

## 오존에 노출된 자작나무류 4수종 잎의 가시적 피해와 성장 반응

이재천 · 한심희 · 김장수 · 장석성

임업연구원 임목육종부

(2002년 1월 8일 접수; 2002년 2월 27일 수락)

## Visible Foliar Injuries and Growth Responses of Four *Betula* sp. Exposed to Ozone

Jae-Cheon Lee, Sim-Hee Han, Chang-Soo Kim and Suk-Seong Jang

Department of Tree Breeding, Korea Forest Research Institute, Suwon 441-350, Korea

(Received January 8, 2002; Accepted February 27, 2002)

### ABSTRACT

This study was conducted to compare ozone sensitivity among *Betula* sp. by measuring visible foliar injuries and growth responses. Four *Betula* sp. (*B. costata*, *B. davurica*, *B. platyphylla* var. *japonica* and *B. ermani*) grown in the greenhouse, were transplanted in the plastic pots. One-year-old seedlings of four *Betula* sp. exposed to relatively high ozone concentration (100 ppb) for 8 h day<sup>-1</sup> for 5 weeks in fumigation chamber. We measured visible injuries, leaf numbers and leaf areas at the end of experiments, and growth effects were evaluated by measuring the relative growth rate (RGR) of height and diameter and the dry weights of leaf, stem and root once a week. Four *Betula* species showed the significant differences for growth responses by the ozone treatment. Growths of three species, except for *B. ermani*, were significantly reduced by the O<sub>3</sub> exposure. *B. costata* with leaf senescence at the early growing stage and *B. davurica* indicated highest visible foliar injury rate may be the sensitive species at the 100 ppb ozone concentration. Although the growth rate of *B. ermani* was reduced by 100 ppb ozone exposure at the early growing stage, *B. ermani* may be a tolerance species that recover the growth rate with the adaptation for the high ozone concentration.

**Key words :** *Betula ermani*, ozone exposure, visible injury, relative growth rate (RGR), growth responses

### I. 서 론

오존은 산림 수목의 성장에 영향을 미치는 주요 대기오염물질 가운데 하나로서(Pye, 1988) 이에 대한 수목의 반응은 최근까지도 많은 연구가 수행되고 있다(Minnocci *et al*, 1999; Bortier *et al*, 2001; Oksanen *et al*, 2001). 오존은 잎의 가시적인 피해 증상 뿐만 아니라 수목의 성장 감소에도 큰 영향을 미쳐 일부 지역에서는 산림 생산성을 감소시키는 주 요인이 되기도 한다(Darrall, 1989; Chappelka and Chevone, 1992).

그러나 오존에 대한 수목의 반응은 수종간 뿐만 아니라 수종내 가계간 혹은 클론간에도 다르게 나타나는데(Davis and Skelly, 1992; Coleman *et al*, 1995) 오존에 대한 수종간, 가계간 혹은 클론간 민감성 차이는 해부학적, 생리적 반응 차이에서 비롯되며(Pääkkönen *et al*, 1995; Oksanen *et al*, 2001), 이러한 특성은 오존에 대한 내성 수종 및 가계를 선발하는데 중요한 지표로 이용할 수 있다(Lee *et al*, 1999). 또한 오존에 대한 민감성은 노출된 오존의 농도와 노출 기간에 따라 다르게 나타나는데, 아직까지 이에 대한 정확한 메커니즘은 밝혀지지 않고 있다.

우리 나라에서 오존에 대한 연구는 오존의 유해성이 널리 인식되어 많은 연구가 진행되고 있는 선진국과는 달리 수목의 생리적 반응에 관한 연구에 한정되어 있으며(김과 이, 1995; 우수영, 1997, 1998), 오존 농도 및 노출 기간에 따라 다르게 나타나는 여러 가지 생리적 반응 메커니즘에 관해서는 체계적인 연구가 무진한 실정이다.

자작나무류는 우리 나라에서 용재수로 이용될 뿐 아니라 최근에는 환경수로 이용되고 있다. 그러나 여러 가지 오염물질에 대한 자작나무류의 반응에 관한 연구는 매우 미진한 실정이며, 특히 오존에 대한 반응 연구는 우리 나라와는 다른 종 분포를 보이는 유럽에서 성장 및 생리적 반응에 중점을 두고 많이 수행되고 있다(Mortensen and Skre, 1990; Pääkkönen *et al.*, 1995, 1996).

따라서 본 연구는 우리 나라에 분포하는 자작나무류를 대상으로 오존에 대한 민감성을 비교하기 위하여 앞에 나타나는 가지적 피해를 관찰하고, 오존 노출이 진행되는 기간 동안의 성장 반응을 구명하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 공시 재료

본 연구에서 이용한 자작나무 4개 수종은 거제수나무(*Betula costata*), 물박달나무(*B. davurica*), 자작나무(*B. platyphylla* var. *japonica*), 사스래나무(*B. ermani*)이며, 임업연구원 임목육종부의 온실에 파종하여 양묘한 후 포트로 옮겨 심고, 오존 처리 1주일 전에 생장이 균일하고 활력이 있는 묘목을 수종별로 50본씩 선발한 후 임목육종부 환경제어실의 인공광 온실내에서 적응시켰다. 인공광 온실의 광 조건은  $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 온도는  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ , 습도는  $70 \pm 5\%$ 를 유지하였다.

