

실내식물과 소나무의 오존에 대한 광합성 능력, 항산화 효소의 활성, 해부학적 반응

이주영 · 제선미 · 이성한 · 우수영*

서울시립대학교 환경원예학과

The Effects of Ozone on Photosynthesis, Antioxidative Enzyme Activity and Leaf Anatomical Response in the Indoor Plants and Japanese Red Pine

Ju Young Lee, Sun Mi Je, Seoung Han Lee and Su-Young Woo*

Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

요약: 오존에 따른 피해 현상을 관찰해 보고 식물 수종에 따라 어떤 차이가 있는지 알아보기 위해서 소나무(*Pinus densiflora*)와 실내식물 가운데 많이 활용되는 스파티필름(*Spathiphyllum patinii*), 스킨답서스(*Epipremnum aureum*)의 항산화 효소인 GR(Glutathione Reductase), APX(Ascorbate peroxidase)의 활성, 광합성속도와 잎의 해부학적 피해 현상을 관찰하였다. 오존농도는 30 ppb로 유지했고, 50일 동안 하루 8시간(09:00~17:00) 오존을 처리한 후 다음과 같은 결과를 얻었다. 오존 농도가 30 ppb정도의 낮은 농도에서 소나무는 광합성속도, 수분이용효율, 항산화 효소의 활성, 잎의 해부학적인 특성에서 대조구와 크게 다르지 않은 것을 알 수 있었다. 반면에 실내식물인 스파티필름과 스킨답서스의 광합성속도, 항산화 효소의 활성(특히, GR의 활성), 잎의 해부학적 특성이 대조구와 오존 처리구간의 상당한 차이를 보여, 오존에 대한 민감성이 소나무에 비해 큰 것으로 나타났다.

Abstract: The purpose of this study was to identify the effects of ozone pollution on the one woody species and two indoor plants in controlled environment. *Pinus densiflora*, *Spathiphyllum patinii* and *Epipremnum aureum* seedlings were exposed in both control and ozone chambers to investigate photosynthetic rate, water use efficiency, antioxidative enzyme activities such as GR(Glutathione reductase) and APX(Ascorbate peroxidase) activity and leaf anatomical response. Ozone was fumigated 8 hours for a day with 30 ppb concentration for 50 days. *Pinus densiflora* seedlings showed no significant difference on photosynthetic rate, water use efficiency, antioxidant enzyme activity during ozone exposure. Ozone concentration (30 ppb in this study) is not high enough to generate ozone damage on *Pinus densiflora* species. In contrast, ozone generally altered photosynthetic rate, antioxidant enzyme (especially GR) activity and leaf anatomy in two indoor species (*Spathiphyllum patinii* and *Epipremnum aureum*) exposed in ozone chamber were significantly differ from those of control in every measurement. These data suggest that two indoor species(*Spathiphyllum patinii* and *Epipremnum aureum*) are more sensitive to ozone than *Pinus densiflora*.

Key words : anatomy, antioxidative enzyme, ozone, indoor plant, photosynthesis

서론

오존은 우리 주변에서 가장 흔한 대기오염물질로, 대기 중에서 햇빛(자외선)에 의해 자연적으로 생성되기도 하지만, 인간 활동에 의해 대기에 직접 배출되는 NOx(질소산화물), HCs(탄화수소류)등이 햇빛과 반응을 하여 생성되는 광화학산화물(Photochemical Oxidants)인 H₂O₂,

PAN(Peroxyacetylnitrate:과산화아세틸질산염)과 같이 2차 오염물질 가운데 하나이다. 특히, 오존은 광화학물질 중에서 약 90% 이상을 차지함으로써, 광화학 오염의 표시물질로서 인식되어 광화학산화물에 의한 오염에서는 오존 농도를 주요 판단기준으로 이용하고 있다. 1990년에 0.009 ppm이던 서울시의 오존 농도는 1994년에는 0.014 ppm, 1997년에는 0.016 ppm으로 증가하였고 2005년에는 0.018 ppm으로 증가하였다(Woo, 2006). 이는 오존생성 전구물질의 가장 큰 배출원인 자동차 대수가 급격히 증가했고,

*Corresponding author
E-mail: wsy@uos.ac.kr

오존 전구물질을 배출하는 오염원이 늘어났다는 것을 의미한다.

