

## 오존 노출 시간에 따른 버즘나무와 백합나무의 광합성과 SOD 활성 변화

이재천<sup>1</sup> · 오창영<sup>1</sup> · 한심희<sup>1</sup> · 김판기<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국립산림과학원 산림유전자원부, <sup>2</sup>상주대학교 산림환경자원학과  
(2005년 4월 6일 접수; 2005년 6월 1일 수락)

## Changes on Photosynthesis and SOD Activity in *Platanus orientalis* and *Liriodendron tulipifera* According to Ozone Exposing Period

Jae-Cheon Lee<sup>1</sup>, Chang-Young Oh<sup>1</sup>, Sim-Hee Han<sup>1</sup> and Pan-Gi Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Genetic Resources, Korea Forest Research Institute, Suwon 441-350, Korea

<sup>2</sup>Department of Forest Resources and Environment, Sangju National University, Sangju 742-711, Korea

(Received April 6, 2005; Accepted June 1, 2005)

### ABSTRACT

This study was conducted to compare the physiological and biochemical responses of *P. orientalis* and *L. tulipifera* in response to ozone. One-year-old seedlings of *P. orientalis* and *L. tulipifera* were exposed to 100 ppb ozone concentration for 2, 4, or 8 hr/day for 1 week. Photosynthesis, stomatal conductance and ozone uptake rate were measured daily, and chlorophyll fluorescence, carboxylation efficiency, chlorophyll content, and SOD activity were measured after 1 week. In *P. orientalis*, photosynthesis and stomatal conductance were not decreased in the 2 h/day ozone treatment, but the *L. tulipifera* response was more sensitive even in the 2 h/day ozone treatment. Increased treatment time decreased photosynthesis and stomatal conductance. Chlorophyll fluorescence was not significantly different among treatment times. However, carboxylation efficiency decreased with increased treatment time, and *L. tulipifera* was more sensitive than *P. orientalis*. Chlorophyll content did not differ with species or treatment time. SOD activity response was greater in *L. tulipifera* than in *P. orientalis*, increasing to 131% of pretreatment observations. Therefore it was concluded that *L. tulipifera* was more responsive and had lower ozone tolerance than *P. orientalis*.

**Key words :** Ozone, Photosynthesis, Carboxylation efficiency, Photosystem II, Antioxidant, SOD

### I. 서 론

산업화에 따른 화석연료 사용의 증가로 인하여 오늘날 대기오염 문제가 대두되고 있으며, 1차적으로 질소 산화물이나 황산화물들에 의한 오염뿐만 아니라 광화학반응에 의해서 발생된 2차적인 오염물질이 중요한 환경 문제를 발생 시키고 있다. 특히 오존은 광화학 산물 중 강한 독성을 가진 대기오염물질로 식물뿐만

아니라 인체에도 매우 해로운 물질이다. 오존은 식물체에 흡수되면 기공 폐쇄와 엽육세포 파괴 등을 유발하여 광합성 능력(Pääkkönen *et al.*, 1996)과 생리·생화학적인 저해를 통하여 수목의 성장을 감소시킨다(Pye, 1988).

오존이 체내에 유입되었을 때 나타나는 식물의 반응을 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 체내로의 오존 유입을 차단하기 위하여 기공을 닫는 것이고, 다른 하

나는 세포 내에 유입된 오존을 해독하는 과정에서 발생한 각종 활성 산소를 제거하는 것이다(Heath, 1980). 활성산소는 일반적인 상황에서 대사과정 중 발생하지 만(Lidon and Henriques, 1993), 오존에 의해서 발생한 활성 산소는 각종 산화적 장애를 일으키게 된다(Asada, 1999).

기공을 통하여 오존이 유입되면 세포간극을 통하여 확산되어 세포에 도달하여 hydrogen peroxide( $H_2O_2$ ), superoxide( $O_2^-$ ) 그리고 hydroxyl radical( $OH \cdot$ ) 등의 활성산소종(ROS)으로 분해된다(Kangasjarvi et al., 1994; Heath and Taylor, 1997). 이러한 활성산소종에 대하여 식물은  $\alpha$ -tocopherol, ascorbate, carotenoid, glutathione, phenolic compound 등의 항산화 물질을 생산하거나, SOD(superoxide dismutase), POD(peroxidase) 등의 효소를 생산하는 방어기작을 나타낸다(Shannon and Mulchi, 1974).

오존에 의한 광합성 감소는 탄소고정 효율 저하로 나타나는데 이는 Rubisco의 함량과 활성을 감소시키기 때문이다(Pell et al., 1992; Pelloux et al., 2001). Rubisco의 함량과 활성 감소는 어린잎보다 성숙한 잎에서 더 심하게 나타나며, 또한 어린잎에서는 함량 증가가 나타나기도 한다(Pell et al., 1994a; Brendley and Pell, 1998). 최근 오존에 대한 수목의 반응에 관하여 많은 연구가 있었으나, 오존에 대한 생리 생화학적 반응들이 복합적으로 나타나기 때문에 오존과의 관계를 정확하게 밝혀내는데 어려움이 있어, 오존에 대한 수목의 내성 및 민감성을 정확히 평가하기 위해서는 이들의 연관성을 고려할 필요가 있다(Bortier et al., 2001).

