

## 서울의 대기오염과 시정감소

### On Air Pollution and Visibility Reduction in Seoul

최 정 숙 · 정 용 승

한국교원대학교 환경과학연구소  
(원고접수: 1992. 12. 24)

Jeong-Sook Choe and Yong-Seung Chung

Environmental Science Institute, Korea National University of Education  
Khangnae, Chongwon, Choongbook 363-791, Korea  
(Received 24 December 1992)

#### Abstract

In order to study on the cause of visibility aggravation, we have selected the days of low-visibility observed in Seoul with haziness that was below 6km from 12 to 15 LST. According to the examinations, the number of low-visibility days satisfying the criteria is 30 days in 1989, 39 days in 1990, and 35 days in 1991, respectively. The annual number of low visibility days appears to increase mainly due to an increase in emission of air pollutants and in anthropogenic water vapor in the biosphere.

The relationship between visibility and air pollutants(TSP, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) of selected days is also studied. Air pollution concentrations of selected days are much higher than those of other days. It is observed that the cause of visibility aggravation in Seoul is mainly smog and air pollutants. In particular, the visibility reduction and high SO<sub>2</sub> concentrations at Seoul in winter are similar phenomena that occurring with London smog, while the visibility reduction and high O<sub>3</sub> concentrations at Seoul in summer are also similar to the type of Los Angeles smog.

#### 1. 서 론

1970년대 이래 산업화 정책에 기인한 고도의 경제성장은 부수적으로 도시지역에 오염물질을 증가시키는 결과를 가져왔다. 대기중으로 배출되는 오염물질은 주로 TSP, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, 그리고 유기물 입자들은 물론 광화학 작용에 의해 형성되는 O<sub>3</sub> 등이 있다. 이러한 오염물질들이 점점 많아지면 대기 혼탁도가 증가하여 시정의 악화를 초래한다(White, 1977).

시정은 빛의 소광(消光, extinction)과 밀접한 관련이 있으며, 빛의 소광은 입자와 가스의 흡수 및 산란에 의한다. 가스에 의한 빛의 소광은 청색광을

흡수하는 NO<sub>2</sub>를 제외하고, 도시지역에서 가시영역의 빛의 소광에 가스의 기여도는 아주 낮다(Groblicki et al., 1981). 입자에 의한 빛의 흡수는 주로 1차 오염물질인 탄소 입자에 의하며(Japar et al., 1986 ; Adams et al., 1990), 입자에 의한 빛의 산란은 빛의 소광에 가장 중요하며 대기에서 광화학 반응으로 형성된 2차 aerosol에 의해 우세하게 나타난다. 입자에 의한 빛의 산란값은 오후에 최대가 된다(White and Roberts, 1977). 따라서, 대기중에 입자가 많아 소광량이 클수록 시정이 나빠진다. 실제로 시정과 TSP, SO<sub>2</sub>농도와는 음의 상관(negative correlation)이 있다고 보고했다(Junge, 1955).

시정에 관한 연구에서 세계의 대도시(뉴욕, 동경

등)은 악시정이 점점 감소하는 경향을 보이며, 중소도시에서는 악시정이 점점 증가하고 있다고 보고되었다(Beebe, 1967; Corfield and Newton, 1968; Nomoto, 1983). 중소도시의 시정 감소 원인으로서는 산업화, 도시화에 따라 대기로 방출되는 오염물질이 많아져 대기 혼탁도가 증가함을 들었다(Joseph and Manes, 1971). 반면에, 대도시에서 시정이 개선되는 원인으로서는 공기 청정법의 입안을 들었다(Naegele and William, 1981). 그러나, 한국의 경우 민경덕 등(1990)이 14년동안 시정의 경년변화와 계절변화에 관한 연구에서 대도시와 중소도시 모두 시정이 점점 나빠지고 있다고 보고했다. 특히, 서울의 경우 겨울에 시정이 가장 나쁘게 나타나고, 시정감소율은 여름에 41%로 가장 심하게 나타나 여름시정이 계속적으로 악화되고 있음을 밝혔다. 이 결과는 정용승 등(1991a)이 도시의 대기오염과 시정감소에 관한 연구에서 혼합고가 낮은 겨울에 시정이 가장 나쁘며, 여름에도 광화학 작용에 의해 시정이 감소한다고 밝힌 것과도 일치한다. 이와 같이 외국의 경우와는 달리 대도시, 중소도시, 산업도시 등지에서 계절에 관계없이 시정이 점점 나빠지고 있다.

따라서 본 연구는 서울에서 시정 악화 원인이 단순한 연무(haze)에 의한 것인가 smog에 의한 것인가를 알기 위하여 1989년부터 1991년까지 12시부터 15시 사이에 시정이 6km 이하이고 haze가 발생한 날을 선정하여 선정된 날의 시정과 오염물질(TSP, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>)과의 관계를 밝혀 시정감소 원인을 규명해 보고자 한다.

## 2. 자료 및 조사지역

본 연구의 조사지역으로 선정된 서울은 인구 1,000만이 넘는 대도시로써 한강을 경계로 하여 강북과 강남으로 양분된다. 기후특성으로는 Fig. 1의 풍배도에서 보여주듯이 종관규모계 편서풍의 영향을 강하게 받으며, 인위적으로는 도로 포장율 증가 등에 따라 특이한 도시기후를 나타낸다.

본 연구를 위하여 1989년부터 1991년까지 기상청에서 관측한 일일지상관측표와 환경처에서 측정하는 대기오염 자료를 사용하였다. Fig. 1에 나타난 각 지점은 1988년 후반기부터 환경처와 서울특별시에서 계속적으로 대기오염농도를 측정하고 있는 지역으로 주거지역 13개 지점, 산업지역 3개 지점, 상업지역 1개 지점, 그외 주변지역 3개 지점이다.

