

식생보호를 위한 한계농도 누적 지표로 본 1998-2002년도의 우리나라 대기권 오존 오염

윤성철 · 김보선

선문대학교 응용생물학부 생물자원전공

(접수 2003년 12월 20일; 수락 2004년 2월 27일)

Tropospheric Ozone Pollutions in Korea during 1998-2002 Using Two Ozone Indices for Vegetation Protection

Sung-Chul Yun and Bo-Sun Kim

Department of Applied Biological Sciences, Sun Moon University, Asan, Korea 336-708

(Received December 20, 2003; Accepted February 27, 2004)

ABSTRACT

Tropospheric ozone data in Korea for 1998-2002 were analyzed to assess the impact on vegetation. SUM06(sum of hourly concentrations at or above 0.06 ppm) and AOT40(accumulated exposure over a threshold of 40 ppb), widely used as ozone indices in the U.S. and Europe, were calculated based on hourly ozone concentration in 612 areas during 1998-2002 in Korea. SUM06 of the highest 30 areas were 5-12 ppm/hr which were almost the same levels of the U.S. average, and a crop loss of 5% would be expected. Ozone pollution in Seoul during 1998-2002 had decreased compared to that for 1990-97 except in the Northern area; however, ozone pollution in Kyunggi during 1998-2002 had been increased twice compare to the previous 5 years. Korea was divided into four regions: Seoul Metropolitan area, Jungbu, Honam, and Youngnam. Ozone pollution in the Seoul Metropolitan area was much higher during 1998-2000 than the other areas, but ozone pollution during 2001-2002 was almost the same in all four regions. Chunnam-Kwangyang and Kyungbuk-Gumi, famous industrial complexes in southern Korea, were significant ozone pollution areas. However, other industrial complexes, such as Incheon, Ulsan, and Kyunggi-Sihwa, were not polluted compared to their neighbors. Comparing all ozone indices, SUM06(yr), SUM06(3mon), AOT40(yr), AOT40(3mon), number of hours exceeding 100 ppb, 95 percentile, 99 percentile, and maximum concentration, it was determined reasonable to use SUM06(3mon), AOT40(3mon) and number of hours exceeding 100 ppb for evaluation of the chronic impact of ozone on vegetation.

Key words : ozone, vegetation, SUM06, AOT40

I. 서 론

식물은 대기오염 중 오존에 의한 피해가 가장 심한 것으로 알려져 있다(USEPA, 1996). 기공을 통해 이산화탄소와 함께 들어온 고농도 오존은 강력한 산화력을 가진 superoxide(O₂)나 과산화수소로 전환, 엽육세

포를 산화시키고 잎에 전형적인 오존 증상과 조기낙엽 등 급성적 독성 피해를 입힌다(Yun and Laurence, 1999b). 또한 비교적 낮은 농도에 오랜 기간 노출된 식물체는 광합성 저해와 이에 따른 생육, 수확량 감소 등 만성적 피해를 입는다(Yun and Laurence, 1999a). 이러한 피해는 전형적인 오존 증상 없이도 탄소 동화

물질 감소로 인한 동화산물의 저장 기관으로의 전류의 저해로 나타나며, 피해가 수년~수십년 누적되는 수목에서는 삼림 쇠퇴로 발전한다(Heath and Taylor, 1997).

식물체에 노출되는 오존량에 따른 식물 피해반응의 관계(dose-response relationship)를 제대로 구축하면, 오존 측정만으로도 식생 피해 추정이 가능하다. 미국 및 유럽에서는 명확한 오존 피해 추정을 위한 오존 노출 지표를 선별하고자 필드에서 수행된 오존 노출 결과를 바탕으로 지표를 선별, 비교, 평가하였다(Lee *et al.*, 1998; Finnan *et al.*, 1996, Lefohn *et al.*, 1992). 오존 노출량은 농도에 노출된 시간을 곱한 오존량(ppm·hr)으로 표현되나, 가중치를 두기 위한 주된 고려사항은 어느 농도 이상에서 피해가 시작되느냐(threshold)와 고농도에 가중치를 줄 것인가이다. 미국에서는 60ppb 이상의 노출량(SUM06)의 합으로, 유럽에서는 40ppb 이상의 노출량(AOT40)의 합으로 식생보호를 위한 오존 농도의 이차 기준치(secondary ozone standard)가 결정되었는데, 법적 효력은 없으나 식생보호를 위한 오존 오염 지표로 활용되고 있다(Legge *et al.*, 1995). 미국에서 오존에 의한 농작물 피해를 SUM06로 정리하면, 23.4 ppm·hr에서 10%의 작물수량 감소가 추정된다(Hogett *et al.*, 1995).

식생 피해 정도는 오존에 대한 식물체의 민감한 반응 정도(저항성, 감수성), 생육 시기, 그리고 식물체 탄소동화량 축적 수준 등 식물체 내부 조건 뿐만 아니라 생육 온도, 습도, 광 등 환경 요인들이 복합적으로 작용하여 발생하므로 정확한 피해를 추정하려면 관심지역에서 노출 실험이 필수적이다. 따라서, 식생보호 지표로 오존 피해를 추정하는 연구의 궁극적인 목적은 정확한 피해 추정보다는 식생보호 차원에서 오존 오염 수준을 평가함으로써 대기질 개선을 통한 삶의 질 향상을 이루고자하는데 있다. 즉, 오존 오염의 판단을 인체에 영향을 주는 시간당 100ppb, 3시간 연속 평균 80ppb 이상 고농도(Heo and Kim, 2002) 기준들보다도 훨씬 낮은 식생 피해가 우려되는 40~60ppb 수준으로 관심을 확대시키고자 한다. 또한 이를 바탕으로 오픈탑 챔버를 사용한 직접적 오존 연구, 전국을 그물로 엮는 오존 측정망 구축 등 막대한 예산이 소요되는 국책사업의 필요성을 부각하고자 한다.