오존은 SO_2 , NO_2 , HF(불화수소)등과는 달리 생태계에서 어떤 특정한 성분과 선택적으로 결합하거나 축적되지 않는다. 그러나 오존은 광화학 산화물의 대부분을 차지하며, 가장 독성이 높아 농작물과 식물에 직접적으로 심각한 영향을 줌으로 상당한 손상을 초래한다(Peng et al., 2012; Paoli et al., 2012; Meloni et al., 2003). 오존에 의해 피해를 받은 식물들에게서 나타나는 현상은 우리가 육안으로 직접 관찰할 수 있는 가시적 피해와 외부적으로 직접 볼 수 없는 비가시적 피해로 나눌 수 있다(Wohlgenuth et al., 2002). 비가시적 피해는 내부조직 변화 혹은 생리적인 기작에 변화가 생겨, 결국 식물의 성장 및 수확량의 감소 등 가시적 피해로 이어진다. 식물들은 여러 가지 대기오염물질에 대하여 각각 다르게 반응하고 있으며, 오존에 대해서도 마찬가지로 식물의 종류는 물론이고 같은 종 내에서도 개체마다 서로 다른 내성을 지니고 있다. 대기오염물질에 대해서 식물이 내성이 있는지의 여부는 일반적으로 일정한 농도의 오염물질에 노출시켰을 때 가시적 피해 수준 혹은 순 광합성속도의 감소 수준에 따라 구분하기도 한다(Karnosky et al., 2005; Grantz et al., 2003).

본 연구는 오존에 따른 피해 현상을 관찰해 보고 식물 수종에 따라 어떤 차이가 있는지 알아보는 것이다. 따라서 항산화 효소의 활성, 광합성속도의 측정과 해부학적 피해 현상을 통해 소나무와 실내식물의 대표적인 식물인 스파티필름, 스킨답서스에 미치는 오존의 영향을 비교하고자 한다.

재료 및 방법

1. 공시수종

이 연구에서는 가로수나 조경용 수목 가운데 중요한 소나무(*Pinus densiflora*)와 실내식물로서 실내 환경을 조절할 목적으로 상업적으로 중요한 수종인 스파티필름(*Spathiphyllum patinii*)과 스킨답서스(*Epipremnum aureum*) 세 수종을 공시재료로 하였다. 소나무는 1-1묘목을 사용하였고, 스파티필름과 스킨답서스는 2년생을 활용하였다. 각각 0.5 리터 화분에 식재하여 충분히 적응한 후 오존 처리를 하였다.

2. 오존 처리

오존 처리구와 대조구에 각각 3 수종을 3 개체로 반복하여 확보하였다. 식물체를 주간 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 야간 $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 습도 60%, 광도 $300 \pm 30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 유지되는 밀폐형 챔버($60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$)로 옮겨 1 일간 순화시킨 후 오존 가스를 처리하였다(Figure 1). 오존 가스 처리를 위

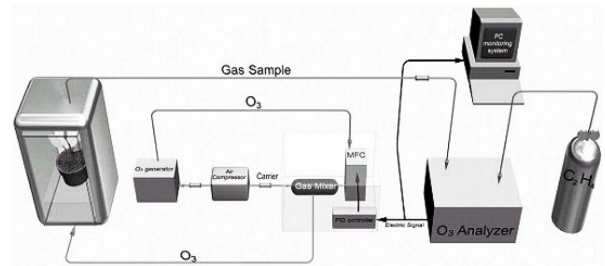


Figure 1. Schematic diagram of O_3 fumigation chamber in this study.

해 오존 발생기(ON-1-2, Nippon Ozone Co., Japan)를 통하여 발생된 오존을 챔버 내로 유입시켰으며 농도의 모니터링은 화학발광식 오존 자동 측정기(806, Kimoto, Japan)를 이용하였다. 농도 조절은 MFC(Mass Flow Controller)를 장착한 PID controller를 이용하여 $0.03 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (30 ppb)의 농도로 유지하였다. 50일 동안 하루 8시간(09:00~17:00) 오존을 처리하였다.

3. 광합성 능력

각 수종의 광합성 능력(Net photosynthesis; 순 광합성량(An))은 Li-6400 Portable Photosynthesis System(Li-cor Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 이 때 leaf chamber에 유입되는 공기의 유량은 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ 이며, Chamber 온도는 block temperature 25°C , CO_2 농도는 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 상대습도는 60~70%로 조절하였다. 순광합성 능력은 광도를 PPFD 0, 50, 100, 300, 500, 800, 1000, 1500, 2000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 변화를 주어 Light curve를 그려 각 지점의 광합성속도를 비교하였다.