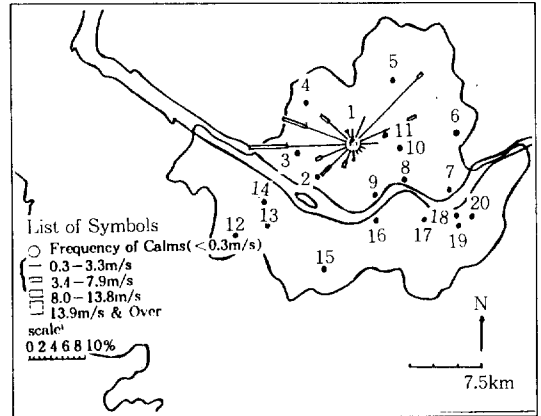


Fig. 1. Location of monitoring sites in Seoul.

- \*\* A wind rose indicates frequencies of annual mean wind-direction. (1. GWANGHWA MOON 2. MAPO 3. NAMGAZWA 4. BULGWANG 5. SSANGMUN 6. MYUNMOG 7. GUWI 8. SUNGSU 9. HANNAM 10. SINSUL 11. GILUM 12. ORU 13. GURO 14. MUNRAE 15. SINLIM 16. BANPO 17. DAECHE 18. JAMSIL 19. BANGI)

## 3. 조사방법 및 절차

본 연구의 조사방법 및 절차는 다음과 같다.

- 1) 시정 악화 원인이 단순한 haze에 의한 것인가 smog에 의한 것인가를 알기 위하여 1989년부터 1991년까지 12시부터 15시 사이에 기상청에서 관측한 시정이 6km 이하이고 haze가 발생한 날을 선정하였다.
- 2) 선정된 날의 시정 악화 원인을 알아보기 위해 선정된 날의 TSP, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>의 평균농도와 총 월 평균 농도를 비교했고, 시정과의 관계도 알아 보았다.
- 3) 기상학적 요인과 오염물질 농도와의 상관관계를 보기위해 기온과 오염물질 농도와의 상관관계를 분석했다.

## 4. 분석 및 토의

서울에서 시정 악화 원인을 알기 위해 12시부터 15시 사이에 시정이 6km(4mile) 이하이고 haze가 발생한 날을 선정하였다. 선정된 날에 각 오염물질의 농도는 단기간의 기준값(short-term standards)을 사용하였다. 즉, TSP와 SO<sub>2</sub>농도는 24시간 평균치를, NO<sub>2</sub>와 O<sub>3</sub>농도는 12시부터 15시 사이에 가장

Table 1. Low visibility(<6km) and air pollution concentrations during hazy days in Seoul.

1989년												
(단위 : TSP, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , ppb)												
	1	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
선정일수	2	4	3	4	2	1	4	1	—	2	3	4
평균시정	5	5	5.3	4.4	6	6	5.8	6	—	5	4.7	3.5
TSP 평균농도	227	246	208	239	118	177	167	144	—	231	265	242
SO <sub>2</sub> 평균농도	173	161	93	68	23	23	24	16	—	82	168	152
NO <sub>2</sub> 평균농도	44	47	52	52	28	45	35	20	—	69	69	59
O <sub>3</sub> 평균농도	5	11	22	40	34	67	52	29	—	24	9	5

1990년												
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
선정일수	4	3	2	2	2	2	1	3	1	5	8	6
평균시정	3.9	5.2	4.3	3.9	4.5	5	6	5.3	6	4.7	5	4.9
TSP 평균농도	192	260	217	231	169	191	192	150	236	251	266	254
SO <sub>2</sub> 평균농도	125	109	77	72	46	31	28	20	29	63	76	124
NO <sub>2</sub> 평균농도	50	50	50	49	34	36	46	36	56	69	59	70
O <sub>3</sub> 평균농도	7	16	15	19	17	54	53	72	68	18	14	6

1991년												
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
선정일수	3	1	4	4	1	4	1	2	1	2	6	6
평균시정	4.5	6	3.9	4.5	6	4.9	5	3.8	4	6	5.2	5.3
TSP 평균농도	232	251	265	233	183	147	144	141	101	189	234	233
SO <sub>2</sub> 평균농도	140	126	109	74	33	24	15	13	11	57	78	92
NO <sub>2</sub> 평균농도	77	62	72	76	50	35	44	40	25	61	75	55
O <sub>3</sub> 평균농도	13	12	19	30	49	42	71	89	26	21	14	10

Table 2. Air quality standards.

(단위 : \*. $\mu\text{g}/\text{m}^3$  \*\*.ppm)

구 분	TSP*		SO <sub>2</sub> **		NO <sub>2</sub> **		O <sub>3</sub>	
	연평균	24시간	연평균	24시간	연평균	1시간	연평균	1시간
한 국	150	300	0.05	0.15	0.05	0.15	0.12	0.10
미 국	70	260	0.03	0.14	0.053		0.12	
일 본	100	200	0.04	0.1	0.04-0.06		0.06	
WMO	90	230	0.022	0.056	0.17		0.10	

높게 나타난 시간대의 1시간 평균치를 사용하였다.

선정된 날은 89년 30일, 90년 39일, 91년 35일로 나타났으며, 특이하게 1989년 9월은 한번도 나타나지 않았다. 이를 표 1에 나타냈다. 표 1에서 조건에 만족한 날은 3년 모두 여름보다는 겨울에 많았고, 시정도 상대적으로 겨울철에 낮게 나타남을 볼 수 있다. 오염물질의 경우 TSP, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>는 겨울에 높게 나타났으며, 특히 SO<sub>2</sub>가 겨울철에 높은 기록을 보였다. 반면에 O<sub>3</sub>은 여름철에 높게 나타났으며 최고 농도에 있어 계속 증가해가는 추세가 있다. 표 1의 결과를 상세하게 조사 및 분석하였다. 또한 표 2

에 나타난 우리나라와 외국의 대기환경기준치와 선정된 날의 오염물질들의 농도를 비교하여 서울의 오염상태를 알아보았다.