식물이 오존 등 여러 스트레스에 노출되었을 경우, 스트레스의 강도와 노출 시간에 따른 반응은 다르게 나타난다. 낮은 농도의 오존에 대한 식물의 해독 및 회복 작용 능력에 관하여 많은 연구가 이루어 졌다(Pell et al., 1997). Pell et al.(1994b)은 단기간에 오존 노출 강도가 식물의 해독 및 회복 기능의 한계점을 넘을 경우 Rubisco 활성 감소에 의한 광합성 감소가 나타난다고 보고하였다. 반면에 낮은 농도의 오존에서 장시간 처리 될 경우에 잎의 노화가 촉진된다고 보고되었다(Nie et al. 1993).

따라서 본 연구는 버즘나무와 백합나무의 수종별 오존 흡입 능력, 오존 흡입량과 광합성 능력 및 항산화 효소 활성을 측정하여, 오존에 대한 생리 생화학적

반응 특성 비교와 단기간의 오존 노출에 따른 수목의 피해 및 내성 반응 기작을 알아보고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 공시 재료

시험 재료는 버즘나무(*Platanus orientalis*)와 백합나무(*Liriodendron tulipifera*)를 이용하였으며, 국립산림과학원 산림유전자원부(경기도 수원시 권선구 오목천동 44-3)의 온실에서 파종하여 양묘한 후 포트로 옮겨 심었다. 오존 처리 1주일 전에 생장이 균일하고 활력이 있는 묘목을 수종별로 선발하여 산림유전자원부 환경제어실의 인공광 온실에서 적응시켰다. 인공광 온실의 광 조건은  $450 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 온도는  $25 \pm 1^\circ\text{C}/\text{day}$ , 습도는  $\text{RH } 70 \pm 5\%$ 를 유지하였다.

### 2.2. 오존 처리

오존 처리는 인공광 chamber를 이용하였으며, 처리 구분은 대조구인 오존 비처리구와 우리나라 오존의 1 시간 평균 환경 기준인 100 ppb 오존에 1일 2, 4, 8시간씩 1주일간 노출시킨 처리구로 구분하였다. 실험 기간 동안의 대조구와 처리구 챔버내의 평균 오존 농도는 각각  $5 \pm 1$  ppb,  $98 \pm 5$  ppb로 기록 되었다.

### 2.3. 광합성 및 오존 흡입량 계산

광합성과 기공 전도도는 LI-6400 휴대용 광합성 측정기(LI-COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 광합성 측정시 leaf chamber의 조건은 온도  $25^\circ\text{C}$ , 습도 RH 60%, 광량은 PPF 1,100  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 고정하였으며, 줄기 끝에서 4-6번 잎을 10분간 측정하여 평균치를 이용하였다.

오존 흡입량은 Laisk et al.(1989)의 계산식인  $Q = Z_a \times g_{gw} \cdot 1.68$ 을 이용하여 계산하였다. 여기서 Q는 오존 흡입량,  $Z_a$ 는 노출된 오존 농도,  $g_{gw}$ 는 기공전도도, 1.68은 대기 중의 수증기와 오존에 대한 확산 계수의 비이다. 일시적 오존 흡입량은 광합성 측정시 얻은 기공 전도도를 이용하여 계산하였다.

### 2.4. 광화학계 및 탄소고정계 활성 측정

광화학계의 활성은 PSII에서의 엽록소 형광반응을 이용하여 측정하였다(Strand, 1995). OS5-FL 엽록소 형광반응 측정기(OPTI-SCIENCES, USA)를 이용하여

광합성을 측정할 잎에 대하여 30분간 암적응을 시킨 후 측정하였다.

탄소고정계의 활성 측정은 엽육내 CO<sub>2</sub> 농도 변화에 따른 광합성속도 변화를 이용하여 측정하였다(Kim and Lee, 2001). 광도 1,100  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 leaf chamber에 유입되는 공기의 유량과 온도는 광합성 측정과 동일한 조건에서 수행하였다. Leaf chamber에 공급되는 공기의 CO<sub>2</sub> 농도를 조절하면서 광합성을 측정하였다. 엽육 내부의 CO<sub>2</sub> 농도는 Farquhar and Sharkey(1982)의 식을 적용하여 산출하였으며, 광합성 측정기의 leaf chamber에 공급되는 CO<sub>2</sub> 농도를 변화시켜 측정된 광합성 속도의 결과를 사용하여 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도(C<sub>i</sub>)와 광합성(A)의 관계를 나타내는 A-C<sub>i</sub> curve를 작성하고, 이 결과에서 탄소고정효율(carboxylation efficiency)을 산출하였다.

**2.5. 엽록소 함량 및 SOD 활성 측정**

• 엽록소 함량

잎 내의 색소 함량은 dimethyl sulfoxide(DMSO) 방법에 의하여 측정하였다. 0.1 g 생엽에 DMSO 10 ml를 첨가하고 70°C 오븐에서 2시간 동안 유지하여 색소를 추출하여 Lichtenthaler(1987)의 식에 의해 계산하였다.