4. 수분이용효율

수목의 수분이용효율은 광합성속도/증산속도(Je et al., 2006; Ashraf et al., 2002; Wang et al., 2003)으로 계산하였다. 수분이용효율의 계산에 사용한 광합성속도와 증산속도는 $1,000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 광도에서 Licor-6400 Portable Photosynthesis System(Li-cor Inc., USA)을 이용하여 측정하였다.

$$\text{WUE} = \text{Pn} / \text{Tr}$$

WUE : 수분이용효율($\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)

Pn : 광합성속도($\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

Tr : 증산속도($\text{mmol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

5. 해부학적 구조 관찰

식물체의 잎 중 가장 피해가 심하게 나타난 부분을 대상으로 시료를 채취하여 잎을 신선한 상태로 유지하여 실험실내로 옮겨 잎을 $1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 부분으로 잘랐다. 동

결박편기(Cryotome, HM 505E, Microm Lab., Germany)를 이용하여 -35°C에서 시료를 급속 동결된 시료를 단단하게 고정된 후 박편을 제작하였는데, 10 μm 두께로 자른 시료를 슬라이드 글라스에 평평하게 올린 후, 메틸렌 블루(methylene blue)로 염색하여 광학현미경을 통해 엽육 조직의 위, 아래층 책상세포의 두께 및 해면세포층의 두께를 관찰하였다.

6. 항산화 효소의 활성 분석

Ascorbate peroxidase(APX)의 활성분석은 상단부의 성숙한 잎을 채취하여 단편 0.2 g에 1 M 아스코르빈산(AsA)과 pH가 7.4로 보정된 100 mM 인산칼륨 완충액(K-P buffer)을 함유한 추출용액 2 mL를 가하여 균질화하였다. 이를 16,000 rpm에서 30 분간 원심분리한 후 추출액 60 μL를 취하여 반응액[H₂O 2.34 mL, 1 M K-P buffer(pH 6.5) 300 μL, 10 mM AsA 180 μL, 5 mM H₂O₂ 120 μL]과 잘 혼합한 후 UV spectrophotometer(UV-2100, Shimadzu, Japan)를 사용하여 파장 290 nm에서 H₂O₂에 의한 30초간의 아스코르빈산 산화도(extinction coefficient of 2.8 mM⁻¹·cm⁻¹)를 측정하였다.

Glutathione reductase(GR)의 활성 분석은 잎 0.15 g을 취한 후 추출용액(50 mM K-P buffer, 5% PVP, 5 mM AsA, 5 mM DTT, 5 mM EDTA, 0.1 M NaCl 함유)을 2 mL 가하여 균질화하였다. 12,000 rpm에서 5분간 원심분리한 후 상정액 150 μL를 취하여 반응액[H₂O 2.43 mL, 1 M K-P buffer(pH 7.8) 300 μL, 10 mM GSSG 60 μL, 10 mM NADPH 60 μL]과 혼합하였다. 이때의 산화·환원 반응을 파장 340 nm에서 90초간의 흡광도 변화로 측정하였다(extinction coefficient of 6.2 mM⁻¹·cm⁻¹).

모든 효소활성은 단백질 1 mg을 기준으로 산정하였으며, 단백질 정량은 Bradford(1976)가 기술한 바와 같이 Bio-Rad Protein assay(Bio-Rad Laboratories, U.S.A) 5 배 희석액에 엽 추출액을 100:1로 가하여 반응시킨 후 파장 595 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다.

7. 통계처리

수분이용효율과 항산화 효소의 활성에 대하여 오존 처리구와 대조구간의 차이를 GLM(General Linear Model)을 이용하여 검증하였고, Duncan의 다중검정을 통해서 $p < 0.05$ 수준에서 평균값 간의 차이를 분석하였다. 모든 통계 분석은 SAS Version 9.3을 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 광합성 능력

세 수종의 광합성속도를 조사한 결과 대조구와 처리구

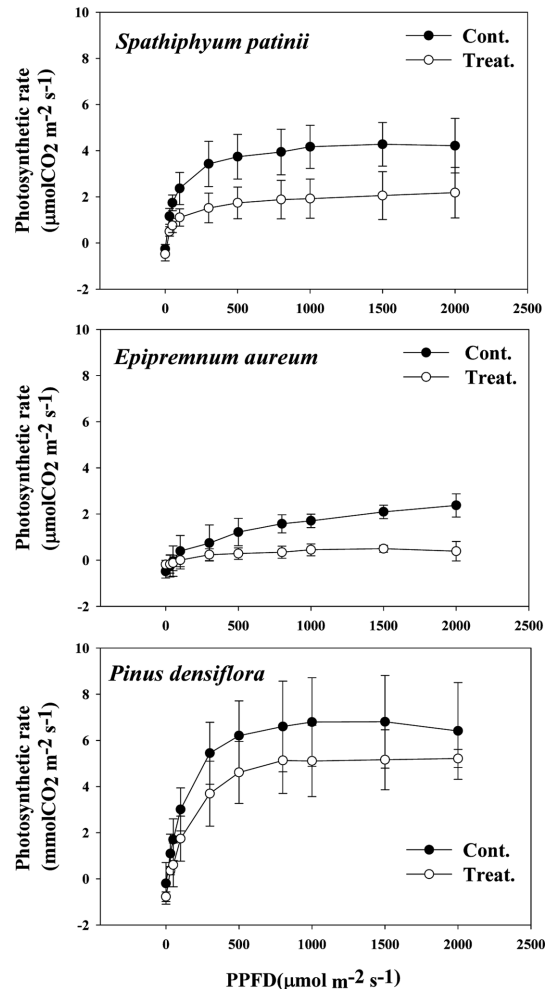


Figure 2. Light response curve of photosynthesis in leaves of each species fumigated with 30 ppb ozone.