### 2.2. 오존 처리

오존 처리는 임업연구원 임목육종부에 설치된 환경제어실의 인공광 챔버를 이용하였다(이재천 등, 2001). 처리는 대조구로 사용하기 위한 clean room과 우리나라 오존의 1시간 평균 환경기준인 100 ppb 처리구로 구분하였으며, 처리 기간은 오전 9시부터 오후 5시까지 하루 8시간 씩 5주간(7월 16일~8월 19일) 계속하여 실시하였다.

### 2.3. 잎의 가지적 피해율

잎의 가지적 피해율은 잎 표면에 오존의 가지적 피해 증상으로 알려진 반점이 차지하는 면적을 백분율로 환산하였다. 피해율은 Horsfall-Barratt의 등급에 따라 조사하였으며(Horsfall and Barratt, 1945; Nash *et al.*, 1992), 한 나무의 전체 잎 중 피해 받은 잎의 비율(LA)을 구한 다음, 피해 받은 잎 중 피해면적의 비율(AA)을 구하였다. 한 나무 전체의 피해율(LAA)은 다음과 같이  $LAA(\%) = LA \times AA / 100$ 의 식을 사용하여 계산하였다(Lee *et al.*, 1999).

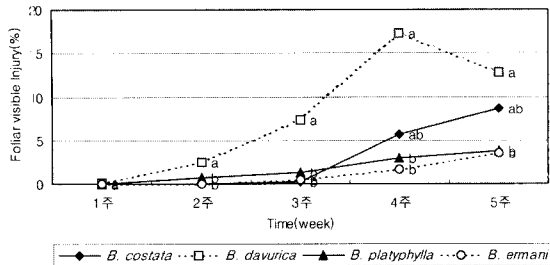
### 2.4. 성장 조사

각 수종의 성장 반응 조사는 오존 처리 후 1주 간격으로 수종별로 5본씩을 챔버에서 꺼낸 후, 잎 수와 잎 면적을 측정하였으며, 성장 효과는 1주 간격으로 줄기 직경과 수고 증가분을 측정하여 평가하였다. 상대 직경생장과 수고생장은 초기 직경 및 줄기와 비교해서 증가율로서 나타냈다. 직경과 수고 증가분은 오존 처리 전과 후의 직경 및 수고간 차이로부터 계산하였다. 실험이 종료된 후 직경과 줄기의 평균 상대생장율(RGR)은  $[\ln(x_2) - \ln(x_1)] / (t_2 - t_1)$ 의 식으로 계산하였다. 여기서  $x_2$ 와  $x_1$ 은 실험 종료 후( $t_2$ )와 초기( $t_1$ )의 직경과 수고를 나타낸다. 실험이 종료된 후 식물들을 수확하여 잎, 줄기, 뿌리로 구분하여 건조한 후 무게를 측정하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 3.1. 잎의 가지적 피해율

오존 처리된 4개 자작나무류 잎의 가지적 피해율은 Fig. 1과 같으며, 잎의 가지적 피해율은 수종간 차이를 보였다. 물박달나무와 자작나무는 오존 처리 2주 후부터 잎에서 가지적 피해가 나타났으며, 거제수나무와 사스래나무는 오존 처리 3주 후부터 가지적 피해를 보였다. 잎의 가지적 피해율은 오존 처리가 진행되는 동안 지속적으로 증가하였으며, 물박달나무는 오존 처리 4주 후에 최고치를 나타냈고, 5주 후에는 오히려 감소하였다. 이러한 현상은 가지적 피해를 받은 잎들의 조기낙엽과 신엽의 발달로 인해 전체적인 비율이 감소한 것으로 보인다. 한편 거제수나무는 3주 후에 피해가 급격히 증가하였으나, 자작나무와 사스래나무는 5주 후에도 가지적 피해율이 비교적 낮았다.



**Fig. 1.** Changes in visible foliar injuries of four *Betula* sp. exposed to 100 ppb ozone for 5 weeks. Each data point represents the mean of five replicates. The different letters within the same week indicate significant differences between the species at  $p < 0.05$  by Duncan's multiple range test.

오존 처리에 의한 자작나무류의 피해 증상은 초기 증상(small light-green, yellowish, brown dots)부터 중간 증상(large necrotic flecks, chlorosis, leaf vein yellowing)까지 다양하며(Pääkkönen et al., 1993), 잎 시듦(wilted leaf), 조기낙엽 등도 포함한다(Mortensen and Skre, 1990).

잎의 가시적 피해율은 오존의 농도가 증가함에 따라 점차 증가한다(이재천 등, 2001). Mortensen and Skre (1990)는 오존 농도가 증가함에 따라 *B. pubescens*와 *B. verrucosa*에서 시듦 잎의 비율이 점진적으로 높아지며, 가장 오래된 잎에서만 관찰되었던 황색반점(yellow molting)은 중간 나이의 잎에서도 관찰되었다고 보고하였다. 이와 같은 증상들은 다른 수종에서도 관찰할 수 있는데, *Populus* sp.에서도 오존 농도가 증가함에 따라 조기낙엽과 잎 시듦 현상이 증가하는 것으로 보고되었다(Wang et al., 1986). 오존에 유도된 가시적 잎 피해는 전분 함량 감소와 세포 파괴 뿐만 아니라 엽육 세포벽의 두께와 산화 스트레스에 유도된 변화와 관련된다(Günthardt-Goerg, 1996; Günthardt-

Goerg et al., 1996). 그러나 잎 피해 증상은 수종에 따라 차이를 알 수 있는데, 이것은 오존에 대한 각 수종의 민감성 차이 때문인 것으로 판단되며(Adams et al., 1988), 가시적 피해율은 오존에 대한 수종간 또는 수종내 클론간 감수성 차이를 확인하는데 유용하게 이용할 수 있다(이재천 등, 2001).

