

## 한계농도 누적 오존지표로 본 1990~1997년의 수도권 오존농도 변화

### Tropospheric Ozone Patterns in the Metropolitan Seoul Area During 1990~1997 Using Two Ozone Indices of Accumulation over the Threshold Concentrations

윤 성 철 · 박 은 우 · 장 영 기<sup>1)</sup>

서울대학교 응용생물화학부

<sup>1)</sup>수원대학교 환경공학과

(1999년 2월 5일 접수, 1999년 7월 14일 채택)

Sung-Chul Yun, Eun Woo Park and Young-Kee Jang<sup>1)</sup>

*School of Applied Biology and Chemistry, Seoul National University, Suwon, Korea 441-744*

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Engineering, The University of Suwon, Suwon, Korea 440-600*

(Received 5 February 1999; accepted 14 July 1999)

#### Abstract

In order to assess the chronic impact of tropospheric ozone on vegetation in the Seoul metropolitan area, it is necessary to quantify ozone exposure. Two ozone indices commonly used to relate ozone exposure to injury of vegetation were calculated. SUM06 (SUM of hourly concentrations at or above 0.06 ppm) and AOT40 (Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb) which are widely used as ozone indices in the US and Europe were calculated based on hourly ozone concentrations in 5 areas of Seoul and 5 cities of Kyunggido during 1990~1997. Most SUM06 levels were 1~5 ppm · hr, however several areas in Northern and Eastern Seoul reached about 5~7 ppm · hr in 1996~1997. AOT40 values were as high as 17~24 ppm · hr. Although measured SUM06 levels would not be expected to significantly impact vegetation, the overall ozone index, as well as annual average, 95th, and 99th percentile have increased continuously over the last 8 years. Often, ozone concentrations are lower in cities where there is a significant NO<sub>x</sub> concentration, than in outlying rural agricultural areas where NO<sub>x</sub> scrubbing is not as important. Concentrations greater than 40 ppb, which can cause chronic ozone toxicity to vegetation, were found mostly in the summer and constituted about 5~15% of total hourly ozone concentrations.

**Key words** : ozone, AOT40, SUM06, vegetation protection, chronic impacts, acute symptoms

#### 1. 서 론

오존은 대기오염원들 중에서 식물에 가장 독성이

강한 것으로 보고되고 있다(USEPA, 1996, 1986). 오존에 의한 식물의 피해는 오존의 농도, 시간 그리고 식물의 오존에 대한 민감도 및 생육조건에 따라 달라진다. 수시간 또는 수일의 고농도 노출에 의한

단기간의 반응은 식물의 생리적, 생화학적 과정의 급격한 변화에 따른 잎의 가시적 피해 증상(chlorosis, bronzing, flecking, bleaching, stippling and bifacial necrosis)으로 나타난다. 한편 생육기간 전체에 걸친 비교적 낮은 오존농도의 노출로도 생육저해, 조기낙엽, 화기형성 지연, 식물체 중량감소, 수확량 감소 등의 오존 피해가 나타나는데, 때로는 고농도의 단기 노출시 나타나는 전형적인 잎의 이상 증상이 보이지 않기도 한다. 잎의 피해 증상을 볼 수 없는 비교적 낮은 오존 농도로도 광합성의 억제, 탄소 동화물질의 뿌리로의 이동 저해가 발생됨으로써 수년에서 수십년에 걸쳐 누적된 다년생 수목의 만성적 오존 피해는 삼림쇠퇴의 원인이 된다(Heath and Taylor, 1997).

식물의 전 생육기간에 걸친 장기간의 오존 노출은 자연에서 나타나는 다양한 오존 농도 패턴에 따른 식물의 만성적 피해를 연구하는데 가장 적합한 시스템이다. 미국과 유럽에서 오픈탑 챔버(open-top chamber)를 사용한 생육기간에 전반에 걸친 장기간의 포장실험에서 오존 처리 수준은 자연상태의 오존 농도(ambient concentration)보다 1.5, 1.7, 2.0, 3.0배 오존을 더 첨가하거나, 활성탄 필터를 사용해서 포장 오존 수준의 0.5~0.7배로 낮게 처리농도를 조절한 것이었다(USEPA, 1996, 1986). 자연상태의 오존 농도와 추이는 포장실험의 오존 수준을 결정하는데 기준이 되는 것으로써 앞으로 우리나라에서 실시될 포장실험의 기준이 될 뿐만 아니라 그동안 축적된 우리나라 측정치와 다른 나라의 포장실험의 오존 수준을 비교함으로써 그동안의 우리나라 식생피해 정도를 개략적으로 파악할 수 있다. 또한 오존 변화의 추이를 바탕으로 미래의 악화될 오존 시나리오를 만들어 포장실험의 처리 수준을 정할 수 있다. 뿐만 아니라 오존이 조절 가능한 실내 환경조건에서 자연의 수준에 근거하여 오존의 처리농도 및 기간을 결정함으로써 현실적인 오존 수준에 의해 일어날 수 있는 식물의 피해를 시뮬레이션할 수 있다.

최근 여름철에 잦은 오존 주의보 발령으로 우리나라의 대류권에서 발생하는 고농도의 오존에 대한 우려가 높아지면서 법적 기준치보다 낮은 수준의 피해에 관심이 고조되고 있으나, 피해가 우려되는 고농도의 오존 수준은 연구자의 관점에 따라 60

ppb, 80 ppb, 100 ppb 등으로 다르게 보고되고 있다. 오존으로 인한 만성적인 식생피해를 파악하려면 피해가 시작되는 상당히 낮은 수준부터 고려되어야 한다. 특히 낮은 농도의 장기간 노출에 따른 식물의 만성독성 피해는 서서히 눈에 띄지 않게 발생하기 때문에 이에 따른 식생의 피해를 평가하려면 오픈탑 챔버를 사용한 직접적인 노출 실험을 전 생육기간에 걸쳐 수행해야하므로 많은 비용과 시간이 소요될 수 밖에 없다. 따라서, 본 연구에서는 90년부터 97년까지 8년간의 대기오염 자동측정망에서 측정된 오존 자료를 바탕으로 서울 및 경기도 도시들의 대기질 수준을 농도별 빈도수와 미국 및 유럽에서 유력하게 제시되고 있는 식생보호를 위한 SUM06(시간당 오존농도가 60 ppb를 넘는 오존 농도의 합, SUM of hourly accumulation over 60 ppb), AOT40(시간당 오존농도가 40 ppb를 넘는 오존 농도의 합, Accumulated exposure Over a Threshold 40 ppb), 그리고 W126 (sigmoidal 함수에 따라 고농도의 오존에 가중치를 계산하여 시간당 농도를 곱한 것에 대한 누적치, Lefohn and Runeckles, 1987) 등의 식물의 만성적인 피해반응을 잘 표현할 수 있는 오존 노출량의 지표들로 환산하고 미국의 exposure response model(Hogsett *et al.*, 1995)에 적용시켜 봄으로써 지난 8년간 수도권 오존에 의한 만성적인 식생피해를 오존 자료로써 추정하고자 한다.

