

수원지역 대기 중 PM_{2.5}와 PM₁₀의 환경거동에 관한 연구

Studies on the Environmental Behaviors of Ambient PM_{2.5} and PM₁₀ in Suwon Area

김 병 화 · 김 동 술

경희대학교 환경·응용화학부 환경학 및 환경공학전공

(1999년 7월 20일 접수, 2000년 2월 10일 채택)

Byoung-Hwa Kim and Dong-Sool Kim

Department of Environmental Science and Engineering,

School of Environment and Applied Chemistry, Kyung Hee University

(Received 20 July 1999; accepted 10 February 2000)

Abstract

A total of 318 particulate sample sets consisting of both fine PM (FPM: $d_p \leq 2.5 \mu\text{m}$) and coarse PM (CPM: $2.5 \mu\text{m} < d_p < 10 \mu\text{m}$) was collected by a dichotomous sampler in Suwon area from December 1996 to November 1997. The concentration of seven inorganic elements such as Pb, Cr, Cd, Cu, Zn, Fe, and Na were determined from each sample using an AAS. The purpose of the study was to extensively investigate environmental behaviors of particulate matters and to provide air quality management schemes applying various statistical approaches. The mean concentrations of PM₁₀, FPM, and CPM were 69.6, 46.3, and 23.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Judging from the number of cases exceeding the ambient air quality standard, the pollution level of FPM was distinctively serious compared to PM₁₀. Results of correlation analyses indicated the existence of strong correlations among inorganic elements, PM₁₀, FPM, CPM, and various meteorological variables. Our study also examined the degree of uncertainties whether the particular elements can be assorted into the accumulation mode or the coarse mode in their size distribution. Furthermore the analysis of the pollution rose showed graphically the direction of potential sources of particulate matters. According to statistical analyses of our data, quantitative differences appeared in the pollution patterns between weekdays and weekends.

Key words : PM₁₀, PM_{2.5}, air pollution management, pollution rose, Suwon

1. 서 론

우리 나라는 PM₁₀에 대한 기준을 1995년부터 신설하여 현재 TSP와 병행하여 규제하고 있다. 그러나, 미세입자(PM_{2.5}; $d_p \leq 2.5 \mu\text{m}$)로서 이하 fine parti-

culate matters (FPM)로 칭함에 대한 관리규제와 기초연구는 아직까지 미흡한 형편이다. 비교적 최근까지 FPM에 대한 연구가 일부 도심이나 청정지역에 국한해 일정기간 동안 한정적으로 수행되었으나(강충민 등, 1998; 배민석과 김영준, 1998; 강창국 등, 1997; 강병욱 등, 1997; 이종훈 등, 1997; 전준민 등,

1997; 김성우와 김운신, 1997; 안준영 등, 1997; 장지훈, 1994) 대기질 개선에 중요한 자료의 축적은 전반적으로 미흡하다. 대기질 개선은 철저한 정도관리에 입각하여 장기간 측정을 수행하고 연구목적에 부합된 자료분석법과 통계분석법을 개발할 때, 즉 대기오염의 기초연구를 강화할 때 이룩될 수 있다. 참고로 미국은 이미 1997년부터 입자상 오염물질에 대한 국가 환경대기질 기준을 개정·강화하여, 기존의 PM₁₀ 기준 이외에 FPM 기준을 추가한 바 있다 (U.S. EPA, 1997).

국내 대기오염의 원인에 대한 합리적 규명과 관리 및 통제를 위해서는 대기오염물질 및 오염원에 관한 기본조사가 선행되어야 할 것이다. 또한 지역 대기질에 관한 정확한 자료가 필요하다. 본 연구는 수원지역 일반 대기질 현황을 파악하고자 FPM (PM_{2.5}; $d_p \leq 2.5 \mu\text{m}$)와 CPM ($2.5 \mu\text{m} < d_p < 10 \mu\text{m}$)를 채집하고 화학적 조성을 분석하였다. 이들 자료를 바탕으로 상관분석, t-test, 오염장미 등의 분석방법을 실행하여 대기오염물질의 농도분포에 대한 특성을 제시하고자 하였다. 장기적, 일관적, 연속적으로 측정된 본 연구자료는 추후 대기환경 기준 설정 또는 연구지역에 대한 대기질 관리의 유용한 자료로 활용될 것으로 사료된다.

2. 실험방법

2.1 연구지역 현황

경기도 수원시와 용인시의 경계면에 위치한 본 연구지역은 인구증가와 산업발달, 생활수준의 향상 등으로 도시규모가 거대화되며 다양한 환경문제에 직면하고 있다. 본 연구를 위한 분진시료의 채취지점은 경희대학교 수원캠퍼스 자연과학대학 옥상(5층)으로 1996년 12월 1일부터 1997년 11월 31일까지 만 1년에 걸쳐 실시하였다. 시료 채취지점은 주변의 장애물 또는 물리적 환경의 영향을 최소화할 수 있는 지점이며, 대략 경부고속도로의 신갈 인터체인지(수원 톨게이트)로부터 서쪽으로 약 4km에 위치해 있다. 한편, 연구지역 주변은 수원시와 오산을 연결하는 국도와 간선도로가 잘 발달되어 있고, 1994년 이래 영통지구 택지개발사업이 대규모로 진행되고 있다. 측정기간 동안의 기상상태는 수원 측후소에서 측정된 기상자료(기상월보, 1997, 1996)를

Table 1. A summary of meteorological information during the whole study periods in Suwon (Feb. 1996 to Nov. 1997).

