

Open-Top chamber 內에서 오존에 露出시킨 현사시 5個 클론의 生長量과 오존에 對한 敏感性과의 關係^{1*}

金兌奎² · 李景俊² · 金君保² · 具永本³

Sensitivity of Five Clones of *Populus alba* x *P. glandulosa* Cuttings to Ozone Exposure in Open-Top Chambers in Relation to Their Growth Rates^{1*}

Tae Kyu Kim², Kyung Joon Lee², Goon Bo Kim² and Yong Bon Koo³

요 약

본 연구는 수목의 오존에 대한 피해정도가 수목 고유의 성장속도와 관련되어 있는지를 검증하기 위하여 실시하였다. 생장이 우수한 현사시(*Populus alba* x *P. glandulosa*) 4호 품종 중에서 두 개 클론(72-30, 72-16)과 생장이 비교적 저조한 현사시 2호 품종 중에서 3개 클론(72-28, 72-27, 72-19)을 본 실험에서 비교하였다. 위의 5개 클론의 삼수를 4월초 2ℓ 화분에 삼목하여 증식시킨 후, 8월 하순에 야외에서 3개의 open top chamber(직경 2.5m, 높이 2.0m) 내에서 30일 동안 70ppb와 130ppb의 오존에 1일 5시간씩 노출하였다. 대조구는 활성탄으로 여과하여 오존의 농도가 30ppb이하로 유지되도록 하였으며, 각 클론별, 처리별로 20개의 화분을 반복으로 사용하였다.

대조구에서 두 품종간의 생장비교는 현사시 4호가 현사시 2호보다 잎 건중량에서 73%, 뿌리 건중량에서 64%, 총건중량에서 38% 더 우수하여 현사시 4호의 성장속도가 2호보다 우수함을 입증하였다. 오존에 의한 가지적 피해는 70ppb 오존처리에서는 나타나지 않았으며, 130ppb 처리에서 현사시 4호에서만 관찰되었으며, 성숙잎에서 전형적인 작은 갈색 반점들로 나타났으며, 성숙잎의 조기낙엽을 가져왔다. 70과 130ppb 오존처리는 5개 모든 클론의 수고생장, 잎과 뿌리의 건중량과 총건중량을 감소시켰는데, 이 중에서 뿌리생장을 가장 크게 감소시켰다. 70ppb 오존에서 뿌리의 감소량은 현사시 4호가 39.7%이고, 현사시 2호는 13.8%이었다. 130ppb 오존에서도 현사시 4호의 뿌리감소량은 47.4%이고, 현사시 2호는 34.9%이었다. 이로 인하여 shoot/root율은 130ppb에서 현사시 4호는 63.4% 증가한 반면, 현사시 2호는 22.1% 증가에 그쳤다. 오존에 의한 기공전도도와 순광합성량의 변화에서도 현사시 4호가 현사시 2호보다 더 많이 감소하였다. 특히 130ppb 오존에서 현사시 4호의 순광합성량은 69.5% 감소한 반면에, 현사시 2호는 31.5% 감소하였다. 따라서 위의 여러 가지 생리적 반응을 근거로 하여 생장이 우수한 현사시 4호가 생장이 상대적으로 적은 현사시 2호보다 오존에 더 민감하다고 판단할 수 있으며, 수목의 오존에 대한 피해정도는 수목 고유의 성장속도가 관련되어 있다고 결론 짓는다.

SUMMARY

This study was conducted to test a hypothesis that sensitivity of trees to ozone exposure was related to their growth rates. Two cultivars of *Populus alba* x *P. glandulosa* with different genetic growth potential were used for the comparison. Two clones(72-30, 72-16) of cultivar No. 4 with fast growing

¹ 接受 1999年 11月 15日 Received on November 15, 1999.

² 서울대학교 농업생명과학대학 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Suwon, Kyounggi-Do 441-744, Korea.

³ 산림청 임업연구원 임목육종부 Forest Research Institute, Forestry Administration, Suwon 441-350, Korea.

* 본 연구는 서울대학교 발전기금의 연구비(95-10-2092)로 이루어진 것임.

potential and three clones(71-28, 72-27, 72-19) of cultivar No. 2 with slow growing potential were propagated in early spring by cutting in 2-ℓ plastic pots. They were grown outdoor for 5 months and exposed in late August for 30 days to 70 and 130ppb ozone in a open-top chambers(2.5m in diameter and 2m in height). Ozone concentration in a control chamber was maintained below 30ppb by filtering with activated charcoal. Each treatment was replicated twenty times.

In a control chamber, cultivar No. 4 grew 73%, 64%, and 38% faster than cultivar No. 2 in leaf weight, root weight, and total dry weight, respectively. Visible injury was observed only in cultivar No. 4 in 130ppb treatment. Ozone treatment at both 70 and 130ppb decreased height growth, dry weight of leaf, root, and entire plants in all five clones. Particularly root growth was reduced by 39.7% and 13.8% in cultivar No. 4 and No. 2, respectively, in 70ppb treatment. Consequently, shoot/root ratio of cultivar No.4 was increased by 63.4%, while that of cultivar No.2 was increased by 22.1%. Stomatal conductance decreased more in cultivar No.4 than in cultivar No.2. Net photosynthesis of cultivar No.4 at 130ppb ozone decreased by 69.5%, while that of cultivar No.2 decreased by 31.5%. Above mentioned physiological responses of two cultivars to ozone strongly suggested that fast growing cultivar No.4 was more sensitive to ozone than slow growing cultivar No.2. It was concluded that sensitivity of trees to ozone exposure was closely related to their growth rates.

Key words : 70ppb, 130ppb, stomatal conductance, net photosynthesis, ascorbate, root growth, pigments, shoot-root ratio, growth potential

서 론

오존은 지구 대기권 중 성층권과 대류권에 주로 존재하는데, 전체 오존의 90%가 성층권에, 나머지 10% 정도가 대류권에 존재하며 지구생태계에 각기 다른 중요한 역할을 한다(Fabian, 1989). 성층권에 존재하는 오존은 태양으로 복사되는 300 nm이하 파장의 자외선을 흡수하여 생태계를 보호하는 방어막 역할을 한다. 그러나 대류권에 존재하는 오존은 성층권에 비해 적은 양이나, 사람이나 농작물, 산림 생태계에 직접적으로 영향을 준다. 1990년대에 이르러서는 대류권 오존에 의한 동식물의 직접적인 피해가 여러 나라에서 새로운 환경문제로 주목받고 있다(Ashmore와 Bell, 1991). 대류권 오존은 주요한 대기오염물질로서 농작물이나 수목과 같은 식물에게 직접적인 피해를 준다(Krupa와 Manning, 1988). 오존에 의한 피해는 농작물의 생산성을 감소시키는데, 미국에서 대기오염으로 인한 농작물 피해의 90% 정도가 오존에 의한 직간접적인 피해로 설명될 수 있다고 한다(Heck 등, 1982; 1983).

