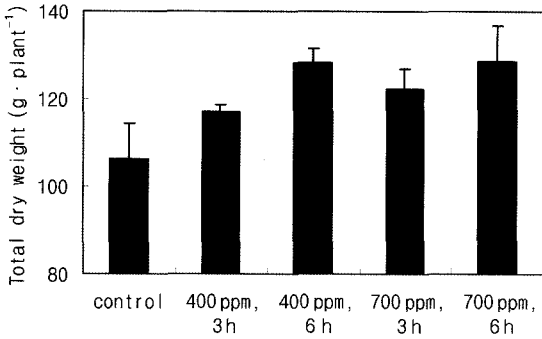


Fig. 2. Effect of CO₂ enrichment concentration and duration on total dry weight of bell pepper at 55 days after transplanting in greenhouse. Total dry weight was composed leaf, stem, root and fruit dry weight. Five treatments included two levels of CO₂ concentration, namely 400 ppm, 700 ppm, two levels of duration, 3 h (9:00-12:00), 6 h (9:00-15:00), and control (non-enrichment CO₂). The bars represent ± standard error of the mean.

착색단고추의 총건물생산은 400ppm과 700ppm 처리 모두에서 3시간 처리보다 6시간 처리구에서 증가하는 것으로 나타났다. 광합성은 24시간 주기성을 가지며, 아침에 증가하고 정오에 최고에 이르며, 그 이후에는 감소하지만 광합성의 주기성은 단일 잎이 포화될 수 있는 높은 광도와 적절한 온도가 주어졌을 때 반응하는 것이라고 하였다(Hennessey 와 Field, 1991). Behboudian과 Lai(1994) 역시 광합성의 효율은 광합성 기간 중 오전에 효율이 좋은 것이라는 가설을 가지고 하루의 광주기(12h)를 3등분(4h)하여 토마토에 탄산시비를 하였으나 오전과 오후에 따른 생육의 차이가 없었으며 4시간 탄산시비를 한 토마토보다 8시간 이상 탄산시비를 한 토마토의 건물 생산량이 증가하였다. 일반적인 온실 재배에서 작물은 상위 잎을 제외하고는 광도가 포화상태가 되는 것이 어려우며, 중위 잎과 하위 잎은 항상 광부족 상태가 될 것이다. 그러므로 작물 군락 전체가 Hennessey와 Field(1991)가 말한 광주기성을 만족시킬 수 있는 환경 조건을 가지는 것은 어렵다. 이것은 무처리에 비하여 탄산가스처리 효과는 있으나 처리 시간에 비하여 농도 수준에 따른 효과가 적은 이유이며, 작물 전체를 볼 때 탄산가스 농도가 높아지더라도 광 등 다른 환경들이 제한 요소로 작용하여 동화 산물의 축적 증가량을 감소시키는 것으로 보인다.

처리별 엽면적은 700ppm 탄산가스 농도와 6시간 시비시간처리에서 증가하였다(Fig. 3). 무처리구의 엽면

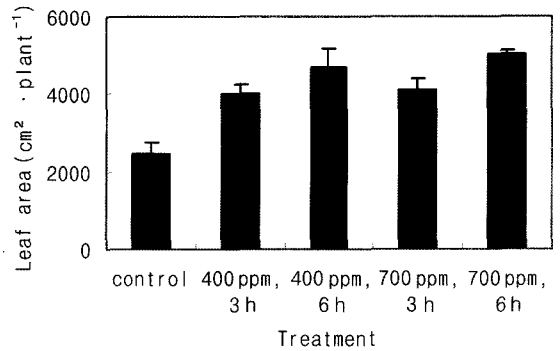


Fig. 3. Effect of CO₂ enrichment concentration and duration on leaf area of bell pepper at 55 days after transplanting in greenhouse. Five treatments included two levels of CO₂ concentration, namely 400 ppm, 700 ppm, two levels of duration, 3 h (9:00-12:00), 6 h (9:00-15:00), and control (non-enrichment CO₂). The bars represent ± standard error of the mean.

적은 2474cm²·plant⁻¹이었으나, 700ppm으로 6시간 처리한 착색단고추의 엽면적은 5013cm²·plant⁻¹으로 약 2배 정도 증가하였다. 엽면적은 작물의 생산성에 큰 영향을 미치는 요소로써(Ranasinghe와 Taylor, 1996), 잎의 생육은 주변 환경에 크게 반응하며, 그 중에 인위적인 탄산가스 공급에 의한 생육반응에 대해서는 많이 알려져 있다. 탄산가스 공급은 잎의 표피조직 세포의 신장을 촉진시키고, 식물 전체 군락의 엽면적과 엽수를 증가 시키고 작물과 품종에 따라 정도의 차이가 있다(Taylor 등, 2001).