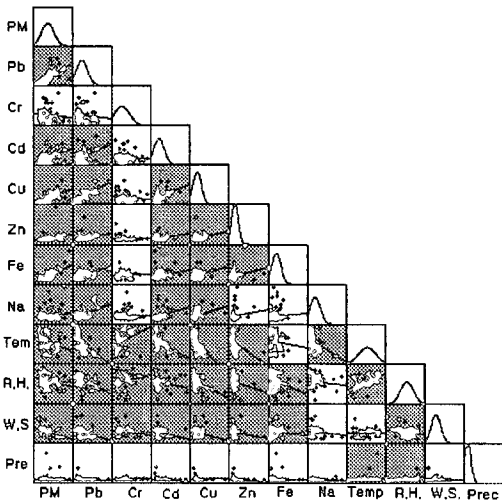
	Temp.	R.H.	W.S.	Prec.	W.D.
Total	12.6	65.3	1.68	1199.8	WSW
Win.	-0.7	56.8	1.57	71.3	WSW
Spr.	12.4	62.3	1.90	301.0	WSW
Sum.	25.1	75.6	1.69	699.7	WSW
Fall	13.4	66.5	1.56	127.8	WSW

Temp. : temperature (°C)
 R.H. : relative humidity (%)
 W.S. : wind speed (m/s)
 Prec. : precipitation (mm)
 W.D. : wind direction.

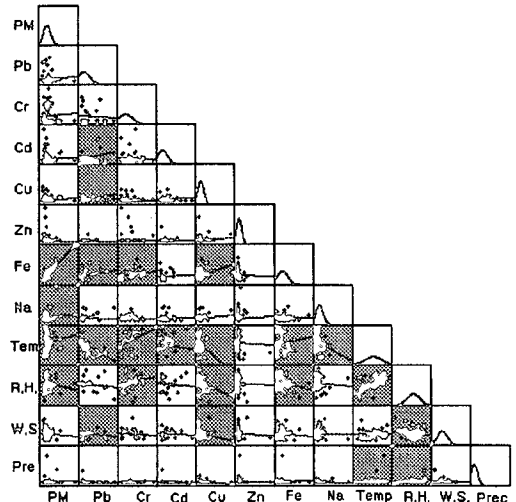
사용하였다(표 1). 측정기간 동안의 평균기온은 12.6°C, 평균상대습도는 65.3%, 연 강수량은 1,200 mm, 풍속은 1.7 m/s로 조사되었으며, 풍향은 주로 서남서향의 서풍계열이었다.

2.2 시료의 채취

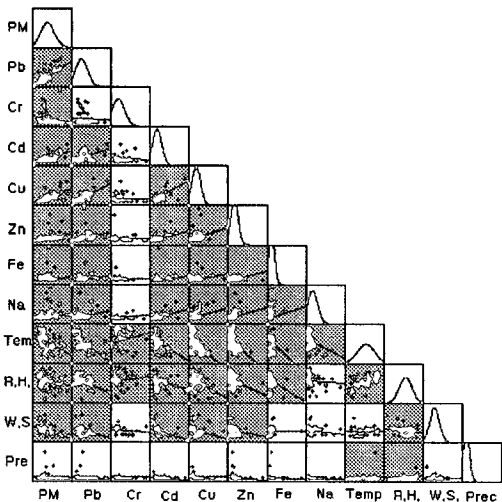
시료채취는 dichotomous sampler (Graseby Andersen, Model SA241)를 사용하였으며, 시료의 개수는 미세입자 (PM_{2.5}; $d_p \leq 2.5 \mu\text{m}$ 로서 이하 fine particulate matters (FPM)로 칭함)와 거대입자 ($2.5 \mu\text{m} < d_p < 10 \mu\text{m}$ 로서 이하 coarse particulate matters (CPM)로 칭함. 따라서 PM₁₀ ≃ FPM+CPM이 성립함) 각각 318 개씩 채취하였다. 채취유속은 CPM의 경우 1.67 L/min, FPM의 경우 15.03 L/min으로서, 총 유속을 16.7 L/min (1 m³/hr)으로 맞추고, 여지 교체시 변화한 유속을 체크하여 유량계산에 사용하였다. 실험에 사용된 여지는 pore size 2 μm, 직경 37 mm의 ringed teflon filter (Graseby Andersen, TEF-DISC)로서 낮은 바탕농도를 가지고 있으며, XRF, INAA, ICP, IC, AAS 등의 방법으로 분석하기에 알맞은 여지로 알려져 있다 (Chow, 1995). 여지는 시료채취를 전후로 하여 3일간 항온, 항습상태의 데시케이터 내에 보관하였다. 이를 항량시킨 후 0.01 mg의 감도를 가진 전자저울 (A & D Co., Model HM-202)로 칭량하고, 칭량 전후의 무게 차로 분진의 무게를 구하였다. 최종적으로 이를 유량으로 나눠서 분진의 농도를 산출하였다. 이러한 계산 방법은 manual에서 제시한 식을 사용하였다. 여지 위에 채취된 입자의 무기원소 분석을 위한 전처리 방법은 미국 EPA에서 고시한 CWA (Clean Water Act)의 microwave 전처리



(a) scatter-plot matrix for PM₁₀



(c) scatter-plot matrix for CPM



(b) scatter plot matrix for FPM

Fig. 1. Scatter-plot matrices for various constituents and parameters associated with FPM, CPM, and PM₁₀. Gray color denotes p-values below 0.05.