**3.2. 잎 수와 엽면적의 변화**

오존 처리 후 측정된 잎 수와 엽 면적의 변화는 수종간 또는 처리기간에 따라 다르게 나타났으며 (Table 1), 잎 수는 오존 처리 3주 후부터, 엽 면적은 오존 처리 2주 후부터 영향을 나타내기 시작하였다. 잎 수는 오존 처리 3주 후에 수종간 차이와 처리간 차이를 나타냈으나, 4주 후에는 수종간 또는 처리간에 차이가 없었고, 5주 후에는 수종간 차이만을 보였다. Fig. 2에서 오존 처리 1주 후에 거제수나무의 잎 수가 대조구보다 적게 나타난 것은 조기낙엽현상 때문인 것으로 보이는데 거제수나무 줄기의 하부에서부터 잎의 조기낙엽을 관찰할 수 있었다. 그러나 오존 처리 2주 후에는 신엽의 발생으로 대조구와 유사하였고, 다시 오존 처리 3주 후에는 대조구에 비해 크게 감소하는 현상을 보이다가 4주 후부터는 다시 잎 수를 회복하는 현상을 나타냈다.

사스래나무는 오존 처리 4주 후부터 잎 수가 대조구보다 감소하기 시작하였는데, 이것은 오존에 의한 피해로 잎 수가 감소한 것이 아니라 대조구에 비해 신엽의 발달이 적었기 때문이다. 그러나 자작나무와 물박달나무는 처리기간 동안 대조구에 비해 잎 수가 큰 변화를 보이지 않았다.

엽 면적은 오존 처리 2주 후부터 처리간 차이를 보였으며, 4주와 5주 후에는 수종간에도 차이를 나타냈

**Table 1.** F-values for analysis of variance and significance levels for the leaf number and leaf area of four *Betula* sp. exposed to 100 ppb ozone for 5 weeks

Parameters	Source	df	F value(week)				
			1	2	3	4	5
Leaf number	Species(S)	3	1.87	1.23	4.48**	1.18	7.30***
	Ozone(O)	1	0.01	0.31	7.92**	0.07	0.57
	S × O	3	0.20	3.99*	3.90*	3.80*	6.33**
Leaf area	Species(S)	3	1.02	1.43	1.71	4.51**	4.89**
	Ozone(O)	1	0.01	6.25*	37.22***	11.39**	33.35***
	S × O	3	0.54	1.51	2.24	1.08	3.00*

\*, \*\* and \*\*\* are represented significant differences at 0.05, 0.01 and 0.001 respectively.

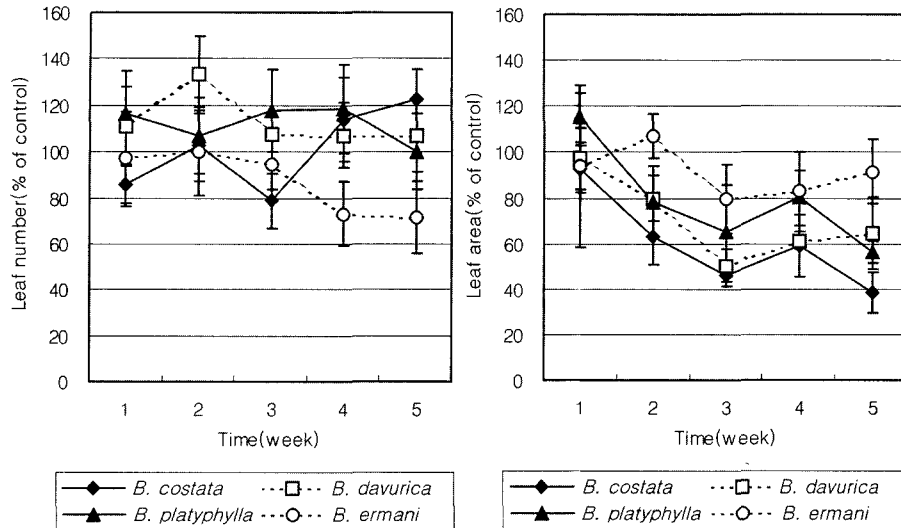


Fig. 2. Changes in the leaf number(left) and the leaf area(right) of four *Betula* sp. exposed to 100 ppb ozone for 5 weeks. All values are expressed as percentages of the control. Each data point represents the mean of five replicates  $\pm$  SD.

다(Table 1). 오존 처리 5주 후에 엽 면적 감소가 가장 컸던 수종은 거제수나무로 대조구의 38.3% 수준이었으며, 사스래나무의 엽 면적은 대조구의 91.7%를 유지하였다(Fig. 2). 이러한 현상은 거제수나무가 신엽의 형성으로 잎 수를 유지하고 있지만, 잎의 크기가 작아 엽 면적이 감소한 것으로 판단되며, 사스래나무는 신엽의 형성이 대조구에 비해 적어서 잎 수는 감소하였지만, 잎의 지속적인 발달로 대조구와 유사한 엽 면적을 유지하였을 것으로 보인다.