한편 오존은 수목의 성장 및 광합성을 감소시키는 것으로 보고되고 있으며(Reich와 Amundson, 1985), 미국 동부 고산지대의 *Picea rubens*림 쇠퇴(Johnson, 1992)와 유럽 중부지역 산림쇠퇴(Schmieden와 Wild, 1995)의 주요 요인으로 작용

한다고 보고되었다. 우리 나라의 경우 현재 도시 지역과 도시인근 지역에서의 오존에 의한 수목의 피해는 여러 차례 보고되었으나(이경준 등, 1995), 산림지역에서의 오존에 의한 직간접적인 산림쇠되는 보고되고 있지 않다.

수목의 오존에 대한 저항성은 수종별로 차이를 나타내지만, 한 수종 내에서도 산지나 클론에 따라 차이를 나타낸다(Temple 등, 1993). 오존에 대한 저항성의 차이는 수종 및 클론 간 광합성 속도와 기공개폐도의 차이와 같은 생리적 기작이 중요한 요인으로 작용하는데(Beyers 등, 1992), 이 밖에도 오존 등의 산화성 물질에 대한 식물의 생화학적, 생리적 항산화 방어기작으로서 오존 저항성을 설명하려는 연구들이 수행되고 있다(Pell 등, 1997).

클론 간 성장속도의 차이는 유전적 요인에 따라 광합성 속도, 기공개폐 기작, 탄수화물 대사와 같은 생리적 차이에 기인한다. 클론간의 유전적 차이에 기인한 내재적인 성장속도의 차이는 오존 저항성의 차이를 유발할 수 있다고 하는데, Patton(1981)은 저농도의 오존에 노출되었을 경우 생장이 가장 좋았던 클론이 고농도의 오존에 노출되었을 경우에는 더 큰 생장의 감소를 보였음을 보고하였다. 따라서 수목생장과 오존 저항성과의 관련성을 파악함으로써 수목의 오존 저항성 기작에 대한 이해를 높일 수 있으며, 오존 저항성 품종 선발의 기초로 삼을 수 있다.

사시나무 속은 전세계적으로 분포하는 대표적인 속성수로서 육종을 통하여 많은 클론이 개발되어 있으며, 한국의 경우 교잡육종에 의해 현사시(*Populus alba* × *P. glandulosa*)를 개발하여 여러 나라에서, 여러 클론이 심겨지고 있다. 현사시의 성장량은 클론별로 큰 차이를 나타내고 있으며, 클론에 따라서 독특한 유전적, 생리적 변이가 알려져 있다(현신규, 1984).

본 연구는 “수목의 오존에 대한 피해정도는 수목 고유의 성장속도와 관련되어 있다”는 가설을 검증하기 위하여 실시하였다. 성장속도가 다른 현사시(*Populus alba* × *P. glandulosa*)의 5개 클론을 open top chamber 내에서 오존에 노출시키면서 부위별 성장량, 가지적 피해, 광합성, 기공전도도, 엽록소 함량, 항산화물질의 함량을 측정하여 상호 비교하였다.

재료 및 방법

1. 연구재료

본 연구에는 현사시나무(*Populus alba* × *P. glandulosa*)의 두 개 품종을 공시 수종으로 하였다. 현사시 2호 품종의 3개 클론과 현사시 4호 품종의 2개 클론을 선택하여 총 5개 클론을 실험에 이용하였다. 1997년 봄에 임목육종연구소의 채수포에서 현사시 2호의 3개 클론(72-19, 72-27, 72-28)과 현사시 4호의 2개 클론(72-16, 72-30)의 삽수를 구입하였다.

이 실험에 사용된 현사시 2호와 4호는 다음과 같은 계보를 가지고 있다. 현사시 2호는 이태리에서 은백양(*Populus alba*) 화분을 도입하여 우리나라에 도착화된 은백양에 교잡하여 얻은 차대묘 중에서 우수한 개체를 골라 수원사시와 역교잡한 품종이다. 현사시 4호는 2호 중에서 산지안정화 시험을 거쳐 생장이 우수한 것을 선발한 품종이다(노의래와 이성규, 1983; 구영분, 1996). 따라서 현사시 4호는 대체적으로 현사시 2호보다 생장이 우수하다고 할 수 있다.

4월초 각 클론별로 평균 120개체씩 삽목하였다. 삽수를 20cm 정도로 잘라 발근촉진을 위하여 25% ethanol에 녹인 IBA 0.1% 용액에 20분간 침적시켜서 삽목하였다(임경빈, 1991). 토양은 모래와 표토장에서 채취한 흙을 2:3의 비율로 섞어 조제하였으며, 화분은 2ℓ용량의 플라스틱용기를 사용하였다. 오존노출 이전까지 약 5개월간 야외

에서, 매일 화분이 마르지 않을 정도로 적당량 관수하여 양묘하여, 이 중에서 활착이 양호하고 생장이 균일한 개체를 클론별로 60개체를 선별하여 실험에 이용하였다.

2. 오존노출

오존노출은 서울대학교 농업생명과학대학 구내 묘포에 설치한 3개의 open top chamber(OTC)에서 실시하였다. OTC는 쇠파이프를 이용하여 직경 2.5m, 높이 2.0m 크기의 팔각원통형 골격에 투명 PVC 필름을 덮어서 제작하였다. 바닥에는 화분이 토양과 직접 닿지 않게 하기 위하여 높이 5cm의 나무로 받침대를 제작하여 설치하였다. 오존 배분장치는 지상에서 1m 높이까지 PVC 필름을 이중으로 설치하여 duct를 만들고, 그 안쪽에 2cm 직경의 구멍을 160개 뚫어 송풍기로 바람(9m³/min)을 고르게 불어넣어 공기와 함께 오존이 투입되도록 하였다. 관수는 타이머를 이용한 미스트 장치로 매일 오전 8:00시와 오후 18:00시 두 번에 걸쳐 화분당 200ml가량씩 수돗물을 공급하였다.