50, Cr 15, Cd 3, Cu 4, Zn 14, Fe 40, Na 60 ng/m³이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PM₁₀과 무기원소의 농도분포

PM₁₀, FPM 및 CPM의 질량농도와 각 무기원소의 농도현황을 조사하였다. 계절별 분석을 위해 편이상 96년 12월~97년 2월(겨울), 3월~5월(봄), 6월~8월(여름), 9월~11월(가을)로 구분하였다. 시료의 개수는 FPM과 CPM에 대해 각각 318개(겨울: 78, 봄: 83, 여름: 80, 가을: 77개)씩 총 636개였다.

본 측정지점에서의 PM₁₀의 중량농도는 평균 69.6 µg/m³, FPM 농도는 평균 46.3 µg/m³, CPM 농도는 평균 23.3 µg/m³였다. 무기원소의 농도는 PM₁₀과 FPM에서는 Na>Fe>Zn>Pb>Cu>Cr>Cd 순으로 높게 나타났으며, 특히 Na과 Fe은 PM₁₀ 농도의 3.4, 1.1%를 각각 차지하고 있었다. 한편, 저농도로 관찰된 Cd의 경우 총 318개의 시료 중 검출한계 이상으로 관찰된 경우는 233개였다. CPM에서는 Na>

법인 Questron (Questron Co., Model Q-15 Micro-Prep)을 이용한 질산 전처리법을 수행하였다. 전처리가 끝난 시료는 AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer, Hitachi, Model Z-6100)를 사용하여 Pb, Cr, Cd, Cu, Zn, Fe, Na 등 7개 무기원소성분을 분석하였다. AAS의 검출한계는 본 연구에 사용된 filter의 바탕시험에 대한 3σ (3 standard deviation)로 Pb

Fe>Zn>Pb>Cr>Cu>Cd 순으로 Cu와 Cr의 순서에서만 차이를 보였다. 또한 대기 중 PM₁₀이나 무기성분의 농도는 계절별로 다양한 추세를 보였는데 대부분 겨울이나 봄철에 최고값을 보였으며, 여름철에 최저값을 보였다. 겨울철 대기 중 고농도의 분진이 관찰되는 것은 대기 안정도에 의한 지표 역전, 건조한 대기 상태, 화석연료 사용량의 증가 등의 요인에 영향받은 것으로 사료되며, 봄철에는 중국으로부터 편서풍을 타고 유입되는 황사의 영향으로 고농도의 분진이 관찰된 것으로 사료된다. 여름철에는 분진의 농도가 연중 최저치를 기록하였는데 이는 FPM의 경우 불안정한 대기 상태에 의해 상층대기로 유입되어 빗방울을 형성하는 응축핵으로 작용하여 제거되는 rainout 현상과 CPM의 경우 강수에 의해 대기 중에서 제거되는 washout 현상에 기인하는 것으로 사료된다(이태정과 김동술, 1997).

3.2 측정변수간의 상관성 분석

측정변수간의 상관성 분석을 위하여 PM₁₀, FPM 및 CPM 영역으로 나누고 다시 계절별로 세분화하여 분석을 수행하였다. 대략적인 상관관계를 나타내는 scatter-plot matrix를 그림 1에 제시하였다. 상관분석과 t-test는 SPSS 9.0을 사용하였으며, scatter-plot matrix는 SYSTAT 8.0을 사용하였다. 그림에서 회색으로 표시된 box는 p-값이 0.05 이하인 경우이다.

각 box에는 x축 변수와 y축 변수의 자료에 대해 선형 상관성 여부를 파악하기 위해서 회귀선을 첨부하였다. X축과 y축의 항목이 동일한 경우에는 해당 자료의 분포를 정규분포선(normal curve)로 표시하였다. 이러한 scatter-plot matrix는 자료에 내재된 선형 또는 비선형 관계를 시각적으로 쉽게 파악할

수 있고, 이상자료(outlier) 및 특이분포를 쉽게 파악할 수 있어 유용한 체거름(screening) 방법으로 활용할 수 있다.