이재천 등(2001)은 미류나무 잎에서 오존 처리 3주 후에 농도가 증가할수록 잎 수가 급격하게 감소하였으며, 조기낙엽율이 증가하면서 고농도에서는 처리구내 클론간 잔존 잎 수의 변이 폭이 감소하였다고 보고하였다. 또한 Pääkkönen *et al.*(1993)과 Pearson(1995)

은 수종간에서 뿐만 아니라 수종내 클론간에서도 오존의 영향으로 잎 수가 감소하는 현상을 확인하였다. 그러나 오존에 노출된 수목은 피해 받은 잎을 보유하지 않고 새로운 잎을 발달시키는 경향이 있으나, 신엽의 크기는 작아져서 총 엽 면적은 감소한다. 한편 사스래나무와 같이 가시적 피해를 나타내지 않는 내성 수종들은 신엽의 생산은 적어지지만 잎의 크기는 지속적으로 커진다는 것을 알 수 있었다.

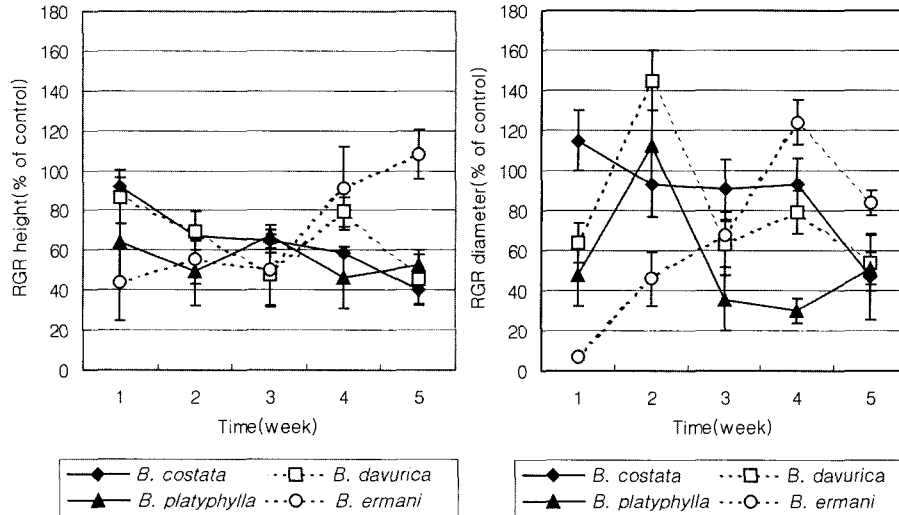
### 3.3. 수고와 직경의 상대생장률

자작나무류의 상대생장률은 수고와 직경에서 다른 양상을 보였다(Table 2). 수고 상대생장률은 오존 처리 1주 후부터 처리간 차이를 나타낸 반면 수종간에는 큰 차이가 없었다. 그러나 직경 상대생장률은 수종

Table 2. F-values for analysis of variance and significance levels for the relative growth rate(RGR) of height and diameter of four *Betula* sp. exposed to 100 ppb ozone for 5 weeks

Parameters	Source	df	F value(week)				
			1	2	3	4	5
Height	Species(S)	3	0.97	5.38**	1.33	1.73	0.20
	Ozone(O)	1	10.17**	14.30***	18.35***	14.89***	53.38***
	S $\times$ O	3	2.22	0.37	0.71	1.52	8.18***
Diameter	Species(S)	3	9.80***	9.26***	4.31*	0.86	7.75***
	Ozone(O)	1	11.89**	3.06	15.21***	5.63*	44.42***
	S $\times$ O	3	5.16**	6.58**	1.07	5.51**	2.92*

\*, \*\* and \*\*\* are represented significant differences at 0.05, 0.01 and 0.001 respectively



**Fig. 3.** Changes in the relative growth rate (RGR) for the height(left) and the diameter(right) of four *Betula* sp. exposed to 100 ppb ozone for 5 weeks. All values are expressed as percentages of the control. Each data point represents the mean of five replicates  $\pm$  SD.

간 또는 처리간에 차이를 나타냈다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 수고 상대생장율은 대조구에 비해 모두 감소하는 것으로 나타났다. 특히 거제수나무의 수고 상대생장율은 오존 처리 1주 후부터 지속적으로 감소하였다. 그러나 사스래나무의 수고 상대생장율은 오존 처리 1주 후에 4개 수종 중 가장 낮았으며, 대조구의 43.6% 수준이었으나 이후 점차 증가하여 오존 처리 4주 후부터는 대조구의 91.3%, 오존 처리 5주 후에는 대조구의 108.3% 수준으로 회복하였다.

직경 상대생장율은 처리기간에 따라 큰 변화를 보였다(Table 2). 거제수나무의 직경 상대생장율은 수고 상대생장율과 마찬가지로 처리 초기인 1주 후에 대조구와 유사한 수준이었으나 점차 감소하여 오존 처리 5주 후에는 4개 수종 중 가장 낮은 수준인 대조구의 47.1%로 가장 낮은 수준을 보였다(Fig. 3). 물박달나무와 자작나무는 오존 처리 1주 후에 직경 상대생장율이 대조구보다 크게 감소하였으나, 오존 처리 2주 후에 대조구와 유사한 수준으로 회복되었다가 3주 후부터 다시 크게 감소하였다. 사스래나무는 수고 상대생장율과 마찬가지로 처리 초기인 1주 후에 대조구의 6.5%를 보여 거의 생장을 하지 않은 것으로 나타났으나 이후부터는 지속적으로 증가하여 오존 처리 4주 후에 대조구와 유사한 수준을 보였다.