## 2. 식생보호를 위한 오존지표

1980년대 미국 환경청(USEPA)의 주관으로 약 10년에 걸쳐 4~5개 지역의 실험포장에서 오픈탑 챔버(open-top chamber)를 이용한 대규모 수확량 손실평가 실험(US NCLAN: National Crop Loss Assessment Network) 자료들을 이용하여 오존 노출과 식물 반응의 상관관계를 알아보기 위한 소급(retrospective) 통계분석을 실시한 결과 실험설계시 오존량의 지표로 사용되었던 7시간 평균농도, 즉 잎이 기공을 열고 대기오염원에 노출되는 9:00~15:59 동안의 평균 오존농도는 오존의 만성 독성에 의한 작물의 반응과 오존량과의 상관관계 구명을 적절하게 할 수 없었다(Lefohn *et al.*, 1988). 이에 따라 정확한 오존의 노출량 산정을 위한 여러 지표들 간의 비교연구들(Lee *et al.*, 1998; Finnan *et al.*, 1996;

Lefohn *et al.*, 1992; Lefohn *et al.*, 1988)이 실시되어 식물의 생육기간 전반에 걸쳐, 고농도에 높은 가중치를 계산하는 농도에 시간을 곱한 노출량(단위는 ppm·hr)으로 표현된 오존지표들이 식생의 피해를 정확하게 표현할 수 있는 오존량의 지표로 추천되었다. 추천된 대표적인 오존 지표들로는 W126과 일정 한계 이상의 오존농도를 합친 SUM06, SUM08(시간당 오존농도가 80 ppb를 넘는 오존 농도의 합, sum of hourly accumulation over 80 ppb) 등이었다. 그 후, Hogsett 등(1995)이 NCLAN 자료를 바탕으로 분석한 결과 SUM06이 23.4 ppm hr 이상일 때 전체작물의 수량감소가 약 10% 가량 된다는 노출-반응관계(dose-response relationship)를 보고하였다. 한편 유럽에서는 EOTCP(European Open Top Chamber Program) 실험 자료의 소급(retrospective) 통계분석 결과, 식생피해를 적절한 상관관계로 나타내기에 적합한 오존지표로 AOT40을 1993년에 확정, 광범위하게 사용하고 있다(Legge *et al.*, 1995).

식물은 오존 주의보가 발령되는 시간당 120 ppb보다 낮은 수준에서도 잎의 이상증상을 보이며(Yun, 1998), NCLAN, EOTCP 실험 결과 오존 농도가 50~80 ppb 이상이면 장기적인 식물 성장에 영향을 끼치기에 충분하므로(Legge *et al.*, 1995) 결국 현재의 법적 기준치는 만성적인 오존 피해로부터 식생을 보호하기에 너무 높은 수준이다. 따라서 미국에서는 식생보호를 위한 이차 오존 기준치(secondary ozone standard)로서 SUM06을 적용하려는 논의가 활발하고 유럽은 임계수준(critical level)으로서 AOT40이 92년 UN-ECE Egham 워크샵에서 오존 지표로 추천된 후, 비록 법적 효력은 없지만 식생의 피해에 대한 과학적인 논의에 활발히 이용함으로써 정책 결정에 참고자료로 사용하고 있다. 현재까지의 비교연구 결과 오존지표 중 AOT40, SUM06과 같은 일정 한계농도 이상의 누적치로 나타내는 지표들이 가장 적절한 오존 지표로 인정되고 있으나, 한가지 지표만으로는 식생에 영향을 주는 오존 특성을 표현하기에는 한계가 있으므로 농도별 빈도수와 같은 기존의 분석 방법과 함께 고려되는 것이 바람직하다(Musselman *et al.*, 1994).

### 3. 자료의 분석방법

본 실험에서 사용한 자료는 대기오염 자동측정망에서 측정된 1990년부터 1997년의 서울 및 경기도 그리고 강원도 춘천의 자료를 이용하였다. 허정숙 등(1999)에 따르면 이 기간 동안의 우리나라 오존의 연간 결측율은 11.3~22.3%로 점차 줄어들고 있다. 본 실험에서 사용한 오존 지표들은 특히 고농도를 나타내는 6~8월의 결측에 민감하게 변화하므로 이들 자료 중 서울은 도심, 동부, 북동, 북서, 남동의 5권역으로 나누어 일년중 오존 농도가 높은 6~8월 사이의 측정자료가 비교적 충실한 10개소(도심:광화문, 한남동; 동부:구의동, 성수동; 북동:쌍문동, 길음동; 북서:불광동, 남가좌동; 남동:대치동, 반포동)를 선발하여 자료를 정리하였다. 또한 수도권은 인천(송의동, 부평동), 수원(팔달동, 권선동), 안양, 성남, 의정부, 안산, 과천 그리고 강원도 춘천 자료를 분석에 사용하였다. 각 권역별 오존 현황(표 1~4)을 나타내기 위해서는 각 권역에서 중복되는 두 측정소들 중 최근 4년간 6~8월 결측률이 비교적 낮은 측정소를 각 권역 대표로 선발하였고, 한 도시에 한 측정소만 있는 경기도의 경우 지역적으로 가까운 두 도시 중 한 도시로 5개의 도시를 선발하였다. 서울의 5권역 및 경기도의 5도시를 대표하는 측정소 및 연도별 결측률은 각각 표 1, 2와 같다. 그림 2에서는 각종 오존 지표들 및 연평균, 95, 99 퍼센타일의 연도별 경향을 서울의 10개 측정소 및 경기도의 9개 측정소의 평균값으로 계산하였는데 기초 자료의 결측률이 30% 이하의 자료만 평균 계산에 사용하였다. 미국의 오존 자료를 참조하기 위하여 10개 지역의 88년부터 92년의 오존 자료(Yun, 1998)를 사용하였다.