본 연구는 1998년부터 2002년까지의 우리나라 전역의 시간당 오존 데이터를 식생보호를 위한 오존 지표

로 환산하여 분석함으로써, 각 오존 지표의 년도별, 지역별 추이와 오존 오염 여부를 알아보고자 한다. 최근 5년간 전국의 오존 자료를 수도권 등 몇 개 권역으로 묶어 수도권을 지방 권역과 비교하고, 1990-97년의 수도권 오존 발표(윤성철 등, 1999)와 비교하고자 한다. 또한 법적 기준치, 퍼센타일, 연중 최고농도 등 기존의 지표들과 제시된 식생보호 지표들을 상호 비교하여 오존 오염을 식생보호까지 염두한 지표로써 우리나라 대기권의 오존 오염을 포괄적인 시각에서 평가하고자 연구를 수행하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구에 사용된 시간당 오존 농도는 대기오염 자동측정망에서 측정된 1998년부터 2002년까지 우리나라 전역의 자료였다. Table 1은 해당 연도별 16개 시, 도에서 측정된 관측 지점 수와 이들 중 여름철 3개월(6, 7, 8월)간의 자료가 충실하여 오존지표로 전환, 분석이 가능한 지점이다. 대상 지점은 128~154 지점으로 해마다 달랐으며, 이들 중 113~128 곳이 선별되어, 5년간 총 722 곳의 측정 지점 중 612개 지점의 자료가 분석에 사용되었다.

이들 612 지점 각각에 대해 1년 8,760시간의 오존 농도를 각 지표로 환산하였다. 식생보호를 위한 오존 지표로는 1) 한계농도 60ppb 이상의 오존 농도의 합(SUM06), 2) 한계농도 40ppb 이상의 오존 농도의 합(AOT40)을 사용하였는데, 이들은 각각 미국과 유럽에서 법적 기준치는 아니지만, 식생의 피해에 대한 과학적 논의가 활발한 오존 노출량으로 사용되는 지표들이다(Legge *et al.*, 1995; Musselman *et al.*, 1994; Lee *et al.*, 1988; Lefohn *et al.*, 1988). 이들 두 지표는 1년 전체(총 8760시간; SUM06(yr), AOT40(yr))와 여름철인 6, 7, 8월(총 2208시간; SUM06(3mon), AOT40(3mon)) 두 기간으로 각각 환산하여 총 4가지 지표를 본 연구에 사용하였다. 그런데, 이들만으로는 식생에 영향을 주는 대기 중의 오존 오염 특성을 충분히 나타낼 수 없으므로 통상적으로 사용되는 오존 지표들 중에서 1년 중 시간당 100ppb가 넘는 총 시간 수(# of 100ppb), 연간 95 및 99 퍼센타일, 연간 최고 농도(max) 등이 포함되었다. 분석에 사용된 모든 지표들을 감안할 때, 식생에 위협을 줄 수 있는 오존 농도의 수준은 연간 8,760 시간당

오존 농도 중 최소 40ppb 이상의 농도인데, 대부분의 지점에서 40ppb는 1년간 시간당 농도 중 상위 10% 이내였다.

광화학 반응인 오존은 국지적(local)이 아닌 지역적(regional)인 범위까지 오염이 확대되므로, 행정구역상의 16개 시, 도별 단위보다 광범위하게 구획하는 것이 합리적이다. 따라서, 본 연구에서는 우리나라 전역의 오존 자료를 1) 서울을 중심으로 한 수도권, 2) 강원과 충청을 포함한 중부권, 3) 호남과 제주를 포함한 호남권, 4) 경남, 북과 울산, 부산 등이 포함된 영남권 등 4개 권역으로 크게 나누어 권역들간의 오존 오염 상황, 연도별 추이 등을 비교하였다. 특히, 인구 집중이 높아 대기 오염에 대한 우려가 심각한 수도권에는 서울, 경기, 인천 뿐만 아니라 충남 서산과 강원 원주를 포함하였다. 이들 두 곳은 각각 충남과 강원과 다른 지점보다 농도가 대단히 높았는데, 비록 행정구역상 수도권은 아니지만 경기도 외곽 지점과 인접해 있으므로 오염 물질 전구체들이 광범위하게 영향을 주

었다고 여겨졌기 때문이다. 최근 정부에서 고려 중인 수도권 대기오염에 관한 법률에도 포승공단을 포함한 충남 일부 지점이 수도권으로 편입될 것으로 보인다.

III. 결 과

3.1. 16개 행정 시, 도를 중심으로 한 전국의 오존

여름철 오존 측정이 충실히 수행되어 지표로 전환, 분석된 지점은 5년간 총 612 지점이었으며, 이는 전체 722개 측정 대상 중 약 85% 이다(Table 1). 고농도가 빈번한 여름철 측정이 충실할 수 있도록 겨울철에 철저한 개보수가 필요하다. 특히 여름철 측정이 부실해 전체 대상 중 60-70%만 지표로 전환된 영, 호남 지방 측정지점들의 집중적인 관리가 요구된다. 특히, 전국 16개 시, 도별 측정망 분포와 2000년 인구 센서스를 바탕으로 한 시도별 인구 분포가 대단히 유사하게 나타났는데(Table 1), 이는 현재 전국 오존 측정망 분포가 인구밀도를 중심으로 공단지점이 강화된

Table 1. Ozone monitoring and analyzing sites for calculating the indices during 1998-2002.

Province	1998	1999	2000	2001	2002	total	% of site ²	% of population ³
Seoul	27/27 ¹	29/31	26/29	24/27	26/26	132/140	18.28	21.43
Pusan	9/9	8/11	9/11	9/9	9/9	44/49	6.09	7.95
Daegu	4/5	5/8	6/7	5/6	5/7	25/33	3.46	5.38
Incheon	8/8	10/10	10/10	8/10	10/10	46/48	6.37	5.36
Kwangju	3/4	3/6	5/6	3/4	4/4	18/24	2.49	2.94
Daejeon	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	15/15	2.08	2.97
Ulsan	5/7	2/10	9/11	10/12	7/10	33/50	4.57	2.20
Kyunggi	18/24	23/27	24/31	26/29	26/29	117/140	16.20	19.44
Kangwon	4/4	4/4	3/4	2/3	4/4	17/19	2.35	3.23
Chungbuk	3/4	3/4	1/4	3/4	3/4	13/20	1.80	3.18
Chungnam	2/3	2/4	3/4	3/3	3/3	13/17	1.80	4.00
Chonbuk	6/6	6/6	6/7	5/6	4/6	27/31	3.74	4.10
Chonnam	6/7	7/8	7/8	6/8	4/8	30/39	4.16	4.34
Kyungbuk	9/9	9/10	8/9	9/9	9/10	44/47	6.09	5.91
Kyungnam	6/8	7/10	7/10	7/8	8/8	35/44	4.85	6.46
Jeju	0/0	0/2	1/2	1/1	1/1	3/6	0.42	1.11
Total	113/128	121/154	128/156	124/142	126/142	612/722		

1. The numbers are analyzing sites/monitored sites in each province and year.
2. The percent of monitored site in each province among the total 612 monitored sites for five years.
3. The percent of population in each province based on the sensus in 2000.

