

최근의 서울 대기질 특성 연구('93~'99)

환경조사팀

안미진, 여인학, 이상열, 정호진, 김학수, 김광진

A study on the characteristics of air quality in Seoul ('93~'99)

Environmental Research Team

Mi-Jin Ahn, In-Hak Yeo, Sang-Yeol Lee, Ho-Jin Jeong, Hak-Su Kim
and Kwang-Jin Kim

Abstract

This study is performed to analyze the characteristics of air quality from variance analysis, cross correlation analysis and factor analysis with air pollutants and the meteorological variables measured in Seoul for 7 years(1993~1999). The distribution of air pollutants shows SO₂ 6~16ppb, NO₂ 26~43ppb, O₃ 9~20ppb, CO 0.7~1.3ppm, TSP 52~110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and PM10 41~86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ are in 50% at the middle of sum(100%). According to Kolmogorov-Smirnov test, the distribution of SO₂ and CO can not reject to the hypothesis of lognormal distribution but the others(NO₂, O₃, PM10 and TSP) normal distribution. According to variance analysis, the pollution of SO₂ and CO has decreased yearly but NO₂, O₃ and PM10 not decreased. Two factors were obtained from cross correlation analysis and factor analysis between air pollutants and meteorological variables. The factor 1 shows air pollutants except O₃ is correlated negatively with meteorological variables. The factor 2 shows O₃ is correlated positively with UV and temperature.

서론

서울시는 1970년대 이후 인구증가와 도시화, 산업화로 아황산가스(SO₂), 총먼지(TSP), 일산화탄소(CO) 등의 오염물질이 대기오염의 주원인 물질이었으나, 1990년대 이후 청정연료 보급의 확대와 급속도로 증가한 차량으로 인해 아황산가스와 총먼지, 일산화탄소의 오염도는 낮아지고 질소산화물(NO_x), 오존

(O₃), 미세먼지(PM10) 및 유해화학물질 등에 의한 오염도가 현저히 증가하고 있다.

대기오염의 분포는 배출량과 기압배치, 난류확산 및 강수량, 풍속 등의 영향을 크게 받으며, 따라서 오염에 영향을 끼치는 인자들의 분석이 중요하다.¹⁾ 도시지역 대기오염농도를 지배하는 요인 중 배출원을 제외하고 가장 영향을 많이 주는 요소는 기상인자로 알려져 있다.²⁾ 대기오염도의 시공간적 변화추세를 파악하기 위해서는 장기간의 자료를 분석하는 것이 필요하다.³⁾

따라서 본 연구에서는 최근 7년간의 서울시 대기오염도를 평가하여 그 특성과 변화추세를 파악하고 기상인자와의 연관성을 통계분석 함으로써 효과적인 오염저감대책을 위한 자료를 제공하고자 한다.

연구 방법

본 연구원에서 대기질 관리를 위해 운영하는 대기오염자동측정장(17개)에 의해 측정하여 데이터베이스가 구축된 7년간(93~99년)의 일 평균 자료와 99년도의 시간자료를 이용하였다.

대기오염자료로는 SO₂, TSP, PM10, NO, NO₂, O₃, CO를 기상자료로는 온도(TEMP), 습도(HUM), 풍속(WS), 자외선량(UV)이며 PM10은 95년부터 측정된 관계로 5년간(95~99년)의 자료이다.

최근 7년간의 대기오염물의 농도분포 및 오염특성을 분석하고 분산분석을 통한 연도별 오염도 변화추세를 파악하며 대기오염물과 기상인자간의 연관성 분석을 위해 교차상관분석 및 인자분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 대기오염 농도분포와 오염 특성

Fig.1은 각 오염물질(SO₂, NO₂, O₃, CO, TSP, PM10)의 농도별 출현빈도를 파악하기 위해 의 7년간 일 평균 자료를 도수분포화 한 것이다.