탄산가스 시비 농도와 시비 시간에 따른 착색단고추의 잎, 줄기, 뿌리 및 과실의 생체중과 건물중은 Table 1과 같다. 탄산가스 농도가 높아지고 시비시간이 길어짐에 따라 착색단고추의 잎과 과실에서 생체중과 건물중이 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 착색단고추의 줄기와 뿌리의 생체중과 건물중, 지상부에 대한 근권부 비율이 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 4). 잎에서 생성된 동화산물은 일시적으로 잎에서 형태가 바뀌어(Starch 등) 저장되어 있다가 그것을 요구하는 다른 기관(Sink)으로 이동하게 되며 Sink의 탄수화물 활용능력에 따라 분배되어 전체적인 균형을 이루게 된다고 하였다(Farrare 등2000). Sink-Source 균형에는 온도, 광 등 다양한 환경조건이 영향을 미치며, 탄산가스는 광합성의 주요 합성 요인이며, 광합성에 관여하는 효소들의 활성을 결정하기 때문에 탄산가스 역시 Sink-Source 균형에 영향을 미치는 주요한 환경요인이

탄산 시비 농도와 시비 시간이 착색단고추 생육에 미치는 영향

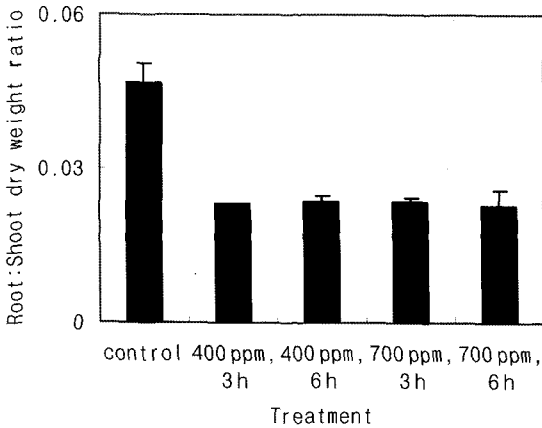


Fig. 4. Effect of CO₂ enrichment concentration and duration on Root:Shoot dry weight ratio of pepper at 55 days after transplanting in greenhouse (Shoot dry weight was composed leaf and stem weight). Five treatments included two levels of CO₂ concentration, namely 400 ppm, 700 ppm, two levels of duration, 3 h (9:00-12:00), 6 h (9:00-15:00), and control (non-enrichment CO₂). The bars represent ± standard error of the mean.

다(Arp, 1991). 많은 문헌들에서 1000ppm 이상의 탄산시비를 하였을 경우 다양한 작물들에서 뿌리부터 과실까지 모든 기관의 생체중과 건물중을 증가시킨다고 보고되었다. 그러나 사탕무, 무와 같이 뿌리 기관이 큰 Sink로 작용하는 경우에는 뿌리 생육의 증가가 확연히 나타나지만(Arp, 1991), 토마토, 면화 등 잎이 전체 식물체에서 차지하는 비율이 높고, 과실을 생산하는 작물에서는 뿌리 생육이 감소하거나 거의 증가하지 않는다(Fierro 등, 1994; Reddy와 Zhao, 2005; Behbou-

Table 2. Effect of CO₂ enrichment concentration and duration on fruit yield of pepper at 55 days after transplanting in greenhouse.

Treatment ^z		No. of fruits (plant ⁻¹)	Fruit weight (fruit ⁻¹)
Control		5.5 a ^y	154.8 a
400 ppm	3 h	6.0 a	139.9 a
	6 h	6.0 a	146.9 a
700 ppm	3 h	6.5 a	138.2 a
	6 h	6.5 a	141.5 a
CO ₂		NS	NS
Hour		NS	NS
CO ₂ ×Hour		NS	NS

^zFive treatments included two levels of CO₂ concentration, namely 400 ppm, 700 ppm, two levels of duration, 3 h (9:00-12:00), 6 h (9:00-15:00), and control (non-enrichment CO₂).

^y Value significantly different at *P*<0.05, using DMRT.

^{NS} Not significant at *P*=0.05.

dian 과 Lar, 1994). 또한, 높은 탄산가스 농도는 착색단고추의 과실 무게를 증가시키고 과실 경도도 증가시킨다(Islam, 1996). 착색단고추는 다른 고추에 비하여 넓은 잎과 용적이 큰 과실을 가지고 있어 많은 양의 동화산물을 필요로 하므로 탄수화물의 활용 능력이 커져 강한 Sink로 작용하고 뿌리나 줄기 등 다른 기관에 비하여 건물 생선이 증가하는 것으로 보인다.