#### 4. 1 시정과 TSP와의 관계

TSP는 미세입자에서 커다란 먼지입자까지 다양하다. 주로 큰 입자는 20 $\mu\text{m}$  이상의 비교적 무거운 먼지로서 빨리 지면으로 침강하여 대기로부터 쉽게 제거된다. 20 $\mu\text{m}$  이하의 입자는 대기중에 오랫동안 부유하며, 오염원으로부터 바람에 의해 먼 거리까지 이동한다. 특히 5 $\mu\text{m}$  이하의 입자는 유해한 원소를

많이 함유하고 있어 인간의 건강에 영향을 미친다. 0.1-10.0 $\mu\text{m}$  크기의 입자는 빛을 산란시킴으로써 시정감소에 중요한 역할을 한다. TSP는 산업시설이나 다른 인위적인 요인보다 대기상태나 자연적인 방출에 더 많은 영향을 받는다. 가장 중요한 기상요소는 풍향, 풍속, 기온, 대기 안정도이다(Hindy et al., 1990).

표 1의 시정과 TSP와의 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 89년 5월만 제외하고 3년동안 모두 선정된 날의 월평균값이 총 월평균값보다 훨씬 높게 나타났다. 이것으로 보아 haze가 발생한 날의 TSP 오염농도가 보통때보다 훨씬 높은 것을 알 수 있다.

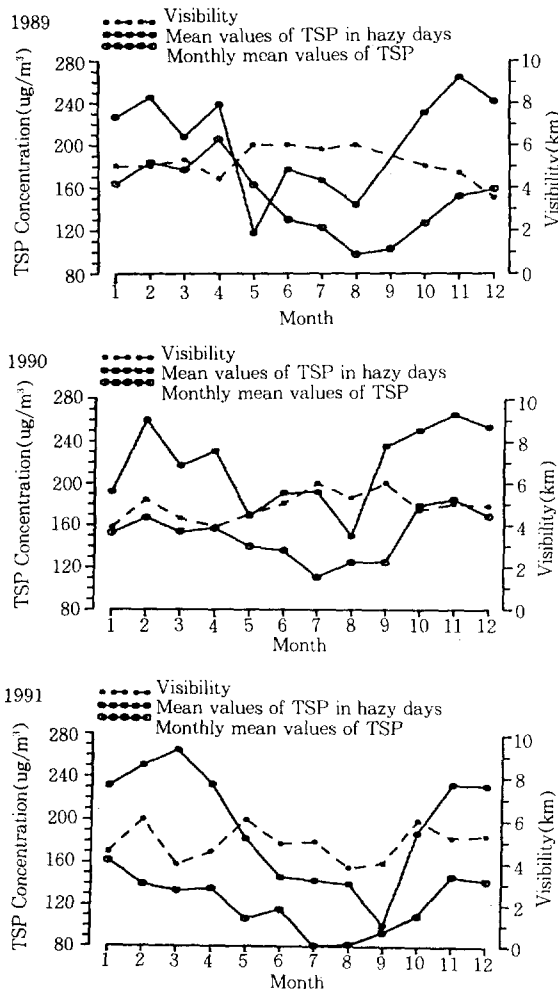


Fig. 2. Monthly mean values of TSP and visibility in hazy days observed in Seoul from 1989 to 1991.

TSP의 월별 농도 변화를 보면, 5월에서 9월 사이에 낮은 농도(최저기록; 91년 9월 1일, 101 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를, 10월에서 4월 사이에 높은 농도(최고기록; 89년 11월 23일, 329 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 보여준다. 특히 11월부터 2월까지 그리고 4월에 높다. 이중 11월에서 2월 사이에 높은 이유는 가정에서 난방연료 사용의 증가와 강수에 의한 wash out의 감소, 그리고 낮은 혼합고를 들 수 있고, 4월의 높은 농도는 황사 등 봄철의 많은 먼지에 의한 것으로 생각된다. 4월에 나타나는 이러한 결과는 황사현상이 나타날 때 대기중에 부유하는 입자속에 무기질의 부유분진이 많아 황사가 저시정의 원인임을 밝힌 선행연구와도 일치한다(Yoo et al., 1991). TSP농도가 높을 때 북서계열의 바람이 주로 불며 TSP농도는 북서풍과 높은 상관성을 갖는다. 이것은 중국에서 가장 문제가 되는 오염물질 중 하나인 TSP가 편서풍을 타고 장거리 이동해 오면서 침전된다는 선행연구와 일치한다(정용승 등, 1991b). TSP농도가 높을 때의 풍속은 대부분 3m/sec 이하의 바람이 불었다.

반면에, 5월부터 9월 사이에는 낮은 농도를 갖는다. 이것은 장마철을 포함하여 여름철에 강수량이 많아 비에 의해 wash out되기 때문이다. 또한 여름철은 일조시간이 길고 일사량이 많아지므로 혼합고가 높아 대기가 불안정해지기 때문이다. 이렇게 TSP농도는 기상요소에 의해 주로 좌우된다. 실제로 TSP농도는 기온과 음의 상관(-0.44,  $p=0.001$ )을 갖는다.

그림 2에서 TSP농도가 높은 경우의 시정은 농도가 낮은 경우보다 상대적으로 나쁘게 나타났고, 선정된 날의 시정과 TSP농도와의 상관관계는 음의 상관(-0.27,  $p=0.01$ )을 보인다. TSP월평균 농도의 연도에 따른 변화경향을 보면 90년까지는 증가하다가 91년에 감소하는 추세를 보인다. 이와 같은 결과는 산업 또는 공장지대에서 인위적으로 배출되는 TSP량을 줄이기 위한 노력의 일환으로도 평가된다. 91년에 TSP농도 감소는 91년도에 저시정 발생일수가 가장 적은 원인으로 설명될 수 있다. 이로써 TSP농도는 시정감소에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

서울지역에서 haze가 발생한 날의 평균농도는 101-329 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 우리나라의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날이 4.8%, 미국의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날은 24%, 일본의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날이 65%로 나타났다. 이런 결과는 우리나라의 대기환경기준치가 다른나라보다 훨씬 높게 책정되어 있기 때문이다.

4.2 시정과 SO<sub>2</sub>와의 관계

황을 포함한 연료를 연소할 때 90% 이상이 SO<sub>2</sub> 형태로 배출되며, 최근들어 화석연료 사용량이 많아지면서 SO<sub>2</sub>에 대한 관심이 높아져 가고 있다.