모든 오존 자료는 시간당 평균 오존 농도였으며, 식생보호를 위한 오존지표로는 1) 한계농도 60 ppb 이상의 오존 농도의 합(SUM06), 2) 한계농도 40 ppb 이상의 오존 농도의 합(AOT40), 3) 오존 농도가 80 ppb 이상일 경우 가중치를 두는 시간당 오존 농도의 합(W126)(Lefohn *et al.*, 1988) 등 비교적 오존 관련 논문들에서 흔히 사용되면서 과학계에서 폭넓게 받아들여지는 지표들(Legge *et al.*, 1995; Musselman *et al.*, 1994; Lee *et al.*, 1988; Lefohn *et al.*,

1988) 을 사용하였다.

#### 4. 분석결과

##### 4.1 농도별 발생빈도 분포

시간당 오존 자료를 각 농도 단계별로 구분하여 최근 4년간 서울과 경기지역의 각 권역별 빈도수의 백분율을 표 1, 2에 각각 나타내었다. 전체 오존 중 10ppb 이하의 농도가 차지하는 비중은 대체로 40~60%가 대부분을 차지하며, 40 ppb 이상의 비중은 5~10%, 60 ppb 이상은 1~3%로 나타났으나, 서울 동부와 북동지역은 40ppb 이상과 60ppb 이상의 비중이 각각 10~15%, 2~5%로 다른 지역에 비해 높았다(표 1). 결국 식생에 반성적인 영향을 미치는 40 ppb 또는 60 ppb 이상의 고농도는 일년 8760시간 중 5~15%의 기간이며 이때의 오존의 농도 수준과 변화의 양상에 의해 식생이 영향을 받을 것으로 예측된다. 표 1, 2에 나타나듯이 최근 3년(96년 이후) 간의 60 ppb를 넘는 빈도수의 백분율이 서울의 도심, 인천을 제외하고는 모두 1%(87시간)을 넘고 있으며, 또한 최근 3년간 대부분 지역에서 10 ppb 이하의 빈도수 백분율은 감소되는 반면 40 ppb 이상의 빈도수 백분율은 점차 증가되었다(표 1, 2). 경기는

대체로 서울에 비해 40 ppb 이상의 백분율이 낮았는데, 특히 인천은 다른 경기도 도시에 비해 낮게 나타났다(표 2). 서울의 북동 및 강북지역의 경우 현재의 법적 허용 농도 수준인 100 ppb를 넘어서는 빈도수가 0.4~0.5%(35~45시간)를 육박하고 있다(표 1). 오존 지표를 감소시키는 6~8월의 결측률은 서울은 대체로 5% 정도였으나 95년에는 10%에 달했고, 경기는 거의 10%를 넘어서고 있었으며, 특히 의정부, 수원, 인천의 결측이 높은 것으로 나타났다. 미국은 오존의 농도가 특히 높은 남 캘리포니아를 제외하고는 40 ppb와 60 ppb 이상은 각각 25~30%와 5~10%로 우리나라 수도권외의 5~15%, 1~5%비해 대체로 높았으나, 연중 최대값은 100~140 ppb으로 두 나라에서 거의 비슷하였고(Yun, 1998) 서울 동부와 북동의 최근 2년간의 40 ppb와 60 ppb 빈도수는 거의 미국과 같았다.

그림 1은 서울 동부지역의 4년간 오존의 시간별 농도와 각 단계별 빈도수를 나타낸 것이다. 다른 연구에서 보고된 계절별 변화(윤마영과 정용승, 1995; 정용승과 정재섭, 1991)가 뚜렷이 보였는데 특히 최근 2년간의 농도 수준이 전보다 점차 증가됨을 보인다. 또한 96년 이후 오존의 일 최저 농도치(기준선)가 0~10 ppb까지 내려가지 않고 10 ppb 이상에

Table 1. The percent of hourly ozone data in each level during 1994~1997 in Seoul.

Area	Measured site	Year	Missing	Equal 0	<10	>40	>60	>80	>100	>120
Central	Kwanghwamun	1994	6.59	4.28	60.41	5.30	1.38	0.56	0.23	0.18
		1995	2.87	0.41	56.46	4.69	0.67	0.02	0.00	0.00
		1996	5.56	1.42	58.62	3.52	0.81	0.17	0.02	0.00
		1997	2.73	0.34	58.82	5.47	1.48	0.47	0.08	0.01
East	Kuui	1994	7.37	0.18	58.98	4.79	1.15	0.35	0.06	0.01
		1995	9.43	0.07	48.29	8.15	1.78	0.42	0.01	0.00
		1996	0.56	0.00	23.50	15.98	5.34	1.26	0.18	0.02
		1997	3.04	0.00	12.07	12.22	3.39	1.33	0.39	0.06
Northeast	Ssangmun	1994	3.84	0.53	40.98	9.40	2.30	0.80	0.28	0.08
		1995	9.55	0.51	36.96	10.68	2.59	0.67	0.10	0.00
		1996	1.97	0.65	35.05	14.07	3.56	1.36	0.48	0.07
		1997	3.06	0.91	43.06	13.66	4.35	1.55	0.51	0.16
Northwest	Pulkwang	1994	5.01	0.02	48.05	4.40	1.11	0.32	0.05	0.00
		1995	5.95	0.03	48.42	4.88	0.70	0.17	0.07	0.05
		1996	11.94	2.73	35.07	9.75	2.29	0.67	0.14	0.03
		1997	10.73	0.33	38.48	8.25	2.02	0.51	0.08	0.01
Southeast	Taechi	1994	8.52	1.67	60.13	1.73	0.56	0.21	0.00	0.00
		1995	11.89	0.09	57.61	2.38	0.19	0.00	0.00	0.00
		1996	8.79	0.37	54.31	3.92	1.64	0.71	0.21	0.06
		1997	4.61	0.00	41.34	9.56	3.20	0.99	0.23	0.02

Table 2. The percent of hourly ozone data in each level during 1994~1997 in Kyunggido.

