

## 오존 감수성 및 저항성 고추 품종의 생리생태 변화

윤성철

선문대학교 응용생물과학부 생물자원전공  
(2004년 5월 11일 접수, 2004년 7월 28일 수리)

### The Ecophysiological Changes of *Capsicum annuum* on Ozone-Sensitive and Resistant Varieties Exposed to Short-Term Ozone Stress

Sung-Chul Yun (Department of Applied Biological Sciences, Sun Moon University, Asan 336-708, Korea)

**ABSTRACT** : Ozone effects were studied by plant growth chamber to evaluate the impact of ozone ( $O_3$ ) on the physiology of two hot pepper, *Capsicum annuum* L., cultivars, 'Dabotab' and 'Buchon'. Forty-day old plants with 5~7 leaves were exposed to  $O_3$  of <20 and 150 nL/L for 8 h/d for 3 days. Net photosynthesis and stomatal conductance were measured and foliar injury was described. Foliar damage due to the treated  $O_3$  was different from the varieties. 'Dabotab' was most sensitive to  $O_3$  and 'Buchon' was resistant. Symptom of ozone damage on the leaves was bifacial necrosis. Decreases of net photosynthesis by  $O_3$  were 56% and 40% on 'Dabotab' and 'Buchon', respectively. Decreases of stomatal conductance by  $O_3$  were 66% and 63% on each variety.  $O_3$  damage on net photosynthesis was started at the low levels of light on the two hot peppers. In addition, assimilation-internal  $CO_2$  concentration curves were not different from the two varieties. In conclusion,  $O_3$  closed the stomata and decrease net photosynthesis on hot peppers regardless of the ozone sensitivity on leaf injury, but the difference of ecophysiological responses between the two varieties was not found clearly.

**Key words**: ozone, hot pepper, net photosynthesis, leaf injury, stomatal conductance.

## 서 론

우리나라의 대기권 오존 오염은 수도권의 경우 이미 10여 년 전부터 식생을 위협할 정도로 심각하며<sup>1)</sup>, 특히 최근 3~4 년 동안 경기도 남부 지역으로 오염이 급격히 증가, 확산되고 있을 뿐만 아니라, 일부 지역을 제외한 전국의 오존 수준이 식생의 만성적 피해가 우려될 정도로 심각한 상황이다<sup>2)</sup>.

오존에 의한 식물 피해는 생리적, 생화학적 손상에 의해 잎에서 피사와 같은 전형적인 피해 증상이 급성적으로 나타나거나, 뚜렷한 가시적 피해 없이 생육기간 전반에 걸친 광합성 저해에 따른 생육저해나 수확량 감소와 같은 만성적 피해가 발생하기도 한다<sup>3)</sup>. 특히 오존에 의한 광합성 감소는 기공개폐 기작의 손상이거나<sup>4)</sup> 이산화탄소를 고정하는 엽육세포의 광합성 능력저하<sup>5)</sup>에 기인하므로 가시피해의 정도와 무관하게 발생할 수도 있다.

특히, 벼 다음으로 경제적 중요성이 높은 고추의 오존 피

해는 단기간의 잎의 가시피해 증상 위주의 보고<sup>6)</sup>만 있으며 오존에 의한 생리생태적 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 고추의 생산성을 가능할 수 있는 잎에서 발생하는 오존에 따른 광합성 능력의 저해를 가시피해 정도와 상호 비교함으로써 오존 피해를 다각적으로 연구 분석할 필요가 있다. 잎에서 가시적 피해는 단기적으로 높은 농도의 오존 노출에 의해 주로 나타나며, 대상 작물 및 품종의 오존에 대한 저항성, 감수성을 구별하는데 가장 중요한 표현형이다.