분포라 할 수 있다.

5년간 평균 오존 지표들을 시, 도별로 나누어 분석한 결과(Table 2), 서울보다 경기도의 오존 지표가 더 높게 나타났다. 일반적으로 오존 오염 지표로 사용하는 법적 기준치인 100ppb를 넘는 연간 시간 수로 봤을 때, 경기, 서울, 전남, 충남의 5년간 평균이 각각 연간 10.9, 9.3, 7.1, 6.5 시간 순으로 심각하였는데 전남의 경우 여수, 광양을 중심으로 한 공단지점들의 여름철 오존 농도가 높았고, 충남은 서산의 오존 농도가 높았기 때문이다.

반면 인천, 광주, 울산, 충북을 제외한 11개 시도의 AOT40(yr)은 서울보다 높았고, SUM06(yr)는 대전, 경기, 충남, 경북이 서울보다 높게 나타났다. 99퍼센타일은 경남, 경기, 충남, 대전이 각각 70.65, 70.47, 69.96, 69.51ppb로 서울의 67.86ppb보다 높았고, 99 퍼센타일은 충남, 경남, 대전 등이 높았는데 이들 99 퍼센타일과 95 퍼센타일의 시도별 양상은 SUM06(yr)와 AOT40(yr)와 비슷한 경향을 보였다. 서울의 1년간 오존 양상은 다른 지방 시도에 비해 저농도의 빈도가 많다가 여름철에는 높은 오존 농도의 분

포를 보였는데, 이는 타 시, 도와는 다른 것이다. 즉, 연중 최고치 농도나 1년 8,760 시간 중 시간당 100ppb가 넘는 시간은 경기 및 서울에서 더 많으나, 중간 농도인 40-60ppb 빈도는 서울보다 지방이 더 높거나 대등하게 분포하였다.

3.2. 수도권을 포함한 4가지 권역별로 본 1998-2002년 동안의 오존 지표의 추세

행정구역상의 시, 도 구분없이 전국을 4개의 권역, 즉 수도권, 중부권, 호남권, 영남권으로 묶어 이들 권역별로 5년간 추이를 분석하였다. 각종 오존 지표의 권역별 연간 추이를 Figure로 나타내었다(Fig. 1, 2). 오존 지표는 1998년부터 2001년까지 4년간 완만하게 전국 모든 권역에서 상승하였다. 특히, 1998년부터 2000년까지는 수도권의 오존 식생 지표 (AOT40(3mon), SUM06(3mon)) 및 법적 기준치인 100ppb를 넘는 시간 수, 최고 농도 등이 지방보다 월등히 높았으나, 최근 2년(2001-02년)동안 이들 지표는 수도권과 지방의 격차가 많이 줄었다.

1년간의 AOT40(yr)의 경우 연도별 변이가 뚜렷하여

Table 2. The ozone indices for vegetation protection and statistical indices during 1998-2002 (Five year average)

Province	SUM06 (yr) ¹	AOT40 (yr) ²	SUM06 (3mon) ³	AOT40 (3mon) ⁴	# of 100ppb ⁵	95 percentile	99 percentile	maximum conc. ⁶	% of missing ⁷	% of mis3 ⁸
Seoul	2.314	9.432	1.549	5.145	9.33	45.59	67.86	124.0	9.30	2.57
Pusan	1.828	12.456	0.777	3.760	3.68	50.00	66.56	109.0	7.59	2.53
Daegu	2.000	9.901	0.934	4.164	3.44	47.96	65.58	104.7	2.83	9.84
Incheon	1.741	8.718	0.992	4.144	4.87	45.33	63.27	114.7	9.10	1.97
Kwangju	0.796	7.460	0.384	2.674	0.33	45.83	60.04	89.8	8.54	1.49
Daejeon	2.503	13.971	1.113	5.084	2.47	52.67	69.51	102.8	6.61	0.90
Ulsan	1.278	7.020	0.527	2.225	2.48	43.72	60.19	105.6	15.12	5.40
Kyunggi	2.765	11.500	1.847	6.127	10.86	48.81	70.47	127.6	10.19	4.80
Kangwon	2.190	11.591	1.217	4.957	5.18	50.35	66.78	103.9	7.05	1.17
Chungbuk	2.230	13.226	0.899	4.350	2.31	51.46	67.22	98.7	7.11	2.09
Chungnam	2.680	16.680	1.389	6.488	6.46	54.69	69.96	116.9	8.59	2.13
Chonbuk	1.135	9.805	0.516	3.327	0.37	48.41	62.05	89.0	9.47	3.54
Chonnam	2.296	14.056	1.109	4.707	7.10	51.67	66.99	124.6	8.85	3.40
Kyungbuk	3.087	13.902	1.109	4.597	4.34	51.14	67.25	102.2	6.36	1.86
Kyungnam	2.758	15.755	1.486	5.927	2.69	53.23	70.65	107.1	9.19	5.21
Jeju	0.563	11.155	0.167	2.477	0.67	49.67	60.00	86.7	9.68	0.54

1. SUM06(yr) is an accumulative concentrations grater than 0.06 ppm (ppm-hr) for one year (8,760-hr conc.)
 2. AOT40(yr) is an accumulative concentrations grater than 0.04 ppm (ppm-hr) for one year (8,760-hr conc.)
 3. SUM06(3mon) is an accumulative concentrations grater than 0.06 ppm (ppm-hr) for June, July and August (2,208-hr conc.)
 4. AOT40(3mon) is an accumulative concentrations grater than 0.04 ppm (ppm-hr) for June, July and August (2,208-hr conc.)
 5. # of 100ppb is the number of hour concentration exceeding 100ppb for one year.
 6. Percent of missing is the percent of hourly missing data for one year.
 7. % of mis3 is the percent of hourly missing data during June, July and August in each year.