평균에 대한 비대칭 정도를 나타내는 왜곡도계수가 SO₂는 2.32로써 저농도 영역으로 치우친 양상을 보이며 중앙 50%를 차지하는 농도영역은 6~16ppb이고, CO 역시 약간 저농도 영역으로 치우쳤으며 중앙 50%를 차지하는 농도 영역은 0.7~1.3ppm이다. NO₂는 왜곡도 계수가 0.42로 작고 중앙값(35ppb)과 평균(34ppb)이 유사하며 중앙 50%를 차지하는 농도영역은 26~43ppb이고, O₃, TSP, PM10의 왜곡도 계수는 SO₂나 CO보다 작으나 NO₂보다는 크며 중앙 50%를 차지하는 농도 영역은 9~20ppb, 52~110 μ g/m³, 41~86 μ g/m³이다.

월별 오염도 변화 추세는 Fig. 2와 같다. SO₂, PM10, TSP, CO는 겨울(12~3월)에 최고농도를 보이고 여름(7~9월)에 최저농도를 보이며 O₃는 이와

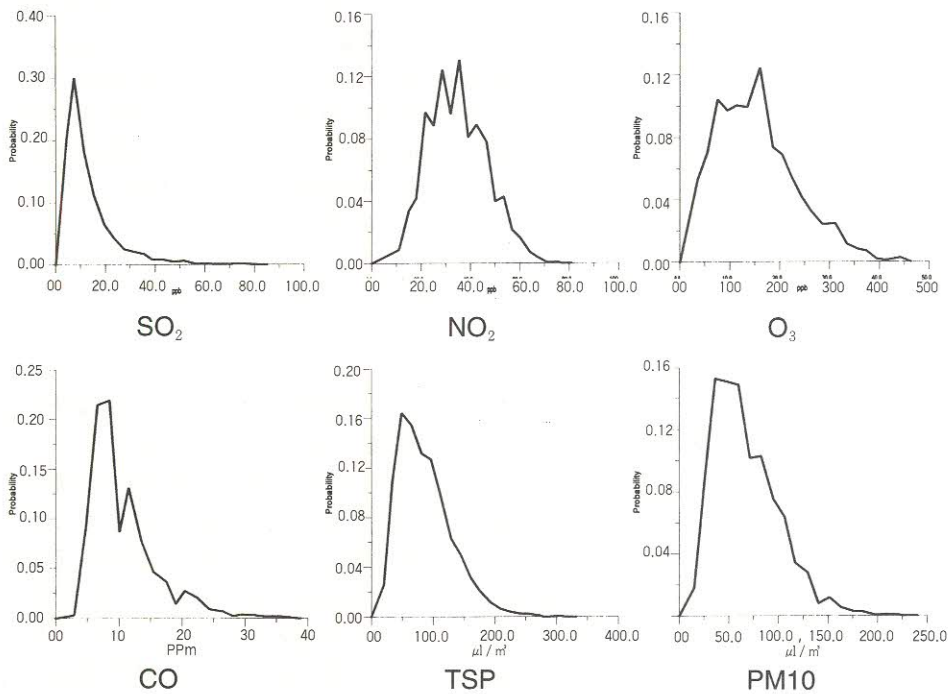


Fig. 1. Frequency distribution of air pollutants for 7 years ('93-99) in Seoul

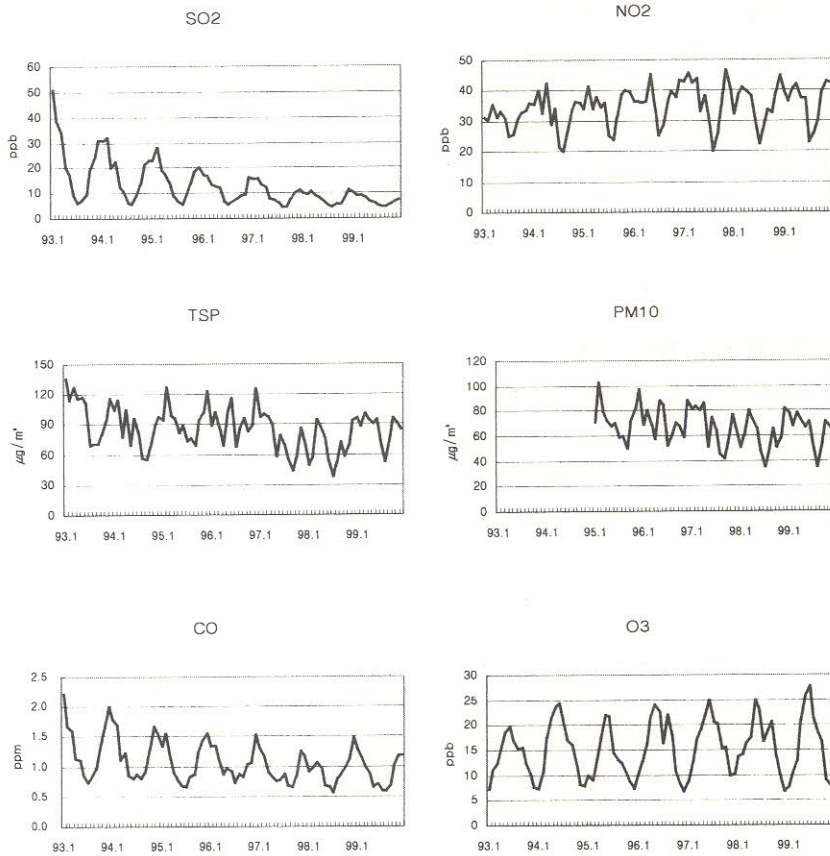


Fig. 2. Variation of air pollution for 7 years(1993-1999) in seoul

반대 양상으로 뚜렷한 계절성을 보여주고 있다. NO₂는 여름에 최저농도를 나타내지만 겨울에서 봄(11월, 2~5월)에 최고농도를 나타낸다.

대기오염물질의 일 변화 특성을 파악하기 위해 최근 1년간(1999년)의 일 중 대기오염도의 변화 추세를 Fig. 3에 나타내었다. SO₂는 6~8ppb사이의 낮은 농