오존은 방전식 오존발생장치(Anseros, Germany)에 순도 95% 산소를 투입하여 발생시키고, 레귤레이터와 테프론 재질의 튜브를 거쳐 각 OTC에 분산시켰다. 세 개의 OTC 중에서 한 개는 대조구, 다른 두 개는 오존처리구로 사용하였다. 오존농도의 측정은 UV photometric ozone analyzer(Dasibi Environmental Co., 미국)를 이용하였다. OTC내 오존농도는 지상 1m 지점에 설치된 2곳의 점원을 통해 들어온 공기를 mixing T valve를 거쳐 10ml/sec의 유속으로 오존분석기로 전달되도록 하였다. 측정된 자료는 data logger(Dasibi Environmental Co., 미국)를 이용하여 10분 간격으로 적분하여 기록하였다. 오존 농도는 대조구의 경우 활성탄 필터로 여과하여 30ppb이하로 공급되게 하였으며, 오존처리구의 오존 농도는 60~80ppb(평균 70ppb)와 120~140ppb(평균 130ppb)의 두 수준으로 유지하였다. 노출은 매일 아침 11시부터 오후 4시까지 5시간 동안, 8월 22일부터 9월 22일까지 30일간 수행하였다.

그림 1은 실험에 사용한 오존노출 농도의 시간별 변화를 보여주고 있다. 노출은 여름철 도시에 시간별 오존농도 변화와 유사하게 하기 위하여 11:00시에 시작하였으며, 오존 농도는 급격히 증가하여 12시경에는 목표농도인 70과 130ppb를 유

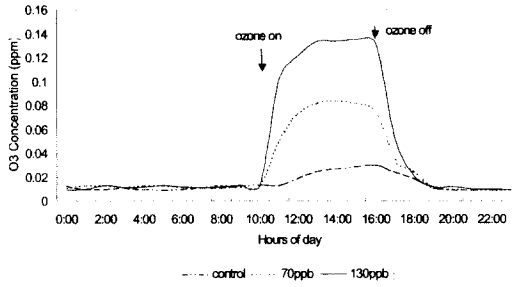


Fig. 1. Time schedule of ozone exposure to *Po-pulus alba* × *P. glandulosa* in open-top chambers.

지하도록 하였다. 목표 오존 농도는 오후 4시까지 지속되었으며, 그 이후 감소하도록 조정하였다.

3. 가시적 피해 및 생리적 특성의 측정

오존노출 기간 동안 가시적 피해는 매일 관찰하여 병반의 발생시기를 기록하였다. 노출 종료시 수고, 잔존잎수, 낙엽된 잎수를 조사하고, 잎, 줄기, 삽수, 뿌리로 나누어 건중량을 측정하였다.

광합성은 오존노출 종료 직전에 전개체를 대상으로 10:00~14:00 사이에 LI-6400 휴대용 광합성측정기(Li-Cor Inc., USA)로 순광합성속도 (A_n)와 기공전도도(g_{sw}), 광반응곡선을 측정하였다. 잎의 생리적 연령의 차이에 따른 오차를 줄이기 위하여 LPI(Leaf plastochron index) 7 또는 8에 해당되는 잎을 대상으로 한정하여 측정하였다. 큐벳조건은 25°C, PAR 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$, RH 30%를 유지하도록 하였으며, 광반응곡선(Light-Photosynthesis curve)의 측정에는 큐벳에 내장된 LED를 광원으로 사용하였다.

광합성색소인 chlorophyll a, b, total carotenoids는 실험종료 후 4개체씩을 대상으로 잎을 잘게 썰은 후 10mL의 dimethyl sulfoxide로 추출하고 Lichtenthaler(1987)의 식을 사용하여 실온에서 470, 644, 662nm의 파장에서 흡광법으로 측정하였다. 잎의 Ascorbate 함량은 Wildi와 Lütz(1996)의 방법에 따라서 측정하였다. LPI 7~8인 잎을 0.2g 채취하여 액체질소에 넣고 갈아 50mM KH_2PO_4 에 5mM 2,3-dihydroxybutane-1,4-dithiol (DTE)를 혼합한 buffer(pH 6.0)로 추출하였다. 12,000×g에 15분간 원심분리 후 상등액을 0.45 μm 필터로 여과하였다. 상등액을 각각 1mL씩 두 개로 나누어 하나에는 ascorbate oxidase 용액(20U/m³, 50mM KH_2PO_4 , pH 6.0)을 첨가한 후 흔들어서

ascorbate를 dehydroascorbate(DHA) 상태로 환원시켰다. HPLC 분석에서는 이동상으로 25mM KH_2PO_4 buffer(pH 6.0), 컬럼은 Luna C18(5 μm , 4.6×250mm)을 사용하여 분리하고 UV 264nm에서 검출하였다.

4. 자료분석

모든 통계분석은 SAS(ver. 6.12, SAS Institute Inc., USA) 패키지의 GLM과 MEANS 절차를 이용하였다. GLM 절차에서 모든 측정항목에 대한 클론 및 오존수준간의 반응의 차이를 이원분산분석모델로 분석하였다. 측정항목에 있어서 클론간 평균의 비교에는 REGWF 다중검정($\alpha = 0.05$)을 이용하였고, 대조구와의 비교에는 Dunnett's T-test($\alpha = 0.05$)로 오존처리에 따른 대조구와의 차이를 검정하고 그 변화율을 퍼센트로 나타내었다.

결과 및 고찰

1. 가시적 피해

오존에 의한 가시적인 피해는 오존 처리 농도에 따라 품종별로 다르게 나타났다. 70ppb의 오존 농도에서는 모든 클론의 개체에서 가시적인 피해 증상이 보이지 않았다. 130ppb의 오존 농도로 처리한 경우 현사시 4호의 개체에서 가시적 피해 증상이 관찰되었는데, 초기에는 증상이 보이지 않다가 노출개시 20일 후부터 생장이 우수한 현사시 4호인 72-16 클론과 72-30클론의 일부 성숙한 잎에서 물에 젖은 듯한 전형적인 오존 피해증상을 관찰할 수 있었다. 30일간의 노출이 끝난 시점에서는 현사시 4호의 모든 개체에서 피해증상을 관찰하였으며, 일부 잎에서는 작은 반점들이 확대되어 합쳐져서 커다란 갈색반점으로 커지는 경우도 있었으나, 잎 전체가 괴사하지는 않았다. 현사시 2호의 3개 클론에서는 가시적 피해가 관찰되지 않았다. 따라서 가시적 피해만을 기준으로 판단할 경우, 생장이 우수한 현사시 4호가 생장이 저조한 현사시 2호보다 오존에 더 민감하게 피해를 받는다고 할 수 있다. 본 실험에서 현사시 4호의 경우 130ppb에서의 가시적 피해는 모두 성숙한 잎에서 나타났으며, 어린 잎에서는 전혀 관찰되지 않아서, 어린 잎은 오존에 대한 저항성이 성숙 잎보다 큼을 알 수 있다. 오존 노출 후 잎의 피해 증상은 주로 황화현상(chlorosis)과 괴사(necrosis)

인데(Kozlowski와 Constantinidou, 1986), 때때로 물에 젖은 반점과 같은 것이 보고되기도 한다(Kim과 Lee, 1995). Mooi(1980)는 *Populus euramericana*의 두 변종에 대한 오존 실험에서 노출 10일 정도 후에 잎의 앞면에서 약한 황화현상과 괴사를 관찰하였다고 보고하였다.