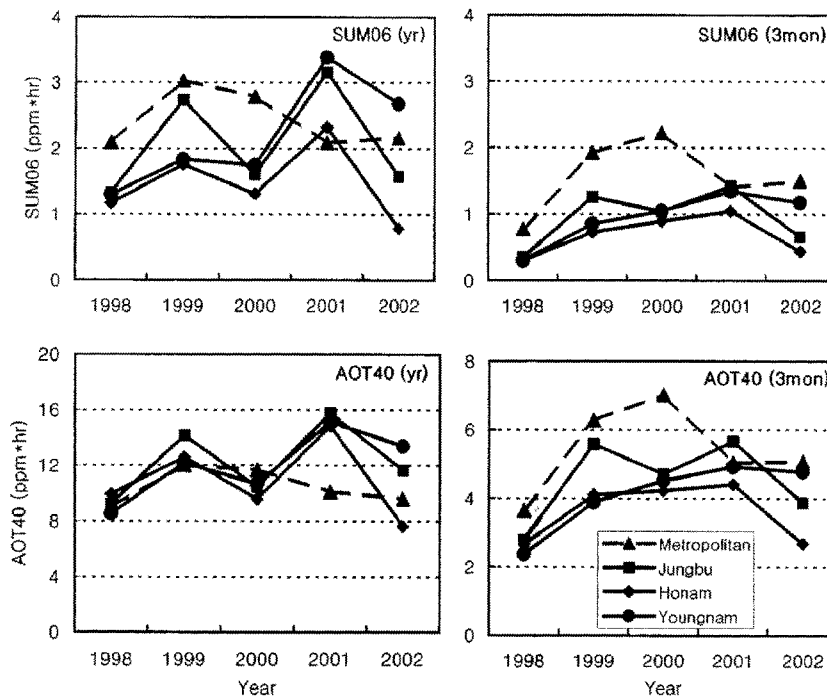
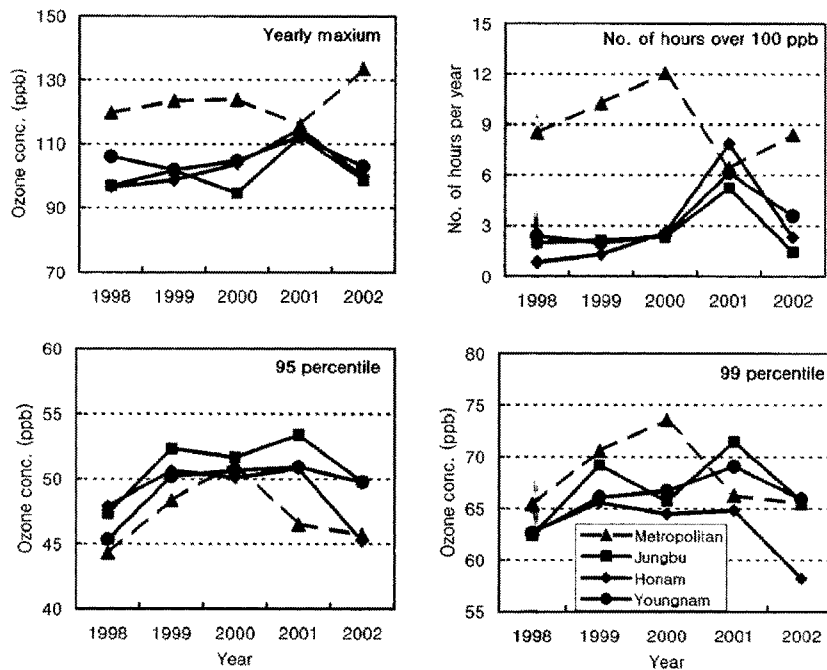


Fig. 1. Yearly trends of the indices for vegetation protection during 1998-2002. SUM06 (yr) and SUM06 (3mon) are accumulative concentrations greater than 0.06 ppm for one year and for June, July, August, respectively. AOT40 (yr) and AOT40 (3mon) are accumulative concentrations greater than 0.06 ppm for one year and for June, July, August, respectively. Metropolitan area is included Seoul, Kyunggi, Incheon, Seosan of Chungnam and Wonju of Kangwon.



2. Yearly trends of maximum, no of hours exceeding 100ppb, 95 and 99 percentile of hourly concentration of ozone for years. Metropolitan area is included Seoul, Kyunggi, Incheon, Seosan of Chungnam and Wonju of Kangwon.

2000년에는 4개 권역 모두 낮았고 2001년은 수도권을 제외한 3개 권역이 높게 나타났다. 여름철의 오존 데이터만으로 작성된 AOT40(3mon)과 SUM06(3mon)는 1998년부터 2000년까지는 수도권에 비해 월등하게 높았으나 2001~02년에는 다른 권역과 거의 비슷하였다(Fig. 1)

생육이 활발하여 심각한 식생 피해가 우려되는 여름철 지표를 중심으로 살펴보면 2000년 여름의 수도권의 식생 피해가 가장 심할 것으로 추정되며, 그 다음으로는 1999년 여름의 수도권 식생 피해가 높았으리라 추정된다. 법적 기준치인 시간당 100ppb를 넘는 횟수나 각 측정지의 연중 최고치들의 평균에서는 수도권에 다른 권역에 비해 2001년을 제외한 4년 동안 월등하게 높게 나타났으며, 95 퍼센타일과 99 퍼센타일에서는 연도별 추세나 권역별 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다(Fig. 2) 수도권을 제외한 지방은 1998년부터 2000년까지는 수도권보다 고농도가 많지 않았으나 2001년에는 모든 지표에서 수도권 수준에 거의 육박하여 전국적으로 고른 오존 피해가 추정된다.

Figure 3은 5년간 총 612개 측정 지점 데이터를 여름철 SUM06(3mon) 및 시간당 법적 기준치 초과 시간(# of 100ppb)의 두 가지 지표로 상위 10%인 60개 지점의 연도별, 권역별 분포를 나타낸 것이다. 연도별로는 2000년과 1999년이 SUM06(3mon), 시간당 법적 기준치 초과 시간 등 두 지표가 다른해에 비해 높아 5년 중 오염이 가장 심각했으며, 권역별로는 수도

권이 80%이상을 차지하였고 영남은 약 10~15%였다.

3.3. 지표별 수도권 상위 10개 지점 및 지방 상위 5개 지점

5년간 전국 총 612개 측정 지점을 수도권 312 지점과 비수도권(지방권)의 300 지점으로 나누어 각 지표별로 수도권에서 상위 10개 지점 및 비수도권의 상위 5의 측정장소 및 연도를 나타내었다(Table 3). 서울의 방학동, 경기의 성남, 수원, 구리, 의정부 등이 높았고, 수도권으로 편입시켰던 강원 원주와 충남 서산이 SUM06(3mon)와 # of 100ppb에서 각각 4위와 10위를 차지해 경기도를 약간 벗어난 외곽의 지점의 심각성을 알 수 있다. 지방의 경우는 전남 광양과 경북 구미공단의 오존 오염이 심각하였다.