도로 하루 중 변화가 뚜렷하지 않으며, NO, CO, TSP, PM10은 9시경에 최고농도(71ppb, 1.5ppm, 71µg/m³, 95µg/m³)를 보이다가 16시경에 최저농도(16ppb, 0.65ppm, 80µg/m³, 58µg/m³)를 보이고 다시 증가하는 경향을 보인다. NO₂도 유사한 양상을 보이지만 다른 오염물질에 비해 그 농도 변화 폭이 다소

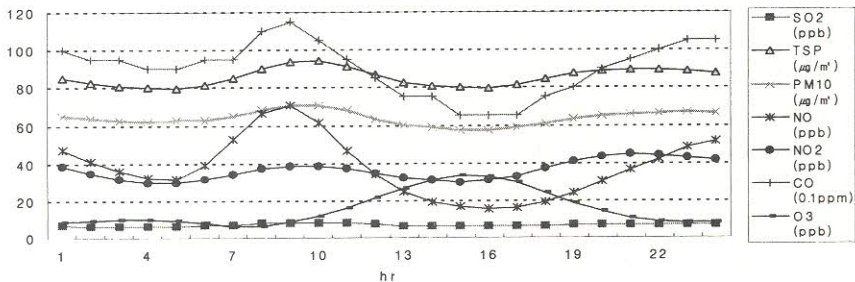


Fig. 3. Diurnal variation of air pollutants for 1 year(1999)

작으며 21시경에 최고농도(45ppb)를 보인다. O₃은 다른 오염물질과는 다르게 15시에 최고농도(34ppb)를 나타내고 있다. 이러한 양상은 자동차가 주요원인으로 작용하여 발생하는 대도시의 광화학 반응의 결과로 사료된다. 즉 출근시간대에 자동차의 배출은 NO 등 1차 오염물질의 농도를 증가시키고 이 NO는 NO₂로 산화되며 NO₂는 태양광에 의해 광분해되고 오존과 같은 2차 오염물질이 형성되기 때문이다.⁴⁾

2. 연도별 대기오염도의 변화 특성

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 SO₂의 농도는 현저히 감소하는 경향임을 볼 수 있는데, 연도별 평균을 비교하기 위해 분산분석을 실시하기 앞서 분산분석의 기본가정인 오차변량의 정상성 가정을 고려하여 오염물이 이론적 확률분포형 중 어느 분포에 적합한지 판단하기 위해 Kolmogorov-Smirnov(K-S)검정을 실시하였다. 7년간의 일 평균 자료로 K-S검정을 한 결과 모두 정규분포성이 없는 것으로 나타났는데 이는 표본크기 n이 커짐에 따라 K-S검정을 위한 한계값 $Dn^* (=1.36/\sqrt{n})$ 이 작아지는 성질 때문으로 판단되어 이런 변수를 줄이기 위해 일 평균 자료를 월 평균 자료로 변환하여 다시 K-S검정을 실시하여 그 결과를 Table 1에 나타냈다.

