

# 窒素와 燐 施肥가 Open-Top Chamber 內에서 오존에 露出시킨 소나무(*Pinus densiflora*) 苗木의 生長, 炭水化物 濃度와 光合成에 미치는 影響<sup>1</sup>

朴宰亨<sup>2</sup> · 李景俊<sup>2\*</sup>

## Effects of Nitrogen and Phosphorus Fertilization on the Growth, Carbohydrate Contents and Photosynthesis of *Pinus densiflora* Seedlings Exposed to Ozone in an Open-Top Chamber<sup>1</sup>

Jae Hyoung Bak<sup>2</sup> and Kyung Joon Lee<sup>2\*</sup>

### 요 약

본 연구는 질소와 인의 영양상태에 따라서 오존에 노출시킨 조경수목의 생리적 반응과 오존에 대한 저항성을 이해하기 위하여 실시하였다. 1년생 소나무(*Pinus densiflora* S. et Z.) 묘목을 인공토양(버미큘라이트와 펠라이트)을 담은 플라스틱 화분에 심고, 6월초부터 변형된 Hoagland 용액을 이용하여 질소와 인을 조절하여 양묘하고, 7월 3일부터 8월 31일까지 open-top chamber(직경 2.5m, 높이 2.0m) 내에서 8주간 1일 7시간씩(0.12ppm에서는 3시간씩) 오존농도를 자연상태에 유사하게 조절하여 노출시켰다. 오존대조구는 활성탄을 사용하여 오존농도를 0.02ppm 이하로 유지하였다. 8주 후에 부위별 생장량, 탄수화물 함량, 엽록소 함량, 순광합성속도를 측정하였다.

오존에 노출시킨 어떤 묘목에서도 가지적 피해를 관찰할 수 없었다. 오존대조구에서 질소와 인의 각각 혹은 동시 시비로 총건중량이 22%에서 95%까지 증가하여 시비효과를 확인하였다. 오존처리구에서도 시비효과는 비슷하게 관찰되었다. 오존처리구는 오존대조구와 비교하여 건중량을 감소시키지 않았으나, S/R(Shoot/Root)율을 14.5% 증가시켰다. 잎의 설탕함량은 오존처리로 평균 23%가 증가한 반면에, 뿌리의 설탕함량은 질소와 인의 시비와 관계없이 오존처리로 평균 20% 감소하였다. 잎의 전분함량은 시비 혹은 오존에 의하여 크게 영향을 받지 않았으나, 뿌리의 전분함량은 오존처리로 41% 감소하여, 뿌리로 탄수화물의 이동이 감소함으로써 뿌리의 발달이 상대적으로 위축되었음을 입증하였다. 잎의 엽록소 함량은 질소시비에 의하여 70% 증가하였으나, 오존에 의해서 감소하지 않았다. 순광합성속도는 오존대조구에서 질소의 단독시비로 80% 증가하였으며, 인의 경우는 질소가 함께 시비될 때에만 광합성을 증가시켰다. 오존처리구의 순광합성속도는 오존대조구보다 평균 11.7% 적었는데, 특히 질소와 인이 동시에 시비되었을 때 오존대조구보다 22.3% 적었다. 반면 질소와 인이 시비되지 않은 경우에는 오존에 의해서 순광합성속도가 거의 영향을 받지 않았다.

위와 같은 질소와 인과 오존 간의 상호작용에서 다음과 같은 결론을 얻게 된다. 소나무 유묘는 단기 간의 0.12ppm 오존 노출에서 가지적 피해를 입지 않았으며, 오존에 의하여 지상부의 생장이 감소하지 않지만 S/R 율은 증가하였다. 그러나 오존처리로 뿌리에서는 전분의 함량이 현저히 감소했을 뿐만 아니라, 순광합성속도도 큰 폭으로 감소하였으므로, 장기적으로 관찰하면 생장량이 감소하리라고 판단한다. 질소와 인의 시비에 의한 생장촉진효과는 오존으로 인하여 감소할 가능성이 있으나, 소나무에 시비하면 광합성을 촉진하고 탄수화물의 재분배를 통해서 오존피해를 복구하기 위한 에너지를 저축함으로써 저항성을 증진시킬 것으로 판단된다.

<sup>1</sup> 接受 2001年 3月 9日 Received on March 9, 2001.

審査完了 2001年 4月 26日 Accepted on April 26, 2001.

<sup>2</sup> 서울대학교 농업생명과학대학 산림자원학과 Department of Forest Resources, Seoul National university, Suwon 441-744, Korea.