본 논문에서는 자료를 제시하지 않았지만, 인천 및 인근 시화 공단이나 울산 공단 주변의 오존 오염은 심각하지 않아 공단 주변이라고 반드시 오존이 높다고 볼 수 없었다. 특히, 수도권 고농도 10개 지역은 서울보다는 경기도에서 더 많았는데, 특히 의정부, 구리, 성남의 지표가 대단히 높게 나타났다. 이는 서울 시내에서도 오존 오염이 심각한 동부 및 북부의 오존 오염이 확대된다고 볼 수 있다. 특히 원주의 농도가 높았던 반면, 인천의 농도는 그리 높지 않은 것으로 보아 수도권에서 발생한 오존 전구체들이 서울의 동부 및 경기 동부 및 강원도 서부 일부까지 이동하여 오존 오염을 증가시키는 것으로 여겨진다.

3.4. 제시된 각종 오존 지표들간의 상관관계

Table 4는 본 연구에서 사용된 오존 농도 자료를 바탕으로 계산된 각종 오존 지표들간의 상관관계를 5년간 612개 데이터로 구한 상관관계수이다. 이들 값은 각 지점 고유의 오존 분포 특징을 바탕으로 각 지표의 특징을 반영한 것으로써, 각 지표들의 상호 연관성을 알아보기 위해 분석을 수행하였다. SUM06(yr)와 AOT40(yr)의 상관관계수는 0.854, SUM06(3mon)와 AOT40(3mon)의 상관관계수는 0.949, SUM06(yr)과 SUM(3mon)은 0.758, AOT40(yr)과 AOT40(3mon)은 0.748로 각각 나타나 같은 기간의 두 지표간 상관관계가 다른 기간의 같은 지표사이의 상관관계보다 더 높았다. 법적 기준치인 100ppb를 넘는 연간 시간 수는 일반적으로 사용되는 지표이나 식생보호 지표인 SUM06와 AOT40들과는 0.487~0.782로 상관관계가

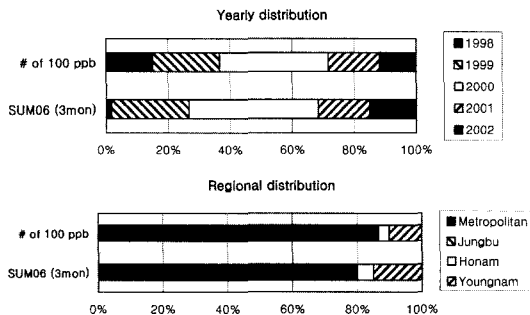


Fig. 3. The relative distributions of the two indices based on the year (1998-2002) and the regions. Each index of the top 60 sites was selected among 612 sites based on either year or region.

1. # of 100ppb is the number of hour concentration exceeding 100ppb for one year.
2. SUM06 (3mon) is an accumulative concentrations grater than 0.06 ppm (ppm-hr) for June, July and August (2,208-hr conc.)

Table 3. The highest ozone indices among 312 metropolitan sites and 300 other sites during 1998-2002

Area	Rank	SUM06(3mon) ³					AOT40(3mon) ⁴					# of hours exceeding 100ppb ⁵					
		Province	Location	Year	ppm-hr	Province	Location	Year	ppm-hr	Province	Location	Year	ppm-hr	Province	Location	Year	# of 100ppb
Metropolitan ¹	1	Kyunggi	Sungnam-Danda	1999	6.622	Kyunggi	Sungnam-danda	1999	15.270	Kyunggi	Sungnam-Danda	1999	15.270	Kyunggi	Sungnam-Danda	1999	58.0
	2	Seoul	Banghak	1999	5.500	Seoul	Banghak	1999	13.704	Seoul	Banghak	1998	13.704	Seoul	Banghak	1998	55.0
	3	Kyunggi	Guri-Sutak	1999	4.872	Kangwon	Wonju-Hanksung	2000	4.872	Seoul	Sungsoo	1998	13.092	Seoul	Sungsoo	1998	49.0
	4	Kangwon	Wonju-Hanksung	2000	4.832	Kyunggi	Guri-Sutak	1999	12.454	Seoul	Banghak	1999	12.454	Seoul	Banghak	1999	43.0
	5	Seoul	Banghak	2000	4.702	Seoul	Banghak	2000	12.131	Kyunggi	Guri-Sutak	1999	12.131	Kyunggi	Guri-Sutak	1999	43.0
	6	Kyunggi	Suwon-Wooman	1999	4.446	Kyunggi	Suwon-Wooman	1999	11.608	Kyunggi	Suwon-Wooman	2000	11.608	Kyunggi	Suwon-Wooman	2000	39.0
	7	Kyunggi	Kwangmyung-3	2001	4.062	Incheon	Songhae	2001	11.185	Kyunggi	Uijuongbu	2001	11.185	Kyunggi	Uijuongbu	2001	34.0
	8	Seoul	Chonho	2000	4.040	Kyunggi	Kwangmyung-Chulsan	2000	11.150	Kyunggi	Kwachen	2000	11.150	Kyunggi	Kwachen	2000	34.0
	9	Kyunggi	Anyang-Burim	1999	3.999	Kyunggi	Ansan-Bonoo	2000	11.019	Kyunggi	Uijuongbu	2000	11.019	Kyunggi	Uijuongbu	2000	32.0
	10	Kyunggi	Uijuongbu	2001	3.951	Kyunggi	Uijuongbu	2001	10.551	Chungnam	Seosan-Dongmun	1998	10.551	Chungnam	Seosan-Dongmun	1998	32.0
			Average of 312 sites	1.587		Average of 312 sites		5.463		Average of 312 sites		5.463		Average of 312 sites		9.2	
Others ²	1	Chonnam	Kwangyang Jungdong	2001	4.686	Kyungnam	Jinhae-Kyungghwa	2000	16.119	Chonnam	Kwangyang Jungdong	2001	16.119	Chonnam	Kwangyang Jungdong	2001	48.0
	2	Kyungnam	Jinhae-Kyungghwa	2000	4.188	Chonnam	Kwangyang-Jungdong	2001	14.736	Kyungbuk	Gumi-Hyunggok	2001	14.736	Kyungbuk	Gumi-Hyunggok	2001	31.0
	3	Kyungbuk	Gumi-Hyunggok	2001	4.001	Chonbuk	Iksan-Nanjung	2000	12.192	Ulsan	Gaewoon	2002	12.192	Ulsan	Gaewoon	2002	31.0
	4	Kyungbuk	Gumi-Hyunggok	2002	3.763	Kyungnam	Jinhae-Kyungghwa	2001	11.526	Kyungbuk	Pohang-Jukdo	2000	11.526	Kyungbuk	Pohang-Jukdo	2000	25.0
	5	Ulsan	Gaewoon	2002	3.760	Kyungbuk	Gumi-Hyunggok	2002	11.423	Kyungbuk	Gumi-Wonpyung	2002	11.423	Kyungbuk	Gumi-Wonpyung	2002	23.0
			Average of 300 sites	0.895		Average of 300 sites		4.077		Average of 300 sites		4.077		Average of 300 sites		3.2	