오존은 전자전달계 과정<sup>7)</sup> 혹은 세포막 투과성 및 구조<sup>8)</sup>에도 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 가스 교환 측정 큐벳 내부의 이산화탄소 농도를 임의로 조정하면서 광합성 변화를 나타내는 곡선(A-Ci, Assimilation-internal  $CO_2$  concentration)은 오존 등의 스트레스가 잎 내부의 광합성에 관련된 동화효소의 파괴를 나타내는 지표로 유용하게 쓰인다<sup>9,10)</sup>. A/Ci curve가 오존에 의해 변한다면, 그것은 초기 기율기 감소이거나 혹은 최대 광합성량의 감소로 나타날 수 있는데<sup>11,12)</sup>, 초기 기율기 변화는 quantum yield 및 rubisco 효소 파괴에 의한 광합성의 감소를 의미하고, 최대 광합성량의 변화는 기공전도도에 따른 광합성 억제를 의미한다.

\*연락처:

Tel: +82-41-530-2282 Fax: +82-41-530-2917

E-mail: scyun@sunmoon.ac.kr

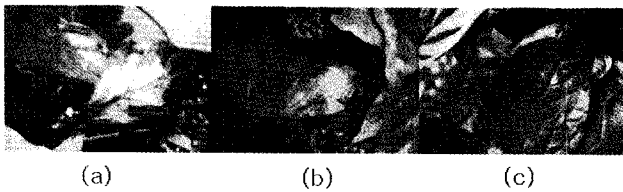


Fig. 1. Various ozone damages on the leaves of hot peppers. Bilateral necrosis and browning symptoms were severe (a), intermediate (b), and mild (c). Those symptoms were found at 3 days after ozone fumigation at 150 nL/L between 9:00 and 17:00 h.

본 연구는 오존으로 인한 고추 잎의 가시적 피해 증상뿐만 아니라 광합성, 기공 전도도 등 생리적 기능의 저해를 측정함으로써, 오존에 의한 고추의 피해를 보다 면밀하게 분석하고자 하였다. 특히, 광합성의 저해가 가시피해에 의한 감소인지, 기공 닫힘에 의한 이산화탄소 공급의 감소인지, 아니면 동화작용에 관여하는 효소활성의 억제인지를 알아보려고 하였다. 즉, 단기간의 고농도 오존에 따른 고추 잎에서의 피해 반응으로 오존에 대한 저항성, 감수성 품종을 나누고, 상이한 반응을 생리생태적 변화로 설명하고자 연구를 실시하였다.

## 재료 및 방법

### 오존노출 시스템

두 개의 식물생장상이 사용되었다. 생장상 내부의 광원은 3과장 형광등이었고 생장상 내부의 온도와 습도는 각각  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 와 60~80% 상대습도로 유지하였다. 방전관식 오존 발생 장치에서 만들어진 오존은 가스폭로 라인을 통해 공기와 섞여 생장상 내부로 유입시켰다. 오존 농도는 생장상 내부의 테프론 샘플 라인을 통해 자외선 흡광 오존 측정기(Model 400E, API, USA)로 측정하였고, 측정기 내부에 설치된 Data logger를 통해 1분 간격으로 기록되었다. 또한 PID control 방식의 자동제어 시스템을 통해 목표 오존 농도에서 5% 내외로 정밀하게 조정되었다.

### 식물체 준비

실험에 사용된 고추 식물체는 다보탑, 부춘 그리고 포청천 세 가지 품종이었는데, 오존 노출 24시간 전에 생장상에 미리 배치하여 순화시켰다. 처리 오존 농도는  $150 \pm 20$  nL/L로 3일간 매일 8시간씩 (9:00~17:00 h)이었다. 식물체는 25구 상업용 연결포트에 원예용 상토와 버미큘레이트를 각각 3:1(v:v)로 혼합한 토양에서 고추를 재배하였다. 실험에 사용된 식물체는 파종 후 약 45일 된 것으로서 5~7개의 잎이 완전히 전개된 것을 사용하였다.