3.2.1 분진과 기상인자와의 상관관계

먼저 PM₁₀과 기상인자와의 상관성을 살펴보면, 온도, 상대습도, 풍속, 강수량과 모두 음의 상관관계($r = -0.27, -0.25, -0.38, -0.06$)를 보였으나 강한 상관관계를 보이는 항목은 없었다(표 2). 다만 이를 계절별로 살펴보면 겨울과 가을철에는 풍속과 보통 이상의 상관관계($r = -0.62, -0.57$)를, 여름철에는 상대습도와 보통이상의 상관관계($r = -0.51$)를 갖는 것으로 나타났다. FPM 역시 온도, 상대습도, 풍속, 강수량과 모두 음의 상관관계($r = -0.43, -0.26, -0.50, -0.10$)를 보였다. 이는 기온이 낮아 난방연료의 사용량이 늘고, 대기가 안정되어 풍속이 느리며, 건조한 대기상태에서 PM₁₀ 및 FPM의 발생량이 증가하며 강수시 세정효과에 의해 대기 중 농도가 낮아지는 일반적인 특성과 일치하는 것이다. 한편 CPM의 경우 일부 계절에 한해 일부 기상인자와 보통의 상관관계를 나타냈을 뿐 상관의 정도가 매우 약했거나 통계적으로 의미가 있다고 볼 수 없었다. 이중 온도와의 상관성은 CPM의 경우 약한 양의 상관관계($r = 0.12$)를 보인 반면 FPM은 상대적으로 강한 음의 상관관계($r = -0.43$)를 보였다. 이는 기온이 낮으면 난방연료 사용에 의해 FPM의 농도는 증가하는 반면, 기온의 변동이 CPM의 농도에 큰 영향을 주지 않으리라 시사한다. 또한 PM과 상대습도와의 상관관계를 살펴보면, PM₁₀, FPM 및 CPM은 모두 여름철에만 상대습도와 음의 상관성이 관찰되었다($r = -0.51, -0.47, -0.50$). 이는 측정기간 중 여름철

Table 2. Correlation coefficients among PM, inorganic species and meteorological factors.

	PM ₁₀					FPM					CPM				
	PM	Temp.	R.H.	W.S.	Prec.	PM	Temp.	R.H.	W.S.	Prec.	PM	Temp.	R.H.	W.S.	Prec.
PM		-0.27	-0.25	-0.38	-0.06		-0.43	-0.26	-0.50	-0.10		0.12	-0.12	-0.07	0.02
Pb	0.59	-0.51	-0.33	-0.32	-0.10	0.70	-0.47	-0.37	-0.30	-0.10	0.03	-0.36	-0.11	-0.12	-0.05
Cr	-0.09	0.44	0.25	-0.12	0.07	-0.17	0.20	0.16	-0.06	0.06	0.05	0.40	0.21	-0.10	0.04
Cd	0.38	-0.31	-0.18	-0.26	-0.10	0.50	-0.32	-0.19	-0.28	-0.09	0.02	-0.12	-0.09	-0.04	-0.09
Cu	0.44	-0.51	-0.34	-0.24	0.03	0.58	-0.51	-0.35	-0.24	0.07	0.05	-0.34	-0.20	-0.14	-0.07
Zn	0.24	-0.26	-0.18	-0.12	-0.07	0.41	-0.40	-0.25	-0.16	-0.09	-0.05	-0.02	-0.3	-0.02	-0.02
Fe	0.56	-0.09	-0.30	-0.09	0.01	0.18	-0.30	-0.26	-0.01	-0.05	0.79	0.12	-0.17	-0.10	0.05
Na	0.13	-0.36	-0.08	-0.10	-0.05	0.16	-0.30	-0.06	-0.11	-0.04	0.12	-0.22	-0.06	-0.01	-0.04

(Bold denotes p-value is below 0.05, N = 318)

에 상대습도가 가장 높았으며 변동의 폭이 가장 낮았던 특성 (76±9°C, mean±1 SD)을 고려할 때, 응축이나 응결에 의해 제거되는 분진은 특정 고습도 하에서만 선형관계를 유지하리라고 사료된다. 강수량과 PM₁₀, FPM, CPM과는 거의 상관관계가 나타나지 않았는데 (r = -0.06, -0.10, 0.02), 이는 분진농도의 변동폭(각각 69.6±24.9, 46.3±25.6, 23.3±16.0 µg/m³, mean±1 SD)에 비해 강수량의 변동폭(3.8±15.9 mm, mean±1 SD)이 매우 심했으며, 강수량이 0 mm인 경우가 총 70% 이상으로 자료가 한쪽으로 치우친 데 따른 결과로 사료된다. Finlayson-Pitts와 Pitts (1986)에 의하면 강수에 의해 제거되는 세정효율은 FPM보다 CPM이 더 높은 것으로 보고된 바 있다.

3. 2. 2 분진과 무기원소와의 상관관계

각 분진의 크기 영역별로 무기원소의 농도변화는 일차적으로 분진의 중량농도에 영향을 받을 수 있다 (Kim *et al.*, 1997). 각 무기원소 성분과 분진간의 상관성을 살펴보면, 먼저 PM₁₀ 영역에서는 Cr (r = -0.09)을 제외한 무기원소들과 분진 사이에 양의 상관관계를 확인할 수 있었으며, 특히 PM₁₀과 Pb, Cd, Cu, Zn, Fe 은 전체기간 (r = 0.59, 0.38, 0.44, 0.24, 0.56) 혹은 일부 계절 동안 어느 정도 강한 양의 상관성을 보였다(표 3). FPM 영역에서 분진농도와 무

기원소 간에도 역시 Cr (r = -0.17)을 제외하고 모두 양의 상관관계를 확인할 수 있었다. 특히 Pb, Cd, Cu, Zn은 어느 정도 강한 양의 상관성 (r = 0.70, 0.50, 0.58, 0.41)을 보였다. CPM 영역에서는 분진농도와 무기원소 간에는 Fe만이 측정기간 내내 강한 상관성 (r = 0.79 (전기장), 0.48 (겨울), 0.80 (봄), 0.89 (여름), 0.79 (가을))을 보였으며, Na과는 겨울철에 어느 정도 강한 양의 상관관계 (r = 0.47)를 보였다.