1. Metropolitan area is included Seoul, Kyunggi, Incheon, Seosan of Chungnam and Wonju of Kangwon. It has 312 sites for five years.

2. Others area are all sites except Metropolitan area. It has 300 sites for five years.

3. SUM06 (3mon) is an accumulative concentrations greater than 0.06 ppm (ppm-hr) for June, July and August (2,208-hr conc.)

4. AOT40 (3mon) is an accumulative concentrations greater than 0.04 ppm (ppm-hr) for June, July and August (2,208-hr conc.)

5. # of 100ppb is the number of hour concentration exceeding 100ppb for one year.

Table 4. Correlation coefficients of the two ozone indices for vegetation protection and other indices during 1998-2002.

	SUM06(yr) ¹	AOT40(yr) ²	SUM06 (3mon) ³	AOT40 (3mon) ⁴	# of 100ppb ⁵	95 percentile	99 percentile	maximum conc. ⁶
SUM06 (yr) ¹	1.0000	0.8535	0.7579	0.7689	0.6638	0.7191	0.8101	0.4947
AOT40 (yr) ²	-	1.0000	0.6446	0.7483	0.4874	0.9202	0.8295	0.3430
SUM06 (3mon) ³	-	-	1.0000	0.9490	0.7823	0.6296	0.8351	0.6449
AOT40 (3mon) ⁴	-	-	-	1.0000	0.6688	0.7392	0.8682	0.5575
# of 100ppb ⁵	-	-	-	-	1.0000	0.4354	0.6823	0.7357
95 percentile	-	-	-	-	-	1.0000	0.8579	0.2931
99 percentile	-	-	-	-	-	-	1.0000	0.5558
maximum conc. ⁶	-	-	-	-	-	-	-	1.0000

1. SUM06(yr) is an accumulative concentrations grater than 0.06 ppm (ppm-hr) for one year (8,760-hr conc.).
2. AOT40(yr) is an accumulative concentrations grater than 0.04 ppm (ppm-hr) for one year (8,760-hr conc.).
3. SUM06(3mon) is an accumulative concentrations grater than 0.06 ppm (ppm-hr) for June, July and August (2,208-hr conc.).
4. AOT40(3mon) is an accumulative concentrations grater than 0.04 ppm (ppm-hr) for June, July and August (2,208-hr conc.).
5. # of 100ppb is the number of hour concentration exceeding 100ppb for one year.

높지 않았다. 반면 99 퍼센타일과 식생 피해 오존 지표들과의 상관계수는 0.810~0.868로 대단히 높았다.

이를 정리하면, 기존의 오존 지표들과 법적 기준치인 100ppb를 넘는 연간 시간 수가 상호 보완적으로 오존 노출의 피해 추정에 사용되는 것이 적절하리라 여겨지며, 여름철 3개월간의 오존 지표와 1년간의 오존 지표는 상당한 차이를 보이므로 가급적 식물의 오존 피해를 직접적으로 표현할 수 있는 3개월간의 데이터로 작성된 오존 지표를 사용하는 것이 바람직하다. 99퍼센타일은 데이터마다 다르지만 60~70ppb 가량이므로 결과적으로 SUM06(3mon)와 대단히 비슷하였다.

자료를 제시하지 않았지만, 연도별로 각 지표들의 상관계수는 SUM06와 AOT40 두 오존 지표간의 차이보다는 같은 지표의 3개월과 1년 단위의 연도별 변이가 더 컸으며, 99퍼센타일과 다른 오존 지표들 간에 높은 상관관계는 꾸준하였다. 결국 여름철과 겨울철의 오존 패턴은 연도별로 뚜렷이 다르나, 지표들 간의 차이는 없었다.

IV. 고 찰

4.1. 1990-97년과 최근 5년의 오존 지표로 본 수도권 오존 비교

99년 보고(윤성철 등, 1999)에서 1990-97년 서울의 SUM06(yr)는 구의와 쌍문동에서 6.3~7.1 ppm-hr가 최고였는데, 본 연구에서는 1998-2002년 서울 방학동에서 6.7~9.0 ppm-hr였고, 경기의 수원, 군포, 성남

에서는 1999년에 7.5~7.8 ppm-hr이었다. 참고로, 전남 광양은 11.5 ppm-hr로 최고였다. AOT40(yr)는 96-97년의 구의와 쌍문동에서 19~24 ppm-hr였는데, 98-2000년 방학동은 23~28 ppm-hr까지 올라갔다. 또한, 경기도 수원 및 의정부에서 각각 23과 24 ppm-hr, 그리고 충남 서산에서는 1999년에 25 ppm-hr, 1998에는 무려 34 ppm-hr까지 올라갔으며, 전남 광양은 48 ppm-hr이었다.

97년 이전까지 인천을 포함한 경기도 지역은 SUM06(yr) 최고가 1994년 수원 권선의 3.4 ppm-hr이었고 AOT40(yr)은 14.4 ppm-hr였으나 최근 5년간의 최고치는 이들의 2배에 육박하였고 Table 2에서 보듯이 모든 오존지표에서 서울의 평균치를 모두 상회하는 등, 서울 외곽의 경기도 지역의 오존 오염이 최근 5년간 심각해졌다. 최근 정부 자료에 의하면 서울보다 경기도 지방의 고농도 오존이 훨씬 심각하다고 한다. 특히, 과천, 안양, 군포, 수원에 이르는 경기 남부지역의 오존 수준이 AOT40(yr) 13~23 ppm-hr, SUM06(yr) 3~7 ppm-hr 수준으로 방학동을 제외한 서울의 어떤 지점보다 높았다.