• SOD 활성

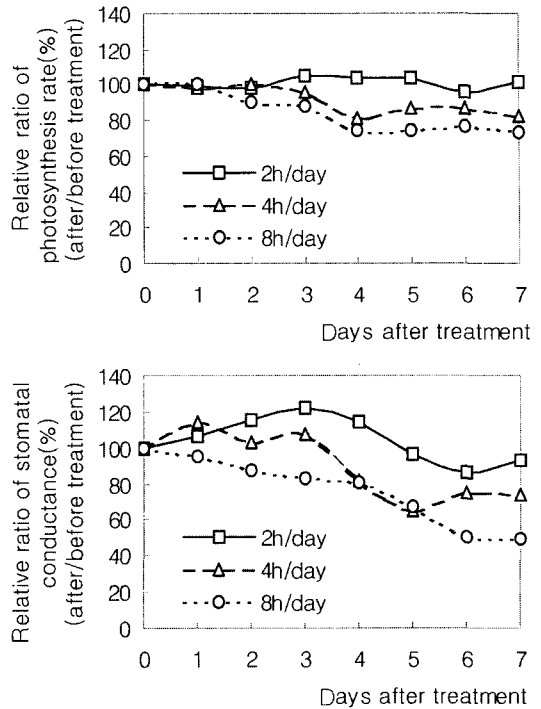
Superoxide dismutase(SOD) 활성은 nitro blue tetrazolium(NBT) 환원법을 이용하였으며, 분광광도계로 530 nm에서 120초 동안의 흡광도 증가를 측정하였다(Beauchamp and Fridovich, 1971). 활성은 Asada *et al.*(1974)의 V/v-1의 식에 의해서 계산하였으며, V와 v는 각각 SOD가 없을 때와 존재할 때, NBT의 환원 속도를 나타낸다.

**III. 결과 및 고찰**

**3.1. 오존 처리 기간 동안의 변화**

**3.1.1. 광합성과 기공전도도**

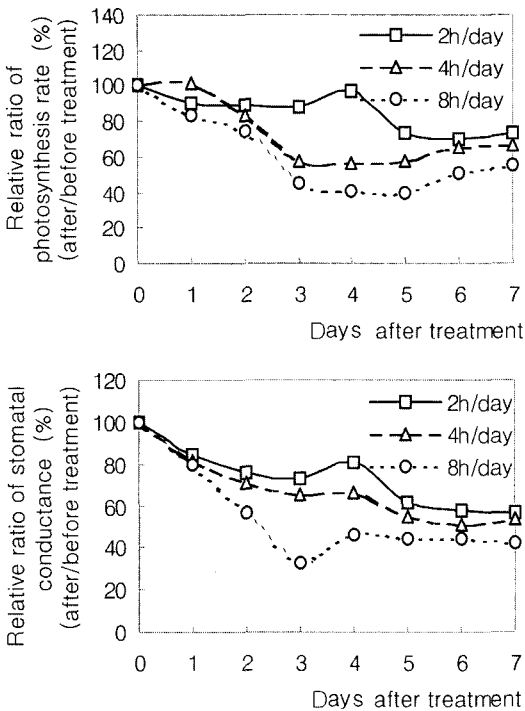
Fig. 1과 2는 오존 처리 기간 동안 버즘나무와 백합나무의 오존 처리전과 오존 처리 기간동안의 광합성의 비와 기공전도도의 비를 나타낸 것이다. 버즘나무의 경우 2시간 오존 처리구는 처리전에 비하여 광합성 감소를 보이지 않았다. 하지만 4시간 오존 처리에서는 7일이 경과한 뒤 오존 처리전 광합성의 82%, 8



**Fig. 1.** Relative ratio of photosynthetic rate and stomatal conductance of one-year-old *P. orientalis* seedlings during ozone treatment.

시간 오존 처리구에서는 처리전의 73%로 나타났다. 기공전도도의 변화에 있어서, 2시간 처리구에서는 처리 초기에 일시적으로 처리전에 비하여 증가하였지만 감소하여 7일 후에는 처리전의 93%로 나타났으며, 4시간 처리구에서도 처리 초기에 일시적으로 증가하였지만 곧 감소하여 7일 후에는 처리 전의 74%였다. 8시간 처리구에서는 오존 처리 후 지속적으로 감소하여 7일 후에 처리 전의 49%로 나타났다. 백합나무는 버즘나무와는 달리 오존에 민감하게 반응한 것으로 나타났다. 2시간 처리구에서도 광합성 감소가 나타나 처리 7일 후에는 처리전의 73%로 나타났다. 또한 4시간 처리구에서는 처리 1일 후 일시적으로 처리 전에 비하여 감소가 나타나지 않았지만 곧 감소하여 7일후 처리전의 67%로 나타났으며, 8시간 처리구에서는 처리 7일후 처리전의 55%로 나타났다. 또한 기공전도도에 있어서도 2시간 처리구에서 오존 처리 직후 감소하여 7일 후 처리전의 56%를 나타냈으며, 4시간 처리구에서도 7일 후에 처리전의 54%, 8시간 처리구에서도 7일 후에 처리전의 42%를 나타냈다.