### 광합성 측정

순광합성(Net photosynthesis)과 기공 전도도(Stomatal conductance) 측정을 위해서 Li-Cor 6400 광합성 측정 장치(Li-

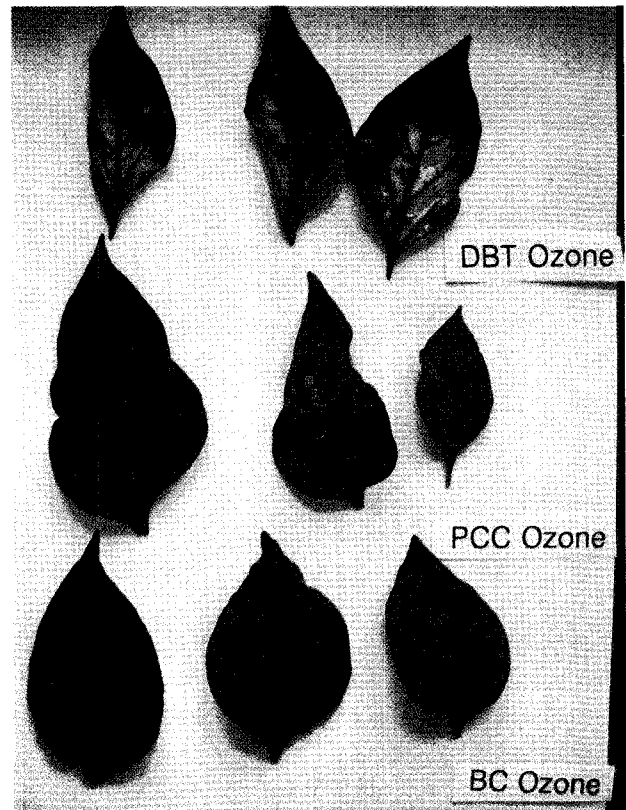


Fig. 2. Comparison of the sensitivity to ozone on the hot pepper leaves. 'Dabotab' had severe symptoms after 2 days of the ozone fumigation. Small spots were occasionally found on 'Buchon' leaves. 'Pochungchun' could be the intermediate variety of ozone symptom.

Cor, Lincoln, NE)로 가스교환 속도를 측정하였다. 측정은 오존을 처리한 직후와 오존 처리 24시간 이후에 실시하여 오존 처리 직후와 24시간 이후 회복을 알아보았다. 측정 잎은 2 cm × 3 cm 크기의 광합성 측정 큐벳에서 측정하였고, 광원 light emitting diode (LED) 인공광으로  $1,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 조절하였으며, 공급된 이산화탄소의 농도는 400  $\mu\text{L}/\text{L}$ , 그리고 큐벳의 온도는  $25^\circ\text{C}$  였다. 세 품종에 대해서 처리 별로 각각 5개의 잎이 측정하였다.

광 강도 변화에 따른 광합성 속도는 측정 큐벳의 광(photo-synthetically active radiation, PAR)을 1000, 600, 400, 200, 100, 0  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  6단계로 광 강도를 점차 줄이면서 측정하였다. 측정 큐벳의 조건은 400  $\mu\text{L}/\text{L}$   $\text{CO}_2$ ,  $25^\circ\text{C}$  온도, 그리고 30~60%의 상대습도를 유지하였다. 광합성 측정 장치에 부착된  $\text{CO}_2$  주입 시스템(Li-Cor 6400-01, Lincoln, NE)은 액체  $\text{CO}_2$ 를 사용하여 측정 큐벳 내로 공급되는 이산화탄소 농도의 변화에 따른 광합성량을 측정하였다. 큐벳 내의 이산화탄소 농도는 600, 400, 200, 100, 0  $\mu\text{L}/\text{L}$   $\text{CO}_2$ 로 조절하였다. 측정 큐벳의 조건은  $1,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  PAR,  $25^\circ\text{C}$  온도, 그리고 30~60%의 상대습도로 유지하였다. 잎의 가시적 피해는 무처리와 비교하여 오존처리에서 발생된 잎의 이상증상을 자세히 육안으로 비교 관찰하였다. 피해조사는 오존 처리 시작 후 3일,

7일째에 실시하였다.