이처럼 분진과 무기성분과의 상관관계를 해석해 보면, FPM 크기영역에 편중되어 있는 것으로 알려져 있는 Pb, Cd, Cu 및 Zn의 경우, 모두 FPM 농도와 일정 수준이상의 양의 상관성을 보여 주었다. 반면, CPM 크기영역에 편중되어 있다고 알려져 있는 Fe 와 Na의 경우, CPM 농도와 어느 정도 강한 상관성을 갖고 있는 것으로 확인되었다.

3. 2. 3 무기원소 상호간의 관계

각 무기원소간의 상관관계를 살펴보면(표 4), PM₁₀ 영역에서 Pb과 Cd, Cu 사이에 전 계절에 걸쳐 모두 보통 이상의 양의 상관관계가 관찰되었다 (r = 0.47 (Pb-Cd), 0.66 (Pb-Cu), 0.50 (Cu-Cd)), 이러한 상관성의 강도는 FPM 영역에서도 확인되었다 (r = 0.46 (Pb-Cd), 0.64 (Pb-Cu), 0.52 (Cu-Cd)). 이는 PM₁₀과 FPM의 Pb, Cd, Cu가 동일한 오염원에서 배출되었을 가능성을 시사하는 것이며, 이들 원소의 중량농도가 FPM에 편중되었을 가능성을 시사한다. CPM의 경우 무기원소간의 상관성은 대체적으로 약했으며, 통계적으로도 유의한 수준이 아니었다. 따라서 본 연구지역에는 전계절에 걸쳐 지속적인 Pb-Cd-Cu의 오염원이 존재함을 확인할 수 있었고, 이들 분진은 동종의 단일 오염원에서 방출되었을 가능성이 매우 컸다.

Table 3. Correlation coefficients among PM and inorganic species.

	Pb	Cr	Cd	Cu	Zn	Fe	Na
PM ₁₀	0.59	-0.09	0.38	0.44	0.24	0.56	0.13
FPM	0.70	-0.17	0.50	0.58	0.41	0.18	0.16
CPM	0.03	0.05	0.02	0.05	-0.05	0.79	0.12

(Bold denotes p-value is below 0.05, N = 318)

Table 4. Correlation coefficients between inorganic species.

	PM ₁₀							FPM							CPM							
	Pb	Cr	Cd	Cu	Zn	Fe	Na	Pb	Cr	Cd	Cu	Zn	Fe	Na	Pb	Cr	Cd	Cu	Zn	Fe	Na	
Pb	1.00							1.00							1.00							
Cr	-0.09	1.00						-0.04	1.00						-0.03	1.00						
Cd	0.47	-0.04	1.00					0.46	-0.08	1.00					0.21	-0.01	1.00					
Cu	0.66	-0.11	0.50	1.00				0.64	0.00	0.52	1.00				0.28	-0.05	0.06	1.00				
Zn	0.26	-0.03	0.22	0.31	1.00			0.36	0.01	0.32	0.41	1.00			-0.05	0.04	-0.02	0.08	1.00			
Fe	0.39	0.05	0.23	0.27	0.19	1.00		0.26	0.05	0.18	0.29	0.31	1.00		0.19	0.17	0.03	0.19	-0.01	1.00		
Na	0.42	0.00	0.26	0.26	0.11	0.06	1.00	0.28	0.07	0.22	0.26	0.23	0.18	1.00	-0.01	-0.02	0.03	0.08	0.04	0.01	1.00	

(Bold denotes p-value is below 0.05, N = 318)

3.3 오염장미 (Pollution Rose)

온도나 상대습도, 풍속, 강수량 등과 같은 기상인자는 수치적으로 정량화할 수 있으므로 상관분석이나 그 밖의 통계적인 분석이 용이하다. 하지만, 오염물질의 농도변동에 가장 중요한 인자로 작용할 수 있는 풍향의 경우 정량화에 어려움이 따르기 때문에 분석대상에서 제외되는 경우가 종종 있다. 이를 위해서 각 측정성분의 농도를 풍향에 따라 구분한 후 각 풍향별 농도를 전체 평균농도로 표준화(normalization)시킨 오염장미 (pollution rose)를 작성하여 풍향에 따른 오염물질의 변동을 살펴보는 방법이 시도되어 왔었다(김기현과 이강웅, 1998; Eleftheriadis *et al.*, 1998; Somerville *et al.*, 1994; Batterman *et al.*, 1987). 본 연구에서 각 오염장미는 22.5°씩 16 방위로 나누어 살펴보았다. 이러한 오염장미로는 단지 해당원소의 주요오염원 위치를 추정하는 것일 뿐이

며, 풍향별 빈도분포나 풍속분포와 동일하지 않을 수 있다.

먼저 측정지역에서의 풍향의 빈도와 풍향별 풍속의 분포는 그림 2와 같다. 주풍향은 전계절에 걸쳐 서남서풍이 우세하였으며, 풍향별 풍속은 북북동풍이나 남남동풍일 때 연평균의 약 1/2의 수준으로 느린 풍속이 있었을 뿐 큰 변동은 없었다. 그림 2에서 풍향별 풍속은 연평균으로 표준화시킨 그래프로서 1보다 큰 경우는 연평균보다 높게 나타난 경우이며, 1보다 적은 경우는 연평균 보다 낮게 나타난 경우이다.