표 1의 SO<sub>2</sub>와 시정과의 관계를 그림 3에 나타냈다. 그림에서 선정된 날의 평균농도와 총 월평균농도를 비교했을 때 91년 9월을 제외하고는 TSP와 마찬가지로 선정된 날의 평균농도가 훨씬 높게 나타났다. 따라서 SO<sub>2</sub>오염농도도 haze가 발생한 날이 보통때보다 훨씬 높다.

선정된 날의 월별 평균농도는 겨울(11월~2월)에 높고, 여름(5월~9월)에 낮다. 겨울철에 SO<sub>2</sub>농도가 높은 이유는 주로 가정에서의 난방을 위한 연료사용의 증가와 같은 양의 에너지를 생산하는데

드는 연료가 여름보다 겨울에 더 많이 소요되기 때문이다(Stern et al., 1984). 또한 겨울철에는 기온이 낮아 대기중에서 확산되는 것을 방지하기 때문이다. SO<sub>2</sub>는 기온과 높은 음의 상관(-0.80, p=0.01)을 갖는다.

그림의 3의 SO<sub>2</sub>와 시정과의 관계에서 농도가 낮은 5월에서 8월까지(여름)는 시정이 비교적 좋고 농도가 증가하기 시작하는 10월에서부터 2월까지(겨울)는 상대적으로 시정이 좋지 않은 확실한 양상을 보인다. 실제로 SO<sub>2</sub>농도와 시정과의 상관은 음의 상관(-0.30, p=0.01)을 갖는다.

SO<sub>2</sub>농도는 90년까지 증가하다가 91년에는 최대 농도가 감소하는 추세에 있다. 이것은 에너지 효율의 증가와 가정에서 난방연료를 석탄에서 무연연료(석유나 천연가스)로 변환한 때문으로 보인다. 이와 같이 91년에 SO<sub>2</sub>농도 감소는 TSP와 같이 91년에 저시정 발생일수가 가장 적었던 원인으로 설명될 수 있다. 이로부터 SO<sub>2</sub>가 시정감소에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. SO<sub>2</sub>는 다른 오염물질들보다 TSP와 상관관계가 높고(0.63, p=0.01), TSP와 비슷한 변동을 보인다. 이것은 두 오염물질들의 source가 비슷하다는 것에 원인이 있다. 즉, 최근에 중국의 산업화에 따라 석탄의 연소 증가로 가장 문제가 되고 있는 TSP와 SO<sub>2</sub>의 일부가 편서풍을 타고 한반도까지 장거리 이동해와 침전한 때문이다(정용승 등, 1991).

서울지역에서 haze가 발생한 날의 SO<sub>2</sub> 평균농도는 0.01~0.243ppm으로 우리나라의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날이 10.8%, 미국의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날은 13.5%, 일본의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날이 31.7%로 나타났다.

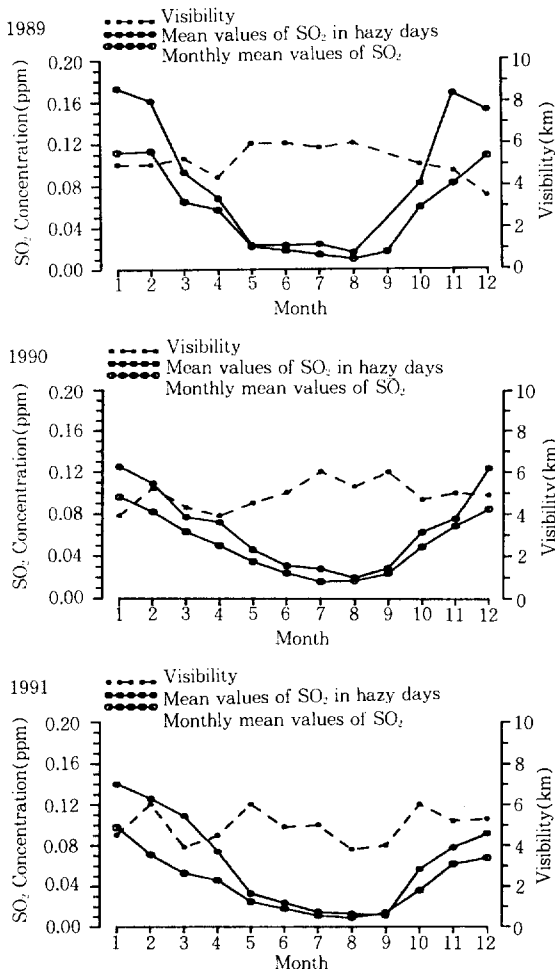


Fig. 3. Monthly mean values of SO<sub>2</sub> and visibility in hazy days observed in Seoul from 1989 to 1991.

4.3 시정과 NO<sub>2</sub>와의 관계

NO<sub>2</sub>는 대기화학에서 매우 중요한 요소 중 하나이다(Logan, 1983). 서론에서 살펴본 것처럼 NO<sub>2</sub>의 중요한 역할은 청색부분의 가시광선을 흡수하여 haze를 황갈색으로 보이게 한다. 또, 지표에 도달하는 일사량을 감소시켜 시정감소에 영향을 미치며, 대기중의 유기입자를 사용하는 자동차 주행, 산업 등의 인위적인 활동에 의해서 대기중으로 방출되고, 직접적으로 인간의 건강을 침해한다(Logan, 1983).

NO<sub>2</sub>와 시정과의 관계는 그림 4에 나타났다. 그림에서 선정된 날의 농도는 91년 9월을 제외하고 보통때보다 높게 나타났다. 따라서 TSP, SO<sub>2</sub>의 경우와 같이 NO<sub>2</sub>오염농도도 보통때보다 haze가 발생했을 때 훨씬 높다.