**결과 및 고찰**

**고추의 가시피해 및 저항성, 감수성 품종 선발**

오존 처리에 의해 고추 잎에서 발생한 피해 양상은 초기에는 수침상(水浸像)이 나타나다가 1~2일이 지난 후 잎의 양쪽 모두 심각한 갈색의 썩음 증상이 나타났다. 피해 증상은 심할 경우 오존 처리 2일째부터 발생하였으며, 가시피해가 뚜렷한 3일까지 피해의 면적이 서서히 진전되었다(Fig. 1).

특히 공시된 세 품종의 가시적 피해 정도는 품종별로 상이하였는데, 오존에 민감하여 잎에서 가시피해가 두드러졌던 품종은 다보탑이었으며, 그 다음은 포청천 그리고 부춘은 거의 가시적 피해 찾을 수 없을 정도로 오존 처리에 저항성의 반응을 보였다(Fig. 2). 오존 피해에 대한 품종 간의 저항성 판단 기준은 대부분의 경우 단기간 고농도의 오존 처리 후 발생하는 가시피해의 양이다<sup>5,13)</sup>. 따라서 다보탑은 오존에 대한 감수성 품종이고, 부춘은 상대적으로 오존 저항성 고추 품종

으로 구분할 수 있다.

**오존 처리에 따른 저항성 및 감수성 고추의 생리생태적 반응**

단기간의 고농도 오존 처리에 따른 잎의 반응으로 고추 품종의 저항성과 감수성 품종을 구분한 후 오존 처리에 따른 잎 내부의 생리생태적 기능저하와 품종간 차이를 구명함으로써 고추에서 오존에 대응하는 저항성 기작을 설명하고자 하였다. 오존 감수성과 상관없이 두 가지 고추 품종 모두에서 오존 처리에 따른 광합성의 감소(Fig. 3)와 기공 전도도의 감소(Fig. 4)는 대단히 뚜렷하고 통계적으로 유의하지만, 고추 저항성과 감수성 품종 간에는 오존 피해의 정도가 유의하지 않은 수준의 차이였다(Fig. 3, 4). 오존 처리에 따른 광합성 저해 정도는 콩에서의<sup>14)</sup> 50~60% 감소와 거의 비슷한 뚜렷한 생리생태적 피해를 고추에서도 보였다. 오존은 기공을 통해 식물체에 유입되므로 잎의 기공전도도의 변화를 통한 오존 저항성 기작은 매우 중요하다. 콩에서 단기간의 고농도 오존 처리는 저항성 품종의 기공을 닫는 기작으로 보고된 바 있다<sup>15)</sup>. 콩 품종의 경우 오존 처리에 따른 기공 전도도의 상이한

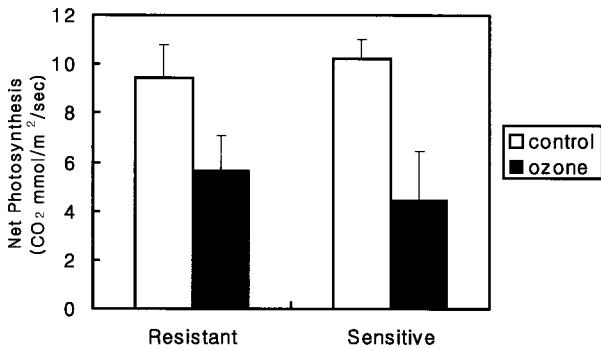


Fig. 3. Changes in net photosynthesis ( $P_{net}$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ ) in the sensitive and resistant varieties of hot peppers at the last day of fumigation with 150 nL/L ozone. Net photosyntheses were determined at 1,000  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$  light, 400  $\mu\text{mol}$   $\text{CO}_2$ , 25°C in the controlled measurement chamber.