\* 연락저자 E-mail : fraxinus@snu.ac.kr

## ABSTRACT

The objectives of this study were to understand the physiological responses and resistance of red pine trees to ozone exposure in relation to nitrogen and phosphorus fertilization. Potted one-year-old seedlings of *Pinus densiflora* S. et Z. were exposed in an open-top chamber(OTC) to ozone at concentration of 0.12ppm for 3 hours daily for eight weeks with or without N and P fertilization alone or in combination. The OTC had dimensions of 2.0m in height and 2.5m in diameter, and the air in a control chamber was filtered with activated charcoal to maintain the ozone concentration below 0.02ppm.

After eight weeks of ozone exposure, none of the seedlings showed any symptoms of visible injury on leaves. The seedlings fertilized with N and P in a control chamber showed 22 to 95% increase in total dry weight, and similar fertilizer effect was also noticed in an ozone chamber. Ozone treatment did not decrease the total dry weight, but increased shoot/root ratio by 14.5%. Ozone treatment increased sucrose content in the leaves by 23%, but decreased sucrose content in roots by 20% regardless of N or P application. Starch content in the leaves was not affected by either ozone or fertilizer. However, starch content in the roots was decreased by 41% by ozone treatment. Chlorophyll content in the leaves was increased by 70% by N application, but was not affected by ozone treatment. Nitrogen and P fertilization stimulated net photosynthesis by 80% in a control chamber, but stimulatory effect of N and P on net photosynthesis was 22.3% less in an ozone chamber. Net photosynthesis of the seedlings with no fertilization was not affected by ozone treatment. Based on the observed interactions between N, P, and ozone, it was concluded that the stimulatory effect of fertilization on growth of *Pinus densiflora* would be decreased by ozone treatment, but fertilization would increase resistance to ozone by re-allocation of increased carbohydrates.

*Key words* : resistance, fertilizer and ozone interaction, shoot-root ratio, carbohydrate translocation

## 서론

1970년대 국내에서 가장 심각했던 대기오염물질은 아황산가스이었으나, 1990년대에 들어서면서 청정연료의 사용으로 아황산가스 문제는 해결되고, 대신 급속한 자동차 보급으로 인하여, 대도시에서 여름철에 오존에 의한 대기오염이 심각한 수준에 달하고 있다(환경백서, 1999). 서울시는 오존경보제를 1995년에 처음 도입하였는데, 오존경보의 발령횟수는 매년 꾸준히 늘어나는 추세이며, 발령기간도 점점 길어지고, 연중 발령시기도 매년 빨라지고 있다. 오존주의보 농도인 0.12ppm 이상인 경우, 인간의 건강에도 영향을 미치지만, 식물에게도 영향을 준다. 즉, 현사시와 소나무의 경우 오존에 의하여 생리적 피해를 받을 수 있다(김태규 등, 2000; Hong, 1999).

오존은 이산화탄소 흡수를 감소시키고, 식물기관 사이의 물질이동이나 분배를 감소시키며(Laurence 등, 1994), 광합성 저하로 인하여 전체적인 성장속도를 감소시킨다. 또한 손상된 잎에 대한 복구과정에서 암호흡(dark respiration)을 증가시키고

복구불능이거나 이미 떨어진 잎들의 보충을 위하여 새로운 잎들을 생산할 때, 광합성 산물인 탄수화물을 소모시킨다. 동시에 잎에서 뿌리로의 탄수화물 전달 기작인 사부적재(phloem loading)를 교란시켜 공급원-수용부(source-sink) 관계에 영향을 미쳐서 동화 및 이화작용 효소의 변화에 의해 뿌리의 성장속도를 저하시켜 정상적인 식물에 비해 S/R(shoot/root)율이 증가하게 된다(Cooley and Manning, 1987).

식물의 기관 중 잎은 오존의 영향을 가장 많이 받는 곳이다. 오존은 엽록소 함량의 감소와 빠른 노쇠를 일으켜 조기낙엽을 초래한다. 그러나 질소비료의 시비는 엽록소의 생성을 증가시켜 광합성 산물의 생성이 증가되고 노쇠도 지연시킨다. 이때 수목은 엽록소가 증가되고, 광합성에 관여하는 효소의 활성화로 잎에 많은 탄소원을 축적한다. 그러므로 질소비비는 오존의 피해를 복구할 수 있는 에너지를 증가시켜서 복구를 빠르게 하며 스트레스에 강하게 만든다(Greitner 등, 1994). 그러나 반대의견도 있는데, 질소는 기공전도도를 증가시키고 기공을 통하여 오존이 들어와 피해를

크게 한다는 것이다(Pell and Dann, 1991). 오존은 식물이 지상부의 복귀작용을 위하여 에너지를 소모하게 함으로써 뿌리생장의 감소를 가져오는데, 질소도 뿌리의 생장보다 지상부의 생장을 촉진하기 때문에 오존과 정의 상호작용을 통하여 지상부의 생장을 증가시키며, 반대로 뿌리의 생장을 크게 감소시킬 수 있다.