NO₂, O₃, PM10, TSP는 적합성이 인정되어 정규분포로 볼 수 있으나, SO₂와 CO는 적합성이 인정되지 않아 대수 변환하여 검정해본 결과 그 적합성이 인정되어 대수정규분포(lognormal distribution)를 나타내었다. 이러한 SO₂와 CO의 대수정규분포성은 신찬기 등(1992)⁵⁾에 의해 보고된 결과와 일치하였다.

유의수준 0.05에서 분산분석 하여 Tukey Grouping 한 결과를 Table 2에 나타냈다. SO₂와 CO는 대수변환하여 자료화하였으므로 그 평균값은 대수변환된 것을 다시 변환한 것으로 실제 연 평균과는 다소 차이가 있으며 실제 연평균을 연도 및 괄호 안에 표기하였다. NO₂, O₃, PM10은 귀무가설이 기각(Pr=0.2212, 0.7456, 0.1547)되어 연도별 평균이 다르지 않은 것으로 나타났고, SO₂와 CO는 매년 감소하며, TSP는 93년이 A그룹으로 고농도, 98년이 C그룹으로 저농도로 감소하나 99년에 다시 증가하였다.

따라서 SO₂, CO의 오염도는 개선되었으나 NO₂, O₃, PM10의 오염도는 개선되지 않은 것으로 판단되

었다.

3. 기상인자와의 연관성 분석

대기오염물질과 기상인자 또는 대기오염물질 간의 상관관계의 정도(strength)와 방향(direction)을 측정하기 위해 교차상관분석을 실시하였다.

7년간('93~'99)의 일 평균 자료로 교차상관분석을 한 결과 상관계수가 단순상관분석과 유사하고 지체시간(lag time)도 대부분 0이어서 표는 생략했다. 오염물질간 지체시간이 0이므로 한 오염물질이 고농도를 보이는 날은 상관계수가 높은 다른 오염물질 역시 고농도를 보임을 나타낸다.

1년간('99)의 시간자료로 교차상관분석을 한 결과를 Table 3에 나타냈다. 단순상관에서 TSP는 PM10과 0.96이상의 상관계수를 가지고 다른 항목과의 상관계수 패턴도 유사하여 Table에서 제외시켰고, 지체시간(lag time)은 24시간을 주기로 하였다.

SO₂-PM10·NO·CO, PM10-NO₂·CO, NO-NO₂·CO, NO₂-CO간에 지체시간 0~±1에서 0.5 이상의 상관계수를 나타내어 이들 물질들간에는 0~1 시간정도의 차이를 두고 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

CO의 다른 오염물질과의 상관계수가 모두 0.5이상이므로 대기오염지표로서 CO의 사용 가능성을 시사해준다. 기상인자 중 풍속은 NO, NO₂, CO, O₃과 0.5이상의 상관계수를 나타내나, SO₂, PM10과는 낮은 상관계수를 나타냈다. O₃은 풍속, 습도, 자외선량과 음의 상관관계를, 온도와는 양의 상관관계를 나타내어 타 오염물질들과 다른 양상의 오염패턴을 나타내었다. 주요 오염물질, 기상인자간의 교차상관관계를 나타낸 Fig. 4에서 풍속-CO·NO와의 그래프는 풍속-O₃과의 그래프와 반대양상을 보이고 있다. 자외선량-O₃의 교차상관그래프는 2시간의 지체시간에서 높은 상관계수(0.7655)를 나타내고 그래프의 경사가 급하여 10시간 전후로 음의 상관관계를 나타내는데, 이 관계를 더 연구한다면 상대적으로 측정이 간단한 자외선량 측정치만으로 오존 경보제를 시행하기 어려운 지역에 응용하는 방안도 고려할 수 있으리라 생각된다.