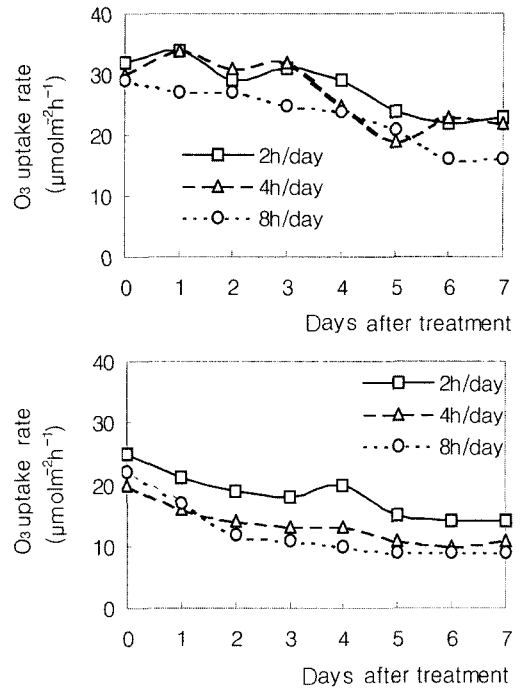
일반적으로 수목은 오존에 대한 피해를 방지하기 위



**Fig. 2.** Relative ratio of photosynthetic rate and stomatal conductance of *L. tulipifera* during ozone treatment.

하여 기공을 닫아 체내로 오존이 유입되는 것을 차단 하거나 저항성 기작을 이용하여 체내 유입된 오존의 독성을 제거한다(Laisk *et al.*, 1989). 그러나 기공 폐쇄와 저항성 기작의 이용은 생장량 감소를 유발하는 것으로 알려져 있다(Heath, 1980). Farquhar and Sharkey(1982)는 기공전도도와 광합성 속도는 밀접한 상호관계를 갖지만, 반드시 기공전도도가 광합성 속도를 억제하는 중요한 인자는 아니라고 하였다. 본 연구에서 나타난 결과에서 보면 오존 처리 시간 증가에 따른 기공전도도 감소는 광합성 속도 감소와 유사한 경향을 보여, 기공전도도와 광합성 속도 간에 정의 상관관계를 보였다. 두 수종 모두 오존 처리에 따라서 피해를 줄이기 위한 기작으로 일차적으로 기공 폐쇄를 유도하였으며, 이로 인하여 광합성 감소가 나타난 것으로 판단된다.

Farage and Long(1995)은 밀의 경우 200~400 ppb 오존 농도에서 수 시간 내에 기공전도도의 감소가 나타나는 것으로 보고하였으며, 본 연구에서는 두 수종의 경우 모두 100 ppb 농도에서 수 시간 내에 피해를 입는 것을 확인할 수 있었다.



**Fig. 3.** Ozone uptake rate of one-year-old *P. orientalis*(above) and *L. tulipifera*(below) seedlings during ozone treatment.

### 3.1.2. 오존 흡입량

Fig. 3은 오존 노출 기간 동안의 각 수종별 시간당 오존 흡입량을 나타낸 것이다. 여기서 오존 흡입량은 기공전도도를 기준으로 계산한 값으로(Laisk *et al.*, 1989), 일시적 오존 흡입량은 기공전도도에 따라 크게 좌우된다. 버즘나무에 있어서 2시간 처리구에서는 처리 5일 후 기공전도도의 감소가 나타나 오존 흡입량은 처리 초기의  $32 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 에서  $24 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 으로 감소하였다. 4시간 처리구에서는 처리 4일 후 처리 초기의  $30 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 에서  $25 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 으로 감소하였으며, 8시간 처리구에서는 처리 3일 후에 처리 초기의  $29 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 에서  $25 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 으로 감소하였다. 또한 오존 흡입에 의한 피해 증가로 인하여 기공전도도의 감소가 지속되면서 오존 흡입량은 더욱 감소하게 되었다. 백합나무에 있어서는 버즘나무보다 민감하게 반응하여 기공전도도의 감소가 오존 노출 초기부터 나타나기 시작하였기 때문에 오존 흡입량 감소는 노출 직후 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 단위시간당 오존 흡입량은 백합나무에 비하여 버즘나무가 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서 오존 노출에 대한 기공의

반응은 수종마다 다르게 나타날 뿐만 아니라(Nali *et al.*, 1998), 처리 시간에 따라서도 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