City	Measured site	Year	Missing	Equal 0	< 10	> 40	> 60	> 80	> 100	> 120
Inchon	Bupyung	1994	18.54	1.05	39.94	1.60	0.53	0.32	0.15	0.07
		1995	5.62	0.00	37.25	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00
		1996	6.97	0.01	63.74	1.80	0.31	0.05	0.00	0.00
		1997	12.61	1.20	51.26	2.56	0.52	0.10	0.00	0.00
Suwon	Kwonsun	1994	10.40	3.41	50.11	7.31	1.91	0.78	0.33	0.06
		1995	16.89	1.13	51.73	8.20	1.43	0.11	0.00	0.00
		1996	48.79	1.38	55.06	9.43	3.32	1.07	0.13	0.02
		1997	6.53	0.21	45.04	11.08	3.53	0.66	0.00	0.00
Uijongbu	Uijongbu	1994	16.63	0.43	48.05	5.87	1.36	0.42	0.03	0.00
		1995	14.24	0.54	43.38	3.37	0.39	0.08	0.00	0.00
		1996	19.76	0.66	48.54	10.37	2.62	0.60	0.06	0.00
		1997	6.62	3.94	54.11	6.44	1.76	0.61	0.20	0.01
Sungnam	Dandae	1994	12.96	0.59	61.21	3.08	1.05	0.30	0.01	0.00
		1995	11.75	2.39	56.40	1.89	0.16	0.00	0.00	0.00
		1996	6.02	0.01	49.00	5.45	1.06	0.16	0.00	0.00
		1997	10.56	0.00	43.74	6.13	2.07	0.66	0.18	0.00
Anyang	Hokae	1994	7.28	0.65	53.76	6.69	1.60	0.47	0.04	0.00
		1995	4.10	0.94	56.74	4.82	0.29	0.00	0.00	0.00
		1996	7.09	1.02	57.71	3.71	0.96	0.17	0.00	0.00
		1997	2.92	0.06	52.75	7.33	1.59	0.32	0.06	0.00

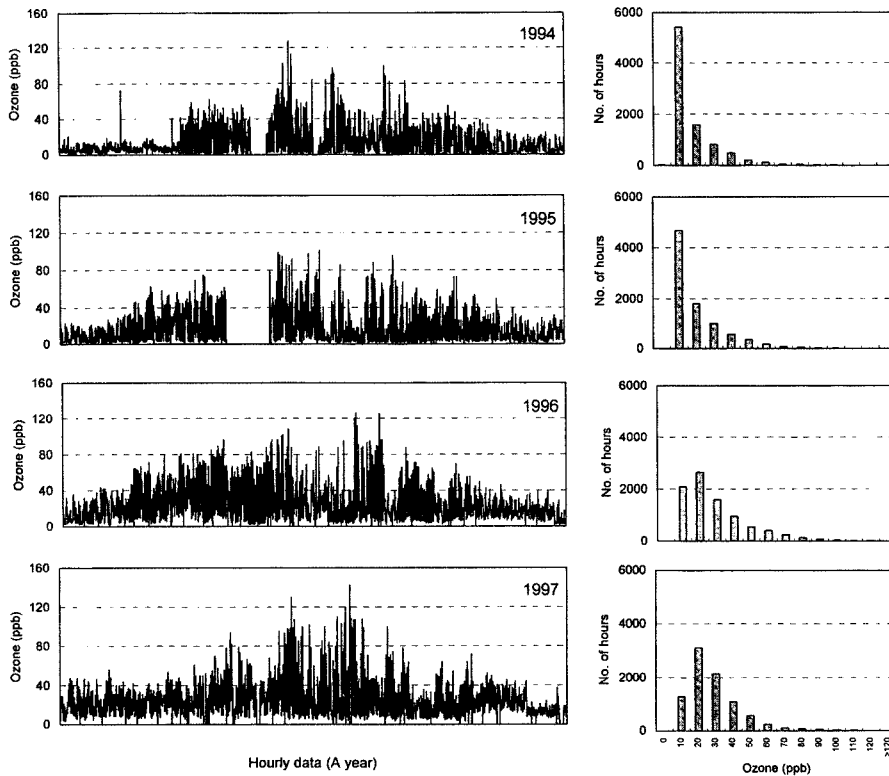


Fig. 1. Hourly ozone concentration and frequency at Eastern Seoul site (Kuuidong) during 1994~1997.

서 다양하게 변화하고 있다. 이에 따라 빈도수는 0~10 ppb의 비중이 낮아지면서 96년부터는 10~20ppb의 수준이 가장 높은 빈도 계급이 되었다(그림 1). 그러나 서울 동부 지역 외의 모든 서울 및 경기지역의 최고 빈도 계급은 0~10 ppb이었다. 미국의 10개 지역 대부분의 경우 최고 빈도계급은 20~30 ppb이었는데, 두 나라간의 이러한 차이가 10 ppb가 넘는 평균 오존 농도의 차이로 나타났다. 서울 동부지역의 96년 이후 연평균 농도는 23 ppb로 다른 지역에 비해 특히 높았는데(표 3), 이러한 차이는 최대 농도의 증가라기보다는 각 단계별 오존 자료 중 10 ppb 이하가 10~20%로 다른 지역의 40~50% 비해 낮게 나타났기 때문이다(표 1).

**4.2 식생보호를 위한 오존 지표로 본 최근 4년간의 상황**

최근 5년간 각각 서울 및 경기 지역 오존 자료를 미국과 유럽에서 제안된 식생보호를 위한 오존 지표로 정리하였다(표 1, 2). 농도가 높을수록 sigmoi-

dal 함수에 따라 가중치를 두는 W126의 가중치 계산(Lefohn and Runeckles, 1987)은,

$$w_i = 1/[1 + M \cdot \exp(-A \cdot C_i)],$$

여기서 M은 4403과 A는 0.126 상수이며,  $w_i$ 는 i 농도에서의 가중치,  $C_i$ 는 농도 i이다. 이 가중치에 시간당 농도를 곱한 각 시간별 오존자료의 연간 합이 W126이다.

일년 12달 모두를 포함해 계산된 SUM06은 0.05~7.1 ppm·hr로 그 수준이 연도별, 지역별로 다양하였으며, 서울은 95년을 제외하고는 대체로 2~7 ppm·hr로 경기도의 0.3~3.4 ppm·hr에 비해 매우 높게 나타났다. 대체로 모든 지역에서 최근 들어 증가세가 뚜렷하였지만, 서울의 북동과 강북이 다른 지역에 비해 현저히 높았으며, 인천이 0.3~0.4 ppm·hr로 가장 낮았다(표 4). AOT40은 SUM06에 비해 더 큰 변화를 보였는데, 서울은 도심을 제외하고 96, 97년은 10~20 ppm·hr로 전년도에 비해 증가되었으며, 경기는 5~15 ppm·hr으로 서울보다는

Table 3. Various ozone indices, yearly average, and percentiles in Seoul.