가시적인 피해 증상은 잎이 회복할 수 없을 정도의 고농도에 단기간 노출되는 경우이거나, 아니면 저농도일지라도 장기간 노출되었을 경우 나타나는 증상이기 때문에, 본 실험에서처럼 황화현상이나 커다란 괴사 반점이 관찰되지 않았던 것은 처리농도가 70ppb와 130ppb로 비교적 낮았으며, 노출기간이 30일로 비교적 짧았기 때문으로 생각된다.

2. 청정대기에서 두 품종의 생장 비교

본 실험에서는 생장이 우수한 현사시 4호 품종 중에서 72-30과 72-16의 두 개 클론을 사용하였으며, 생장이 저조한 현사시 2호 품종 중에서 72-28, 72-27, 72-19의 세 개 클론을 사용하였다. 표 1에 30일간의 오존노출이 끝난 후에 수확하여 측정된 생장자료를 제시하였다.

수고생장의 경우에 현사시 4호의 평균수고(128.9cm)가 2호의 평균수고(119.8cm)보다 약간 높았으며, 통계적으로 유의성을 보여주지 않았다. 특히 2호인 72-27의 수고생장이 4호인 72-16보다 우수하여, 두 품종간에 차이를 인정할 수 없었다. 그러나 잎, 뿌리, 그리고 총건중량에서는 현사시 4호가 현사시 2호보다 월등하게 우수하여, 1% 수준에서 통계적으로 유의성을 인정할 수 있었다. 현사시 4호의 평균 잎 건중량(6.4g)은 2호의 평균건중량(3.7g)보다 73% 더 많았다. 뿌리의 건중량에서도 현사시 4호의 평균치(8.2g)는 2호의 평균치(5.0g)보다 64% 더 컸다. 총건중량에서도 4호의 평균치(36.6g)는 2호의 평균치(26.5g)보다 38% 더 커서, 현사시 4호의 건중량 생산이 현사시 2호보다 우수함을 입증하였다. 이러한 결과는 현사시 2호와 4호에 관한 기존의 연구보고와 일치하는 내용이다(구영본, 1996).

3. 오존 농도에 따른 생장 변화

표 1에서 보듯이 현사시의 5개 클론은 모두 오존에 노출시켰을 경우 생장이 감소하였다. 수고생장은 70ppb 오존처리에서 5개 클론에서 평균 7.4% 감소한 반면에, 130ppb 오존 처리에서는

평균 9.5% 감소하여, 두 처리간에 유의한 차이를 나타내지 않았다. 수고생장에서 오존의 두 처리간에 차이가 나타나지 않은 것은 130ppb의 오존 피해가 줄기 하단부의 성숙잎에서 나타나며, 이러한 성숙잎은 수고생장에 크게 기여하지 않기 때문이다(Kozlowski와 Pallardy, 1997). 그러나 수고생장과는 다르게 잎, 뿌리, 그리고 총 건중량의 감소는 처리간에 큰 차이를 보여주었다. 잎의 건중량은 70ppb 오존에서 대조구와 비교하여 19.2% 감소하고, 130ppb 오존에서 31.9% 감소하였다. 뿌리의 건중량은 70ppb 오존에서 24.1% 감소하였으며, 130ppb에서는 39.9% 감소하였다. 총건중량의 경우에도 같은 경향을 나타내서 70ppb 오존에서 13.9% 감소한 반면에, 130ppb에서는 25.3% 감소하였다. 오존농도를 증가시킬 경우 생장량이 더욱 감소하는 예는 Reinert 등(1996)이 테다소나무를 대상으로 한 실험에서도 나타났으며, Karnosky 등(1996)이 *Populus tremuloides*를 대상으로 한 실험에서도 볼 수 있다.

현재 한국에서는 대기오염기준으로 오존의 농도가 0.12ppm(120ppb)일 때 오존주의보를 발령하도록 되어있으며(환경부, 1998), 본 실험에서 130ppb를 채택하여 1개월간 노출한 결과 건중량의 약 25% 가량이 감소하였으므로 오존주의보가 내릴 경우 가로수의 생장이 감소하고 가시적 피해를 입을 수 있다고 판단한다.

4. 오존에 의한 두 품종의 생장변화 비교

표 1에서 오존노출시 현사시 4호 품종(클론번호 72-30과 72-16)와 현사시 2호 품종(클론번호 72-28, 72-27, 72-19)의 생장자료를 서로 비교하면, 두 품종간에 뿌리에 관련된 자료에서 차이가 있음을 알 수 있다.

수고생장은 70과 130ppb 오존에 의해서 5개 클론이 1.2%에서 12.2%까지 다양하게 감소하였다. 현사시 4호의 평균감소량은 70ppb에서 6.7%인 반면, 130ppb에서는 10%이었으며, 현사시 2호는 수고감소량이 각각 7.8%와 9.2%로서 두 품종간에 유의성을 인정할 수 없었다. 잎의 건중량 감소에서는 비슷한 경향을 나타내서, 현사시 4호의 평균감소량은 70ppb에서 21.7%인 반면, 130ppb에서 37.8%이었으며, 현사시 2호는 그 감소량이 각각 17.5%와 27.9%이었으며, 두 품종간에 유의성을 인정할 수 없었다. 그러나 뿌리의 건중량 감소에서는 두 품종간에 차이가 인정되었다. 즉 현

Table 1. Growth parameters of five clones of potted *Populus alba* × *P. glandulosa* cuttings 30 days after exposure to 70 and 130ppb ozone in open-top chambers.