**3.2. 오존 처리 7일 후의 생리활성 변화**

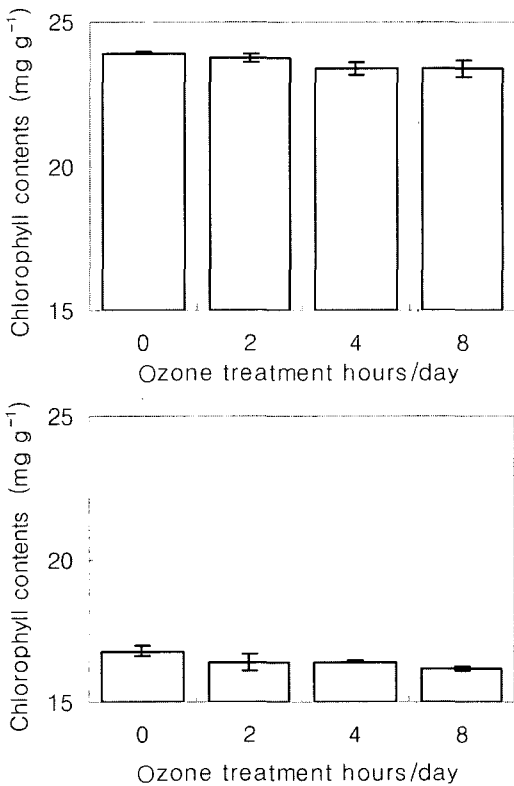
**3.2.1. 엽록소 함량**

Fig. 4는 오존 처리 1주일 후의 처리전과 처리후의 엽록소 함량 비를 나타낸 것이다. 버즘나무는 2시간 처리구에서 처리전과 대비 99%의 함량을 나타냈으며, 4시간과 8시간 처리구에서는 처리전 대비 97%의 함량을 나타냈다. 반면에 백합나무는 버즘나무에 비하여 더 많은 엽록소 함량 감소를 나타냈는데, 2시간과 4시간 처리구에서는 처리전 대비 97%, 8시간 처리구에서는 처리전 대비 96%의 엽록소 함량을 나타냈다.

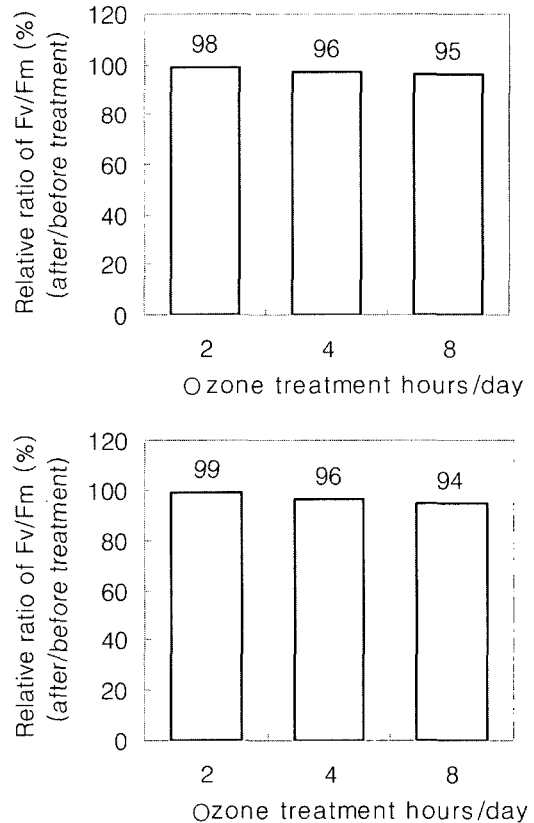
식물의 엽록소 함량은 대기오염과 같은 스트레스에 의해서 파괴되어 황화현상 혹은 백화현상을 나타낸다.

따라서 오존 등 여러 대기오염에 대한 식물 피해의 측정 척도로써 엽록소 함량이 유용한 지표가 될 수 있어(Knudson *et al.*, 1977), 많은 수종에서 연구가 이루어졌다. 하지만 몇몇 수종에서는 오존에 대하여 엽록소 함량 감소가 나타나지 않는 등의 상이한 결과가 나타났다(Saitanis *et al.*, 2001).

본 연구에서는 잎의 가시적인 피해 현상이 나타나지 않았을 뿐만 아니라, 오존 처리 시간에 따른 광합성 및 기공전도도 감소에 비하여 엽록소 함량의 감소가 매우 적게 나타났다. 이것은 식물이 스트레스에 노출된 후에 나타나는 일시적인 보상반응으로 판단되는데, 일시적으로 스트레스를 해소하고자 엽록소 합성을 증가시켜 생장을 도모하거나(Oksanen and Rousi, 2001; Lee *et al.*, 2002) 혹은 오존의 독성을 제거하는 방어 메커니즘의 작동과 연관되는 항산화작용을 통하여 오존 의한 엽록소 파괴를 보호하였기 때문으로 판단된다.



**Fig. 4.** Chlorophyll contents of *P. orientalis*(above) and *L. tulipifera*(below) seedlings after 1 week ozone treatment. Each bar represents mean and standard deviation of three replications.



**Fig. 5.** Relative ratio of PSII chlorophyll fluorescence of *P. orientalis*(above) and *L. tulipifera*(below) seedlings after 1 week ozone treatment.