Area	Year	Maxium (ppb)	Average (ppb)	AOT40 <sup>1</sup> (ppm·hr)	SUM06 <sup>2</sup> (ppm·hr)	W126 <sup>3</sup> (ppm·hr)	Missing <sup>4</sup> (%)	99 percentile	95 percentile
Central (Kwanghwamun)	1994	322	12.55	8.62	3.62	10.55	10.87	65	41
	1995	86	12.58	4.18	0.42	4.30	2.13	56	40
	1996	102	11.65	3.90	0.82	4.72	13.41	56	36
	1997	126	12.57	7.54	2.16	9.52	0.36	67	42
East (Kuui)	1994	128	12.39	5.93	1.56	7.34	8.51	63	40
	1995	101	15.56	8.89	1.96	10.48	1.59	69	47
	1996	127	23.31	24.30	6.34	29.67	0.86	83	61
	1997	143	23.87	17.11	5.57	22.28	0.59	85	54
Northeast (Ssangmun)	1994	144	18.22	12.29	3.63	15.24	1.90	75	49
	1995	118	19.40	12.39	2.99	14.90	1.81	75	51
	1996	162	21.25	19.42	5.91	24.15	0.59	86	56
	1997	150	19.91	21.35	7.11	27.39	3.58	88	58
Northwest (Pulkwang)	1994	117	14.10	5.29	1.47	6.96	2.90	62	39
	1995	167	14.41	4.63	0.94	5.22	4.30	57	40
	1996	121	19.18	10.83	2.81	13.28	8.56	74	49
	1997	122	18.47	9.56	2.29	11.65	8.06	71	48
Southeast (Taechi)	1994	99	10.02	2.51	0.75	3.30	8.74	52	27
	1995	77	11.48	1.73	0.08	1.70	5.07	50	33
	1996	143	12.61	6.91	2.80	9.67	7.29	73	36
	1997	123	18.51	14.44	4.44	18.60	1.86	80	53

1. AOT40 is an accumulative concentrations greater than 0.04 ppm (ppm·hr).  
 2. SUM06 is an accumulative concentrations greater than 0.06 ppm (ppm·hr).  
 3. W126 is an accumulative concentrations weighing  $w = 1/[1 + 4403 \cdot \exp(-0.126 \cdot O_3 \text{ conc.})]$   
 4. Missing is the percent of hourly missing data during June, July and August in each year.

Table 4. Various ozone indices, yearly average, and percentiles in Kyunggido.

City	Year	Maxium (ppb)	Average (ppb)	AOT40 <sup>1</sup> (ppm · hr)	SUM06 <sup>2</sup> (ppm · hr)	W126 <sup>3</sup> (ppm · hr)	Missing (%)	99 percentil	95 percentile
Inchon (Bupyung)	1994	132	12.81	2.51	1.11	3.60	10.42	49	28
	1995	55	12.52	0.13	0.00	0.38	3.26	34	25
	1996	95	10.53	1.68	0.34	2.07	3.31	46	28
	1997	94	11.61	2.36	0.49	2.93	2.58	50	32
Suwon (Kwonsun)	1994	188	15.18	9.63	3.21	12.28	26.27	74	45
	1995	88	15.01	6.89	0.93	7.25	21.51	64	46
	1996	136	14.74	7.88	2.45	10.18	37.09	81	53
	1997	95	18.02	14.74	3.41	17.86	4.62	77	54
Uijongbu (Uijongbu)	1994	108	14.88	6.15	1.52	7.53	21.83	66	43
	1995	97	14.40	2.56	0.28	2.88	19.52	54	37
	1996	115	15.99	10.67	2.48	12.45	7.52	75	51
	1997	131	14.02	8.36	2.44	10.62	28.13	69	44
Sungnam (Dandae)	1994	106	11.15	4.12	1.20	5.47	37.18	62	33
	1995	70	10.89	1.21	0.05	1.25	7.61	46	29
	1996	98	14.48	5.52	0.89	6.14	12.64	61	42
	1997	118	16.15	8.41	2.72	11.22	2.31	73	44
Anyang (Hokae)	1994	118	13.63	8.24	1.93	9.82	6.20	69	46
	1995	77	12.67	3.26	0.14	3.01	2.22	53	40
	1996	98	11.96	4.40	0.99	5.41	9.38	60	36
	1997	119	14.79	8.30	1.57	9.37	0.05	66	46

1. AOT40 is an accumulative concentrations greater than 0.04ppm (ppm · hr).
2. SUM06 is an accumulative concentrations greater than 0.06ppm (ppm · hr).
3. W126 is an accumulative concentrations weighing  $w = 1/[1 + 4403 \cdot \exp(-0.126 \cdot O_3 \text{ conc.})]$
4. Missing is the percent of hourly missing data during June, July and August in each year.

낮았으며, 인천은 2.5 ppm · hr을 넘지 못했다(표 3, 4). 그런데 위의 3가지 지표는 모두 고농도의 누적치이므로 고농도가 주로 많은 여름철(6~8월) 결측율이 높다면 이들 지표는 실제보다 훨씬 낮게 나타난다. 서울은 도심, 강서, 강남이 최고 8~10%의 여름철(6~8월) 결측율을 보였지만 나머지 지역은 1~3%로 낮았다(표 3). 경기의 수원, 성남은 각각 최고 37%, 28%의 결측율을 보이므로(표 4) 만일 결측율이 낮았다면 이들 지역의 AOT40, SUM06, W126은 더 높아질 것이다. 예상과는 달리 인천의 결측율은 2~3%로 낮았고, 안양도 96년의 9%를 제외하고는 모두 0.2~3%여서 이들 지역의 오존 지표는 서울 및 다른 경기도 도시들에 비해 확실히 낮다는 것을 알 수 있었다.