모두 광도가 증가함에 따라 광합성속도가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 세 수종 모두 오존 처리구의 광합성속도는 전반적으로 대조구의 광합성속도 보다 낮게 나타났다(Figure 2). 대기오염물질은 일반적으로 식물의 광합성을 감소시키는 것으로 보고되고 있는데, 이는 기존 수종에서 탄소의 흡수가 억제되거나(Paoli et al., 2012; Aben et al., 1990; Reich and Amundson, 1985), 엽록체의 틸라코이드 막 또는 calvin cycle(Lehnherr et al., 1988; Karnosky et al., 2005)이나 광합성 관련 효소인 Rubisco와 엽록소, 카로티노이드 등과 같은 색소 그리고 항산화시스템(D'Haese et al., 2005; Conklin and Barth, 2004; Kangasjarvi et al., 1994)에 영향을 받기 때문인 것으로 알려져 있다.

2. 수분이용효율

소나무(*Pinus densiflora*)의 경우 대조구에 비해 오존 처리를 한 실험구에서 수분이용효율이 높게 나타난 반면, 스파티필름(*Spathiphyllum patinii*)과 스킨답서스(*Epipremnum aureum*)의 경우 대조구와 오존 처리구간의 수분이용효율

의 차이가 나타나지 않았다(Figure 3). 수분이용효율은 식물체가 건전한 증산과 광합성을 하는지를 평가하는 중요한 척도이다. 일반적으로 스트레스 조건에서 식물은 수분이용효율이 증가하는 경향이 있다. 대기오염 조건에서 오염물질 유입을 막기 위해서, 혹은 건전한 성장을 하지 못

하여 기공전도도가 감소할 수 있는데, 이로 인해 증산량이 상대적으로 많이 줄어들어 광합성속도와 증산속도 비로 산출되는 수분이용효율은 증가할 수 있다(Lim et al., 2006; Je et al., 2006). 그러나 본 연구에서 나타난 소나무의 수분이용효율의 증가는 스트레스에 대한 내성기작 중 하나로 엽 내로 유입되는 오존의 양을 감소시키기 위한 기공조절에 의한 것으로 판단된다.

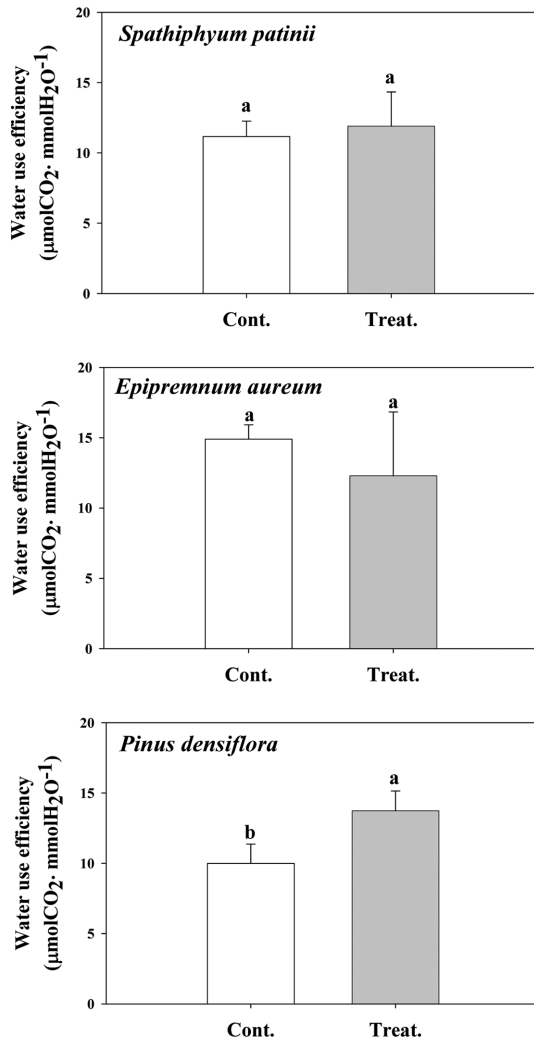


Figure 3. Water use efficiency in leaves of each species fumigated with 30 ppb ozone.