탄산가스 무시비구에서 엽면적과 잎의 생체중, 건물중이 탄산가스 처리구에 비하여 유의하게 적고, 뿌리 생육은 증가한 것으로 나타났다(Fig. 4, Table 1). 식물의 주변에 존재하는 다양한 환경 스트레스는 식물체

Table 1. Effect of CO₂ enrichment concentration and duration on fresh and dry weight of pepper plants at 55 days after transplanting in greenhouse.

Treatment ^z	Fresh weight (g·plant ⁻¹)				Dry weight (g·plant ⁻¹)				
	Leaves	Stems	Roots	Fruits	Leaves	Stems	Roots	Fruits	
Control	122.6 b ^y	145.5 a	18.9 a	851.9 a	17.0 b	32.2 a	2.29 a	55.5 b	
400 ppm	3h	151.2 b	145.4 a	16.4 a	839.8 a	25.4 a	32.4 a	1.41 b	51.2 b
	6h	176.7 ab	159.1 a	18.4 a	857.5 a	31.4 a	34.7 a	1.57 b	60.6 ab
700 ppm	3h	151.3 b	130.4 a	13.8 a	865.6 a	24.2 a	35.1 a	1.39 b	58.3 ab
	6h	208.3 a	132.4 a	17.9 a	921.1 a	31.6 a	32.7 a	1.39 b	61.6 a
CO ₂	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
Hour	*	NS	NS	NS	*	NS	NS	*	
CO ₂ ×Hour	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	

^zFive treatments included two levels of CO₂ concentration, namely 400 ppm, 700 ppm, two levels of duration, 3 h (9:00-12:00), 6 h (9:00-15:00), and control (non-enrichment CO₂).

^y Value significantly different at *P*<0.05, using DMRT.

^{NS, *} Not significant and significant at *P*=0.05.

내에는 오존을 형성시키고 생육에 영향을 미친다 (Grulke 등, 2002). 앞선 연구들에서 오존은 잎의 생육을 감소시키고 뿌리의 호흡과 생육을 증가시킨다고 하였다(Grantz 등, 2003). 하지만 높은 탄산가스에 노출되면 오존의 영향을 상쇄시키고 잎의 생장을 증가시킨다는 보고가 있다(Reid와 Fiscus, 1998). 오존에 대한 증거는 조사되지 않았지만 이와 같은 이유로 대조구의 뿌리 생육이 탄산가스 처리구에 비하여 증가하였다고 추측된다.

Table 2에서 탄산가스 농도와 시비시간에 따른 과실의 착과수와 과별 무게를 나타내었다. 탄산가스 처리 농도가 높아지고, 시비시간이 길어질수록 총 수량이 증가하는 것으로 나타났으며(Table 1), 무처리구에 비하여 착과량 또한 증가하는 것으로 나타났으나 통계적인 유의차는 없었다. 과실의 착과에 영향을 미치는 요소로서 첫 번째는 호르몬으로 많은 작물에서 옥신과 에틸렌의 합동작용에 의하여 결정되며, 두 번째는 동화산물의 공급과 관계가 있다(Marcelis 등, 2004). 낙화나 낙과는 착색단고추를 포함한 많은 작물에서 수량을 결정하는 중요한 요인이다(Marcelis 등, 2004). Alnoi 등(1994)은 동화산물을 꽃을 발달시키는 중요 요인으로 보고하였으며, 꽃에서 탄수화물 함량이 감소하게 되면 낙화한다고 하였다. 탄산가스의 인위적인 공급은 꽃에서의 탄수화물 함량을 증가시키고, 고온스트레스에 의한 낙화를 경감시킨다고 하였다(Alnoi, 2001).

적 요

본 연구는 착색단고추의 겨울철 시설재배시 탄산가스 시비의 이용효율을 높이기 위한 시비 농도 및 시간을 구명하기 위해 수행하였다. 탄산가스의 공급 설정 농도 수준은 400ppm과 700ppm이었으며, 시비 시간은 09:00-12:00(3h)과 09:00-15:00(6h)로 농도와 시간을 조합한 4 수준과 무처리구를 합하여 5 처리를 하였고, 정식 후 55일간 처리하였다. 그 결과 전반적으로 탄산가스 농도가 높고, 시비시간이 길어질수록 전반적인 생육이 증가하였다. 그러나 겨울철에는 광도가 제한 요소로 작용하기 때문에 탄산가스의 높은 농도보다는 시비 시간이 길어질수록 생육이 더 증가하였다. 그러므로 광이 적은 겨울철에는 높은 농도의 이산화탄소를 짧은 시간 시비하는 것보다 낮은 농도로 긴 시