본 연구는 도시림의 구성수종인 소나무가 수체내 질소와 인의 영양상태에 따라서 오존에 대해서 어떻게 다른 생리적 반응을 보이는가를 조사하고, 질소와 인의 시비가 오존에 노출시킨 소나무의 생장과 오존에 대한 저항성을 증진시킬 수 있는가를 검증하기 위하여 실시하였다.

### 재료 및 방법

#### 1. 실험재료

본 연구에서는 1년생 소나무(*Pinus densiflora* S. et Z.)묘목을 사용하였다. 임업연구원 중부임업시험장에서 증자로부터 양묘한 소나무 1년생 묘목 200본을 봄철에 분양 받아서 peatmoss : perlite : vermiculite를 1 : 1 : 1로 혼합한 토양을 만든 다음, 가로 4cm × 세로 4cm × 높이 15cm의 플라스틱 포트에 옮겨 심었다. 옮겨 심은 후 2일에 한번씩 물을 충분히 주었다. 6월 1일에 활착이 양호한 160본의 묘목을 open top chamber(OTC) 내로 옮겨 3일 동안 적응시켰다. 포트 배열은 난수표를 이용하였고 1주일에 한번씩 배치를 변경하였다.

#### 2. 오존처리와 양료처리

오존농도는 서울대학교 농업생명과학대학 구내 묘포장에서 2개의 OTC에서 7월 3일부터 8월 31일까지 8주 동안 실시하였다. OTC는 직경 2.5m, 높이 2.0m의 원통형 철제기둥에 비닐을 씌웠는데, 비닐을 지상 1m까지는 이중으로 입혀서 안쪽 비닐에 구멍을 30cm 간격으로 뚫어서, 외부공기가 OTC 안으로 균일하게 유입되도록 제작된 것이다(김태규 등, 2000). 2개의 OTC 중 한 개는 오존처리구, 다른 한 개는 오존대조구로 사용하였다. 소나무 뿌리가 직접 흙에 닿지 않도록 나무 받침대를 설치하였다. 오존대조구의 OTC에는 활성탄으로 대기중의 오존을 정화시켜 0.02ppm 이하로 주입하였고, 오존처리구에는 산소를 오존발생기(Model : Ozomat COM, Anseros, Germany)에 주입시켜 오존을 생산하고, Teflon tube을 사용하여 OTC 내

로 흘려 보냈다. 오존 농도는 UV 흡광방식의 오존 분석기(Model : Ozomat MP, Anseros, Germany)로 측정하였다. 오존농도는 매일 오전 10시에 시작하여 오후 5시에 멈추었는데, 10 : 20AM에서 11 : 00AM까지는 0.06ppm, 11 : 00부터 12 : 00까지는 0.09ppm, 12 : 00부터 3 : 00까지는 최고인 0.12ppm로 조정하고 3 : 00부터는 반대로 차츰 낮추어 갔다.

양료처리는 질소(N)와 인(P)을 두 수준(대조구와 처리구)으로 하는 요인실험으로 설계하였다. 각 요인과 수준별로 20반복으로 하였다. 영양공급을 위하여 Madhusudana Rao와 Terry(1989)와 Lopez-Cantarero 등(1994)에 의해서 수정된 Hoagland 양액을 사용하였다(pH 6.0). 6월 4일부터 양료처리를 실시하였다. 6월 4일부터 7월 2일까지 질소 대조구와 인 대조구에는  $NH_4NO_3$ 와  $H_3PO_4$ 를 첨가하지 않았다. 7월 3일에 오존농출을 시작할 때 질소처리구는  $NH_4NO_3$  4.5mM를, 질소대조구는 낮은 농도인  $NH_4NO_3$  1.5mM를 첨가하였고 인처리구는 전과 동일하게 실시하였다.

#### 3. 건중량 측정

건중량은 9월 3일에 난수표를 이용하여 80개체를 추출한 다음 가스교환을 측정한 후 수확하였고, 9월 7일에 80개체를 2차 수확하였다. 수고와 근원경을 측정하고 나서, 잎과 줄기를 분리하고 뿌리는 세균이 떨어지지 않게 주의해서 물로 흠을 씻어 냈다. 채취한 부위를 알루미늄 호일로 싸서 액체질소에 급속 냉각시킨 다음 저온 냉동고에서 열려서 동결조건을 3일 동안 실시하여 0.01g 단위로 측정하였다.