그림 3은 측정기간동안의 풍향에 따른 PM₁₀, FPM 및 CPM의 오염도를 평균농도에 입각하여 평균화시킨 오염장미로서, 풍향별 변동은 심하지 않았으나, FPM의 경우 상대적으로 느린 남남동풍이 불 때 오히려 연평균보다 고농도가 나타났다. 또한 CPM의 경우 상대적으로 느린 북북동풍이 불 때

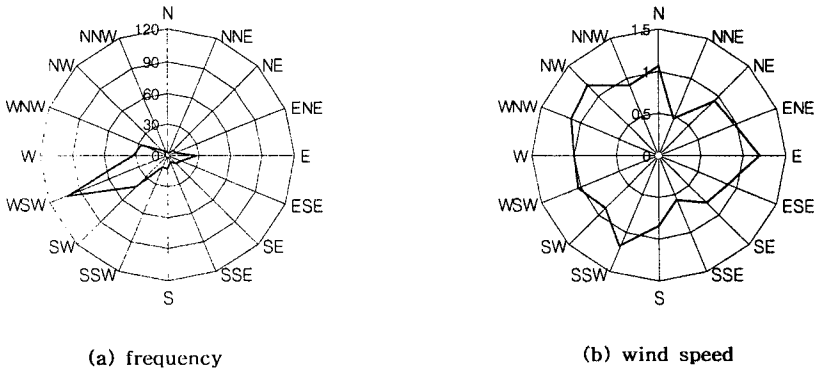


Fig. 2. The wind rose during the study period. (a) probability by wind direction, (b) ratio of wind speed to annual mean by wind direction.

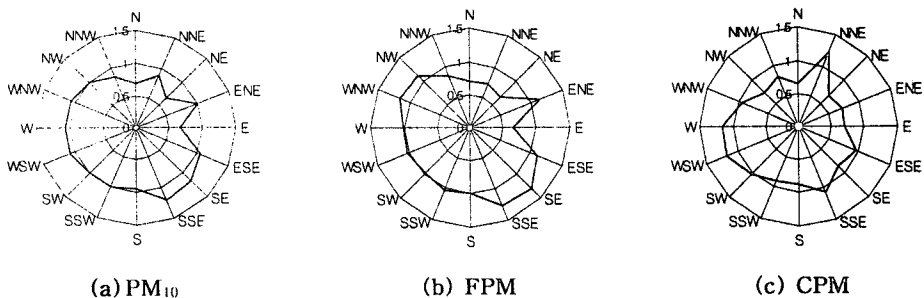
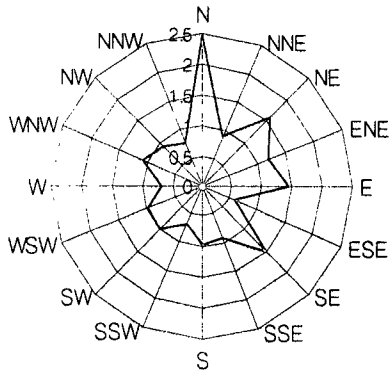
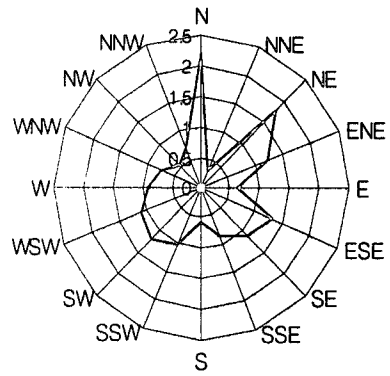


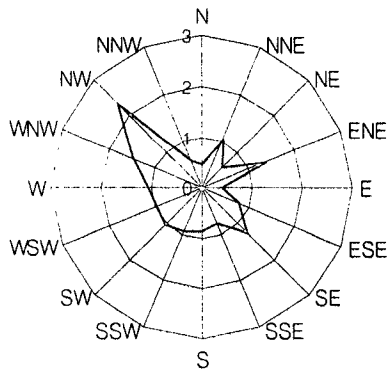
Fig. 3. The pollution roses of PM as a function of wind direction.



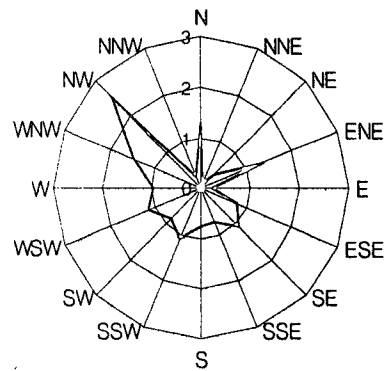
(a) Cr in FPM



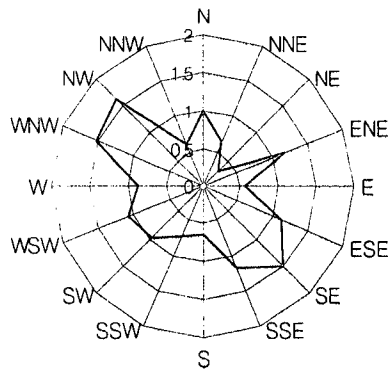
(b) Cr in CPM



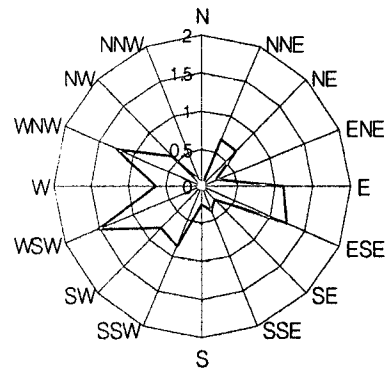
(c) Cu in FPM



(d) Cu in CPM



(e) Zn in FPM



(f) Zn in CPM

Fig. 4. The pollution roses for each element as a function of wind direction.