오존이 수목의 생장에 미치는 영향은 수고보다 직경 생장에 더 민감하게 작용하는 것으로 판단되며, 수종에 따라 오존에 대한 반응이 매우 다름을 알 수 있었다. 특히 초기에 조기낙엽을 보이던 거제수나무는 대조구와 유사한 성장 속도를 보이면서 피해를 회복하려는 경향을 나타냈으나, 이후 오존에 의한 성장 저해로 수고와 직경의 성장 속도가 느려졌음을 알 수 있었다. 그러나 사스래나무는 오존 처리 초기에는 생장에 민감한 영향을 받아 생장이 지연되지만 이후 오존에 대한 적응성이 증가하여 생장이 재개되면서 대조구와 유사한 수준까지 성장속도를 유지하였다. 즉 가시적 피해에서도 나타났듯이 사스래나무는 오존에 대한 내성을 보유한 수종임을 알 수 있었다. 반면 거제수나무는 오존에 대한 저항성이 매우 낮은 수종임을 알 수 있었다.

낮은 오존 농도에서 자작나무(*B. pendula*)의 오존 내성 클론은 줄기 수고 성장, 동아의 수, 기공전도도, Rubisco와 수용성 단백질 농도 등을 증가시켜 스트레스에 대한 순화와 보상 반응을 나타낸다(Oksanen and Rousi, 2001), 또한 장기적인 오존 스트레스의 효과를 개선하는 보상 반응은 *Liriodendron tulipifera*. (Tjoelker and Luxmoore, 1991), *Quercus rubra*. (Samuelson et al. 1996)에서도 보고된 바 있다.

본 연구에서 오존 처리에 대한 보상 반응은 명확하지 않았다. 그러나 물박달나무의 경우 오존 처리 2주

후에 일시적인 생장 증가를 나타냈으며, 사스래나무의 경우 오존 처리 4주 후에 생장이 급격히 증가하면서 오존에 대한 일시적인 보상 반응을 나타냈다.

### 3.4. 건중량 및 SR율의 변화

잎의 건중량은 오존 처리 1주 후부터 수종간 차이를 나타냈으나 오존 처리 효과는 처리 2주 후부터 나타났다(Table 3). Fig. 4에서 나타난 바와 같이 잎의 건중량은 오존 처리 1주 후에 대조구와 거의 유사한 수준을 보였다. 그러나 오존 처리 2주 후부터는 점차 감소하였으며, 5주 후에는 사스래나무를 제외한 3개 자작나무류의 잎의 건중량이 대조구에 비해 현저하게 감소하였다. 그러나 사스래나무의 잎 건중량은 오존 처리 1주 후부터 3주 후까지는 감소하였으나 이후 점차 증가하여 5주 후에는 대조구와 유사한 수준을 보였다.

줄기 건중량은 오존 처리 1주 후부터 3주 후까지 수종간 차이를 보였으나, 오존 처리 효과는 3주 후부터 5주 후까지 나타났다(Table 3). 줄기 건중량은 오존 처리 1주 후에 수종간에 큰 차이를 보였다. 특히 거제수나무의 줄기 건중량은 대조구보다 높은 수준을 나타내어 4개 수종 중 가장 높은 값을 나타냈으나 2주 후부터는 급격하게 줄기 건중량이 감소하였다(Fig. 4). 물박달나무와 자작나무는 오존 처리가 진행되는 동

안 지속적으로 감소하여 3주 후부터는 오존 처리 효과가 나타나 대조구에 비해 현저히 감소하였음을 알 수 있었다. 그러나 사스래나무의 줄기 건중량은 오존 처리가 진행되는 동안 큰 변화가 없었다.