#### 4. 가스교환 측정

1999년 9월 2일과 3일, 1 : 00에서 4 : 30까지 LI-6400 Portable Photosynthesis System (LI-COR Inc., USA)을 이용하여 소나무 잎을 가지런히 펴서 잎 큐벳에 넣은 다음 광합성속도를 측정하였다. 잎 큐벳의 조건은 온도 25°C, 광량(photosynthetically active radiation ; PAR)  $1000 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ , 상대습도는 50%를 유지하며 측정하였다. 잎 큐벳에 들어간 부분을 잘라 내어 생중량을 측정하였다. 순 광합성속도는 잎의 면적 대신에 생중량을 기준으로 표시하였다.

#### 5. 엽록소 분석

엽록소 추출은 DMSO(dimethyl sulfoxide)추출

방법을 사용하였다(Hiscox and Israelstam, 1979). 액체질소로 급속냉각하여 저온 냉동고에 보관하던 생잎을 잘게 썰은 다음 DMSO(0.1g/7ml)에 넣고 57℃에서 3시간 동안 침적시킨 후, 추출액을 분광광도계(Unicam UV Series Spectrometers, ATI, USA)를 이용하여 흡광도를 측정하고, Lichtenthaler(1987)의 식에 따라 엽록소 함량을 계산하였다.

**6. 탄수화물 분석**

동결건조된 시료 0.1g을 methanol/chloroform/water을 12/5/3의 비율로 만든 용매 1.5ml에 넣어 유화분쇄시켜 추출하고, 13,000×g에서 1분 동안 원심 분리한 다음, 상등액은 설탕분석을, 침전물은 전분분석을 실시하였다.

설탕은 포도당과 과당으로 분해하여 포도당농도를 측정 후 2를 곱해 농도를 측정하였다. 추출액 0.1ml에 50mM sodium acetate buffer(pH 4.6) 0.8ml과 invertase 10 units를 포함하는 50mM sodium acetate buffer(pH 4.6) 0.1ml을 첨가한 후 50℃에서 20분 동안 반응시킨 후 glucose oxidase 방법을 사용하여 포도당의 함량을 측정하였다(Henry 등, 1993).

전분은 건조시킨 침전물을 pH 4.5, 0.1M sodium acetate - 0.02M NaF buffer 4ml에 담고 95℃에서 15분간 젤라틴화 시키고, amyloglucosidase 15 units를 포함하는 0.10M sodium acetate - 0.02M NaF buffer(pH 4.5) 1 ml를 첨가하여 50℃에서 24시간 분해시킨 후, glucose oxidase 방법으로 포도당 함량을 측정하였다.

**결과 및 고찰**

**1. 생장 변화**

Table 1과 Table 2는 질소와 인의 시비에 따른 오존처리가 각각 잎과 총건중량의 생산에 미치는 영향을 보여주고 있다. 잎과 총건중량에서 질소의 시비효과가 오존처리에 관계없이 뚜렷하게 나타났다. 즉 질소에 의한 생장촉진효과는 인을 함께 시비할 때 2배 이상 나타났으나, 인을 시비하지 않을 때는 30% 촉진에 그쳤다. 따라서 인의 시비효과는 질소시비가 함께 이루어질 때에만 나타났다고 할 수 있다. Table 1과 Table 2에서 오존의 처리효과는 뚜렷하게 나타나지 않았는데, 오존에 노출된 묘목의 건중량이 대조구의 묘목의 건중량보

다 큰 숫자를 보였으나, 통계적으로 유의성이 인정되지 않았다. 따라서 본 실험조건에서 8주간의 짧은 기간 동안 오존에 노출시킬 경우, 건중량 생산에 큰 영향을 주지 않는다고 결론지을 수 있다. 본 연구에서 수고생장도 함께 측정하였으나, 소나무의 경우 수고생장이 7월에 이미 완료되기 때문에 오존에 의해서 영향을 받지 않았다.

**Table 1.** Leaf dry weight of *Pinus densiflora* exposed to ozone and fertilized with nitrogen and phosphorus. (Unit : g/seedling)

Nutrient Status	Ozone treatment		Average	
	+O <sub>3</sub>	-O <sub>3</sub>		
+N	+P	1.06 ± 0.09a	0.82 ± 0.06b	0.96 ± 0.06
	-P	0.54 ± 0.03c	0.61 ± 0.05c	0.58 ± 0.03
-N	+P	0.31 ± 0.03d	0.27 ± 0.02d	0.29 ± 0.02
	-P	0.39 ± 0.03d	0.35 ± 0.03d	0.37 ± 0.02
Average		0.57 ± 0.05	0.49 ± 0.03	0.53 ± 0.03

\* Means of eight cells with the same letter are not significantly different at 0.05 level in Duncan's multiple range test.