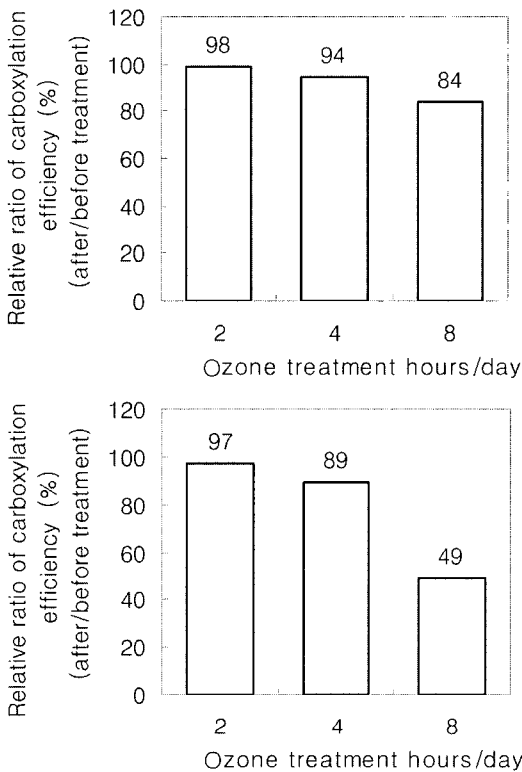
**3.2.2. 광화학계 및 탄소고정계 활성**

Fig. 5와 6은 버즘나무와 백합나무의 오존 처리전에 대한 각 시간별 오존 처리 후의 광화학계 및 탄소고정계의 상대비율을 나타낸 것이다. 광화학계의 활성에서 버즘나무의 경우 2시간 처리구는 처리전 대비 98%의 활성을 나타냈으며, 4시간 처리구는 96%, 8시간 처리구는 95%를 나타냈다. 그리고 백합나무의 경우에는 2시간 처리구는 99%, 4시간 처리구는 96%, 8시간 처리구는 94%를 나타냈다. 본 연구에서는 처리 시간에 따른 광화학계의 활성은 큰 차이가 나타나지 않았다. 반면에 탄소고정효율은 처리 시간에 따라서 큰 차이가 나타났다. 버즘나무의 경우 2시간 처리구는 처리전 대비 98%를 나타냈고, 4시간 처리구는 94%, 8시간 처리구는 84%로 나타났다. 그리고 백합나무에서는 2시간 처리구의 경우 97%, 4시간 처리구는 89%, 8시간 처리구는 49%로 매우 많이 감소되었다.

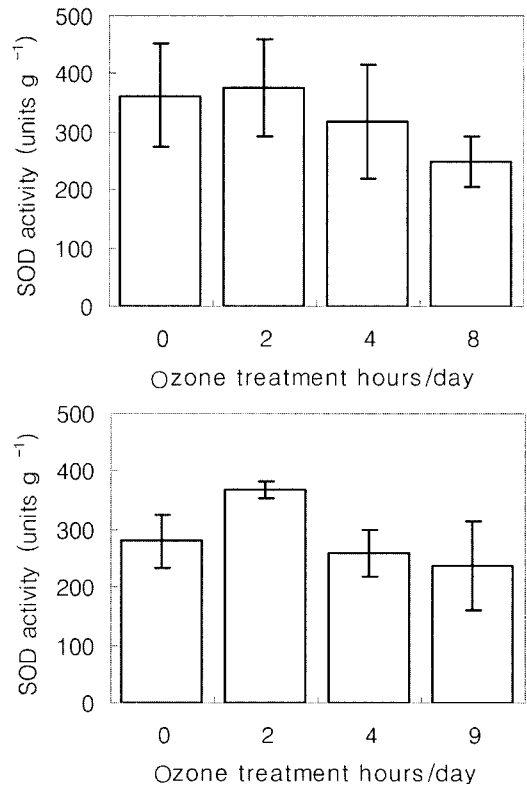
오존은 PSII의 전자 전달계에 영향을 주어 광화학

효율 감소를 유발하여 광합성 감소가 나타난다(Barnes *et al.*, 1990; Agrawal *et al.*, 1993). 하지만 본 연구에서는 광화학효율의 감소는 크게 일어나지 않았다. 반면에 탄소고정효율의 감소가 나타났는데 백합나무가 버즘나무에 비하여 더 많은 감소를 보였다. 엽육내 이산화탄소 분압이 낮을 경우에는 rubisco의 함량에 의해서 광합성 속도가 좌우되므로 엽육내 이산화탄소 분압에 따른 광합성 속도가 직선적으로 증가하는 구간의 회귀 직선의 기울기인 탄소고정효율은 rubisco의 함량을 반영한다(Farquhar *et al.*, 1980; Kim and Lee, 2001).

따라서 본 연구에서 나타난 결과에 의하면 버즘나무와 백합나무의 시간 별 오존 처리에 따른 광합성 감소는 광화학효율의 감소보다 탄소고정효율의 감소에 더 큰 원인이 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Farage and Long(1995)의 연구 결과에서 나타난 것과 같이 단기간의 오존 처리에 따른 피해는 탄소고정계가 가장 먼저 피해를 입는다는 것과 일치한다.



**Fig. 6.** Relative ratio of carboxylation efficiency of *P. orientalis* (above) and *L. tulipifera* (below) seedlings after 1 week ozone treatment.



**Fig. 7.** SOD activity of *P. orientalis*(above) and *L. tulipifera* (below) seedlings after 1 week ozone treatment. Each bar represents mean and standard deviation of three replications.

### 3.2.3. SOD 활성

Fig. 7은 버즘나무와 백합나무의 오존 처리 전에 대한 처리 후의 SOD 활성 비를 나타낸 것이다. 버즘나무에서는 2시간 처리구에서 처리전 대비 131%로 나타났고, 4시간 처리구에서는 98%, 8시간 처리구에서는 85%로 나타났다. 반면에 백합나무에서는 2시간 처리구의 경우 103%, 4시간 처리구는 87%, 8시간 처리구는 68%로 나타나 버즘나무에 비하여 SOD의 활성이 매우 낮게 나타났다.