연평균보다 고농도가 나타났다. 이는 이들 풍상지역에 오염원이 존재할 가능성을 보여주는 것이다. 시료 채취지점에서 풍상지역의 오염원을 살펴보면, FPM의 경우 남남동방면에 기흥단지가 조성되어 있으며, CPM의 경우 북북동방면에 경부고속도로와 영동고속도로가 교차하는 지점으로 고속도로를 끼고 논밭이 산재되어 있어 타이어 마모나 토양성분의 비산이 상대적으로 큰 것으로 사료된다.

무기원소의 경우 풍향에 따라 농도의 변동이 심하게 나타났다. 이 중 PM₁₀, FPM, CPM 입자영역 모두에서 Cr과 Cu는 유사한 경향을 보였으며, 이들의 경우 FPM이나 CPM의 오염원이 동일 방향에 위치할 가능성이 존재함을 의미한다(그림 4). 또한 FPM 영역에서 Zn의 풍향별 분포는 FPM의 농도분포와 비슷한 양상을 보였는데, 이는 Zn가 FPM의 유입농도에 크게 의존함을 의미한다.

3. 4 PM_{2.5} (FPM)과 PM₁₀의 비교

표 5는 FPM과 PM₁₀의 질량농도, 무기원소의 농도분율(the concentration ratio of FPM vs PM₁₀: F/T ratio)의 산술평균과 산술평준편차를 요약한 것이다. F/T 값은 성분 중 FPM이 차지하는 구성비율로서 이 값이 0.5 이하일 때는 CPM에, 0.5 이상일 때는 FPM에 해당 원소가 편중되었음을 의미한다. 이는 FPM이 주로 인위적 과정에서 생성되고, 거대입자가 주로 자연적 과정에서 생성됨에 비추어 볼 때, 그 발생원을 추정하는데 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구기간동안 분진 및 Pb, Cd, Cu, Zn의 경우 F/T 비는 각각 0.66, 0.91, 0.90, 0.87, 0.79로서 FPM 영역에 편중되었으며, Fe, Cr, Na의 경우 각각 0.24, 0.43, 0.48로서 CPM 영역에 편중되었다. 이러한 결과는 다른 지역에서 조사된 도시 대기 중의 무기원소성분의 입경별 농도분포와 대부분 일치하였다(신훈중 등, 1996; 손동헌 등, 1991). 다만 본 연구에서 Cr의 경우 CPM 영역에 편중되어 있어 기존의 조사결과와는 다른 양상을 보였다. Cr은 토양 등에서 자연적으로 발생하며, 인위적으로는 철강산업 등 각종 산업체와 같은 오염발생원이 중요한데(Huo et al., 1998), 측정지점을 중심으로 영통주거지역이 개발되고 있었음을 고려한다면, 공사 중에 비산된 토양입자 중 Cr이 주변의 대기질에 큰 기여를 하고 있는 것으로 추정된다.

일부 무기원소의 경우 F/T 비가 0.5에 근사하였는데, 이 경우 해당원소가 특정 크기영역에의 소속여부를 판별할 때 무리가 따른다. 이를 위하여 독립표본 t-검정을 통해서 FPM과 CPM 농도간에 유의한 차이가 존재하는지를 확인하였다. 그 결과 Cr의 경우 전기간에 걸쳐 FPM 농도와 CPM 농도차는 통계적으로 유의하게 나타났다. 그러나, 이를 계절별로 살펴보면, 여름철을 제외하고는 FPM과 CPM의 농도차가 유의하지 않았다(99% 신뢰구간). 이 밖에도 Zn의 경우 여름철, Fe의 경우 겨울철, Na의 경우 여름과 겨울철에 각각 유의한 차이가 없었다(99% 신뢰구간). 이는 해당항목의 성분들이 그 기간동안 특

Table 5. The F/T ratio of inorganic elements measured during this study. The FPM concentrations of elements were normalized by their counterpart PM₁₀.

	Mass			Pb			Cr			Cd		
	Mean	SD	n	Mean	SD	n	Mean	SD	n	Mean	SD	n
Total	0.66	0.14	318	0.91	0.18	270	0.43	0.43	216	0.82	0.27	233
Win.	0.81	0.09	78	0.80	0.30	72	0.42	0.44	52	0.80	0.32	54
Spr.	0.59	0.11	83	0.93	0.09	75	0.66	0.45	52	0.77	0.29	73
Sum.	0.59	0.10	80	0.94	0.09	53	0.25	0.30	75	0.84	0.23	53
Fall	0.64	0.12	77	1.00	0.00	70	0.51	0.48	37	0.90	0.17	53
	Cu			Zn			Fe			Na		
	Mean	SD	n	Mean	SD	n	Mean	SD	n	Mean	SD	n
Total	0.79	0.24	262	0.75	0.30	308	0.24	0.33	298	0.48	0.33	295
Win.	0.77	0.23	77	0.77	0.32	77	0.58	0.36	75	0.52	0.41	62
Spr.	0.77	0.23	71	0.83	0.24	81	0.16	0.23	79	0.34	0.34	82
Sum.	0.77	0.29	53	0.61	0.36	73	0.08	0.17	74	0.53	0.24	75
Fall	0.87	0.18	61	0.79	0.20	77	0.12	0.25	70	0.54	0.27	76

정영역에 확연하게 편중되어 측정되지 않았다는 것으로 해석할 수 있는데, 이는 Whitby 등(1972)에 의해 알려진 부유분진의 쌍극분포에서 편중의 불확실도(uncertainty)를 통계적으로 검증할 수 있는 한가지 방법론으로 사료된다.