**Table 2.** Total dry weight of *Pinus densiflora* exposed to ozone and fertilized with nitrogen and phosphorus. (Unit : g/seedling)

Nutrient Status	Ozone treatment		Average	
	+O <sub>3</sub>	-O <sub>3</sub>		
+N	+P	2.21 ± 0.14a	1.93 ± 0.10b	2.09 ± 0.10
	-P	1.44 ± 0.07cd	1.58 ± 0.11c	1.51 ± 0.06
-N	+P	1.04 ± 0.07e	0.99 ± 0.04e	1.01 ± 0.04
	-P	1.19 ± 0.06de	1.13 ± 0.07e	1.16 ± 0.05
Average		1.48 ± 0.08	1.38 ± 0.07	1.43 ± 0.05

일반적으로 오존스트레스에 대한 수목의 반응은 건중량이 감소하게 된다(Wang 등, 1986). 그러나 오존과 다른 환경적 요인의 작용으로 단기간 내에 반드시 건중량 감소가 일어나지는 않는다. Harkov와 Brennan(1980)은 포플러에 Hoagland 용액 중 N, P, K의 농도를 표준용액 1/2로 희석하여 시비한 경우 시비하지 않은 것과 완전한 Hoagland 용액을 시비한 것보다 오존에 대한 피해가 증가하여 건중량이 감소하였다고 했다. 또한 Heagle(1979)

은 높은 영양분의 공급이 있을 경우, 낮은 양분의 공급보다 오존에 의하여 건중량 감소를 초래했다고 했다. 반면에 Pääkkönen과 Holopani(1995)은 질소를 시비한 자작나무의 잎과 뿌리의 건중량이 오존처리로 증가하였다고 하였다. 이와 같이 질소와 인의 시비 하에서 오존노출에 대한 수목의 건중량 반응은 일관적이지 않다.

Table 3은 실험 종료 후 지상부와 지하부의 비율(Shoot-root ratio, S/R율)을 나타낸 것이다. 질소시비는 오존처리에 관계없이 지상부의 생장을 촉진하여, S/R율을 평균 39%가량 증가시켰다. 특히 인이 추가될 경우 그 효과가 크게 나타나서, 질소시비로 인하여 평균 58%의 증가율을 보였다. Table 3에는 S/R율에 대한 오존처리효과도 나타나 있다. 즉, 오존에 노출시킨 묘목의 S/R율은 평균 1.50인데 반하여, 오존에 노출시키지 않은 묘목은 1.31에 그쳐서, 오존처리로 S/R율이 14.5% 증가하였으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 특히 질소와 인이 모두 시비될 경우, 오존처리로 인하여 S/R율이 28% 증가하였다. 이와 같은 S/R율의 증가 결과는 기존의 연구와 유사하며(Cooley와 Manning, 1987), 잎의 탄수화물이 뿌리로 이동하는 것을 오존이 방해하여 뿌리의 생장을 억제한다는 기존의 연구결과와 일치하는 현상이다(Laurence 등, 1994; Samuelson and Kelly, 1995; Hong, 1999).

**Table 3.** S/R ratio of *Pinus densiflora* exposed to ozone and fertilized with nitrogen and phosphorus.

Nutrient Status	Ozone treatment		Average	
	+O <sub>3</sub>	-O <sub>3</sub>		
+N	+P	2.06 ± 0.08a	1.61 ± 0.08b	1.87 ± 0.07
	-P	1.42 ± 0.07bc	1.46 ± 0.05b	1.44 ± 0.04
-N	+P	1.28 ± 0.06cd	1.09 ± 0.05d	1.18 ± 0.04
	-P	1.22 ± 0.05d	1.16 ± 0.06d	1.19 ± 0.04
Average		1.50 ± 0.06	1.31 ± 0.04	1.41 ± 0.04

**2. 탄수화물 변화**

Table 4와 Table 5에 잎과 뿌리에서 조사한 설탕의 농도를 표시하였는데, 시비효과와 오존효과가 함께 나타나 있다. Table 4에서 인의 시비가 설탕농도에 미치는 영향은 적은 반면에, 질소의 효과는 매우 커서, 질소를 시비하지 않으면 설탕

농도가 증가하였다. 이러한 현상은 Table 2에서와 같이 질소를 시비하지 않으면 건중량이 크게 감소함으로써 생장이 둔화되어, 광합성으로 만들어진 설탕이 Table 4와 같이 체내에 축적되는 것으로 판단된다. 오존처리는 대조구에 비하여 잎 내 설탕의 함량을 평균 23% 가량 증가시켰다.

오존처리에 의한 이러한 설탕함량의 증가는 체내에서 항산화물질을 생산하여 오존의 피해를 경감시키려는 내부 기작에 의하여 일어나는 것으로 기존의 연구에서 알려져 있으며(Greitner 등, 1994; Paynter 등, 1990), 본 연구에서도 유사한 경향을 얻었다. 반면에 Table 5에서 뿌리의 설탕 함량은 반대 경향을 보여서 오존처리에 의하여 대조구보다 유의하게 감소하였다. 즉, 오존처리는 질소와 인의 시비와 관계없이 뿌리 내 설탕의 함량을 20% 가량 감소시켰다.