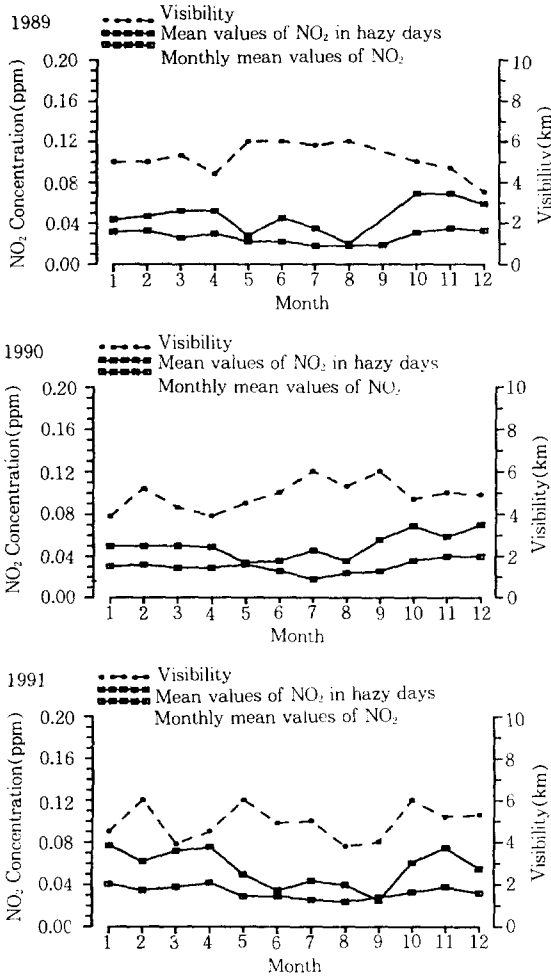


Fig. 4. Monthly mean values of NO<sub>2</sub> and visibility in hazy days observed in Seoul from 1989 to 1991.

선정된 날의 연중 NO<sub>2</sub> 월평균 농도 변화량은 아주 적다. 그러나, 비교적 10월에서 4월 사이, 6월, 7월에 높고(최고기록; 91년 11월 1일, 0.107ppm), 5월과 8월에 낮게(최저기록; 89년 8월 31일, 0.02ppm) 나타난다. 이와 같이 비교적 겨울에 농도가 높은 이유는 SO<sub>2</sub>와 같이 가정에서의 난방연료 사용 증가와 혼합도가 낮아 상층으로의 확산을 막기 때문이다. NO<sub>2</sub>는 기온과 음의 상관(-0.41, p=0.01)을 보여준다.

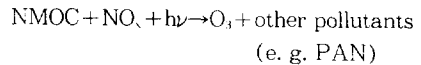
그림 4에서 NO<sub>2</sub>와 시정과의 관계를 보면, 농도가 높은 겨울에 상대적으로 시정이 나빠 NO<sub>2</sub>도 시정에 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 여름철 자외선과의 반응으로 광화학 스모그를 형성하는 O<sub>3</sub>의 전조물질

(precursor)로써 직접·간접적으로 시정에 영향을 미친다. 실제로 시정과의 상관은 TSP, SO<sub>2</sub>와는 달리 점점 증가하는 추세에 있다. 이것은 NO<sub>2</sub>의 주요 배출원인 자동차가 해가 갈수록 빠른 속도로 증가함에 따라 교통체증이 심해져 대기중으로 배출되는 양이 많아지기 때문이다.

서울지역에서 haze가 관측된 날의 NO<sub>2</sub> 평균농도는 0.02~0.107ppm으로 우리나라의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날은 한번도 없으나, 미국의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날은 51.9%, 일본의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날은 41.4~76.9% 범위를 갖는다.

4.4 시정과 O<sub>3</sub>과의 관계

O<sub>3</sub>은 광화학 반응으로 형성되는 2차 오염물질로 대도시에서 광화학 스모그를 형성하는 주범이다. O<sub>3</sub>의 형성 mechanism은 다양하지만, 주로 NO의 농도에 따라 결정되며 CO와 CH<sub>4</sub>의 산화과정과 밀접한 관련이 있다. O<sub>3</sub>형성의 반응식은 다음과 같다.



윗 식에서 보듯이 대기중의 오염물질 중 자동차에서 주로 배출되는 NO가 태양 자외선과의 반응으로 O<sub>3</sub>과 다른 여러 산화물들을 생성한다. NO의 농도는 대류권에서 O<sub>3</sub>형성을 결정하는 중요한 요소이다.

대류권에서 O<sub>3</sub>형성은 기상학적 상태에 따라 결정된다. 즉, 기온이 높고 일사량이 많은 날, 고기압을 형성한 기상학적 상태(Chung, 1977)에서 침강 역전층이 수반되었을 때 대규모 바람장과 함께 장거리 이동해 온 오염물질들에 의해 많이 만들어진다(Kurita et al., 1985). O<sub>3</sub>의 최대농도는 깊고 강한 역전층 아래에서 기록된다. 이른 아침에 형성된 복사 역전층은 산업지대로부터 방출된 1차 대기오염물질의 확산을 막아 아침 시정을 악화시키며, 역전층의 소멸과 함께 오염물질들은 혼합층으로 주입하여 O<sub>3</sub>을 형성한다. 혼합층 위에서 O<sub>3</sub>농도는 급격히 감소한다. 따라서, O<sub>3</sub>의 최대 농도는 혼합층의 높이와 밀접한 관련이 있으며, 일간 변동도 혼합층의 높이에 의해 결정된다(Wakamatsu et al., 1984).

O<sub>3</sub>과 시정과의 관계는 그림 5에 나타내었다. 그림에서 선정된 날의 농도는 89년 1월과 12월, 90년 1월과 12월을 제외하고 다른 오염물질들처럼 보통 때보다 높게 나타났다. 즉 TSP, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>와 같이 haze가 발생한 날 O<sub>3</sub>오염농도가 보통때보다 훨씬