Parameters	O ₃ Level	Hyunsasi No. 4		Hyunsasi No. 2		
		72-30	72-16	72-28	72-27	72-19
Height (cm)	Control	135.5±10.3	122.3±3.2	120.3±8.6	134.3±2.6	110.0± 9.3
	70ppb	119.0±10.1 (-12.2)	120.8±3.3 (-1.2)	113.8±5.3 (-5.4)	121.5±8.0 (-9.5)	100.5±10.6 (-8.6)
	130ppb	120.3± 5.4 (-11.3)	111.5±6.5 (-8.8)	111.3±7.4 (-7.5)	119.8±3.9 (-10.8)	99.8± 7.2 (-9.3)
Leaf weight(g)	Control	5.8±1.0 ^{ab}	6.9±0.8 ^a	3.7±0.4 ^d	3.8±0.2 ^d	3.9±0.3 ^d
	70ppb	4.5±1.0 ^{ab} (-22.9)	5.5±0.2 ^a (-20.4)	2.8±0.3 ^d (-24.6)	3.0±0.2 ^d (-20.5)	3.6±0.4 ^{ab} (-7.5)
	130ppb	3.7±1.1 (-37.3)	4.3±0.6 (-38.3)*	2.7±0.4 (-28.5)	2.0±0.6 (-46.6)*	3.5±0.2 (-8.7)
Root weight(g)	Control	8.1±1.6 ^{ab}	8.3±0.5 ^a	5.7±0.5 ^{abc}	4.8±0.6 ^c	5.0±0.3 ^c
	70ppb	5.2±0.3 (-36.1)	4.7±0.2 (-43.2)*	3.9±0.2 (-31.7)*	4.4±0.3 (-7.9)	4.9±0.5 (-1.9)
	130ppb	4.1±0.7 (-49.1)*	4.5±0.7 (-45.7)*	3.4±0.1 (-41.3)*	3.5±0.9 (-27.2)	3.2±0.2 (-36.3)*
Stem weight(g)	Control	12.1±1.8	8.7±1.1	8.8±0.8	9.8±0.2	7.6±1.1
	70ppb	8.3±1.8 (-31.4)	8.2±0.7 (-5.4)	7.4±0.8 (-15.6)	8.2±1.1 (-15.7)	6.8±1.2 (-10.6)
	130ppb	9.0±1.1 (-26.2)	7.0±0.8 (-19.4)	7.4±1.1 (-16.0)	8.0±0.7 (-18.5)	5.1±0.3 (-32.1)
Stock weight(g)	Control	13.2±2.1	10.0±1.2	9.3±1.0	8.6±0.8	9.3±0.6
	70ppb	15.6±2.1 ^a (-18.1)	9.9±0.8 ^d (-0.6)	7.8±1.4 ^d (-16.2)	9.7±1.1b ^d (+12.7)	11.0±0.7 ^{ab} (+17.9)
	130ppb	13.8±2.0 (+4.2)	9.9±0.3 (-0.9)	7.1±2.3 (-24.0)	7.1±0.7 (-17.7)	7.1±0.3 (-24.0)*
Total weight (g)	Control	39.3±5.0 ^a	34.0±2.8 ^{ab}	27.6±1.8 ^{ab}	27.0±0.3 ^d	25.8±1.8 ^d
	70ppb	33.6±1.2 ^{ab} (-14.5)	28.4±1.6 ^a (-16.3)	22.0±1.0 ^d (-20.3)	25.4±2.5 ^d (-5.9)	26.3±0.8 ^d (+1.9)
	130ppb	30.5±4.0 ^a (-22.3)	25.7±1.7 ^{ab} (-24.2)*	20.5±2.8 ^d (-25.6)	20.6±2.2 ^{ab} (-23.7)	19.0±0.7 ^d (-26.4)*
Shoot/Root Ratio	Control	4.05±0.55	3.11±0.30	3.92±0.47	4.99±0.91	4.14±0.13
	70ppb	5.53±0.28 (+36.6)	5.03±0.23 (+61.9)*	4.69±0.42 (+19.6)	4.82±0.55 (-3.4)	4.55±0.63 (+10.0)
	130ppb	6.74±1.10 (+66.3)	4.98±0.59 (+60.40)*	5.06±0.64 (+29.2)	5.71±1.04 (+14.4)	5.07±0.61 (+22.6)

- 1) Each numbers is an average of 20 observations.
- 2) Numbers in parenthesis indicate increase(+) or decrease(-) in percentage of parameters compared with control.
- 3) Hyunsasi No. 4 and No. 2 are fast-growing and slow-growing cultivars, respectively.
- 4) *: Indicates significant difference at $\alpha=0.05$ level by Dunnet's t-test within a column of single parameter.
- 5) Suffixed alphabet indicates significant difference at $\alpha=0.05$ level by REGWF's multiple range test within a row of single treatment.

사시 4호의 뿌리 감소량은 70ppb 오존에서 39.7% 인 반면, 130ppb에서는 47.4%이었으며, 현사시 2호의 감소량은 각각 13.8%와 34.9%로서, 현사시 4호의 감소량이 2호보다 더 컸다. 총 건중량에서는 70ppb 오존의 경우, 현사시 4호가 15.4% 감소한 반면 현사시 2호는 12.9% 감소하였다. 그러나 130ppb 오존의 경우 현사시 4호의 총건중량이 23.2% 감소한 반면, 현사시 2호는 26.7% 감소하여, 두 품종간에 차이가 없었다.

shoot/root의 비율(S/R)은 표 1에 열거된 5개의 성장 parameter 중에서 두 품종간에 가장 크게 차이가 나는 부분이라고 할 수 있다. 70ppb 오존처리에서 현사시 4호의 S/R율은 평균 49.3% 증가한 반면, 현사시 2호는 8.7% 증가에 그쳤다. 130ppb 오존처리에서도 현사시 4호의 S/R율은 평균 63.4% 증가한 반면, 현사시 2호는 22.1% 증가에 그쳤다. 이는 두 수준의 오존처리에서 현사시 4호의 뿌리 생장이 크게 감소함으로 인하여 S/R율이 커졌다고 할 수 있다. 오존에 의해서 S/R율이 증가하는 것은 잎에서 오존의 해독을 위하여 에너지를 소모함으로써 뿌리로 이동할 탄수화물의 양이 감소하기 때문인 것으로 알려져 있다 (Rennenberg 등, 1996).

포플러의 경우 여러 개의 클론을 이용하여 오존에 대한 민감도를 측정할 예는 일부 보고되고 있다. Wang 등(1986)은 *Populus tremuloides*의 네 클론을 이용하여 오존에 대한 민감도를 조사하였는데, 클론간에 차이가 있으며, 지상부의 건중량 생산을 12~24%까지 감소시키고, S/R율을 증가

시켰다. Woo(1997)는 *Populus trichocarpa* × *P. deltoides* 잡종을 이용하여 오존을 노출시켰는데, 품종간에 저항성에 차이가 있었으며, 오존에 민감한 클론은 저항성 클론에 비해서 뿌리의 성장 감소가 더 크게 나타났다.

5. 광합성 색소의 변화

표 2에 오존 노출에 따른 현사시 5개 클론의 광합성 색소의 변화를 나타냈다. 무처리구의 경우 총엽록소함량은 현사시 4호가 17.0µg/g로써, 현사시 2호의 14.1µg/g보다 약간 높았으나 통계적으로 유의하지 않았다. 카로테노이드의 함량도 현사시 4호(5.37µg/g)가 현사시 2호(4.90µg/g)보다 약간 높았으나, 유의성이 인정되지 않았다.