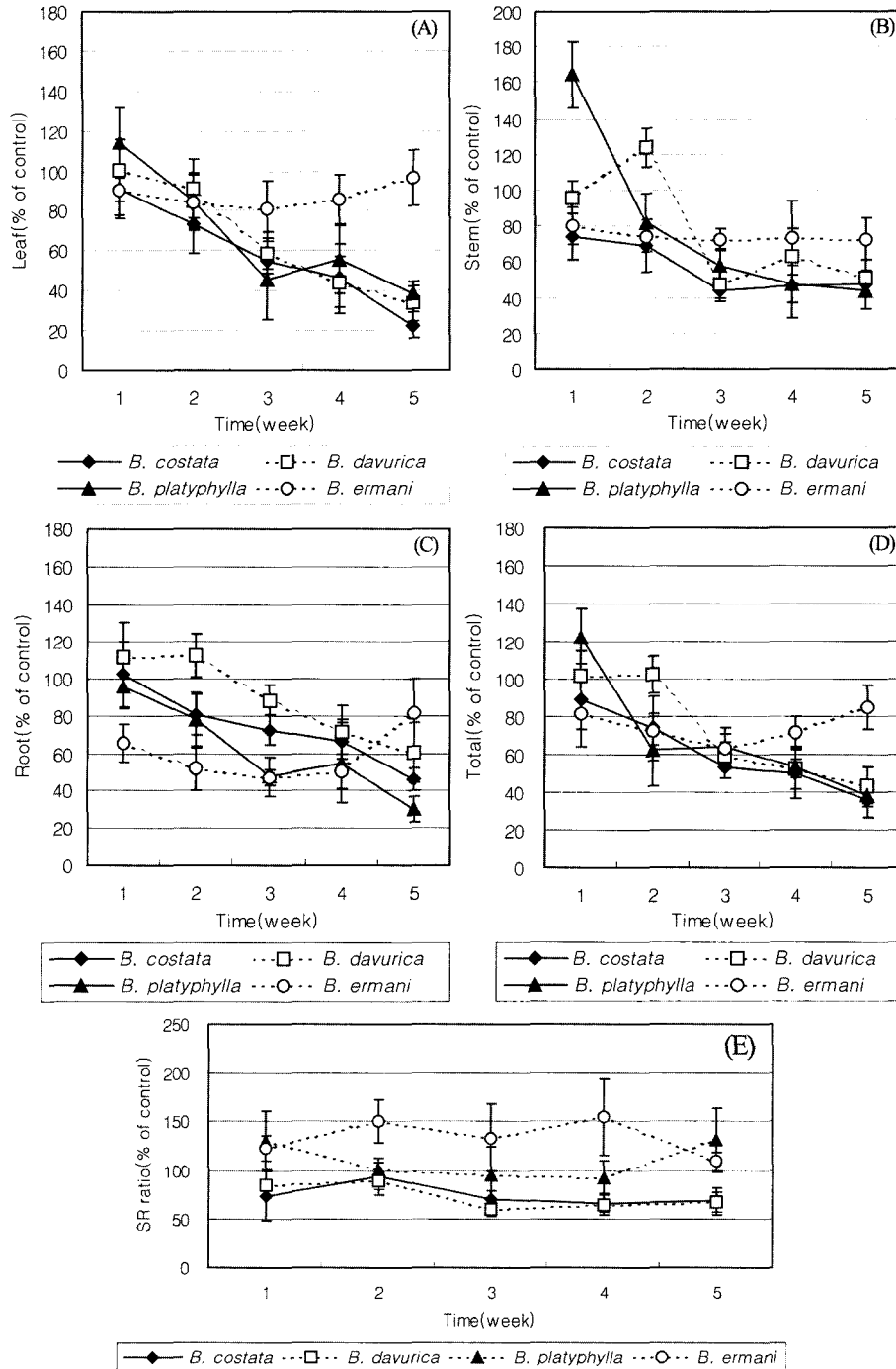
뿌리 건중량은 줄기와 유사한 특성을 보여주었는데 처리 1주 후부터 3주 후까지는 수종간 차이를 보인 반면 오존 처리 효과는 3주 후부터 5주 후까지 뚜렷하게 나타났다(Table 3). 사스래나무를 제외한 3개 수종의 뿌리 건중량은 대조구와 유사한 수준이었다. 그러나 이후 급격하게 감소하는 경향을 보였으며 5주 후에는 대조구와의 차이가 크게 나타났다(Fig. 4). 특히 자작나무의 뿌리 건중량은 4개 수종 중 가장 크게 감소하였다. 사스래나무는 잎 건중량과 마찬가지로 3주 후까지는 점차 감소하다가 이후 다시 증가하는 현상을 보여 주었다.

총 건중량은 줄기와 뿌리와 마찬가지로 수종간 차이는 1주 후부터 3주 사이에, 처리간 차이는 3주 후부터 5주 사이에 가장 뚜렷하였다(Table 3). 총 건중량은 잎, 줄기, 뿌리의 변화에 영향을 받았으며 특히 거제수나무와 물박달나무는 줄기의 영향을 그대로 나타냈다. 그러나 사스래나무는 잎과 뿌리의 영향을 더 많이 받은 것으로 보인다. 총 건중량의 변화는 사스래나무를 제외한 3개 수종에서 처리가 진행됨에 따라 지속적으로 감소하였다(Fig. 4). 그러나 사스래나무는 잎

**Table 3.** F-values for analysis of variance and significance levels for the dry weights and shoot/root(SR) ratio of four *Betula* sp. exposed to 100 ppb ozone for 5 weeks

Parameters	Source	df	F value(week)				
			1	2	3	4	5
Leaf	Species(S)	3	10.41***	12.04***	7.12***	3.21*	6.56**
	Ozone(O)	1	0.08	4.42*	27.01***	15.86***	89.85***
	S × O	3	0.30	0.25	0.58	1.71	10.66***
Stem	Species(S)	3	13.28***	8.69***	10.45***	1.38	1.98
	Ozone(O)	1	0.40	3.34	60.19***	15.04***	25.98***
	S × O	3	3.81*	1.23	2.47	0.40	0.93
Root	Species(S)	3	11.0***	14.41***	8.08***	3.91*	0.17
	Ozone(O)	1	1.27	7.33*	11.39**	13.63***	35.96***
	S × O	3	1.81	4.26*	2.44	1.08	2.76
Total	Species(S)	3	14.94***	12.70***	8.76***	2.33	3.69*
	Ozone(O)	1	0.50	6.70*	40.10***	24.39***	81.03***
	S × O	3	1.31	1.33	0.13	0.43	5.78**
SR ratio	Species(S)	3	4.48**	7.95***	1.99	5.27**	2.40
	Ozone(O)	1	0.09	0.42	5.10*	3.13	1.59
	S × O	3	1.46	2.66	4.50**	3.71*	3.91**

\*, \*\* and \*\*\* are represented significant differences at 0.05, 0.01 and 0.001 respectively



**Fig. 4.** Changes in the dry weight of leaf(A), stem(B), root(C) and total(D) and the shoot/root(SR) ratio(E) of four *Betula* sp. exposed to 100 ppb ozone for 5 weeks. All values are expressed as percentages of the control. Each data point represents the mean of five replicates ± SD.