일년 중 오존 농도의 분포를 퍼센타일로 환산하여 보면 서울은 최근 2년 동안에 99 퍼센타일이 도심을 제외하고는 모두 80 ppb에 도달하였으며, 인천을 제외한 경기도는 70 ppb를 넘는 곳이 많았다. 95 퍼센타일도 대부분 40 ppb를 넘어서고 있으므로 식

생에 만성적 피해를 줄만한 오존의 빈도가 전 지역에 걸쳐 최소한 5%(438시간)를 넘어서고 있으며, 특히 이들 중 대부분은 6~8월의 식물의 생장이 가장 왕성한 시기에 발생된다는 것을 감안한다면, 여름철 식물 생장기간 중 만성 피해가 염려되는 수준의 오존에 노출되는 기간은 약 20%에 달한다고 할 수 있다. 표 1~4까지의 40 ppb 또는 60 ppb 이상의 고농도 백분율과 연평균 오존 농도, AOT40, SUM06, W126 등 오존 지표들을 종합적으로 고려하여 서울 5개 권역과 경기 5개 도시의 식생에 위해한 오존 수준을 지역별로 비교해 보면, 서울의 동부 및 북동이 가장 높고, 의정부, 북서, 수원이 그 다음 수준이며, 남동, 안양, 성남, 도심이 그 다음의 낮은 수준이었으며, 인천이 가장 낮은 수준을 보였다.

그림 2는 90년부터 97년까지 서울의 10개 측정소와 경기도와 인천의 9개 측정소의 자료중 여름철 결측율이 30% 미만인 자료들의 각종 오존 지표의 평균으로 본 최근 8년간 우리나라 수도권의 오존 경향이다. 서울의 모든 지표들이 경기도에 비해 높

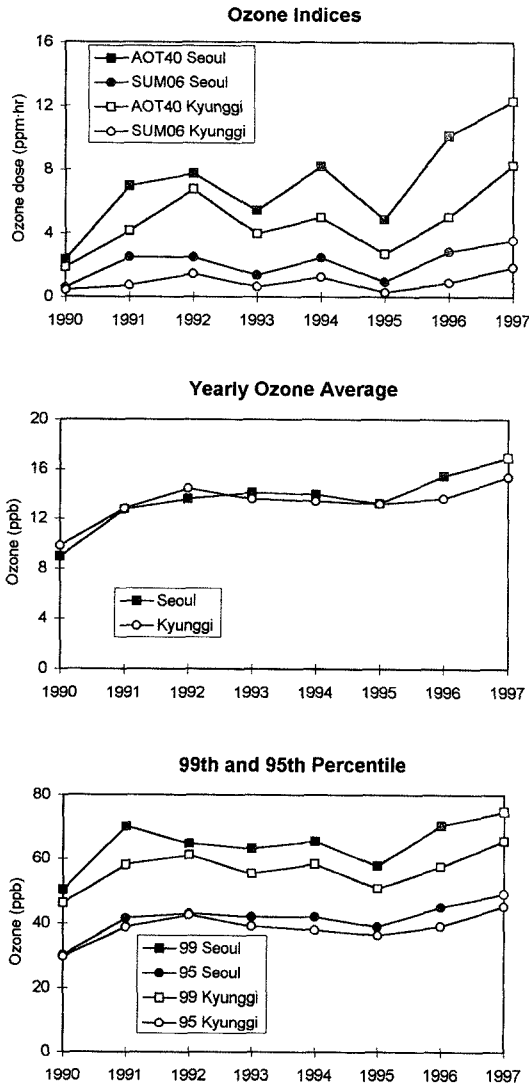


Fig. 2. Year trends of various ozone indices in Seoul and Kyunggi.

1. AOT40 is an accumulative concentrations greater than 0.04 ppm (ppm · hr).
2. SUM06 is an accumulative concentrations greater than 0.04 ppm (ppm · hr).

게 나타났다. 대부분의 지표들이 지난 8년간의 수도권의 오존 수준이 증가하였음을 나타내고 있었는데 특히 AOT40은 다른 지표들에 비해 연도별 변화가 심하게 나타났으며 최근 2년 사이에 급격한 증가를 보이고 있다. 반면, 연평균 농도는 서울과 경기 두

지역의 차이가 없었고, 91년부터 95년까지의 증감도 나타나지 않는 등 오존의 연간 변화를 보기 힘들었다. 식물 생장에 영향을 미칠 수 있는 한계농도인 40 ppb와 60 ppb는 각각 95와 99 퍼센타일 수준이므로 이들 퍼센타일 자료는 만성적 피해를 가늠할 수 있는 한계농도 수준을 파악하는데 사용될 수 있다. 비교적 연도별 증감이 뚜렷한 SUM06, AOT40 등 오존 지표와 99, 95 퍼센타일의 변화는 95년이 서울과 경기지방 모두에서 다른 해보다 더 낮은 수준을 보이고 있으며, 1995년 이후 급격한 증가가 거의 모든 지표에서 보이고 있다. 1993년과 1995년의 모든 지표들이 서울과 경기 모두에서 낮게 나타났는데, 이 두 해는 다른 해에 비하여 기온 30°C를 넘는 일수가 20회 이하로 낮았기 때문이다(김영성, 1997).

## 5. 고 찰

### 5.1 최근 오존 수준이 수도권 식생에 미치는 영향에 대한 예측

우리나라에서 관측된 오존 자료를 Hoggest 등 (1995)이 미국의 실험포장 자료를 토대로 정리한 작물의 수량 감소를 예측하기 위한 SUM06과 식생 피해와의 관계에 적용한다면, 생육기간 전반에 걸쳐 만성적인 오존의 독성으로 인해 10%의 수량 감소를 일으키는 23.4 ppm · hr에 비해 상당히 낮은 0.05 ~ 7.1 ppm · hr이므로 지난 8년간의 오존에 의한 만성적인 피해는 크지 않았으리라 추론된다. 하지만 우리나라 여름철 최고 오존 농도는 단기간의 고농도에 의한 가시피해를 일으키기에 충분하며, 실제 서울시내에서 오존 피해로 여겨지는 소나무 잎의 가시적 증상을 관찰한 바 있다(Laurence and Yun personal communication, 1996). 특히, 그림 2에서 나타나듯이 서울 및 경기 지역 모두에서 각종 오존 지표들이 해가 갈수록 증가하는 추세를 보이고 있다. 특히 서울의 강북과 북동의 SUM06은 6~7 ppm · hr로서 미국의 남 캘리포니아 Crestin의 80~90 ppm · hr에는 못 미치지만 5~12 ppm · hr인 다른 미국 지역의 수준과 같거나 더 악화되고 있으므로 만성적 피해가 발생할 우려가 높아지고 있는 상황이다. 오존에 대한 식물의 피해는 식물종 뿐만 아니라 동종의 품종에 따라 다르므로, 식생피해를 정확



히 알기 위해서는 오존 수준, 온도, 습도, 일사량 등 우리나라의 환경 조건에서 현재 재배되는 중요 작물이나 산림에 자생하는 식물에 오존 노출 실험이 수행되어야 한다. 또한 본 연구에서 제시하는 식생의 피해 수준은 오존 농도를 바탕으로 전반적이고 개략적인 예측이므로 오존에 민감한 식물의 피해는 알 수 없다.