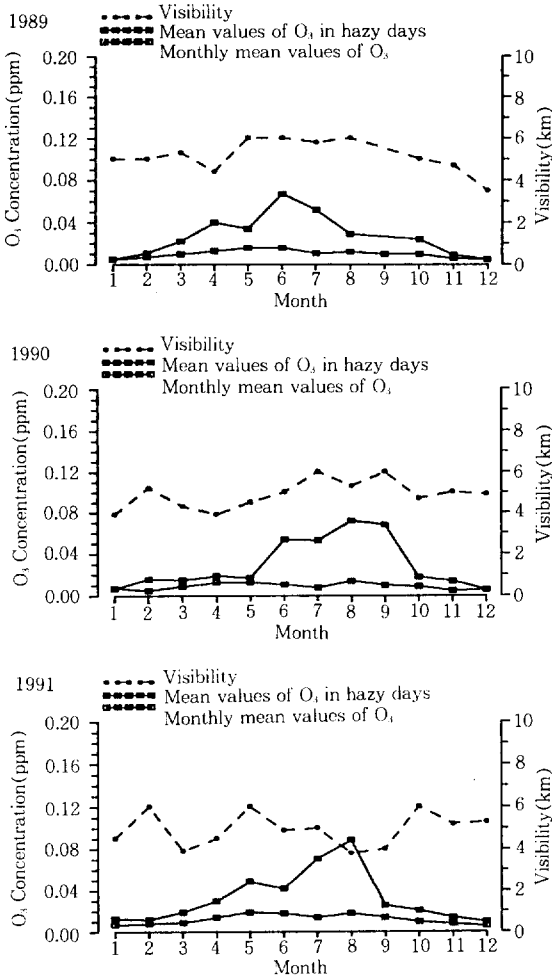


Fig. 5. Monthly mean values of O<sub>3</sub> and visibility in hazy days observed in Seoul from 1989 to 1991.

높다. 선정된 날의 월별 평균농도는 다른 오염물질들과는 정반대로 여름(6월-8월)에 높고(최고기록; 91년 8월 16일 0.098ppm), 겨울(11월-2월)에 낮다(최저기록; 89년 12월 12일 0.002ppm). 이렇듯 여름철에 농도가 높은 이유는 앞에서 살펴보았듯이 O<sub>3</sub>은 주로 자동차에서 배출되는 질소산화물과 태양 자외선과의 광화학반응에 의해 형성되기 때문이다. 이 결과는 오염물질간의 상관관계에서 NO<sub>2</sub>와 음의 상관(-0.38, p=0.01)을 가지는 것과 일치한다.

O<sub>3</sub>이 시정에 미치는 영향을 살펴보면, 다른 오염물질들과는 달리 겨울보다 O<sub>3</sub>농도가 높은 여름에 상대적으로 시정이 좋다. 시정과의 상관분석에서 O<sub>3</sub>

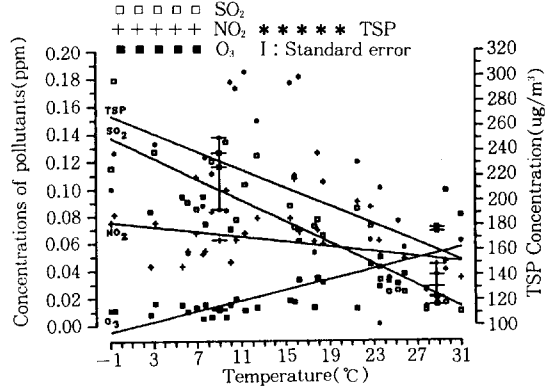


Fig. 6. Correlation between air temperature and pollutants observed in Seoul.

은 양의 상관(0.24, p=0.01)을 갖는 것으로 나타났다. 선정된 날의 O<sub>3</sub> 최고농도는 NO<sub>2</sub>와 같이 점점 증가해 가는 추세에 있다. 그리고 다른 오염물질과는 달리 특이하게 3년 모두 농도가 높은 여름철에 haze가 발생한 날의 농도와 월 평균농도간에 차이가 굉장히 심하다. 이것은 광화학반응은 기상학적으로 요인과 밀접한 연관이 있어 온도가 높고 습도가 낮을 때 활발하게 일어나기 때문이다. 따라서 선정된 날은 상대습도를 70% 이하로 제한하였기 때문에 광화학반응을 활발히 할 수 있는 적합한 조건을 갖추어 이날의 온도가 보통때보다 훨씬 높게 나타난다. 이렇게 O<sub>3</sub>농도는 91년에 감소했던 저시정 변화경향과는 반대로 증가하는 것으로 나타나 O<sub>3</sub>이 시정에 좋은 영향을 주는 것처럼 보인다. 그러나, 그림 5에서 부분적으로 보면 O<sub>3</sub>농도가 최대로 나타난 89년 6월, 90년 8월, 91년 8월에 시정이 다른 달보다 나빠짐을 볼 수 있다. 이는 정용승 등(1990)의 선행연구에서 O<sub>3</sub>은 광화학 스모그를 형성함으로써 여름철 도시시정을 감소시킨다고 보고한 내용과 일치한다. 따라서, O<sub>3</sub>농도가 높은 여름에 시정이 좋게 나타났다고 해서 O<sub>3</sub>이 시정에 좋은 영향을 준다고 말할 수 없다. 실제 시정 연구에서 여름 시정은 과거보다 점점 나빠진다고 보고했다(민경덕, 1991).

서울지역에서 haze가 관측된 날 O<sub>3</sub>평균농도는 0.002-0.098ppm으로 우리나라와 미국의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날은 한번도 없으나, 일본의 대기환경기준(short term standards)을 넘는 날은 9.6%이다. 아직까지 대류권 O<sub>3</sub>이 대기환경기준을 넘는 날은 별로 없지만, 그림 6에서 보듯이 O<sub>3</sub>의 최대 농도는 급격하게 증가하고 있다.

#### 4.5 기온과 오염물질간의 관계

지면에 축적된 오염물질들의 농도는 기상요소와 매우 밀접한 상관을 갖는다. 이 절에서는 기온이 오염물질에 미치는 영향을 살펴보았다. 기온과 오염물질간의 상관을 분석한 결과를 표 3에 나타냈다.

Table 3. Correlation between air temperature and pollutants observed in seoul.

pollutants	correlation coefficients with air temperature
TSP	-.4406**
SO <sub>2</sub>	-.7958**
NO <sub>2</sub>	-.4104**
O <sub>3</sub>	.8030**
N of cases : 104 1-tailed signif : *-.01 **-.001	

TSP, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>농도는 기온과 음의 상관을 갖는 것으로 나타났다. 이중에서도 특히 SO<sub>2</sub>가 기온과 높은 음의 상관(-0.80, p=0.001)을 가진다. 오염물질의 집적(deposition)농도는 배출량과 혼합고, 풍속과 관계가 있다.