일반적으로 다양한 스트레스 하에서 내성 수종들의 SOD 활성은 증가하지만(Sheng *et al.*, 1997), 스트레스가 장기간 지속되거나 과도한 스트레스가 가해지면 SOD 활성은 감소하게 된다(Bennet *et al.*, 1984). 그리고 오존에 대한 중간 내성 차이에 의해서 수종간에 항산화효소의 반응이 다르게 나타난다(Sheng *et al.*, 1997). 오존에 대한 SOD 활성은 내성 수종에서 증가하고, 민감성 수종에서 감소하지만 SOD의 과다 발현은 가시적 피해로 나타나기 때문에, 결국 생장에 필요한 에너지가 손실되어 생장 감소와 고사에 이르게 한다(Sheng *et al.*, 1997).

본 연구에서 나타난 결과는 버즘나무의 2시간 처리구는 SOD 활성이 증가되어 매우 활발한 내성 기작 발현을 나타낸 것으로 판단되며, 오존 처리 시간이 늘어남에 따라서 오존 흡입량이 증가하면서 피해를 받기 시작하였으며, 항산화기작의 능력 감소로 인하여 피해가 증가하게 된 것으로 판단한다. 그리고 백합나무의 경우에는 2시간 처리구에서는 처리전과 비교하여 SOD 활성에 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, 시간 증가에 따라서 SOD의 활성 감소가 버즘나무에 비하여 매우 많은 감소를 나타내 오존에 민감하게 반응할 뿐만 아니라 내성 능력도 낮은 것으로 판단한다.

## IV. 적 요

버즘나무와 백합나무의 오존에 대한 생리 생화학적 반응 특성을 비교하고, 단기간 동안의 노출에 따른 피해 및 내성 반응을 알아보고자 본 연구를 수행하였다. 두 수종 1년생 묘목을 100 ppb의 오존에 2, 4, 8 시간/일 동안 노출시키며 1주일간 광합성, 기공전도도, 오존흡입량을 측정하고 1주일 후 광화학 효율 및 탄소고정 효율, 엽록소 함량 및 항산화효소인 SOD의 활성을 측정하였다. 광합성과 기공전도도는 버즘나무

의 경우 2시간 처리구는 감소하지 않았지만 오존 처리 시간이 길어질수록 감소하였으며, 백합나무는 버즘나무보다 민감하게 반응하여 2시간 처리구에서도 광합성과 기공전도도의 감소가 나타났으며, 오존 처리 시간이 길어질수록 더욱 많이 감소되었다. 엽록소 형광 반응을 이용한 광화학효율 측정에서는 두 수종 모두에서 오존 처리 시간에 따른 광화학효율의 차이가 크게 나타나지 않았지만, 탄소고정효율에 있어서는 오존 처리 시간이 길어질수록 매우 많이 감소하였으며, 백합나무의 감소 폭이 더 컸다. 엽록소 함량은 두 수종 모두 큰 변화가 나타나지 않았지만 SOD 활성에서는 수종간에 큰 차이가 나타났는데 버즘나무 2시간 처리구에서는 증가하였으며, 처리 시간이 증가함에 따라 감소하였지만 백합나무에 비하여 감소 폭이 적었다. 따라서 오존에 대해서 버즘나무보다 백합나무가 민감하게 반응하며 내성이 낮은 것으로 판단되었다.

## 인용문헌

- Agrawal, M., D. T. Krizek, S. B. Argawal, G. F. Kramer, E. H. Lee, R. M. Mirecki, and R. A. Rowland, 1993: Influence of inverse day/night temperature on ozone sensitivity and selected morphological and physiological responses of cucumber. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **118**, 649-654.
- Asada, K., M. Takahashi, and M. Nagate, 1974: Assay and inhibitors of spinach superoxide dismutase. *Agricultural and Biological Chemistry* **38**, 471-473.
- Asada, K., 1999: The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of active oxygen and dissipation of excess photons. *Analytical Biochemistry* **44**, 276-287.
- Barnes, J. D., D. Velissariou, A. W. Davison, and C. D. Holevas, 1990: Comparative ozone sensitivity of old and modern Greek cultivars of spring wheat. *New Phytologist* **116**, 707-714.
- Beauchamp, C. and I. Fridovich, 1971: Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry* **44**, 276-287.
- Bennet, J. H., E. H. Lee, and H. E. Heggestad, 1984: Biochemical aspect of plant. *Gaseous Air Pollutants and Plant Metabolism*, Koziol, M. J. and F. R. Whatley (Eds.), Butterworth England, 413-424.
- Bortier, J., K. Vandermerien, L. De Temmerman, and R. Ceulemans, 2001: Growth, photosynthesis and ozone uptake of young beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to different ozone exposures. *Trees* **15**, 75-82.
- Brendley, B. and E. J. Pell, 1998: Ozone-induced changes in biosynthesis of Rubisco and associated compensation to stress in foliage of hybrid poplar. *Tree Physiology* **18**,