간 시비하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

주제어 : 공급부, 온실, 수요부, 탄산가스

인 용 문 헌

- Aloni, B., L. Karni, Z. Zaidman, and A.A. Schaffer. 1996. Changes of carbohydrates in pepper (*Capsicum annuum* L.) flowers in relation to their abscission under different shading regimes. *Annals of Botany* 78:163-168.
- Aloni, B., M. Peet, M. Pharr, M. Pharr, and L. Karni. 2001. The effect of high temperature and high atmospheric CO₂ on carbohydrate changes in bell pepper (*Capsicum annuum*) pollen in relation to its germination. *Physiologia Plantarum* 112:505-512.
- Arp, W.J. 1991. Effects of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO₂. *Plant, Cell and Environment* 14:869-875.
- Behboudian, M.H. and R. Lar. 1994. Carbon dioxide enrichment in 'Viroso' tomato plant : responses to enrichment duration and to temperature. *HortScience* 29(12): 1456-1459.
- Cure, J.D. 1986. Crop responses to carbon dioxide doubling : a literature survey. *Agricultural and Forest Meteorology* 38:127-145.
- Fierro, A., N. Tremblay, and A. Gosselin. 1994. Supplemental carbon dioxide and light improved tomato and pepper seedling growth and yield. *HortScience* 29(3):152-154.
- Farrar, J., C. Pollock, and J. Gallagher. 2000. Sucrose and the integration of metabolism in vascular plants. *Plant Science* 154:1-11.
- Ferris, R. and G. Taylor. 1994. Stomatal characteristics of four native herbs following exposure to elevated CO₂. *Annals of Botany* 73:447-453.
- Ferris, R., M. Sabatti, E. Miglietta, R.E. Mills, and G. Taylor. 2001. Leaf area is stimulated in *Populus* by free air CO₂ enrichment (POPFACE), through increased cell expansion and production. *Plant, Cell and Environment* 24:305-315.
- Grantz, D.A., V. Silva, M. Toyota, and N. Ott. 2003. Ozone increases root respiration but decreases leaf CO₂ assimilation in cotton and melon. *Journal of Experimental Botany* 54:2375-2384.
- Grulke, N.E., H.K. Preisler, C. Rose, J. Kirsch, and L. Balduman. 2002. O₃ uptake and drought stress effects on carbon acquisition of ponderosa pine in natural stands. *New Phytologist* 154:621-631.
- Hennessey, L.T. and C.B. Field, 1991. Circadian rhythms in photosynthesis. *Plant Physiol.* 96:831-836.
- Islam, S., T. Matsui, and Y. Yoshida. 1996. Effect of

- carbon dioxide enrichment on physico-chemical and enzymatic changes in tomato fruits at various stages of maturity. *Scientia Horticulturae* 65:137-149.
14. Marcelis, L.F.M., E. Heuvelink, L.R. Baan Hofman-Eijer, J. Den Bakker, and L.B. Xue. 2004. Flower and fruit abortion in sweet pepper in relation to source and sink strength. *Journal of Experimental Botany* 55:2261-2268.
 15. Minchin, P.E.H., M.R. Thorpe, J.F. Farrar, and O.A. Koroleva. 2002. Source-sink coupling in young barley plants and control of phloem loading. *Journal of Experimental Botany* 55:168-1676.
 16. Mitchell, R.A.C., J.C. Theobald, M.A.J. Parry, and D.W. Lawlor. 2000. Is there scope for improving balance between RuBP-regeneration and carboxylation capacities in wheat at elevated CO₂. *Journal of Experimental Botany* 51:391-397.
 17. Nederhoff, E.M., A.A. Rijdsdijk, and R. Graaf. 1992. Leaf conductance and rate of crop transpiration of greenhouse grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by carbon dioxide. *Scientia Horticulturae* 52:283-301.
 18. Nelson, P.V. 1992. Greenhouse operation and management. 5th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. p. 375-376.
 19. Ranasinghe, S. and G. Taylor. 1996. Mechanism for increased leaf growth in elevated CO₂. *Journal of Experimental Botany* 47(296):349-358.
 20. Reid, C.D. and E.L. Fiscus. 1998. Effects of elevated [CO₂] and/or ozone on limitations to CO₂ assimilation in soybean (*Glycine max*). *Journal of Experimental Botany* 49:885-895.
 21. Reddy, K.R. and D. Zhao. 2005. Interactive effects of elevated CO₂ and potassium deficiency on photosynthesis, growth, and biomass partitioning of cotton. *Field Crops Research* 94:201-213.
 22. Resh, H.M. 1995. Hydroponic food production : a definitive guidebook of soilless food-growing methods. 5th ed. Woodbridge Press Publishing Company. p. 32-34.
 23. Sage, R.F. and R.C. John. 2001. Effects of low atmospheric CO₂ on plants : more than a thing of the past. *Plant Science* 6(1):18-24.
 24. Taylor, G., R. Ceulemans, R. Ferris, S.D.L. Gardner, and B.Y. Shao. 2001. Increased leaf area expansion of hybrid poplar in elevated CO₂ from controlled environments to open-top chambers and to FACE. *Environmental Pollution* 115:463-472.