Fig. 5에 오염물질과 기상인자간의 산포도를 나타내었다. SO₂는 0℃의 온도에서 고농도를 나타내고, O₃은 20℃ 이상에서 고농도를 나타내며, 풍속

Table 1. Results of Kolmogoronov-Smirnov test ($\alpha=0.05$)

Variable Type		n=84, Dn α =0.14600										n=60, Dn α =0.17000	
		SO ₂		NO ₂		O ₃		CO		TSP		PM10	
		Dn	Skewness	Dn	Skewness	Dn	Skewness	Dn	Skewness	Dn	Skewness	Dn	Skewness
Original		0.1824	1.8524	0.0746	-0.4232	0.0970	0.2254	0.1498	1.0050	0.0577	0.0327	0.0678	-0.0171
Log trnasformation		0.1141	0.4748	-	-	-	-	0.1225	0.3697	-	-	-	-

Table 2. Results of variance analysis

log SO ₂ (f = 7.37, Pr = 0.0001)				SO ₂ (f = 1.41, Pr = 0.2212)				O ₃ (f = 0.58, Pr = 0.7456)			
Tukey	Grouping	Mean (original)	Year	Tukey	Grouping	Mean	Year	Tukey	Grouping	Mean	Year
	A	-1.7427	93		A	0.0369	97		A	0.0164	97
	A	(0.0222)			A				A		
B	A	-1.8240	94		A	0.0365	96		A	0.0164	98
B	A	(0.0173)			A				A		
B	A	-1.8610	95		A	0.0364	99		A	0.0159	96
B	A	(0.0154)			A				A		
B	A C	-1.9810	96		A	0.0351	98		A	0.0156	99
B	C	(0.0112)			A				A		
B	C	-2.0531	97		A	0.0348	95		A	0.0155	94
	C	(0.0096)			A				A		
	C	-2.1294	98		A	0.0322	94		A	0.0136	93
	C	(0.0078)			A				A		
	C	-2.1816	99		A	0.0314	93		A	0.0134	95
	C	(0.0068)									
log CO (f = 2.86, Pr = 0.0145)				TSP (f = 4.75, Pr = 0.0004)				PM10 (f = 1.74, Pr = 0.1547)			
Tukey	Grouping	Mean (original)	Year	Tukey	Grouping	Mean	Year	Tukey	Grouping	Mean	Year
	A	0.1045	93		A	102.0	93		A	73.6	95
	A	-(1.35)			A				A		
B	A	0.0641	94	B	A	94.0	95		A	70.4	96
B	A	(1.21)		B	A				A		
B	A	0.0138	95	B	A	92.9	96		A	67.0	97
B	A	(1.08)		B	A				A		
B	A	0.0134	96	B	A C	85.9	99		A	64.1	99
B	A	(1.06)		B	A C				A		
B	A	-0.0415	97	B	A C	84.5	94		A	59.7	98
B	A	(0.93)		B	C						
B	A	-0.0487	98	B	C	75.9	97				
B	A	(0.92)			C						
B	A	-0.0582	99		C	66.9	98				
	A	(0.91)									

1.5m/sec 이하에서 고농도를 나타낸다. 자외선량과 NO의 산포도는 풍속의 산포도와 유사한 모양이며 2 mW/cm² 이하에서 고농도 현상을 나타내고, O₃은 자외선량 3~6mW/cm² 부근에서 고농도 현상을 나타낸다.

상관행렬을 바탕으로 동질의 변화성을 갖는 변수들

을 찾아내어 몇 개의 인자(factor)로 해석하기 위해 인자분석(주축인자분석)을 실시하여 Kaiser의 규칙에 따라 고유값(Eigen Value)이 1 이상인 인자 중 의미 있는 인자 2개를 채택하여 각 인자별 인자부하량을 산출한 결과를 Table 4에 나타내었다. 인자에 대한 해

Table 3. Cross correlation matrix(cross correlation coefficient & lag time)