오존노출로 인하여 엽록소와 카로테노이드는 4개 클론에서 감소하였다. 감소폭은 클론에 따라서 변이폭이 컸는데, 현사시 2호인 72-28과 72-27 클론은 최고 46%까지 크게 감소한 반면에, 72-16 클론은 9% 이내로 거의 감소하지 않았고, 72-19 클론은 오히려 증가하였다.

6. 기공전도도와 광합성량의 변화

표 3에 오존노출에 따른 5개 클론의 기공전도도와 광합성량의 변화를 나타냈다. 기공전도도는 클론에 따라서 큰 변이를 보여주고 있다. 72-19 클론의 경우에는 오존노출시 기공전도도가 오히려 증가하였으나, 나머지 4개 클론에서는 70ppb 오존의 경우 평균 20%가량 감소하였으며, 두 품종간에 큰 차이를 볼 수 없었다. 반면 130ppb 오

Table 2. Pigment changes of five clones of potted *Populus alba* × *P. glandulosa* cuttings 30 days after exposure to 70 and 130ppb of ozone in open-top chambers.

Parameters	O ₃ Level	Hyunsasi No. 4		Hyunsasi No. 2		
		72-30	72-16	72-28	72-27	72-19
Total chlorophyll (µg/g)	Control	16.29 ± 0.68 ^{ab}	17.64 ± 0.41 ^a	14.99 ± 0.47 ^{ab}	14.91 ± 0.69 ^{ab}	12.52 ± 1.97 ^c
	70ppb	11.76 ± 1.29 ^{bc} (-27.8)	17.63 ± 0.88 ^a (-0.1)	9.56 ± 0.77 ^c (-36.2)	7.97 ± 0.26 ^c (-46.5)*	16.36 ± 2.49 ^b (+30.7)
	130ppb	13.81 ± 0.64 (-15.2)*	16.05 ± 0.64 (-9.0)	11.87 ± 1.48 (-20.8)*	10.85 ± 1.81 (-27.2)*	14.17 ± 1.18 (+13.2)
Total carotenoids (µg/g)	Control	5.30 ± 0.31	5.44 ± 0.14	5.24 ± 0.12	5.04 ± 0.20	4.42 ± 0.61
	70ppb	4.15 ± 0.34 ^{ab} (-21.6)	5.34 ± 0.09 ^a (-1.9)	3.51 ± 0.29 ^b (-32.9)	2.93 ± 0.10 ^b (-41.8)	5.21 ± 0.56 ^a (+17.9)
	130ppb	4.92 ± 0.18 (-7.1)*	5.17 ± 0.12 (-4.9)	4.19 ± 0.48 (-20.0)*	4.16 ± 0.62 (-17.4)*	5.20 ± 0.39 (+17.7)

1) Each number is an average of 4 observations.
2) Refer to the Table 1 for the symbols and footnotes.

Table 3. Stomatal conductance, net photosynthesis, and ascorbate concentrations of five clones potted *Populus alba* × *P. glandulosa* cuttings 30 days after exposure to 70 and 130ppb ozone in open-top chambers.

Parameters	O ₃ Level	Hyunsasi No. 4		Hyunsasi No. 2		
		72-30	72-16	72-28	72-27	72-19
Stomatal conductivity (mmol H ₂ O/m ² s)	Control	213 ± 15 ^c	299 ± 18 ^b	357 ± 13 ^a	300 ± 23 ^{ab}	256 ± 15 ^{bc}
	70ppb	184 ± 14 ^c (-13.6)	228 ± 15 ^{bc} (-23.7)*	259 ± 17 ^b (-27.5)*	249 ± 6 ^b (-17.0)	314 ± 19 ^a (+22.7)*
	130ppb	127 ± 3 ^c (-40.4)*	83 ± 3 ^d (-71.9)*	297 ± 14 ^a (-16.8)*	338 ± 8 ^a (+12.7)*	267 ± 12 ^b (+4.3)
Net photosynthesis (μmol CO ₂ /m ² s)	Control	11.42 ± 0.45	11.47 ± 0.33	11.23 ± 0.38	10.90 ± 0.59	11.28 ± 0.36
	70ppb	7.34 ± 0.39 ^p (-35.7)*	9.72 ± 0.69 ^a (-15.3)*	10.00 ± 0.53 ^a (-11.0)	9.75 ± 0.22 ^a (-10.6)	10.36 ± 0.54 ^a (-8.1)
	130ppb	4.63 ± 0.15 ^c (-59.5)*	2.35 ± 0.18 ^g (-79.5)*	7.27 ± 0.18 ^b (-35.2)*	8.10 ± 0.30 ^a (-25.7)*	7.77 ± 0.23 ^{bd} (-31.0)*
Ascorbate level(μg/g)	Control	69.1	57.0	66.1	75.6	68.5
	70ppb	-	-	-	-	-
	130ppb	101.7 ± 3.29 ^{bc} (+43.5)*	95.97 ± 0.48 ^a (+68.4)*	95.69 ± 6.83 ^{bc} (+44.7)*	96.65 ± 6.47 ^c (+27.8)*	101.7 ± 2.40 ^b (+48.5)*

- 1) Each number for stomatal conductivity, net photosynthesis and ascorbate is an average of 36~39, 27~39, and 4 observations, respectively.
- 2) Refer to Table 1 for the symbols and footnotes.

존에서는 현사시 4호의 기공전도도가 평균 56.2% 감소한 반면에, 현사시 2호는 16.8% 감소하거나 혹은 12.7%의 소폭으로 증가하여 두 품종간에 큰 차이를 나타냈다.

청정공기 하에서 광량의 변화에 따른 5개 클론의 광합성곡선을 그림 2에 나타냈다. 광보상점은 photon flux density 50mmol/m²s 가량으로서 5개 클론이 비슷한 수치를 나타내고 있으며, 광포화점도 모든 클론에서 1500mmol/m²s 정도로 거의 유사하였다. 그러나 순광합성량은 포화광도에서 클론간에 차이를 보였으며, 현사시 4호의 순광합성량이 현사시 2호보다 더 크게 나타나서, 현사시 4호가 현사시 2호보다 더 빨리 자라는 기작을 설명해 주고 있었다.