SO<sub>2</sub>의 경우 난방연료 사용에 의해 다른 계절보다 추운 겨울철에 대기중으로 배출되는 양이 많고, 낮은 기온 때문에 혼합고가 낮아 겨울에 높은 농도로 집적된다. TSP는 인위적인 활동에 의해 대기중으로 배출되기도 하지만, 특징적인 자연적 현상(e. g. 바람에 의한 먼지, 산불, 물보라(sea spray), 화산분출 등)에 의해 계절에 상관없이 많은 양이 대기중으로 방출된다. 실제로, 앞에서 살펴보았듯이 TSP는 SO<sub>2</sub>보다 계절적 변동이 더 적게 나타났다. 이 결과는 SO<sub>2</sub>보다 기온과의 상관이 더 낮게 나타난 것을 설명해준다. NO<sub>2</sub>의 경우 기온과의 상관이 TSP와는 비슷하고 SO<sub>2</sub>보다는 현저하게 낮게 나타난다. 또한, 계절적인 변동이 다른 오염물질들보다 훨씬 적다. O<sub>3</sub>은 다른 오염물질들과는 달리 기온이 높을 수록 농도가 높게 나타났다(그림 6). 즉, 기온과 매우 높은 양의 상관(0.80, p=0.001)을 갖는다.

위에서 설명한 기온과 오염물질들간의 관계를 그림 6에 결과적으로 나타냈다. 즉, TSP, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>는 기온과 음의 상관을 가지고, 반대로 O<sub>3</sub>은 기온과 양의 상관을 갖는다.

#### 4.6 대기오염과 수증기

먼지, 황산염 등 많은 대기오염물질들은 수증기의 응결핵 역할을 할 수 있다. 대기오염과 수증기는 기상조건이 적당할 때, 특히 오전중에 서로 결합하여 안개와 박무를 형성하며 오후에는 증발하여 연무로

남을 수 있다. 이러한 오염과 수증기의 일생은 물의 순환의 일부이다. 특히 서울과 같은 대도시는 많은 TSP를 배출하고 이들은 습도가 높을 때 응결핵으로써 안개와 박무를 발생시킨다. 이러한 물의 순환은 서울의 대기에서 주기적으로 관측할 수 있다. 한편, 30~50년전에 비해 서울과 그 주변은 많은 물을 공급하고 소비하고 있다. 인구 1천만 이상과 많은 공장들의 가동은 물의 수요를 크게 증대시키고 있으며, 결과적으로 대기중에 인위적인 수증기를 배출하고 있다. 우리나라 대부분의 강수량은 주로 여름에 집중되고 있으나 수자원의 보호와 저수활동은 서울과 서울의 대기중에 수증기의 일정량을 꾸준히 공급하고 있다. 그러므로 이와 같은 수증기의 많은 공급과 계속적인 대기오염의 배출은 도시의 박무와 연무의 발생을 촉진하며 특히 시정을 악화시키고 있다.

#### 5. 요약 및 결론

본 연구는 서울에서 시정 악화가 단순한 haze에 의한 것인가 smog에 의한 것인가를 알기 위해 12시부터 15시 사이에 haze가 발생하고 시정 6km 이하인 날을 선정하여 1989년부터 1991년까지 3년 동안 시정과 오염물질과의 관계를 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

1) 서울에서 12시부터 15시 사이에 haze가 발생하고 시정 6km 이하인 날은 89년 30일, 90년 39일, 91년 35일을 기록했다.

2) 시정과 TSP관계에서 TSP는 시정과 음의 상관(-0.27)을 보였고(표 4), 90년까지는 증가하다가 91년에 감소하는 경향을 보였다. 그리고 TSP의 월 변화 경향에서는 11월에서 2월과 4월에 높은 농도를, 5월에서 9월 사이에 낮은 농도로 나타났다. 선정된 날 TSP 평균농도는 101-329  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기록했고, 우리나라 대기환경기준치를 넘는 날은 4.8%, 미국의 대기환경기준치를 넘는 날은 24%, 일본의 대기환경기준치를 넘는 날은 65%에 달했다.

3) 시정과 SO<sub>2</sub>관계에서 SO<sub>2</sub>는 다른 오염물질보다 시정과 가장 높은 음의 상관(-0.30)을 나타냈으며(표 4), TSP와 마찬가지로 90년까지는 증가하다가 91년에 감소하는 경향을 보였다. 월 변화 경향에서 SO<sub>2</sub>는 11월에서 2월에 높고, 5월에서 9월에 낮게 나타났다. 그리고 SO<sub>2</sub>는 NO<sub>2</sub>나 O<sub>3</sub>보다 대부분 높은 농도를 기록했다. 선정된 날의 SO<sub>2</sub> 평균농도는 0.01-0.243ppm을 기록했고, 우리나라 대기환경기준치를 넘는 날은 10.8%, 미국의 대기환경기준치를 넘는 날은 13.5%, 일본의 대기환경기준치를 넘



**Table 4.** Correlation between pollutants and visibility of hazy days in Seoul.

pollutants	correlation coefficients with visibility
TSP	-.2717*
SO <sub>2</sub>	-.2946*
NO <sub>2</sub>	-.2617*
O <sub>3</sub>	.2407*
N of cases : 104 1-tailed signif : *-.01 **-.001	

는 날은 31.7%에 달했다.

4) 시정과 NO<sub>2</sub>관계에서 NO<sub>2</sub>는 시정과 낮은 음의 상관(-0.26)을 가지며(표 4), 점점 증가하는 경향을 보인다. NO<sub>2</sub>는 TSP나 SO<sub>2</sub>처럼 특정한 월 변화 경향을 보이지 않고 비교적 5월에서 8월에 낮게 나타나고, 거의 비슷한 분포를 보인다. 선정된 날의 NO<sub>2</sub>평균농도는 0.02-0.107ppm을 기록했고, 우리나라 대기환경기준치를 넘는 날은 한번도 없으나 미국의 대기환경기준치를 넘는 날은 51.9%, 일본의 대기환경기준치를 넘는 날은 41.4-76.9%에 달했다.