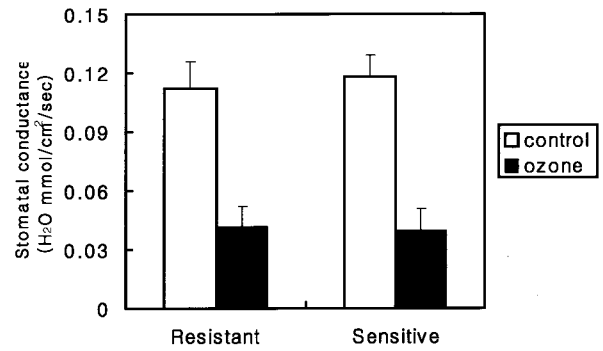


Fig. 4. Changes in stomatal conductance ( $g_s$   $\text{mmol}/\text{m}^2/\text{sec}$ ) in the sensitive and resistant varieties of hot peppers at the last day of fumigation with 150 nL/L ozone. Stomatal conductances were determined at 1,000  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$  light, 400  $\mu\text{mol}$   $\text{CO}_2$ , 25°C in the controlled measurement chamber.

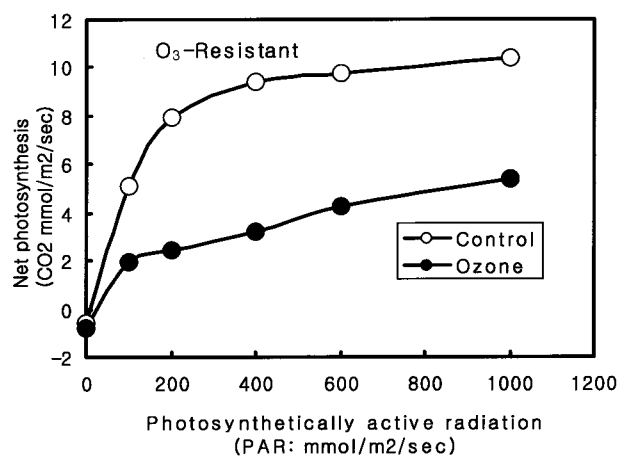
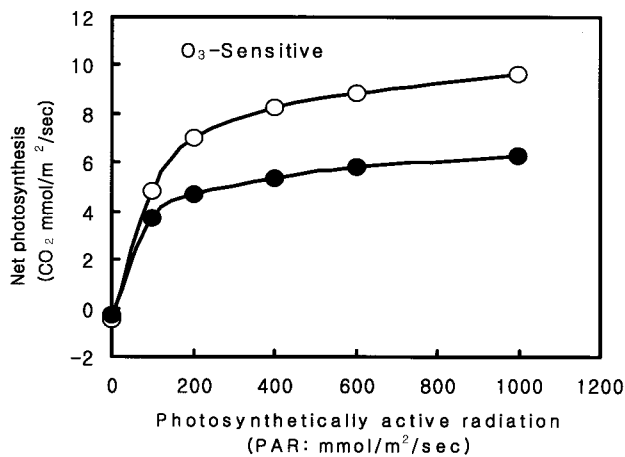


Fig. 5. Effect of ozone on the response of photosynthesis to variation in photosynthetically active radiation (PAR) of the two hot-pepper varieties. Solid circles were ozone treated and open circles were untreated.

반응이 저항성과 감수성 품종을 나눌 수 있는 기작으로 설명되었으나<sup>14)</sup>, 본 실험에서 오존에 상이한 민감도를 갖는 두 고추 품종 간에 오존으로 인한 뚜렷한 기공반응의 차이는 없었다.

광 강도 변화에 따른 광합성 속도 커브는 포화광 강도에 서 오존 민감 정도가 다른 품종 간의 광합성 능력을 비교할 수 있으므로 품종 간의 최대 광합성 차이를 알 수 있다. 두 품종 공히 오존 처리는 무처리에 비해 뚜렷한 광합성 저해가 낮은 광 강도에서부터 시작됨을 알 수 있었고 결국 오존 피해는 광 포화점의 저해를 보여주고 있다(Fig. 5). 그런데, 가시 피해가 심했던 다보탑이 오존에 따른 광합성 저해도 심하게 나타나리라 예상하였으나 저항성 품종인 부춘과 큰 차이를 볼 수 없었으므로, 품종 간의 가시피해와 광합성능 간에는 상관성이 없었다.