과 뿌리에서 처럼 오존 처리 1주 후부터 3주 후까지는 지속적으로 감소하였으나 이후 점차 증가하여 대조

구와 비슷한 수준으로 회복되었다.

저농도 오존 처리는 수목의 생장을 자극하는 경향을

보이나, 100 ppb와 150 ppb의 고농도 오존 처리에 의해서는 생장이 감소한다. 그러나 오존에 내성을 보이는 수종은 고농도에서도 미세한 영향을 받는다(Oksanen *et al.*, 2001). 본 연구에서 대부분 수종의 지상부 생장이 오존에 의해 감소한 것은 오존의 처리 농도가 비교적 높았기 때문이며, 사스래나무의 경우 오존 처리에 의한 지상부 성장 감소가 적었던 것은 Oksanen *et al.*(2001)의 제안처럼 오존에 대한 내성을 보이기 때문인 것으로 판단된다.

SR 율은 오존 처리간 큰 변화를 보이지 않았으나 수종간 차이는 오존 처리 1주 후와 2주 후에 나타났다(Table 3). 거제수나무와 물박달나무는 오존 처리 1주 후에 대조구에 비해 SR 율이 낮았는데, 거제수나무는 조기낙엽으로 인하여 잎 건중량이 감소했기 때문이며, 물박달나무는 뿌리 건중량이 지상부의 건중량에 비해 높았기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 오존 처리 3주 후부터는 SR 율이 두 수종 모두 감소하여 대조구에 비해 현저하게 낮았다(Fig. 4). 이것은 뿌리 건중량 감소보다 지상부인 잎과 줄기의 건중량 감소가 대조구보다 크게 낮아졌기 때문이다. 그러나 자작나무는 초기에 지상부의 건중량이 뿌리에 비해 매우 높았기 때문에 SR 율이 대조구에 비해 높았지만 이후 지속적으로 감소하였다. 이것은 오존에 의해 지하부인 뿌리보다 지상부가 더 큰 영향을 받았기 때문인 것으로 판단되며, 오존 처리 5주 후에 다시 SR 율이 증가한 것은 뿌리의 건중량이 크게 감소하였기 때문이다. 사스래나무는 대조구보다 높은 SR 율을 유지하였지만 처리기간 동안 큰 변화를 보였다. 즉 잎과 뿌리의 변화에 영향을 받았기 때문인 것으로 보인다.

오존에 노출된 수목에서 뿌리의 성장 감소는 줄기 성장에 많은 에너지를 소모하였기 때문인 것으로 보고된 바 있다(Oksanen *et al.*, 2001). 또한 오존 노출에 의한 뿌리 성장 감소는 광합성 속도와 이용 가능한 탄소의 감소(Skärby *et al.*, 1998), 지하부로의 수송 및 사부 적재의 감소(Coleman *et al.*, 1996)에 의해서 일어난다. 이러한 뿌리 성장 감소는 SR 율을 증가시키고, 수목의 구조를 변화시키며, 지하부 경쟁력의 감소로 여러 가지 스트레스에 대한 민감도를 증가시키는 부작용을 가져온다(Oksanen *et al.*, 2001). 그러나 본 연구에서는 오존 노출 농도가 높았기 때문에 지상부와 지하부의 피해 정도에 따라 SR 율이 변화되는 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 수종에 따라 다

름을 알 수 있었다.

#### IV. 적 요

본 연구는 자작나무류의 오존에 대한 잎의 가시적 피해율과 성장 반응을 측정하여 수종별 오존 민감성을 비교하고자 하였다.

시험 재료는 거제수나무, 물박달나무, 자작나무, 사스래나무로 온실에서 양묘하여 포트로 옮겨 심고, 100 ppb의 오존 농도에서 하루 8시간 씩 5주 동안 오존에 노출시킨 후 그들의 가시적 피해율과 잎 수, 잎면적 및 성장(수고와 직경 상대생장을, 잎, 줄기, 뿌리의 건중량)을 측정하여 수종간, 처리간 차이를 비교하였으며 연구 결과는 다음과 같았다.

4개 수종의 오존에 대한 반응은 매우 다르게 나타나는데 사스래나무를 제외한 3개 수종의 생장은 오존에 의해 크게 영향을 받아 감소하는 것으로 보인다. 특히 초기에 많은 조기낙엽을 나타내는 거제수나무와 가시적 피해율이 가장 높은 물박달나무는 오존에 대해 민감한 수종으로 판단된다. 그러나 사스래나무는 초기에 오존에 대한 영향으로 생장이 감소하지만 오존에 대한 적응을 통하여 성장을 회복하는 내성 수종으로 판단된다.