오존 노출 시험에서는 표 3의 자료와 같이 70ppb 오존에 노출시킬 경우 5개 클론에서 순광합성이 평균 16.1% 감소하였으며, 130ppb 오존에서는 평균 46.2% 감소하였다. 이러한 감소의 내용을 보면, 두 품종간에 큰 차이를 보여주고 있다. 현사시 4호는 70ppb에서 순광합성이 26.1% 감소한 반면, 현사시 2호는 10% 감소하였다. 130ppb 오존에서는 현사시 4호의 순광합성이

69.5%로 크게 감소한 반면에 2호는 31.5% 감소하여 현사시 4호가 더 예민하게 반응을 보였음을 알 수 있다.

오존에 의해서 수목의 광합성이 영향을 받는 사실은 이미 알려져 있다. Reich(1983)는 *Populus deltoides* × *P. trichocarpa*를 125ppb에 60일간 노출시킬 경우 광합성의 감소를 가져오며, 이때 기공의 손상도 함께 나타난다고 하였다(Reich와 Lassoie, 1985). Woo(1997)는 *P. trichocarpa* × *P. deltoides*의 오존실험에서 민감한 품종의 광합성이 더 많이 감소한다고 발표하였다.

7. Ascorbate의 함량 변화

표 3에 항산화물질인 ascorbate의 변화를 나타냈다. 대조구에서 ascorbate의 함량은 평균 67.3 μg/g으로서 클론간에 혹은 두 품종간에 차이를 인정할 수 없었다. 130ppb의 오존처리에서 ascorbate의 함량은 크게 증가하였으며, 클론간에 변이가 있었다. 현사시 4호 중 72-16 클론에서 가장 높은 수치인 68.4%의 증가를 관찰하였으며, 2호 중 72-27 클론에서 가장 낮은 수치인 27.8% 증가를 보였으나, 두 품종간에 유의한 차이를 보이지

않았다.

ascorbate는 강력한 항산화제로서, 오존과 같은 산화물질이 증가할 경우 식물의 방어기작으로 체내에 증가하게 된다. *Fagus sylvatica*의 경우 세포내의 ascorbate 함량은 대기중의 오존농도와 상관관계를 보였으며, ascorbate 함량이 오존 스트레스의 지표로 사용될 수 있다고 한다(Luwe, 1996). 식물이 방어기작으로 만드는 물질에는 그 밖에 superoxide dismutase(Dhindsa 등, 1981)와 glutathione reductase(Tuomainen 등, 1996)가 있는데, 이 중에서 본 실험에서는 ascorbate 만을 측정하였다. Gupta 등(1991)은 오존에 노출된 *Populus deltoides* × *P. caudina*의 잎에서 ascorbate의 함량이 증가하며, 이때 glutathione의 함량도 함께 증가함을 관찰하였다.

8. 성장과 오존피해와의 관계 : 가설에 대한 해석

본 실험은 “수목의 오존에 대한 피해정도는 수목 고유의 성장속도와 관련되어 있다”는 가설을 검증하기 위하여 실시하였다. 이러한 근거는 여러 학자에 의해서 제시되었으며, 특히 포플러와 같은 속성수의 경우 Patton(1981)은 생장이 우수한 클론이 오존에 의해서 더 큰 성장감소를 가져온다고 하였다. 오존에 대한 반응을 농작물, 활엽수, 침엽수간에 서로 비교할 경우, 생장이 빠른 농작물이 활엽수보다, 그리고 생장이 빠른 활엽수가 침엽수보다 오존에 의해서 광합성과 성장량이 더욱 감소한다(Reich, 1987)는 연구결과도 위의 가설을 뒷받침하고 있다.

본 실험에서 표 1, 표 3, 그리고 그림 2의 자료들은 위의 가설을 뒷받침하고 있다. 표 1의 자료 중에서 생장이 우수한 현사시 4호의 두 개 클론

모두에서 70과 130ppb의 오존노출로 인하여 뿌리생장이 현사시 2호보다 현저하게 감소하였으며, 이로 인하여 현사시 4호의 S/R율이 크게 증가하였다. 현사시 4호의 뿌리생장이 현저하게 감소한 원인은 표 3에서 보듯이 기공전도도가 감소하면서 순광합성량이 급격히 감소했기 때문이다. 유사한 실험으로서 Woo(1997)는 *Populus trichocarpa* × *P. deltoides*를 이용한 실험에서 오존에 민감한 품종이 오존노출로 인하여 광합성량이 저항성 품종보다 더 많이 감소한다고 발표한 바 있다.

본 실험에서 130ppb 오존을 처리했을 때, 현사시 4호는 작은 갈색반점 형성과 같은 가시적 피해를 입은 반면에, 현사시 2호에서는 가시적 피해가 전혀 나타나지 않았다. 이와 같이 현사시 4호가 현사시 2호보다 가시적 피해, 뿌리생장의 감소, S/R율의 증가, 기공전도도의 감소, 그리고 순광합성속도의 감소가 더 크게 나타났으므로, 현사시 4호는 현사시 2호보다 오존에 더 민감한 품종이라고 판단할 수 있다. 따라서 생장이 우수한 현사시 4호가 생장이 상대적으로 적은 현사시 2호보다 오존에 더 민감하다는 결론으로 해석할 수 있다. 결론적으로 “수목의 오존에 대한 피해정도는 수목고유의 성장속도와 관련되어 있다”는 가설을 받아들일 수 있다. 또한 기존의 다른 연구결과(Reich, 1987)와 결부시킨다면, 생장이 빠른 품종 혹은 수종일수록 오존에 더 큰 피해를 받게 된다고 결론지을 수 있다. 생장이 빠른 수종이나 품종은 대개 기공전도도가 높아서 생장이 느린 수종보다 더 많은 대기 중의 CO²를 흡수하는 경향이 있으며, 이때 대기 중에 있는 오존가스를 함께 흡수함으로써, 더 많은 피해를 입게 된다(Kozłowski와 Pallardy, 1997).

인 용 문 헌

1. 구영본. 1996. 제1회 산림대토론회 보고서 : 속성수 재평가. 한국포플러위원회. PP.9-30.
2. 노의래·이성규. 1983. 안정성 분석에 의한 현사시 clone의 재선발. 임목육종연구보고. 19 : 20-27.
3. 이경준·한심희·김군보. 1995. 전국 주요 도시에 녹음수로 식재된 느티나무의 건강도 측정과 이를 이용한 대기오염상태 추정. 서울대학교 수목원 연구보고. 15 : 1-11.

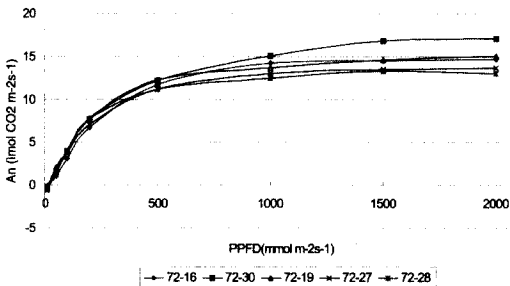


Fig. 2. Light-Photosynthesis curves of five clones of *Populus alba* × *P. glandulosa* constructed using LI-6400 portable photosynthetic system.