**Table 4.** Sucrose concentration in leaves of *Pinus densiflora* exposed to ozone and fertilized with nitrogen and phosphorus. (Unit : mg/g FW)

Nutrient Status	Ozone treatment		Average	
	+O <sub>3</sub>	-O <sub>3</sub>		
+N	+P	2.89 ± 0.12ab	2.15 ± 0.18c	2.50 ± 0.14
	-P	2.99 ± 0.17ab	2.09 ± 0.13c	2.54 ± 0.15
-N	+P	3.00 ± 0.14ab	2.54 ± 0.16bc	2.79 ± 0.11
	-P	3.14 ± 0.19a	2.93 ± 0.14ab	3.04 ± 0.12
Average		3.02 ± 0.08	2.46 ± 0.09	2.75 ± 0.07

**Table 5.** Sucrose concentration in roots of *Pinus densiflora* exposed to ozone and fertilized with nitrogen and phosphorus. (Unit : mg/g FW)

Nutrient Status	Ozone treatment		Average	
	+O <sub>3</sub>	-O <sub>3</sub>		
+N	+P	4.50 ± 0.23bc	5.26 ± 0.53ab	4.92 ± 0.32
	-P	3.81 ± 0.21c	4.58 ± 0.32bc	4.21 ± 0.21
-N	+P	3.84 ± 0.21c	5.62 ± 0.41a	4.65 ± 0.29
	-P	4.52 ± 0.20bc	5.27 ± 0.43ab	4.84 ± 0.23
Average		4.14 ± 0.12	5.16 ± 0.21	4.63 ± 0.13

Table 6에 잎의 전분 함량을 표시하였다. 잎에서 전분의 함량은 시비 혹은 오존치리에 의해서 크게 변화하지 않았다. 그러나 질소와 인을 모두 시비하지 않은 경우에는 전분의 함량이 다른 처리구보다 4배 이상 증가하였는데, 이러한 현상은 질소와 인의 부족으로 인하여 Table 2와 같이 생장이 저조해지면서 탄수화물 대사에 이상을 초래하여 축적된 것으로 보인다. 또한 오존처리구의 탄수화물 함량은 무처리구와 비교하여 유의한 차이를 보이지 않았다.

**Table 6.** Starch concentration in leaves of *Pinus densiflora* exposed to ozone and fertilized with nitrogen and phosphorus. (Unit : mg/g FW)

Nutrient Status	Ozone treatment		Average	
	+O <sub>3</sub>	-O <sub>3</sub>		
+N	+P	11.9±1.13c	12.2±1.94c	12.0±1.03
	-P	9.99±0.79c	9.2±0.95c	
-N	+P	13.0±2.05c	14.4±2.66c	13.8±1.69
	-P	41.5±10.01b	75.2±16.26a	
Average		17.7±2.76	19.9±3.96	18.8±2.38

Table 7에 뿌리의 전분 함량을 표시하였는데, 잎과 매우 다른 경향을 보여주고 있다. 뿌리의 경우 오존처리로 인하여 오존 대조구보다 전분의 함량이 평균 40.7% 감소하였다. 이러한 수치는 오존치리는 잎으로부터 뿌리로 탄수화물의 이동을 방해한다는 것을 뒷받침하고 있다. 특히 Table 5에서처럼 오존처리로 인하여 뿌리에서 설탕의 함량이 감소한 것과 같은 경향을 나타내고 있다. 따

**Table 7.** Starch concentration in roots of *Pinus densiflora* exposed to ozone and fertilized with nitrogen and phosphorus. (Unit : mg/g FW)

Nutrient Status	Ozone treatment		Average	
	+O <sub>3</sub>	-O <sub>3</sub>		
+N	+P	33.9±4.83bc	70.4±10.89a	47.3±6.39
	-P	19.1±2.21c	17.4±1.28c	
-N	+P	31.57±4.98c	75.8±13.95a	55.9±9.30
	-P	40.1±9.62bc	59.0±13.98ab	
Average		31.4±2.83	53.0±6.57	42.2±3.79

라서 오존처리로 인하여 Table 3에서 S/R율이 감소하고, Table 5에서 뿌리의 설탕함량이 감소했으며, Table 7에서 뿌리의 전분함량이 감소함으로써, 일관되게 오존이 뿌리로 탄수화물이 이동되는 것을 방해한다는 결론을 뒷받침한다고 할 수 있다.