3. 항산화 효소

GR 활성은 소나무(*Pinus densiflora*)를 제외하고, 스파티필름(*Spathiphyllum patinii*)과 스킨답서스(*Epipremnum aureum*)에서 오존 처리구가 대조구에 비하여 높게 나타났다. 반면, APX 활성은 세 수종 모두 대조구와 오존 처리구간의 차이가 크게 나타나지 않았다(Figure 4).

식물체가 오존에 대해 내성을 보이는 기작에는 기공 저항 증대를 통한 오존 유입량 감소(Aben et al., 1990; Mansfield and Person, 1996) 또는 항산화 효소의 활성 증대(Guri, 1983; Rao et al., 1996; Rao and Dubey, 1990) 혹은 Rubisco 활성 증대를 통한 보상 반응 등이 알려져 있다(Koch et al., 1998; Woo, 1997). 특히 활성산소의 경우, 오존 피해를 유발시키는 주요 원인으로 알려져 있으나(Asada, 1992), 동시에 세포 내 신호 전달 물질로서도 작용하는데(May et al., 1998; Karpinski et al., 1999), 오존의 경우는 다른 대기오염 물질들과 달리 그 자체가 활성산소의 일종으로 식물 종에 따라 이 같은 신호전달 체계에 의해 PR 단백질 유도(pathogenesis-related proteins) 혹은 HR 반응(hypersensitive reaction; 과민성 반응)이 유도될 수 있다(Pasqualini et al., 2003; Yukihiko et al., 2012). 이 같은 반응은 주로 병충해 감염 시 활성산소를 매개로 나타나는 저항성 반응으로서 오존 노출 시, 이와 같은 반응의 유도는 오히려 가시적인 피해를 증가시킬 수 있다. 이와 관련하여 본 실험에서는 엽록체 혹은 세포질 내에 존재하며 Ascorbate-Glutathione cycle을 통해 H₂O₂를 소거하는 항산화 효소인 APX와 GR이 중요한 역할을 한다.

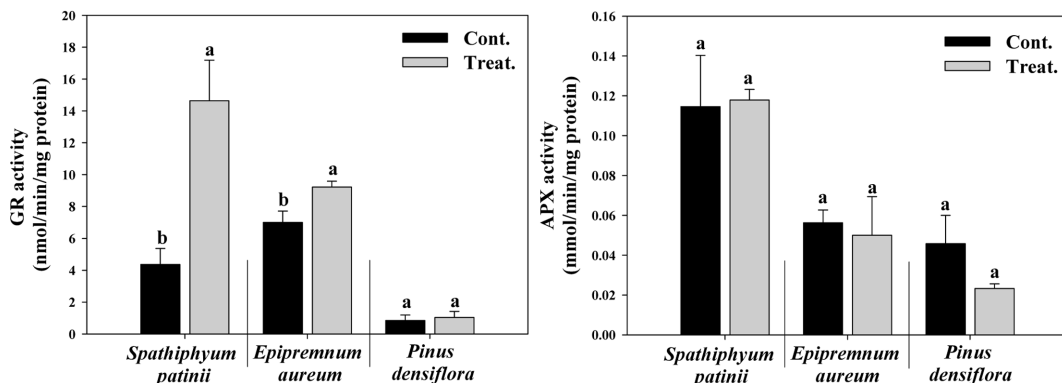


Figure 4. GR and APX activity in leaves of each species fumigated with 30 ppb ozone.