	SO ₂	PM10	NO	NO ₂	CO	O ₃	WS	TEMP	HUM	UV
SO ₂	1.000 0									
PM10	0.578 0	1.000 0								
NO	0.587 1	0.434 1	1.000 0							
NO ₂	0.687 1	0.600 1	0.624 0	1.000 0						
CO	0.704 1	0.599 1	0.900 1	0.738 0	1.000 0					
O ₃	-0.231 1	-0.125 0	-0.470 1	-0.355 0	-0.480 0	1.000 0				
WS	-0.290 3	-0.304 2	-0.525 2	-0.522 0	-0.553 1	0.511 0	1.000 0			
TEMP	-0.434 24	-0.129 24	-0.381 24	-0.267 17	-0.478 24	0.445 0	-0.201 -12	1.000 0		
HUM	-0.367 19	0.067 1	-0.179 12	-0.244 8	-0.203 11	-0.358 0	-0.403 -23	0.499 -12	1.000 0	
UV	-0.164 -20	-0.127 2	-0.304 3	-0.243 1	-0.341 2	0.765 2	0.407 2	0.437 2	-0.416 2	1.000 0

Table 4. Result of fator analysis

Eigen values of the reduced Correlation Matrix Total=8.73649 Average=0.79422				Factor Pattern			Rotated Factor Pattern		
Factor	Eigen value	Proportion	Cumulative	Variable	Factor1	Factor2	Variable	Factor1	Factor2
1	5.2316	0.5988	0.5988	CO	0.9416	0.0188	PM10	0.9633	0.0364
2	1.7753	0.2032	0.8020	NO	0.8601	-0.0360	TSP	0.9138	-0.0098
3	1.1812	0.1352	0.9372	PM10	0.8250	0.4344	CO	0.8280	-0.4439
4	0.4428	0.0507	0.9879	TSP	0.8034	0.3852	NO ₂	0.7737	-0.2116
5	0.3546	0.0406	1.0285	NO ₂	0.7739	0.2115	NO	0.6969	-0.5329
6	0.0791	0.0091	1.0375	SO ₂	0.7302	-0.1074	SO ₂	0.6409	-0.2974
7	0.0184	0.0021	1.0397	WS	-0.5398	-0.3658	WS	-0.5598	0.1862
8	-0.0286	-0.0033	1.0364	O ₃	-0.5599	0.4434	O ₃	-0.1910	0.8337
9	-0.0742	-0.0085	1.0279	TEMP	-0.4669	0.8398	UV	-0.1202	0.7765
10	-0.0962	-0.0110	1.0169	UV	-0.4884	0.5505	TEMP	-0.0817	0.6976
11	-0.1474	-0.0169	1.0000	Hum	-0.0979	0.2863	Hum	-0.0735	-0.0399