5) 시정과 O<sub>3</sub>관계에서 O<sub>3</sub>은 다른 오염물질과는 달리 시정과 낮은 양의 상관(0.24)을 보였고(표 4), NO<sub>2</sub>와 같이 최고 농도에 있어 증가해 가는 경향을 나타냈다. 월 변화 경향에서 O<sub>3</sub>은 6월에서 8월 사이에 농도가 높게 나타났다. 선정된 날의 O<sub>3</sub>평균농도는 0.002-0.098ppm으로 우리나라와 미국의 대기환경기준치를 넘는 날은 한번도 없으나 일본의 대기환경기준치를 넘는 날은 9.6%이다.

6) 선정된 날에 각 오염물질들의 월평균값은 총 월평균값보다 높게 나타났으며, 서울의 시정은 오염물질들과 상관(TSP, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>; 음의 상관, O<sub>3</sub>; 양의 상관)을 가진다. 특히 그림 2와 3에서 보듯이 SO<sub>2</sub>와 TSP농도가 높을 때 저시정이 빈번히 관측되었다. 그리고 O<sub>3</sub>농도가 높은 여름철에도 저시정이 자주 기록되었다. 따라서 서울에서 시정 악화는 단순한 haze가 아닌 오염물과 결합에 의한 smog임을 알 수 있다. 특히, 겨울철은 SO<sub>2</sub>농도가 아주 높아 런던형 smog의 특성을 보이며, 여름은 O<sub>3</sub>농도가 높아 로스엔젤레스형 smog의 특성을 보인다.

7) 서울의 시정은 점점 악화되고 있으며, 이는 대기오염물질의 증대와 인위적인 수증기 배출량이 점점 많아지는데 원인이 있다.

8) 시정과 오염물질간의 관계에서 보았듯이 우리나라의 대기환경기준치는 다른 나라에 비해 너무 높게 책정되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서 대기환경기준치에 대해 재고할 필요가 있다.

9) 오염물질들과 온도와의 상관관계에서 TSP, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>는 높은 음의 상관을 보이며, 특히 SO<sub>2</sub>는

-0.80이라는 높은 상관을 보였다. 이들과 달리 O<sub>3</sub>은 0.80으로 아주 높은 양의 상관을 보였다. 각 오염물질간의 상관관계에서는 TSP와 SO<sub>2</sub>간에 높은 양의 상관(0.63)을 보였고, NO<sub>2</sub>와 O<sub>3</sub>간에는 -0.38로 음의 상관을 보였다.

### 참 고 문 헌

기상청(서울), 일일지상관측표 (1989-1991).  
 민경덕, 김해구 (1990) 한국의 시정의 경년변화와 계절변화. J. Kor. Ear. Sci. Soc. 11, p. 86-99.  
 정용승, 김태군, 정재섭 (1991a) 도시의 대기오염과 시정감소에 관하여. 한국대기보전학회지 8, p. 1-6.  
 정용승, 김태군 (1991b) 대기오염의 장거리 이동 사례연구 : 황사, TSP, Sulphate의 발원지 추적, 한국대기보전학회지 7, p. 197-202.  
 환경처, 오염물질 자료 (1989-1991); TSP, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 등.  
 Adams K. M., Davis L. I., Jr. and Japar S. M. (1990) Real-time, in situ measurements of atmospheric optical absorption in the visible via photoacoustic spectroscopy-IV. Visibility degradation and aerosol optical properties in Los Angeles. Atmospheric. Environment. 224A, p. 605-610.  
 Beebe R. G. (1967) Changes in visibility restrictions over a 20 year period. Bull. Amer. Meteor. Soc. 48, p. 348.  
 Chung Y. -S. (1977) Ground-level ozone and regional transport of air pollutants. J. of Appl. Meteor. 16, p. 1127-1136.  
 Corfield G. A. and Newton W. G. (1968) A recent change in visibility characteristics at Finningley. Meteor. Mag. 97, 204-209.  
 Groblicki P. J., Wolff G. T. and Countess R. J. (1981) Visibility reducing species in the denver 'Brown Cloud'-I. Relationships between extinction and chemical composition. Atmospheric Environment 15, p. 2473-2484.  
 Hindy K. T., Farag S. A. and El-Taieb N. M. (1990) Monthly and seasonal trends of total suspended particulate matter and smoke concentration in industrial and residential areas in cairo. Atmospheric Environment 24B, p. 343-353.  
 Japan Meteorological Agency (1977) Meteorolo-

- gical observation covering the south kanto area.
- Joseph J. H. and Manes A. (1971) Secular and seasonal variation of atmospheric turbidity at Jerusalem. *J. Appl. Met.* 10, p. 453-462.
- Junge C. E. (1963) Air chemistry and radioactivity. Academic Press. New York, p. 383.
- Kurita H., Sasaki K., Muroga H., Ueda H. and Wakamatsu S. (1985) Long-range transport of air pollution under light gradient wind condition. *J. Clim. Appl. Met.* 24, p. 425-434.
- Logan J. a. (1983) Nitrogen oxides in the troposphere : global and regional budgets. *J. Geophys. Res.* 88, p. 10785-10807.
- Naegele P. S. and William D. S. (1981) A study of visibility in eighteen cities in the western and southwestern United States. *Mon. Wea. Rev.* 109, p. 2394-2400.
- Nomoto S. (1983) A Climatological study of visibility in Japan. *Geophys. Mag.* 3, p. 193-284.
- Wakamatsu S., Uno I. and Wadden R. A. (1984) Study on the NMHC source fingerprint and its photochemical reactivity. *Res. Rep. Nat. Inst. Envir. Stud. Jpn.* 61, p. 7-27.
- White W. H. and Roberts P. T. (1977) On the nature and origins of visibility-reducing aerosols in the Los Angeles air basin. *Atmospheric Environment* 11, p. 803-812.
- Yoo Y. S., Kim M. Y., Kil H. K., Yeo I. H., Lee S. C., Kang H. G., Park S. H., Park S. B. (1991) Mutagenicity of airborne particulate organic pollutants in Seoul. *Emerging Issues in Asia : Proceedings of the 2nd IUAPPA Regional Conference on Air Pollution*, P. 345-351.