4. 임경빈. 1991. 조림학본론. 향문사.
5. 현신규. 1984. 임목육종학. 향문사.
6. 환경부. 1998. 환경백서
7. Ashmore, M.R. and J.N. Bell. 1991. The role of ozone in global change. *Annal. Botany*. 67(Supplement 1) : 39-48.
8. Beyers, J.L., G.H. Riechers and P.J. Temple. 1992. Effects of long-term ozone exposure and drought on the photosynthetic capacity of ponderosa pine(*Pinus ponderosa* Laws.). *New Phytol.* 122 : 81-90.
9. Dhindsa, R.S., P. Plumb-Dhindsa and T. A. Thorpe. 1981. Leaf senescence : Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *J. Exp. Bot.* 32(126) : 93-101.
10. Fabian, P. (eds.). 1989. *Atmosphäre und Umwelt*. Springer-Verlag. Berlin.
11. Gupta, A., R. Alscher and D. McCune. 1991. Response of photosynthesis and cellular antioxidants to ozone in *Populus* leaves. *Plant Physiol.* 96 : 650-655.
12. Heck, W.W., O.C. Taylor, R. Adams, G. Bingham, J. Miller, E. Preston and L. Weinstein. 1982. Assessment of crop loss from ozone. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 32 : 353-361.
13. Heck, W.W., R.M. Adams, W.W. Cure, A.S. Heagle, H.E. Heggstad, R.J. Kohut, L.W. Kress, J.O. Rawlings and O.C. Taylor. 1983. A reassessment of crop loss from ozone. *Environ. Sci. Tech.* 17 : 573A-581A.
14. Johnson, A.H. 1992. The role of abiotic stresses in the decline of red spruce in high elevation forests of the eastern United States. *Annu. Rev. Phytopathol.* 30 : 349-367.
15. Karnosky, D.F., Z.E. Gagnon, R.E. Dickson, M.D. Coleman, E.H. Lee and J.G. Isebrands. 1996. Changes in growth, leaf abscission, and biomass associated with seasonal tropospheric ozone exposures of *Populus tremuloides* clones and seedlings. *Can. J. For. Res.* 26 : 23-37.
16. Kim, H.S. and K.J. Lee. 1995. Physiological responses of one-year-old *Zelkova serrata* Makino seedlings to ozone in open-top chamber. *Jour. Korean. For. Soc.* 84 : 424-431.
17. Kozlowski, T.T. and H.A. Constantinidou. 1986. Responses of woody plants to environmental pollution : Part I. Sources, types of pollutants, and plant responses. *For. Abstr.* 47 : 5-51.
18. Kozlowski, T.T. and S.G. Pallardy. 1997. *Physiology of Woody Plants* (2nd ed.). Academic Press, Inc. 411p.
19. Krupa, S.V. and W.J. Manning. 1988. Atmospheric ozone formation and effect on vegetation. *Environ. Pollut.* 50 : 101-137.
20. Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids : Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol.* 148 : 350-382.
21. Luwe, M. 1996. Antioxidants in the apoplast and symplast of beech(*Fagus sylvatica* L.) leaves : seasonal variations and responses to changing ozone concentrations in air. *Plant, Cell and Environment.* 19 : 321-328.
22. Mooi, J. 1980. Influence of ozone on growth of two poplar cultivars. *Plant Disease.* 64 : 772-773.
23. Patton, R.L. 1981. Effects of ozone and sulfur dioxide on height and stem specific gravity of *Populus* hybrids. USDA For. Serv. Res. Paper NE-471. Northeastern For. Exp. Stn., Broomall, PA.
24. Pell, E.J., C.D. Schlaghauger and R.N. Arteca. 1997. Ozone-induced oxidative stress : Mechanisms of action and reaction. *Physiol. Plantarum.* 100 : 264-273.
25. Reich, P.B. 1983. Effects of low concentrations of O₃ on net photosynthesis, dark respiration, and chlorophyll contents in aging hybrid poplar leaves. *Plant Physiol.* 73 : 291-296.
26. Reich, P.B. 1987. Quantifying plant response to ozone : A unifying theory. *Tree Physiol.* 3 : 63-91.
27. Reich, P.B. and J.P. Lassoie. 1985. Influence of low concentrations of ozone on growth,

- biomass partitioning and leaf senescence in young hybrid poplar plants. *Environ. Pollut.* 39 : 39-51.
28. Reich, P.B. and R.G. Amundson. 1985. Ambient levels of ozone reduce net photosynthesis in tree and crop species. *Science*. 230 : 566-570.
29. Reinert, R.A., S.R. Shafer, G. Eason, M. M. Schoeneberger and S.J. Horton. 1996. Responses of loblolly pine to ozone and simulated acidic rain. *Can. J. For. Res.* 26 : 1715-1723.
30. Rennenberg, H., C. Herschbach, and A. Polle. 1996. Consequences of air pollution on shoot-root interactions. *J. Plant Physiol.* 148 : 296-301.
31. Schmieden, U. and A. Wild. 1995. The contribution of ozone to forest decline. *Physiol. Plantarum*. 94 : 371-378.
32. Temple, P.J., G.H. Riechers and P.R. Miller. 1993. Growth responses of ponderosa pine to long-term exposure to ozone, wet and dry acidic deposition, and drought. *Can. J. For. Res.* 23 : 59-66.
33. Tuomainen, J., R. Pellinen, S. Roy, M. Kiiskinen, T. Eloranta, R. Karjalainen and J. Kangasjarvi. 1996. Ozone affects birch (*Betula pendula* Roth) phenylpropanoid, polyamine and active oxygen detoxifying pathways at biochemical and gene expression level. *J. Plant Physiol.* 148 : 179-188.
34. Wang, D., D.F. Karnosky and F.H. Bormann. 1986. Effects of ambient ozone on the productivity of *Populus tremuloides* Michx. grown under field conditions. *Can. J. For. Res.* 16 : 47-55.
35. Wildi, B. and C. Lütz. 1996. Antioxidant composition of selected high alpine plant species from different altitudes. *Plant, Cell and Environment*. 19 : 138-146.
36. Woo, S. 1997. Growth, photosynthesis and Rubisco activity of resistant hybrid poplar (*Populus trichocarpa* × *P. deltoides*) to ozone exposure : A link with compensatory strategy. *Jour. Korean For. Soc.* 86 : 80-86.