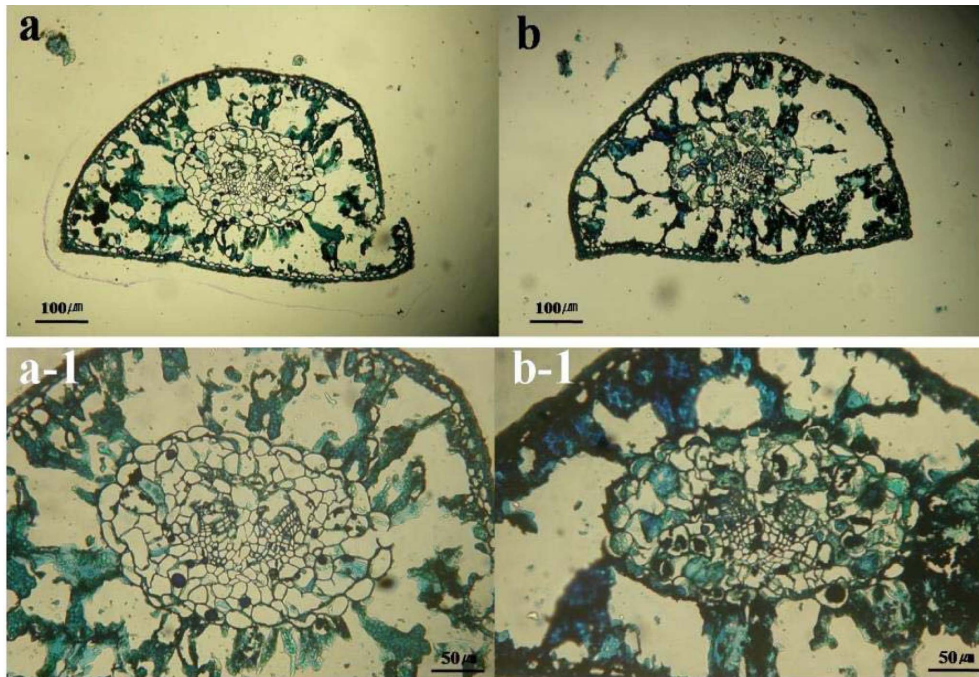


Figure 5. Anatomical observation of cross-sectioned needles of *Pinus densiflora* after 30 ppb ozone fumigation. Control (a and a-1) and ozone treatment (b and b-1).

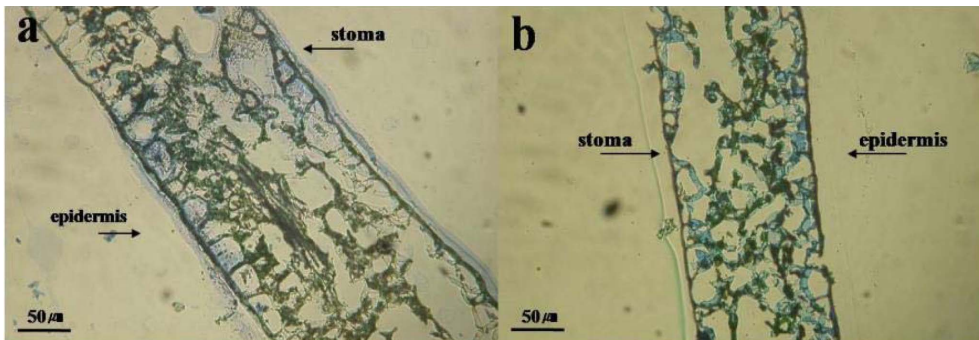


Figure 6. Anatomical observation of cross-sectioned leaves of *Spathiphyllum patinii* after ozone fumigation. Control (a) and ozone treatment (b).

4. 잎의 해부학적 특성

오존 처리가 식물의 잎에 피해를 주는 정도를 알아보기 위해 잎의 해부학적 특징을 조사 하였다. 소나무의 경우 좀 더 확대한 사진을 보면 대조구와 처리구간의 염색의 차이가 있는 것을 제외하고 세포벽이나 조직에 있어서는 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있다. 또한 항산화 효소의 활성에도 거의 변화가 없는 것으로 미루어 보아 실험구에 처리한 30 ppb 정도의 오존 농도에서는 소나무의 경우 만성적인 피해 현상이 거의 나타나지 않은 것을 알 수 있다 [Figure 5(a), (a-1), (b), (b-1)]. 실제로 소나무는 아황산가스에 노출시키고 20일 동안 회복시키면 정상적인 광합성 능력이 돌아오는 것으로 보고된 바 있다(Woo et al., 2003).

Figure 6(a)는 스파티필름의 대조구 앞으로 기공과 표피 조직이 뚜렷하게 보이며, 내부조직의 모습도 정돈되어 있

다. 반면에 처리구의 경우, 기공이 있는 잎의 뒷면의 해면 조직이 많이 손상을 입은 것을 알 수 있다[Figure 6(b)]. 스파티필름의 광합성속도는 대조구에 비해 오존 처리구가 낮게 나타났으며(Figure 2), 수분이용효율은 오존 처리구와 대조구간의 유의성 있는 차이가 나타나지 않았다(Figure 3). 이는 오존 처리구에서 대조구에 비해 높은 수분이용효율이 나타났던 소나무와 반대되는 결과로서, 내성기작의 오존의 유입을 막기 위한 기공조절이 스파티필름에서는 식물 조직의 손상으로 인해 충분한 역할을 하지 못한 것으로 판단된다.