오존 수준의 지역적인 차이를 살펴보면 아직은 서울이 경기 지역보다는 비교적 높게 나타나지만, 경기지역은 서울에 인접한 안양 및 성남보다는 수원 및 의정부의 수준이 더 높게 나타나고 있다. 그런데 식생에 영향을 주는 대기 중 오존은 2차 오염원으로써 전구체인 자동차 매연 등 오염원으로부터 수십 내지 100 km 이상 떨어진 곳에서 지역에 따라 더 높게 나타므로(USEPA, 1996), 식생보호를 위해서는 농촌 및 산림지역의 오존 모니터링이 반드시 필요하다. 한편 춘천지역의 AOT가 12~14 ppm·hr, SUM06이 2~3 ppm·hr 정도로 서울 및 경기도 도시들과 비슷하게 나타나고 있는데, 현재 구리시와 강원도 춘천 사이에 측정소가 없는 것을 감안한다면, 경기, 강원도의 대도시 근교 및 농촌지역의 오존 수준도 높으리라 예상되며, 이들 지역의 오존에 의한 작물생상의 피해도 다소나마 예상된다. 윤마영과 정용승(1995)에 따르면, 93~94년 충북 청원군의 오존 수준이 대도시에 육박한다고 보고하였다.

## 5.2 연평균 오존 농도와 다른 오존 지표들간의 비교

그림 2에서 여러 오존 지표들과 연평균 농도가 비슷한 경향을 보이고 있어 연평균만으로도 경향 분석이 충분하리라 생각할 수 있는데, 지역별로 살펴보면 서울 강북의 경우 연평균은 거의 19~21 ppb로 일정하였으나 AOT40, SUM06은 각각 12~21 ppm·hr, 2~7 ppm·hr로 현저하게 증가되며(표 3), 의정부에서도 연평균은 14~15 ppb로 일정하나 오존 지표들은 급격하게 변화하고 있으므로(표 4) 연평균만으로는 식생피해가 우려되는 고농도의 각 지역별 변화를 제대로 표현할 수 없다. 더군다나 청정지역인 제주 고산지역의 연평균 오존농도가 40 ppb인 반면, 서울, 부산 등 대도시는 15~20 ppb인데(서명석 등, 1995), 이는 일사량의 감소시 대도시의 대기 중에 높은 수준으로 존재하는 NO의 오존

분해 능력에 따른 급격한 오존 농도의 일변화에 따른 것으로, 결국 24시간 평균값의 지역별 비교는 식생보호에 아무런 의미가 없는 수치이다. 그런데 AOT40, SUM06과 같은 오존 지표들은 고농도만을 반영하므로 오존 최고점이 빈번히 발생하는 여름철 오존 변화 및 고농도의 위험성을 확실히 나타낼 수 있다. 이 지표들은 비록 우리나라 환경조건에서 개발되지는 않았지만 여러 종류의 식물반응 실험자료를 바탕으로한 생물 지표이기 때문에 현재 시행 중인 대기 환경기준을 보완하면서 오존에 의한 식생 피해에 관한 과학적인 논의들을 이끌어 갈 수 있는 환경정책의 참고자료로 이용될 수 있다.

표 3, 4에서 보듯이 W126과 AOT40은 거의 비슷하게 증감하는데 이는 두 지표의 속성상 오존 농도가 약 70 ppb될 때까지는 두 지표가 거의 비슷하다가 그 이상의 농도에서는 W126이 더 높아지기 때문인데, 시간당 70 ppb가 넘는 시간의 빈도는 최근 2~3년의 서울의 동부와 북동이 전체 시간 중 1~2%에 육박하였으나 나머지 지역은 0.5~1.0%이므로 W126과 AOT40은 거의 비슷하였다. 만일 미국과 같이 70 ppb를 넘는 경우가 전체의 3%를 넘는다면 이들 고농도에 의해 W126값이 AOT40보다 급격히 증가될 것이다. 오존 지표는 간단할 수록 실제 적용이 쉬운 장점이 있으나 식물체의 생육기간 전반에 걸친 복잡하고 장기적인 생리적, 생태적인 반응이 함께 고려될 수 없으므로, 제시된 오존 지표들은 시간별 빈도수 등 기존의 분석방법과 함께 상호보완적으로 분석되는 것이 바람직하다. 한편, 현재 시간당 100 ppb 이상을 제재하는 단기기준도 오존의 급성독성에 의한 식생의 피해를 줄이는데 대단히 중요하다. 우리나라의 연평균 농도가 미국에 비해 10 ppb 이상 낮게 나타나는 것은 일중 최저 오존 농도가 0~5 ppb까지 떨어지며, 연중 50% 이상의 기간의 오존 농도가 10 ppb 이하인 반면, 미국은 최저 오존 농도가 10~20 ppb 이상으로 비교적 높기 때문이다. 그런데 최근 오존 연평균이 급격히 증가한 서울 북동 지역의 패턴은 미국과 비슷한 양상을 보이고 있다(그림 1). 김영성(1999)의 보고에 따르면 이러한 기준선의 이상은 QC 단계에서 반드시 확인되어야 할 중요한 사항으로서 우리나라 연평균 오존 농도를 믿기 어렵게 하는 것이다.

시간별 오존 자료는 현재의 우리나라 오존 상황

을 파악해서 노출 실험시 오존 폭로의 시간과 수준을 결정하는데 기준이 되는 자료로 삼거나 장차 악화될 오존의 대기질 상황을 예측하는데 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 오존 자료와 기상 자료를 이용하여 TREGRO(Weinstein *et al.*, 1991)와 같은 식물 성장 Modeling을 이용하여 오존에 의한 식물의 성장 저해를 컴퓨터 시뮬레이션 함으로써 막대한 비용이 소요되는 실제 오존 노출에 의한 식물 피해 연구의 대체 수단으로 이용할 수 있다. 그런데 오존 지표는 고농도가 집중되는 6~8월의 시간당 오존 농도의 결측률이 높을 경우 정확도가 크게 떨어지므로 여름철 결측이 생기지 않도록 하는 것이 무엇보다 중요하다.