- 81-90.
- Farage P. K. and S. P. Long. 1995: An in vivo analysis of photosynthesis during short-term O<sub>3</sub> exposure in three contrasting species. *Photosynthesis Research* **43**, 11-18.
- Farquhar, G. D., von S. Caemmerer, and J. A. Berry, 1980: Abiochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C3 species. *Planta* **149**, 78-90.
- Farquhar, G. D. and T. D. Sharkey, 1982: Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology* **33**, 317-345.
- Heath, R.L., 1980: Initial events in injury to plants by air pollutants. *Annual Review of Plants Physiology* **31**, 395-431.
- Heath, R. L. and G. E. Taylor, 1997: Physiological processes and plant responses to ozone exposure. *Forest Decline and Ozone, Ecological Studies*, Sandermann, H., A. L. Wellburn and R. L. Heath (Eds.), Springer-Verlag, 317-368.
- Kangasjarvi, J., J. Talvinen, M. Utriainen, and R. Karjalainen, 1994: Plant defence systems induced by ozone. *Plant Cell Environment* **17**, 783-794.
- Kim, P. G. and E. J. Lee. 2001: Ecophysiology of photosynthesis I: Effects of light intensity and intercellular CO<sub>2</sub> pressure on photosynthesis. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**, 126-133. (in Korean with English abstract)
- Knudson, L.L., T. W. Tibbitts, and G. E. Edwards, 1977: Measurement of ozone injury by determination of leaf chlorophyll concentration. *Plant Physiology* **60**, 606-608.
- Laisk, A., O. Kull, and H. Moldau, 1989: Ozone concentration in leaf intercellular air species is close to zero. *Plant Physiology* **90**, 1163-1167.
- Lee, J. C., S. H. Han, C. S. Kim, and S. S. Jang. 2002: Visible foliar injuries and growth responses of four *Betula* sp. exposed to ozone. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 29-37. (in Korean with English abstract)
- Lichtenthaler, H. K., 1987: Chlorophylls and carotenoids : pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology* **148**, 350-382.
- Lidon, F. C. and F. C. Henriques, 1993: Oxygen metabolism in higher plant chloroplasts. *Photosynthetica* **29**, 249-279.
- Nali, C., L. Guidi, F. Filippi, G. F. Soldatini, and G. Lorenzini, 1998: Photosynthesis of two poplar clones contrasting in O<sub>3</sub> sensitivity. *Trees* **12**, 196-200.
- Nie G. Y., M. Tomasevic, and N. R. Baker. 1993: Effects of ozone on the photosynthetic apparatus and leaf proteins during leaf development in wheat. *Plant, Cell and Environment* **16**, 643-651.
- Oksanen, E. and M. Rousi, 2001: Differences of *Betula* origins in ozone sensitivity based on open-field experiment over two growing seasons. *Canadian Journal of Forest Research* **31**, 804-811.
- Pääkkönen, E., J. Vahala, T. Holopainen, R. Kärjalainen, and L. Karenlampi, 1996: Growth responses and related biochemical and ultrastructural changes of the photosynthetic apparatus in birch (*Betula pendula*) saplings exposed to low concentrations of ozone. *Tree Physiology* **16**, 597-605.
- Pell, E. J., N. A. Eckardt, and A. J. Enyedi, 1992: Timing of ozone stress and resulting status of ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase and associated net photosynthesis. *New Phytologist* **120**, 397-405.
- Pell, E. J., L. G. Landry, N. A. Eckardt, and R. E. Glick, 1994a: Air pollution and Rubisco: effects and implications. *Plant Responses to the Gaseous Environment*, Alscher, R. G. and A. R. Wellburn (Eds.), Chapman and Hall, 239-253.
- Pell, E. J., N. A. Eckardt, and R. E. Glick. 1994b: Biochemical and molecular basis for impairment of photosynthetic potential. *Photosynthesis Research* **39**, 453-462.
- Pell, E. J., C. D. Schlagnhauer, and R. N. Arteca. 1997: Ozone-induced oxidative stress: Mechanisms of action and reaction. *Physiologia Plantarum* **100**, 264-273.
- Pelloux, J., Y. Jolivet, V. Fontaine, J. Banvoy, and P. Dizengremel, 2001: Changes in Rubisco and Rubisco activase gene expression and polypeptide content in *Pinus halepensis* M. Subjected to ozone and drought. *Plant Cell Environment* **24**, 123-132.
- Pye, J. M., 1988: Impact of ozone on the growth and yield of trees: a review. *Journal of Environmental Quality* **17**, 347-360.
- Saitanis, C. J., A. N. Riga-Karandinos, and M. G. Karandinos, 2001: Effects of ozone on chlorophyll and quantum yield of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) varieties. *Chemosphere* **42**, 945-953.
- Shannon, J. G. and C. L. Mulchi, 1974: Ozone damage to wheat varieties at anthesis. *Crop Science* **14**, 335-337.
- Sheng, Y., G. K. Podila, and D. F. Karnosky, 1997: Differences in O<sub>3</sub>-induced superoxide dismutase and glutathione antioxidant expression in O<sub>3</sub> tolerant and sensitive trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) clones. *Forest Genetics* **4**, 25-33.
- Strand, M., 1995: Inhibition of photosynthesis in current-year needles of unfertilized and fertilized Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] during autumn and early winter. *Trees* **9**, 332-340.