스킨답서스 대조구는 표피세포가 형태를 유지 하고 있으나[Figure 7(a)], 처리구는 표피세포의 형태가 많이 허물어진 것을 볼 수 있다[Figure 7(b)]. 스킨답서스의 광합성 속도는 대조구에 비해 오존 처리구에서 뚜렷한 감소를 보

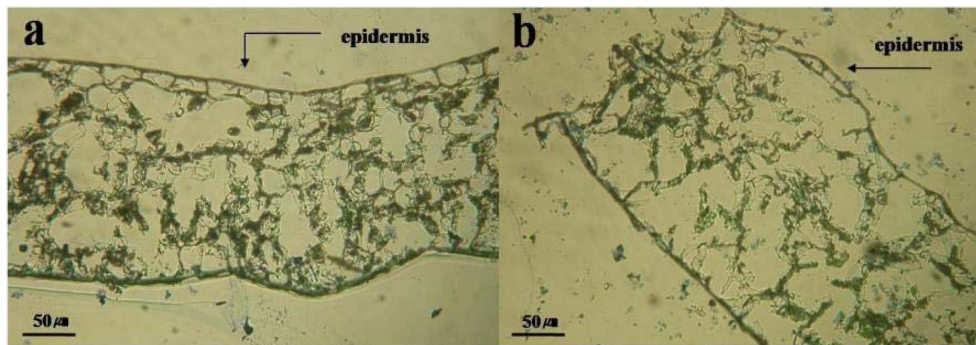


Figure 7. Anatomical observation of cross-sectioned leaves of *Epipremnum aureum* after ozone fumigation Control (a) and ozone treatment (b).

었는데(Figure 2), 이러한 조직의 손상이 식물의 광합성 기능에 크게 영향을 미친 것으로 생각된다. 한편, 수분이용 효율에 있어서도 오존 처리구와 대조구간의 유의성은 없었으나 오존 처리구가 대조구에 비해 수분이용효율이 낮은 경향을 보였는데, 이는 감소하는 광합성속도에 비해 증가한 증산속도를 의미하는 것으로 수분손실이 동화산물의 생성보다 더 많은 비효율적인 기작을 보이고 있음을 알 수 있다. 스킨답서스의 이러한 결과들을 통해 스파티필름과 마찬가지로 기공을 통해 유입된 오존에 의한 산화피해로 인해 식물의 내부 조직이 손상되고 이로 인해 더욱 그 피해가 가중되고 있음을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 것과 같이 30 ppb 정도의 오존 농도에서는 소나무는 해부학적인 특성, 광합성속도, 항산화 활성에서 대조구와 크게 다르지 않은 것을 알 수 있다. 반면에 실내식물인 스파티필름과 스킨답서스의 경우 오존 처리구에서 광합성속도가 감소하고, 항산화 효소인 GR 활성이 증가하였으며 잎 내부 조직의 손상이 크게 나타나 오존에 대한 민감성이 소나무에 비해 큰 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었음.

인용문헌

Aben, J.M.M., Janssen-jurovicov, M., and Adema, E.H. 1990. Effects of low-level ozone exposure under ambient conditions on photosynthesis and stomatal control of *Vicia faba* L. *Plant, Cell and Environment* 13(5): 463-469.

Asada, K. 1992. Ascorbate peroxidase-a hydrogen peroxide-scavenging enzyme in Plants. *Physiologia Plantarum* 85: 235-241.

Ashraf, M., Arfan, M. Shahbaz, M. Ahmad, A., and Jamil, A. 2002. Gas exchange characteristics and water relations in

some elite okra cultivars under water deficit. *Photosynthetica* 40(4): 615-620.

Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72: 248-254.

Conklin, P.L. and Barth, C. 2004. Ascorbic acid, a familiar small molecule intertwined in the response of plants to ozone, pathogens, and the onset of senescence. *Plant, Cell and Environment* 27: 959-970.

D'Haese, D., Vandermeiren, K., Asard, H., and Horemans, N. 2005. Other factors than apoplastic ascorbate contribute to the differential ozone tolerance of two clones of *Trifolium repens* L. *Plant, Cell and Environment* 28: 623-632.

Grantz, D.A., Silva, V., Toyota, M., and Ott, N. 2003. Ozone increases root respiration but decreases leaf CO₂ assimilation in cotton and melon. *Journal of Experimental Botany* 54(391): 2375-2384.

Guri, A. 1983. Variation in glutathione and ascorbic acid content among selected cultivars of *Phaseolus vulgaris* prior to and after exposure to ozone. *Canadian Journal of Plant Science* 63(3): 733-737.

Je, S.M., Son, S.G., Woo, S.Y., Byun, K.O., and Kim, C.S. 2006. Photosynthesis and chlorophyll contents of *chloranthus glaber* under different shading treatments. *Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology* 8(2): 54-60.

Kangasjarvi, J., Talvinen, J., Utriainen, M., and Karjalainen, R. 1994. Plant defense systems induced by ozone. *Plant Cell Environment* 17: 783-794.

Kamosky, D.F., Pregitzer, K.S., Zak, D.R., Kubiske, M.E., Hendrey, G.R. Weinstein, D., Nosal, M., and Percy, K.E. 2005. Scaling ozone responses of forest trees to the ecosystem level in a changing climate. *Plant, Cell and Environment* 28: 965-981.