반면 인천의 10개 측정소 중 부평과 연희동의 SUM06(yr)이 2~4 ppm-hr이었을 뿐 대체로 전국 평균 이하였다. 또한 부천, 안산 시화공단, 시흥, 구로공단 등 인천공단지점들의 농도도 부평 수준을 넘지는 않았다. 본 연구에서 수도권에 충남 서산과 강원 원주를 포함시켰는데 이들 지점의 AOT40(yr)는 각각 25~36, 16~24 ppm-hr이고 SUM06(yr)는 3~7, 5~6

ppm·hr이었다. 이는 수도권의 어떤 곳보다도 높은 것이며, 충남 천안이나 강원 춘천, 강릉과 같이 측정이 이루어진 도내 다른 측정소보다 월등히 높은 오염 수준이었다.

결론적으로, 서울은 97년 이전과 최근 5년 사이에 도봉, 강동 지점을 제외하고는 최근 5년간 오존 오염의 악화가 지속되지 않았으며, 오히려 구의, 성수 지점 등 96, 97년에 고농도였던 곳의 오염이 크게 완화되었다. 반면 경기는 서울 동부 외곽지점인 구리, 하남과 과천, 안양, 군포, 수원을 잇는 남부 지역에서 97년 이전보다 2배 이상 악화되었다.

4.2. 오존 지표에 따른 최근 우리나라 식생피해 추정

Hoggest(1995) 등에 의하면 SUM06가 23.4 ppm·hr 면 농작물의 수량감수가 10% 정도 발생한다고 하였는데, 가장 높은 전남 광양이 11 ppm·hr 이므로 아무리 높은 지점이라 할 지라도 수량감수는 5% 미만으로 추론된다. 하지만 미국 전역의 SUM06가 5~12 ppm·hr인데 최근 5년간 612개 지점 중 상위 5%인 30개 지점에서 이 수준에 육박하였다. 결론적으로 미국 남 캘리포니아를 제외한 미국의 수준과 맞먹는 정도의 오존 오염이 최근 5년 동안 우리나라 일부에서 발생되고 있으며, 오존에 의한 농작물 및 식생의 피해가 추측된다.

Table 1에 나타나듯이 우리나라의 오존 측정망 분포는 인구밀도를 중심으로 공단지점이 강화된 양상을 보이고 있는데, 이는 식생보호를 전혀 염두해 두지 않은 오존 측정망 분포이다. 오존 오염이 전구체 발생 지점에서 최소 100km 이상으로 확대된다는 점을 감안한다면, 오염원 발생 중심이 아닌 일정 간격으로 전국도를 격자 형태로 엮는 오존 측정망이 필요하다. 본 연구 결과에서 보듯이, 오존 오염이 서울보다 경기도가 더 심각하며, 더 나아가 충남, 강원 일부까지 확대되어가고 있으며, 시간당 40~60ppb의 중간급 농도 분포는 수도권 못지않게 지방들도 심각하기 때문이다. 실제로 선진국에서는 오존 오염의 관심을 인구 중심에서 산림 쇠퇴와 식생보호 등으로 확대하면서 일정 간격의 그물망으로 관측점을 구축하고 있다.

본 연구를 통하여 정리된 오존 자료를 측정소별로 구별하여 오염도가 심각한 곳은 그 지점의 기상자료를 입수하여 TREGRO(Weistein *et al.*, 1991)와 같은 식물 생장 시뮬레이션 모델을 컴퓨터를 이용하여 기동

시킴으로써 오존에 의한 광합성 저해를 포함한 산림 쇠퇴 등을 1년~3년 기간동안 추정할 수 있다. 1997~98년의 수원의 오존 및 기상자료를 바탕으로 1년생 포플리의 오존에 의한 피해를 추정하였는데(Yun *et al.*, 2001), 지난 5년간 심각한 오염도를 보이는 곳들은 이보다 훨씬 큰 피해가 예상되며, 특히 수목의 경우 광합성 부족으로 지하 뿌리부 발달이 저해되며, 이로 인해 장기적으로는 산림쇠퇴가 예상된다.

4.3. 식생피해 지표로 본 수도권 이외의 지방의 오존 오염

최근 5년 자료에서 두드러진 오존 오염 지점은 전남 여수, 광양 일대와 경북 구미였다. 이들의 AOT40(yr)는 각각 18~35, 18~29 ppm·hr 였고, SUM06(yr)는 각각 3~5, 3~7 ppm·hr 였다. 주된 관심 지점인 서울 시청앞의 지난 5년간 AOT40(yr)가 6~10, SUM06(yr)가 1~2 ppm·hr 이었던 점을 감안한다면, 이들 지점의 오존 오염의 심각성을 알 수 있다. 장차 수도권 이외에도 오존 오염 심각 지점들이 집중 관리가 필요하다. 반면 울산공단 지점이나 부산, 대구 등의 오존 수준은 그다지 높지 않았다(Table 2).

충북 청주와 대전의 몇몇 측정소에서 관측된 AOT40(yr)는 각각 19~23, 17~20 ppm·hr 였고, SUM06(yr)는 각각 3~4, 3~5 ppm·hr 였는데 거리상으로나 중간 지점인 충남 천안의 오존 수준으로 판단하건데 수도권의 영향이 충청 지방까지 미쳤다고 보기에는 어렵지만, 이들 지점의 오존 수준도 수도권에 버금가는 상당한 오염이 발생되고 있다고 여겨진다. 충북 청원군의 오존 수준이 대도시에 육박한다는 사실(윤마영과 정용승, 1995)은 이런 중부권 일부의 오존 심각성을 뒷받침하는 것이다.

부산, 대구, 울산 그리고 인천과 같은 지점은 인구 집중이나 도심 오존 전구체 발생 등으로 미루어보건데 오염이 심각하리라 여겨지나 일부 1-2곳을 제외하고는 도시지역의 평균 수준을 넘지는 않고 있다(Table 2). 이들 지역은 대체로 편서풍이나 바닷가의 해풍 등에 의해 전구체가 이동되어 축적되지 못했으리라 여겨진다. 홍콩의 경우(So and Wang, 2003), 도심이나 신도시보다 농촌지역이 더 높았는데 좁은 범위에서 바람의 영향에 따라 이러한 결과가 나타났다.