Fig. 6에서 나타나듯이 두 가지 품종 모두 오존 처리에 따라 곡선의 기울기는 차이가 없는 것으로 미루어보아 rubisco 활성의 저해나 quantum yield 등 A-Ci curve로 알아낼 수 있는 오존에 의한 변화를 거의 볼 수 없었다. 즉, 저항성 및 감수성 고추 품종 모두에서 광합성 암반응의 오존 피해는 발생하지 않는 것으로 판단된다.

고추 잎에서 여러 가지 신호 전달 반응에 의한 내부의 생리적 변화로 급격한 피사 반응이 일어날 수 있으리라 여겨진다. 그러나 본 연구에서 가장 중요한 점은 고추 잎에서의 전형적인 오존 가시피해 증상이 있건 없건 오존은 광합성 속도 및 기공 전도도를 뚜렷이 감소시키는 결과를 보였으며, 이러한 결과는 궁극적으로 수량 감수가 초래될 것으로 추정된다.

요 약

공시된 세 품종의 고추에 대한 단기간의 오존 처리로 잎에서 나타나는 전형적인 증상은 갈색의 피사 반응이었으며, 피사가 심했던 오존 감수성인 다보탑과 같은 농도에서 피사가 전혀 없었던 부춘 품종을 오존 저항성 품종으로 판단되었다. 고추의 두 품종에서 오존 처리에 의해 광합성 및 기공 전도도 등의 생리생태적 저해가 뚜렷이 나타났다. 그러나 잎에서

가시피해의 정도와 생리생태적 저해 정도와의 상호 연관성으로 고추에서의 오존 저항성 기작을 설명하고자 하였으나 생리생태적 반응으로 잎에서 발생하는 오존 저항성의 기작을 설명할 수 없었다. 다만, 고추에서 오존 처리에 의한 광합성 감소는 뚜렷한 기공전도도 감소와 명반응에서 광합성 기구들의 손상에 기인한다고 여겨진다. 그러나, 암반응에서 생화학적 반응을 설명할 수 있는 A-Ci curve 상에서는 오존 처리에 따른 효과를 찾을 수 없었다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 지역대학우수과학자 지원사업(과제번호 : R05-2003-000-11104-0)의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Yun, S. C., Park, E. W. and Jang, Y. K. (1999) Tropospheric ozone patterns in the metropolitan Seoul area during 1990~1997 using two ozone indices of accumulation over the threshold concentrations, *J. Kor Soc Atoms. Environ.* 15, 429-439.
2. Yun, S. C. and Kim, B. S. (2004) Tropospheric ozone pollution in Korea during 1998-2002 using two ozone indices for vegetation protection, *Kor. J. Agri. For. Meteorol.* 6, 38-48.
3. USEPA (1996) Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants, EPA-600/P-93/004. National Center for Environmental Assessment.
4. Reich, P. B., Schoettle, A. W., Raba, R. M. and Amundson, R. G. (1986) Response of soybean to low concentration of ozone: I. Reductions in leaf and whole plant net photosynthesis and leaf chlorophyll content, *J. Env. Qual.* 15, 31-36.
5. Sheng, W. S., Chevone, B. I. and Hess, J. L. (1993) Pho-