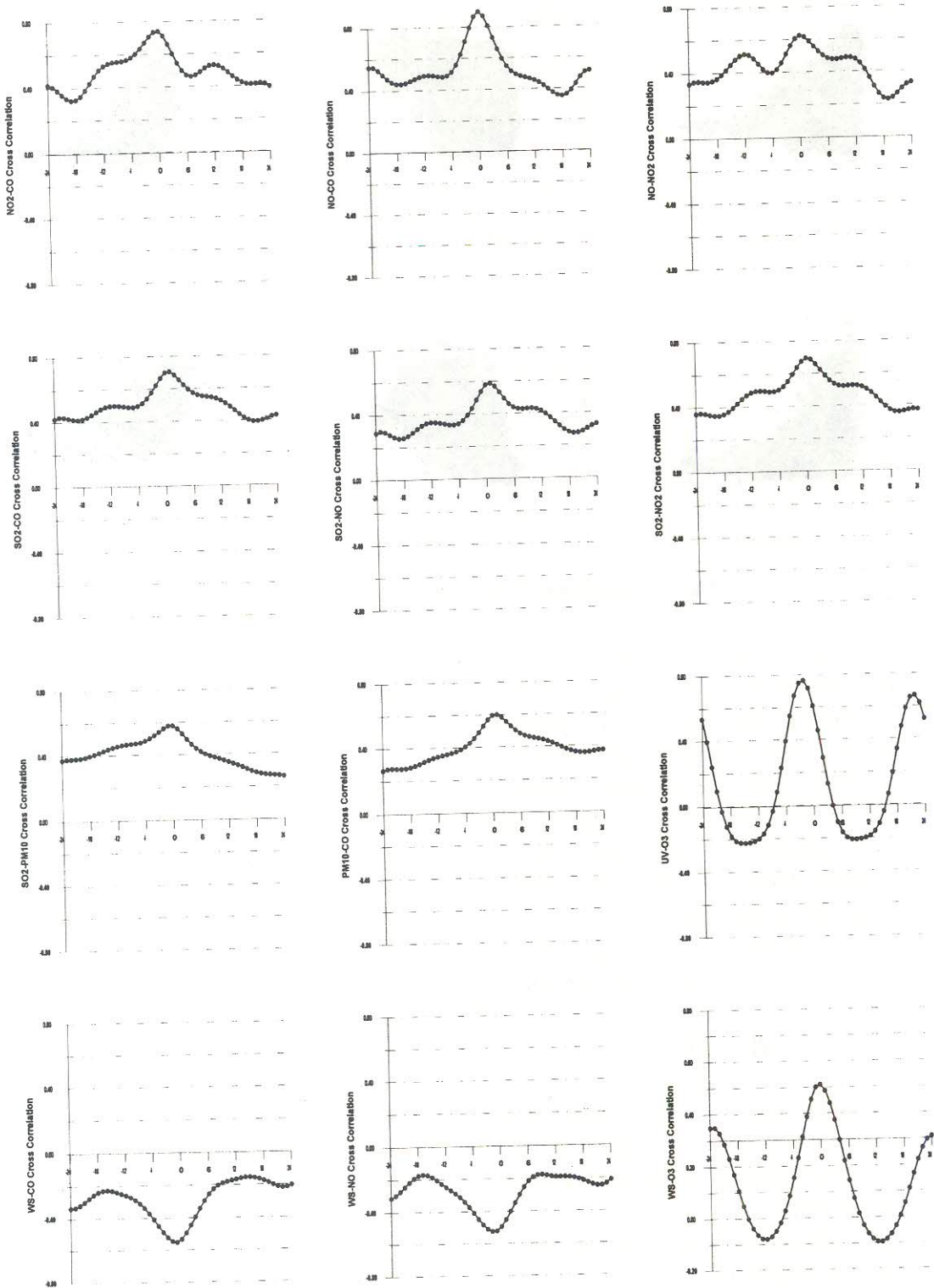


Fig. 4. Cross correlations

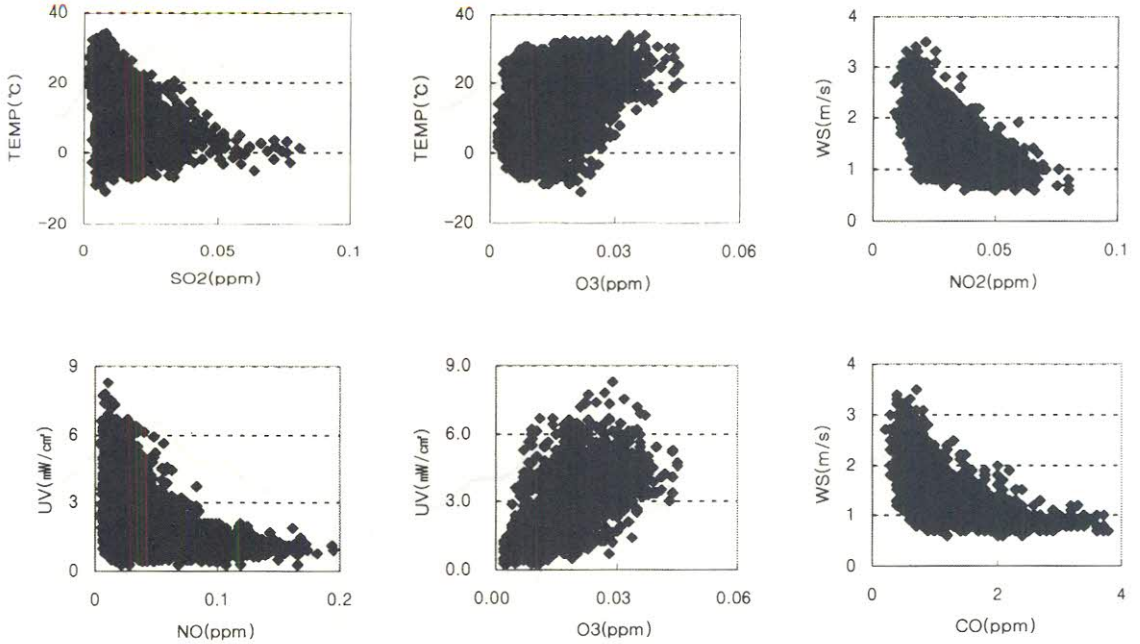


Fig. 5. Schatterdiagram of air pollutants and meteorological data

석을 단순화시키기 위해 직교회전(orthogonal rotation)시켰다. 인자 1은 기상인자와 오존에 부의 적재를 보이고 다른 오염물질은 모두 양의 적재를 나타냈는데 모두 고르게 큰 적재치를 보이고 있어 O₃을 제외한 오염물질이 기상인자와 역비례하는 오염패턴을 이루는 것으로 해석되었다. 인자 2는 PM10과 O₃이 기상인자 중 자외선량, 온도, 풍속과 양의 적재를 보이는데 오염물질 중에는 O₃의 적재치가 크고 기상인자 중에는 자외선량과 온도의 적재치가 크므로 O₃이 자외선량과 온도가 높은 날 오염도가 높아지는 것으로 판단되었다. 2개 인자의 누적 기여율은 80.2%이었다.

결론

최근 7년간(93~99년)의 서울시 대기오염도 및 농도분포, 변화특성을 분석하고, 대기오염물질과 기상인자와의 관련성을 인자분석과 교차상관분석으로 검토한 결과는 다음과 같았다.

1. 대기오염물질의 농도분포는 SO₂ 6~16ppb, NO₂ 26~43ppb, O₃ 9~20ppb, CO 0.7~1.3ppm, TSP 52~110 μ g/m³, PM10 41~86

μ g/m³가 중앙 50%를 차지하였다.

2. K-S검정으로 확률분포형을 검증해본 결과 유의수준 0.05에서 SO₂와 CO는 대수정규분포를, NO₂, O₃, TSP, PM10은 표준정규분포를 이루었다.
3. SO₂, NO₂, O₃, CO, TSP, PM10의 오염도 변화 추이를 유의수준 0.05에서 분산분석을 통해 분석해본 결과 SO₂와 CO의 오염도는 개선되었으며 TSP의 오염도는 감소 추세이나 99년에 약간의 증가를 보였고 NO₂, O₃, PM10의 오염도는 개선되지 않은 것으로 나타났다.