자료는 한 측정소의 자료가 아닌 인근 지역 몇 개 측정소의 자료를 묶어서 경향을 제시하였는데, 이는

한 지점의 데이터가 기계의 오작동으로 잘못 측정될 우려를 배제하고자 주변 2-3 지점의 대략적인 수준으로 판단하였다. 또한 3개월치의 자료가 1년치의 자료보다 식생피해에 더 직접적인 영향을 주리라 판단했지만, 1998년 발표와 동일한 기준으로 비교하기 위해 데이터의 변이가 뚜렷한 1년 동안의 오존 지표, 즉 SUM06(yr)과 AOT40(yr)를 기준으로 비교하였다.

V. 적 요

1998년부터 2002년까지 최근 5년간 우리나라 대기 오염 자동 측정망의 총 612개 지점의 시간당 오존 농도를 SUM06, AOT40 등의 식생피해 지표로 전환하여 오염 정도를 분석하고, 1990-97년의 수도권 오존 오염과 비교하였다.

1. 10%의 농작물 수량감수가 예측되는 SUM06(yr) 23.4 ppm·hr를 기준으로 볼 때, 가장 높은 전남 광양의 연간 SUM06가 11 ppm·hr 이므로 수량감수는 5% 이내로 추론된다. 미국의 SUM06가 5~12 ppm·hr인데 최근 5년간 612개 지점 중 상위 30개 지점에서 이 수준에 도달하였다.

2. 1997년까지 심각했던 서울의 구의, 쌍문 지점의 SUM06는 2/3 수준으로 완화되었으나 도봉, 노원, 강북 지점은 오존 오염이 최근 5년 사이 증가되었다. 반면 경기 지역은 서울 동부 외곽인 구리, 하남 그리고 남부인 안양, 군포, 수원외의 오염이 97년에 비해 2배 이상 악화되었다. 서울 및 경기도는 시간당 100ppb를 넘는 횟수가 지방에 비해 많은 반면, 40-60ppb의 중간급의 분포는 낮아 식생지표로 환산하면, 서울 지점들의 평균치는 전국 16개 시도 중 중, 상위 수준이었다.

3. 수도권에 서울, 경기 뿐만 아니라, 충남 서산과 강원 원주를 포함시켰는데 이들 지역은 서울 및 경기도 평균을 상회하였고, 충남 천안, 강원 춘천 등 인접 지점과는 전혀 다른 양상이었다. 수도권 외에 중부권(강원, 충청), 호남권(전라, 제주), 영남권(경상, 부산) 등 전국을 4권역으로 나누어 비교한 결과, 1998-2000년까지는 수도권의 오염이 다른 지방보다 월등히 심각하였으나, 최근 2년(2001-02년) 사이에 수도권과 지방의 격차가 거의 없었다.

4. 공단지역은 인천, 경기 안산 시화, 울산 광역시 등에서는 오염도가 낮은 반면, 전남 광양, 경북 구미

공단 지역의 오존 오염은 높게 나타났다. 특히 광양과 구미 공단의 오존 오염은 수도권 이외 지방의 300개 지점 중 1-5위 안에 드는 대표적인 고농도 관심 대상 지역이다.

5. 식생보호 지표인 SUM06와 AOT40을 1년 자료와 여름철 3개월(6, 7, 8월) 자료로 나누어 분석하고 또한 연간 100ppb가 넘는 시간수, 95 퍼센타일, 99 퍼센타일, 연간 최고농도 등 여러 오존 지표를 상호 비교한 결과, 식물의 오존 피해를 직접적으로 표현할 수 있는 3개월간의 식생보호 지표들과 법적 기준치인 100ppb를 넘는 연간 시간수를 상호 보완하여 오존에 의한 식생 피해를 추정하는 것이 바람직하다.

감사의 글

이 논문은 2002학년도 선문대학교 교내학술연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

인용문헌

- 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. *Forest decline and ozone: A comparison of controlled chamber and field experiments*, Springer-Verlag, 317-368.
- Heo, J-S. and D-S. Kim, 2002: The characterization of surface ozone concentrations in Seoul, Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **18**, 129-142.
- Hogsett, W. E., A. Herstrom, J. A. Laurence, J. E. Weber, E. H. Lee and D. Tingey, 1995: An approach for characterizing tropospheric ozone risk to forest. *Fourth U.S./Dutch International Symposium on Comparative Risk Analysis and Priority Setting for Air Pollution Issues*, Pittsburgh, PA, 119-145.
- Hong, Y., J. Han, B. Kong, D. Chung, S. Lee, S. Lee and D. Rhee, 2002: A study on high-ozone episode and photochemical smog(II). *Report of National Institute for Environmental Research, Korea* **24**, 209-225.
- Lee, E. H., D. T. Tingey and W. E. Hogsett, 1988: Evaluation of ozone exposure indices in exposure-response modeling. *Environmental Pollution* **53**, 43-62.
- 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. *Atmospheric Environment* **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. *Atmospheric Environment*. **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 level. *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. *Journal of Air & Waste Management Association* **44**, 1383-1390.
- So, K. L. and T. Wang, 2003: On the local and regional influence on ground-level ozone concentrations in Hong Kong. *Environmental Pollution* **123**, 307-317.
- 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 Physiology* **9**, 127-146.
- 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.
- Yoon, M-B. and Y-S. Chung, 1995: Measurements of the ground-level ozone in a rural area of Chongwon, Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **11**, 85-93.
- Yun, S-C., E. W. Park and J. A. Laurence, 2001: Simulation of 1-year-old *Populus tremuloides* response to ozone stress at Ithaca, USA, and Suwon, Republic of Korea. *Environmental Pollution* **112**, 253-260.
- Yun, S-C., E. W. Park and Y-K. Jang, 1999: Tropospheric ozone patterns in the metropolitan Seoul area during 1990~1997 using two ozone indices of accumulation over the threshold concentrations. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **15**, 429-439.
- Yun, S-C. and J. A. Laurence, 1999a: The response of clones of *Populus tremuloides* differing in sensitivity to ozone in the field. *New Phytologist*, **141**, 411-421.
- Yun, S-C. and J. A. Laurence, 1999b: The response of sensitive and tolerant clones of *Populus tremuloides* to dynamic ozone exposure under controlled environmental conditions. *New Phytologist*, **143**, 305-313.