## 6. 결 론

대기 중의 오존에 의한 만성적 식물피해는 일제 가시적 피해 증상없이도 광합성을 저해하여 장기적으로는 수목이나 작물의 생장이 저해되는데, 이런 피해가 시작되는 오존의 한계 농도는 법적 기준치나 주의보 수준보다 훨씬 낮은 40~60 ppb 이상으로 보고되었다. 따라서 본 연구에서는 1990년부터 1997년의 서울 및 수도권을 각각 5권역 및 5개 도시의 시간당 오존농도를 사용하여 식생보호를 위한 지표들인 AOT40, SUM06, W126으로 지난 8년간 오존에 의한 만성적 피해를 예측하였다. 40 ppb가 넘는 농도는 일년의 8760시간 중 대략 5~15%을 차지하며, 주로 여름철에 발생하는데 이들 농도 변화가 제시된 식생보호를 위한 오존지표 수준을 결정하며 궁극적으로 오존에 의한 만성적 피해의 원인으로 작용하는데, 이들을 정리해 보면,

1. 지난 8년간 수도권의 SUM06은 0.05~7.1 ppm·hr으로써 만성적 독성으로 10%의 수량 감수가 초래되는 23.4 ppm·hr에 비해 낮은 수준이어서 그동안 오존으로 인한 식생의 생육감소는 크지 않았다. 그러나 최근 2~3년 동안 각종 오존 지표들이 지역에 따라서 급격하게 증가하고 있다.

2. 각종 오존 지표와 시간당 오존 농도의 평균, 퍼센타일 등의 각 측정소별 변이는 연도별 변이보다 더욱 심하게 나타났는데, 지역별로는 서울의 동부와 북동의 AOT40과 SUM06은 각각 17~24 ppm·hr과 6~7 ppm·hr로서 가장 높았는데 이는 남캘리포

니아를 제외한 다른 미국의 지역에 거의 육박한 수준이었다.

3. 2차 오염원인 오존은 풍속 및 지형의 영향에 따라 수십 내지 백킬로미터로 확산되므로 일부 농촌지역은 오히려 수도권보다 높은 오존 수준을 보일 것으로 예상되므로 이런 지역의 식생 피해는 본 연구에서 예측한 피해정도보다 더 클 것이다. 따라서 식생보호를 위해서는 오존 모니터링이 농촌 및 산간지역으로 시급히 확산되어야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 과학재단 1998년 후반기 박사후 연구 프로그램의 지원으로 수행하였습니다. 연구비 지원에 감사를 포함합니다.

## 참 고 문 헌

- 김영성(1997) 1990~1995 서울, 수도권 지역의 광화학 오염현상. 한국대기보전학회지, 13(1), 41-49.
- 김영성(1999) 오존 자동측정망 자료 중의 이상치 점검. 한국대기환경학회지, 15(2), 139-150.
- 서명석, 박경윤, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준(1995) 청정지역과 도시지역의 오존농도 특성 연구. 한국대기보전학회지, 11(3), 253-262.
- 윤마영, 정용승(1995) 충북 청원군에서 관측된 지표면 부근의 오존. 한국대기보전학회지, 11(1), 85-93.
- 정용승, 정재섭(1991) 서울 수도권 지역의 광화학 오존에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 7(3), 169-179.
- 허정숙, 김태오, 김동술(1999) 오존 대기 환경기준의 비교 연구. 한국대기환경학회지, 15(2), 159-173.
- Finnan, J.M., M.B. Jones, and J.I. Burke(1996) A time-concentration study on the effects of ozone on spring wheat (*Triticum aestivum* L.); 2. A comparison of indices, *Agri. Ecosyst. & Environ.*, 57, 169-177.
- Heath, R.L. and G.E. Taylor(1997) Physiological processes and plant responses to ozone exposure, in *Forest decline and ozone: A comparison of controlled chamber and field experiments*. Edited by R.L. Heath, Springer-Verlag, New York, 317-368.
- Hogsett, W.E., A. Herstrom, J.A. Launce, J.E. Weber, E.H. Lee, and D. Tingey(1995) An approach for characterizing tropospheric ozone risk to forests, *Proceeding of 4th U.S./Dutch International symposium:*

- Comparative Risk Analysis and Priority Setting for Air Pollution Issues, Pittsburgh, PA. Paper No. 119-145.
- Lee, E.H., D.T. Tingey, and W.E. Hogsett (1988) Evaluation of ozone exposure indices in exposure-response modeling, *Environ. Pollut.*, 53, 43-62.
- Lefohn, A.S. and V.C. Runeckles (1987) Establishing standards to protect vegetation-ozone exposure/dose considerations, *Atmos. Environ.*, 21, 561-568.
- Lefohn, A.S., J.A. Laurence, and R.J. Kohut (1988) A comparison of indices that describe the relationship between exposure to ozone and reduction in the yield of agricultural crop, *Atmos. Environ.*, 22, 1229-1240.
- Lefohn, A.S., D.S. Shadwick, M.C. Somerville, A.H. Chappelka, B.G. Lockaby, and R.S. Meldahl (1992) The characterization and comparison of ozone exposure indices used in assessing the response of loblolly pine to ozone, *Atmos. Environ.*, 26, 287-298.
- Legge, A.H., L. Grunhage, M. Nosal, H.J. Jager, and S.V. Krupa (1995) Ambient ozone and adverse crop response: An evaluation of North American and European data as they related to exposure indices and critical levels, *Angew. Bot.*, 69, 192-205.
- Musselman, R.C., P.M. McCool, and A.S. Lefohn (1994) Ozone descriptors for an air quality standard to protect Vegetation, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 44, 1383-1390.
- USEPA (1986) Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants. EPA-600/8-84/020cF. National Center for Environmental Assessment, Research Triangle Park, NC, USA.
- USEPA (1996) Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants. EPA-600/P-93/004 a,b,cF. National Center for Environmental Assessment, Research Triangle Park, NC, USA.
- Weinstein, D.A., R.M. Beloin, and R.D. Yanai (1991) Modeling changes in red spruce carbon balance and allocation in response to interacting ozone and nutrient stresses, *Tree Physiol.*, 9, 127-146.
- Yun, S.C. (1998) Studies of the pathological, ecophysiological, and biochemical responses of two aspen clones to chronic and dynamic ozone exposures. Cornell University. Ph. D. Dissertation. 137pp.