4. 1년간('99)의 기상인자와 대기오염물질의 교차상관분석 결과 SO₂-PM10, NO, CO, PM10-NO₂, CO, NO-NO₂, CO, NO₂-CO간에 지체시간 0~ \pm 1에서 0.5이상의 상관계수를 나타내며, O₃은 풍속, 습도, 자외선량과 음의 상관계수를, 온도와는 양의 상관계수를 가짐으로써 타 오염물질들과 다른 오염양상을 나타내었다. 특히 자외선량과 O₃은 2시간의 지체시간에서 높은 상관계수(0.7655)를 나타내었다.
5. 기상인자와 대기오염물질의 산포도를 통해 SO₂

- 는 0℃의 온도, O₃는 20℃ 이상의 온도와 3~6 mW/cm²의 자외선량에서, NO는 2mW/cm² 이하의 자외선량에서 고농도를 보이며 풍속이 1.5m/sec 이하일 때 고농도가 나타남을 알 수 있었다.
6. 대기오염물질과 기상인자의 인자분석으로 인자 2개를 추출하였는데 인자1은 O₃을 제외한 다른 오염 물질이 기상인자와 역비례 관계에 있었고, 인자2는 O₃과 자외선량, 온도와의 연관성을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Garnett, A : Recent trends in Sulurdioxide air pollution in the Sheffield urban region.

- Atmos. Environ., 14:787 ~ 796(1980)
2. Wilkins, E.T. "Air pollution in a London Smog" Mechanical engineering, 426-429 (1954)
3. EPA, National Air Quality and emissions Trends Report, (1991)
4. 김건, 박종운, 한화진, 허황, 환경화학, 천문각, pp.70-729(1994)
5. 신찬기, 한진석, 김윤신, 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구-서울 광화문지점을 중심으로-국립환경연구원, (1992)