#### 인용문헌

- 김현석, 이경준, 1995: Open-top chamber 내에서 오존에 폭로시킨 1년생 느티나무(*Zelkova serrata* Makino) 묘목의 생리적 반응에 관하여. 한국임학회지, **84**(4), 424-431.
- 우수영, 1997: 오존 환경에 대한 잡종 포플러 묘목의 가스교환과 생장에 관한 연구. 한국생태학회지, **20**(4), 239-244.
- 우수영, 1998: 오존 환경이 잡종 포플러의 성장과 기공개폐에 미치는 영향. 한국임학회지, **87**(1), 50-56.
- 이재천, 김인식, 여진기, 구영분, 2001: 잎의 가시적 피해에 따른 오존에 대한 미류나무(*Populus deltoides*) 클론간 감수성 비교. 한국임학회지, **90**, 10-18.
- Adams, M.B., J.M. Kelly, and N.T. Edwards, 1988: Growth of *Pinus taeda* L. seedlings varies with family and ozone exposure level. *Water, Air and Soil Pollution*, **38**, 137-150.
- Bortier, K., K. Vandermeiren, 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.
- Chappelka, A.H. and B.I. Chevone, 1992: Tree responses



- to ozone. *Surface Level Ozone Exposures and Their Effects on Vegetation*, A.S. Lefohn. (Eds.), Chelsea, Lewis Publishers, Inc., 271-323.
- Coleman, M.D., J.G. Isebrands, R.E. Dickson and D.F. Karnosky, 1995: Photosynthetic productivity of aspen clones varying in sensitivity to tropospheric ozone. *Tree Physiology*, **15**, 585-592.
- Coleman, M.D., R.E. Dickson, J.G. Isebrands and D.F. Karnosky, 1996: Root growth and physiology of potted and field-grown trembling aspen exposed to tropospheric ozone. *Tree Physiology*, **16**, 145-152.
- Darrall, N.M., 1989: The effect of air pollutants on physiological processes in plants. *Plant Cell Environment*, **12**, 1-30.
- Davis, D.D. and J.M. Skelly, 1992: Foliar sensitivity of eight eastern hardwood tree species to ozone. *Water, Air and Soil Pollution*, **62**, 269-277.
- Günthardt-Goerg, M.S., 1996: Different responses to ozone of tobacco, poplar, birch and alder. *Plant Physiology*, **148**, 207-214.
- Günthardt-Goerg, M.S., P. Schmutz, R. Matyssek and J.B. Bucher, 1996: Leaf and stem structure of poplar (*Populus* × *euramericana*) as influenced by O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, their combination, and different soil N supplies. *Canadian Journal of Forest Research*, **26**, 649-657.
- Horsfall, J.G. and R.W. Barratt, 1945: An improved grading system for measuring plant disease. *Phytopathology*, **35**, 655.
- Lee, J.C., J.M. Skelly, K.C. Steiner, J.W. Zhang, and J.E. Savage, 1999: Foliar response of black cherry (*Prunus serotina*) clones to ambient ozone exposure in central Pennsylvania. *Environmental Pollution*, **105**, 325-331.
- Minnocci, A., A. Panicucci, L. Sebastiani, G. Lorenzini and C. Vitagliano, 1999: Physiological and morphological responses of olive plants to ozone exposure during a growing season. *Tree Physiology*, **19**, 391-397.
- Mortensen, L. and O. Skre, 1990: Effects of low ozone concentrations on growth of *Betula pubescens* Ehrh., *Betula verrucosa* Ehrh. and *Alnus incana* (L.) Moench. *New Phytologist*, **115**, 165-170.
- Nash, B.L., M.C. Saunders, B.J. Miller, C.A. Bloom, D.D. Davis and J.M. Skelly, 1992: Foresthealth, an expert system for assessing foliar and crown health of selected northern hardwoods. *Canadian Journal of Forest Research*, **22**, 1770-1775.
- 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.
- Oksanen, E., G. Amores, H. Kokko, J.M. Santamaria and L. Kärenlampi, 2001: Genotypic variation in growth and physiological responses of Finish hybrid aspen (*Populus tremuloides* × *P. tremula*) to elevated tropospheric ozone concentration. *Tree Physiology*, **21**, 1171-1181.
- Pearson, M., 1995: Effects of ozone on growth and gas exchange of *Eucalyptus globulus* seedlings. *Tree Physiology*, **15**, 207-210.
- Pye, J.M., 1988: Impact of ozone on the growth and yield of trees: a review. *Journal of Environmental Quality*, **17**, 347-360.
- Pääkkönen, E., J. Vahala, T. Holopainen, R. Karjalainen and L. Kärenlampi, 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.
- Pääkkönen, E., S. Paasisalo, T. Holopainen and L. Kärenlampi, 1993: Growth and stomatal responses of birch (*Betula pendula* Roth.) clones to ozone in open-air and chamber fumigations. *New Phytologist*, **125**, 615-623.
- Pääkkönen, E., T. Holopainen and L. Kärenlampi, 1995: Ageing-related anatomical and ultrastructural changes in leaves of birch (*Betula pendula* Roth) clones as affected by low ozone exposure. *Annals of Botany*, **75**, 285-294.
- Samuelson, L.J., J.M. Kelly, P.A. Mays and G.S. Edwards, 1996: Growth and nutrition of *Quercus rubra* L. seedlings and mature trees after three seasons of ozone exposure. *Environmental Pollution*, **91**, 317-323.
- Skärby, L., H. Ro-Poulsen, F. Wellburn and L. Sheppard, 1998: Impact of ozone on forests: a European perspective. *New Phytologist*, **139**, 109-122.
- Tjoelker, M.G. and R.J. Luxmoore, 1991: Soil nitrogen and chronic ozone stress influence physiology, growth and nutrient status of *Pinus taeda* L. and *Liriodendron tulipifera* L. seedlings. *New Phytologist*, **119**, 69-81.
- 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. *Canadian Journal of Forest Research*, **16**, 47-55.