### 3. 엽록소 함량 변화

Table 8에 총엽록소함량을 표시하였는데, 오존치리에 의하여 엽록소 함량은 약간 높은 숫자를 보였으나, 통계적으로 차이가 없었다. 그러나 질소 시비는 엽록소 함량에 큰 영향을 주어서 평균 70%가 증가하였다. 인의 시비는 엽록소 함량에 영향을 주지 못했다.

**Table 8.** Total chlorophyll of *Pinus densiflora* exposed to ozone and fertilized with nitrogen and phosphorus. (Unit : mg/g FW)

Nutrient Status	Ozone treatment		Average	
	+O <sub>3</sub>	-O <sub>3</sub>		
+N	+P	0.108±0.010ab	0.121±0.010a	0.115±0.007
	-P	0.121±0.010a	0.096±0.007ab	
-N	+P	0.069±0.005cd	0.059±0.004d	0.064±0.004
	-P	0.088±0.0136bc	0.065±0.007cd	
Average		0.096±0.006	0.085±0.005	0.091±0.004

본 연구에서 오존치리를 1일 7시간씩(점진적으로 상승하여 0.12ppm에서 3시간), 8주간 실시하였는데, 엽록소의 함량이 감소하지 않은 것은 소나무류가 낮은 농도의 오존에 비교적 저항성이 높고, 가시적 피해가 관찰되지 않는다는 기존의 연구와 일치한다(Hong, 1999). 그러나 느티나무(김현석과 이경준, 1996)와 현사시(김태규 등, 2000)와 같은 속성수의 경우는 0.12ppm의 오존에 단기간 노출되어도 가시적 피해가 나타나고 엽록소의 함량이 감소하는 것으로 발표되었다. 따라서 본 연구에서 소나무 유묘의 오존노출 실험은 유묘의 생리적 변화를 초래하였으나, 가시적인 엽록소의 변화, 혹은 피해를 가져오지 않음으로써 소나무가 일반적으로 오존피해에 다른 수종보다 강하다는 것을 뒷받침하고 있다.

### 4. 광합성 변화

Table 9는 순광합성속도를 보여주고 있다. 오

존대조구의 경우, 질소의 시비효과가 뚜렷하게 나타나서, 순광합성속도가 79.5%까지 증가하였다. 인의 시비효과는 질소가 있을 경우에만 나타났다. 오존처리에 의하여 대조구보다 순광합성속도가 평균 11.7% 감소하였는데, 이 중에서 가장 큰 영향을 받은 것은 질소와 인이 함께 시비되었을 때이며, 이 때 오존에 의해 순광합성속도는 오존대조구보다 22.3% 감소하였다. 그 원인은 질소와 인 동시처리의 경우 오존대조구에서 순광합성속도가 다른 처리구보다 월등하게 우수하였기 때문에 오존에 의하여 많은 감소를 보이게 되었다. 소나무 유묘가 질소와 인이 풍부한 상태에서 자랄 경우, 순광합성속도가 높은 수치를 보이다가 오존에 의하여 급격히 감소해서 다른 처리보다 훨씬 더 예민하게 반응을 보였다고 할 수 있다.

있고, 오존에 의하여 지상부의 생장이 감소하지 않았으며, S/R(shoot/root)율은 증가하였다. 그러나 오존처리로 뿌리에서는 전분의 함량이 현저히 감소하였을 뿐만 아니라, 순광합성속도도 큰 폭으로 감소하였다. 따라서 오존에 의하여 지상부의 생장은 장기적으로 관찰할 때 감소하리라고 판단된다. 질소와 인의 동시시비에 의한 생장촉진효과는 오존으로 인하여 감소할 가능성이 있으나, 소나무에 동시 시비하면 질소와 인이 정의 상승작용을 일으켜 광합성 색소의 증가로 인하여 광합성이 촉진되고, 지상부와 지하부의 탄수화물이 크게 늘어나게 된다. 이로 인하여 원활하게 탄수화물이 재분배되고, 오존피해를 복구하기 위한 에너지를 저축함으로써 오존에 대한 저항성을 증진시킬 것으로 판단된다.

**Table 9.** Net Photosynthesis of *Pinus densiflora* exposed to ozone and fertilized with nitrogen and phosphorus.  
(Unit :  $\mu\text{mol CO}_2 / \text{g} / \text{s FW}$ )

Nutrient Status	Ozone treatment		Average	
	+O <sub>3</sub>	-O <sub>3</sub>		
+N	+P	30.7±1.29b	39.5±0.99a	36.1±1.45
	-P	25.6±1.48bcd	29.1±2.07bc	27.3±1.29
-N	+P	25.7±2.42bcd	22.0±2.76d	24.2±1.83
	-P	21.0±2.33d	22.8±2.80cd	22.1±1.88
Average		25.6±1.14	29.0±1.80	27.4±1.12

이러한 현상을 바꾸어 이야기하면, 수목의 영양상태가 부실하거나 불균형일 경우에는 광합성이 저조하기 때문에 오존에 의하여 순광합성속도가 적게 영향을 받는다고 할 수 있다. 조경수 혹은 가로수의 경우에도 비슷한 효과를 가져와서 생장이 불량한 개체는 오존에 의하여 적은 피해 혹은 영향을 받을 것으로 추측된다. 이러한 추정은 김태규 등(2000)이 현사시의 생장우수 클론과 불량 클론을 상대로 하여 오존노출에 대한 영향을 조사하였을 때 생장 우수 클론이 오존에 더 민감하다는 결론에 근거를 둔 것이다.