Karpinski S., Reynolds, H., Karpinska, B., Wingsle, C., Creissen G., and Mullineaux, P. 1999. Systemic signaling and acclimation in response to excess excitation energy in *Arabidopsis*. *Science* 284(5414): 654-657.

Koch, J.R., Scherzer, A.J., Eshita, S.M., and Davis, K.R.

1998. Ozone sensitivity in hybrid poplar is correlated with a lack of defence-gene activation. *Plant Physiology* 188(4): 1243-1252.
- Lehnherr, B., Michier, F., Grandjean, A., and Fuhrer, J. 1988. The regulation of photosynthesis in leaves of field-grown spring wheat (*Triticum aestivum* L., cv Albis) at different levels of ozone in ambient air. *Plant Physiology* 88(4): 1115-1119.
- Lim, J.H., Woo, S.Y., Kwon, M.J., Chun, J.H., and Shin, J.H. 2006. Photosynthetic capacity and water use efficiency under different temperature regimes on healthy and declining *Korean fir* in MT. Halla. *Journal of Korean Forestry Society* 95(6): 705-710.
- Mansfield, T.A. and Person, M. 1996. Disturbances in stomatal behavior in plant exposed to air pollution. pp. 179. In: Yunus, M. and Iqbal, M. (eds.). *Plant response to air pollution*. John Wiley & Sons, New York.
- May, M., Vernoux, T., Leaver, C., van Montagu, M., and Inze, D. 1998. Glutathione homeostasis in plants: implications for environmental sensing and plant development. *Journal of Experimental Botany* 49(321): 649-667.
- Meloni, D.A., Oliva, M.A., Martinez, C.A., and Cambraia, J. 2003. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. *Environmental and Experimental Botany* 49(1): 69-76.
- Pasqualini, S., Picciono, C., Reale, L., Ederli, L., Torre, G.D., and Ferranti, F. 2003. Ozone-induced cell death in Tobacco cultivar Bel W3 plants. The role of programmed cell death in lesion formation. *Plant Physiology* 133(3): 1122-1134.
- Paoli, L., Corsini, A., Bigagli, V., Vannini, J., Bruscoli, C., and Loppi, S. 2012. Long-term biological monitoring of environmental quality around a solid waste landfill assessed with lichens. *Environmental Pollution* 161: 284-290.
- Peng, C., Ouyang, Z., Wang, M., Chen, W., and Jiao, W. 2012. Vegetative cover and PAHs accumulation in soils of urban green space. *Environmental Pollution* 161: 36-42.
- Rao, M.V., Paliyath, G., and Ormrod, D.P. 1996. Ultraviolet-B and ozone-induced biochemical changes in antioxidant enzymes of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology* 110(1): 125-136.
- Rao, M.V. and Dubey, P.S. 1990. Biochemical aspects (antioxidants) for development of tolerance in plants growing at different low levels of ambient air pollutants. *Environmental Pollution* 64(1): 55-66.
- Reich, P.B. and Amundson, R.G. 1985. Ambient levels of ozone net photosynthesis in tree and crop species. *Science* 230: 566-570.
- Wang K.Y., Kellomaki, S., and Zha, T. 2003. Modifications in photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence in 20-year-old pine trees after a four exposure to carbon dioxide and temperature elevation. *Photosynthetica* 41(2): 167-175.
- Wohlgemuth, H., Mittelstrass, K., Kschieschan, S., Bender, J., Weigel, H.J., Overmyer, K., Kangasjarvi, J., Sandermann, H., and Langebartels, C. 2002. Activation of an oxidative burst is a general feature of sensitive plants exposed to the air pollutant ozone. *Plant, Cell and Environment* 25: 717-726.
- Woo, S.Y. 2006. Trends of several air pollutants and the effects of ozone on the plant antioxidant system in *Platanus occidentalis* in Korea. *Journal of Korean Forestry Society* 95(2): 183-187.
- Woo, S.Y., Kwon, K.W., Lee, J.C., Choi, J.H., and Kang, B.S. 2003. Recovery of net photosynthetic rate after SO₂ fumigation in *Quercus acutissima*, *Pinus densiflora*, *Populus alba* × *glandulosa* and *Acanthopanax sessiliflorus*. *Photosynthetica* 41(2): 319-320.
- Woo, S.Y. 1997. Growth, photosynthesis and rubisco activity of resistant hybrid poplar (*Populus trichocarpa* × *P. deltoides*) to ozone exposure-A link with compensatory strategy. *Journal of Korean Forestry Society* 86(1): 80-86.
- Yukihiro, M., Hiramatsu, T., Bouteau, F., Kadono, T., and Kawano, T. 2012. Peroxyacetyl nitrate-induced oxidative and calcium signaling events leading to cell death in ozone-sensitive tobacco cell-line. *Plant Signaling & Behavior* 7(1): 113-120.