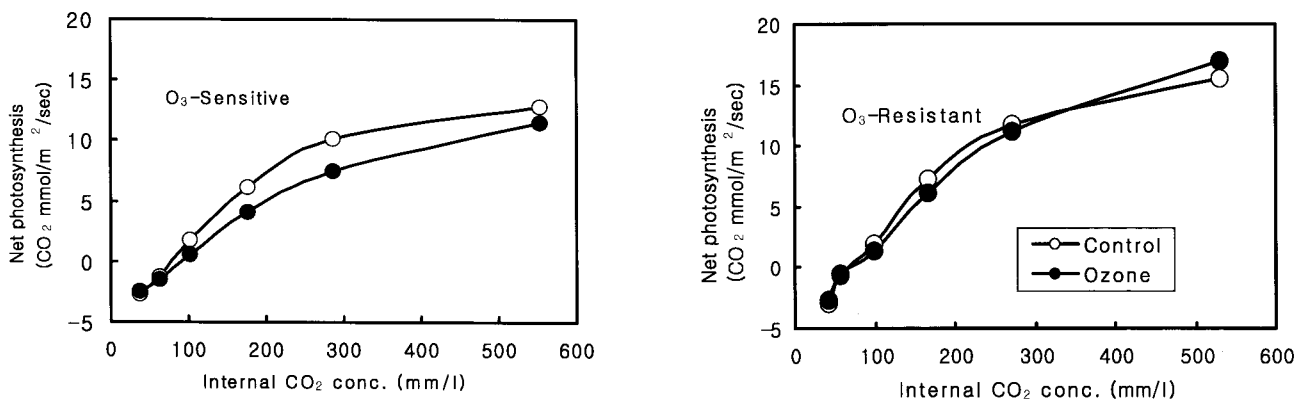


Fig. 6. Effect of ozone on the response of photosynthesis to variation of intercellular CO<sub>2</sub> concentrations of the two hot-pepper varieties. Solid circles were ozone treated and open circles were untreated.

- tosynthetic inhibition and superoxide dismutase activity in soybean cultivars exposed to short-term ozone fumigations, *Env. Pollu.* 80, 45-52.
6. 농업과학기술원 (1998) 농작물 환경오염 피해해석, 농촌진흥청 농업과학기술원, 159 pp.
  7. Coulson, C. and Heath, R. L. (1974) Inhibition of the photosynthetic capacity of isolated chloroplast by ozone, *Plant Physiol.* 53, 32-38.
  8. Matyssek, R., Gunthardt-Goerg, M. S., Keller, W. T. and Scheidegger, C. (1991) Impairment of gas exchange and structure in birch leaves caused by low ozone concentrations, *Trees* 5, 5-13.
  9. Ball, J. T., Woodrow, E. I. and Berry, J. A. (1987) A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions, McGraw-Hill, New York, USA, p.221-224.
  10. Flanagan, L. B. and Jefferies, R. L. (1989) Photosynthetic and stomatal responses of the halophyte, *Plantago maritima* to fluctuations in salinity, *Plant Cell Env.* 12, 559-568.
  11. Matyssek, R., Gunthardt-Goerg, M. S. and Keller, W. T. (1993) Whole-plant growth and leaf formation in ozonated hybrid poplar *Populus x-auramericana*, *Environ. Pollut.* 81, 207-212.
  12. Kull, O., Sober, M. D., Coleman, R. E., Dickson, J. G., Isebrands, Z. and Karnosky, D. F. (1996) Photosynthetic responses of aspen clones to simultaneous exposures of ozone and CO<sub>2</sub>, *Can. J. For. Res.* 26, 639-648.
  13. Smith, G., Greenhalgh, B., Brennan, E. and Justin, J. (1987) Soybean yield in New Jersey relative to ozone pollution and antioxidant application, *Plant Dis.*, 71, 121-125.
  14. Yun, S. C. and Park, E. W. (2000) The visible injury and physiological responses of two varieties of *Glycine max* to ozone, *Kor. J. Agri. For. Meteorol.*, 2(4), 167-174.
  15. Chevone, B. I. and Yang, Y. S. (1985) CO<sub>2</sub> exchange rates and stomatal diffusive resistance in soybean exposed to O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub>, *Can. J. Plant Sci.* 65, 267-274.