**결 론**

소나무 유묘는 8주 동안 단기간의 0.12ppm의 비교적 낮은 오존노출에서 가시적 피해를 입지 않

**인 용 문 헌**

1. 김태규·이경준·김근보·구영본. 2000. Open-Top chamber 내에서 오존에 노출시킨 현사시 5個 클론의 生長量과 오존에 對한 敏感性과의 關係. 韓國林學會誌 89 : 105-115.
2. 김현석·이경준. 1995. Open-top chamber 내에서 오존에 暴露시킨 1年生 느티나무(*Zelkova serrata* Makino) 苗木의 生理的 反應에 關한 研究. 韓國林學會誌 84 : 424-431.
3. 환경백서, 1999. 환경부
4. Cooley, D.R. and W.J. Manning. 1987. The impact of ozone on assimilate partitioning in plants. : A review. Environmental Pollution 47 : 95-113.
5. Greitner, C.S., E.J. Pell and W.E. Winner. 1994. Analysis of aspen foliage exposed to multiple stresses : ozone, nitrogen deficiency and drought. New Phytologist 127 : 579-589.
6. Harkov, R. and E. Brennan. 1980. The influence of soil fertility and water stress on the ozone response of hybrid poplar trees. Phytopathology 70 : 991-994.
7. Heagle, A.S. 1979. Effects of growth media, fertilizer rate and hour and season of exposure on sensitivity of four soybean cultivars to ozone. Environmental Pollution 18 : 313-322.
8. Hendry, G.A. F., K.J. Brocklebank and P.C. Thorpe. 1993. Storage carbohydrates. In G.A.F.

- Hendry and J.P. Grime (eds). *Methods in Comparative Plant Ecology: A Laboratory Manual*. Chapman & Hall. 146-148.
9. Hiscox, J.D. and G.F. Israelstam. 1979. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany* 57 : 1332-1334.
  10. Hong, B.G. 1999. Interactive effect of ozone and water stress applied before and during ozone exposure on the growth, reserve carbohydrates, and needle conductance of one-year-old *Pinus densiflora* seedling. A thesis for the degree of master of science. Seoul National Univ.
  11. Laurence, J.A., R.G. Amundson, A.L. Friend, E.J. Pell and P.J. Temple. 1994. Allocation of carbon in plants under stress : an analysis of the ROPIS experiments. *Journal of Environmental Quality* 23 : 412-417.
  12. Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids : Pigments of photosynthetic biomembrane. *Methods in Enzymology*. Academic Press 148 : 350-382.
  13. Lopez-Cantarero, I., F.A. Lorente and L. Romero. 1994. Are chlorophylls good indicators of nitrogen and phosphorus levels?. *Journal of Plant Nutrition* 17 : 979-990.
  14. Madhusudana Rao, I. and N. Terry. 1989. Leaf phosphate status photosynthesis, and carbon partitioning in sugar beet. *Plant Physiology* 90 : 814-819.
  15. Pääkkönen, E. and T. Holopainen. 1995. Influence of nitrogen supply on the response of clones of birch(*Betula pendula* Roth.) to ozone. *New Phytologist* 129 : 595-603.
  16. Paynter, V.A., J.C. Reardon and V.B. Shelburne. 1990. Carbohydrate changes in shortleaf pine(*Pinus echinata*) needles exposed to acid rain and ozone. *Canadian Journal of Forest Research* 21 : 666-671.
  17. Pell, E.J. and M.S. Dann. 1991. Multiple stress-induced foliar senescence and implications for whole-plant longevity. In : Mooney H.N., Winner W.E., Pell E.J. eds. *Responses of Plants to Multiple Stress*. Academic Press 189-204.
  18. Samuelson, L.J. and J.M. Kelly. 1995. Carbon partitioning and allocation in northern red oak seedlings and mature trees in response to ozone. *Tree Physiology* 16 : 853-858.
  19. Wang, D., D.F. Karnosky and F.H. Bormann. 1986. Effects of ambient ozone to the productivity of *Populus tremuloides* Michx. grown under field condition. *Canadian Journal of Forest Research* 16 : 47-55.