3.5 대기환경기준과의 비교

우리 나라에서는 PM₁₀에 대해서 95년 1월부터 연간 기준치 80 µg/m³, 24시간 기준치 150 µg/m³을 행정목표치로 설정하고 TSP와 함께 규제하고 있다. 반면, 미국에서는 PM₁₀에 대해서 연평균 50 µg/m³, 일평균 150 µg/m³로 규제하고 있으며, 97년 9월부터는 FPM에 대해서도 연평균 15 µg/m³, 일평균 65 µg/m³로 규제하고 있다.

본 연구기간동안 관찰된 PM₁₀ 연평균 농도는 69.6 µg/m³으로서 우리 나라의 연간 기준치 80 µg/m³를 만족하고 있으나, 미국의 기준치인 50 µg/m³는 초과하였다. 또한 측정기간 중 총 8회(측정회수 318회의 2.5%) 우리 나라 기준치인 150 µg/m³을 초과하였다. PM₁₀의 일평균 기준을 초과한 날은 대부분 미국 FPM의 일평균 기준치인 65 µg/m³를 초과하는 것으로 조사되었다.

한편 FPM의 경우, 미국 EPA의 일평균 기준을 69회(측정회수 318회의 21.7%) 초과하여 PM₁₀ 오염보

다 심각하였다. 즉, FPM 농도가 기준치를 초과한 회수는 97년 4월 14회, 1월 13회, 3월 10회, 12월과 2월에 각 8회, 11월과 6월에 6회, 5월 2회, 8월과 10월에 1회씩 총 69회로 단지 여름철에 초과빈도가 낮았다.

그림 5는 각 분진농도가 기준을 초과할 때 분진 농도와 기상인자 정보를 연평균값으로 나눠 표준화시킨 그림이다. PM₁₀ 기준치를 초과한 경우 PM₁₀ 평균농도는 연평균보다 약 2.3배, FPM과 CPM의 평균농도는 각각 2.2, 2.7배 가량 높게 관찰되었다. 우리 나라는 기준치가 없으므로 미국의 FPM 기준치를 초과한 경우, FPM의 평균농도는 연평균보다 약 1.8배가 높았으며, PM₁₀과 CPM의 평균농도는 연평균보다 약 1.7, 1.3배가 높았다. 즉 PM₁₀의 경우 CPM에 의해 증가할 수 있으나 FPM의 경우 CPM과 상관없이 증가할 수 있음을 알 수 있다. 또한 기상인자의 특징을 살펴보면, 상대습도는 연평균과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았지만, 기온, 강수량, 풍속은 연평균보다 낮게 관찰되었다.

그림 6은 PM_{10a}과 FPM의 농도가 기준을 초과했을 때 분진중의 무기원소의 평균농도를 연평균 농도로 표준화시킨 것이다. 그림에서 Cr을 제외한 대부분 무기원소들의 농도가 평소보다 높게 관찰되었다. 즉, 측정기간 중 겨울이나 봄철과 같이 기온이

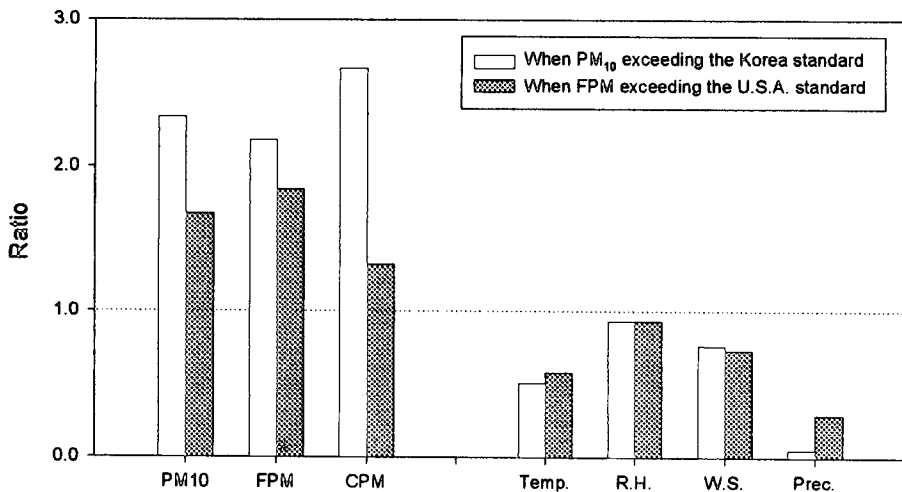


Fig. 5. The normalized values for PM and relevant meteorological parameters. Each individual data set was normalized by their respective annual mean values: (a) when PM₁₀ exceeds Korean standard, and (b) when FPM exceeds U.S.A. standard.

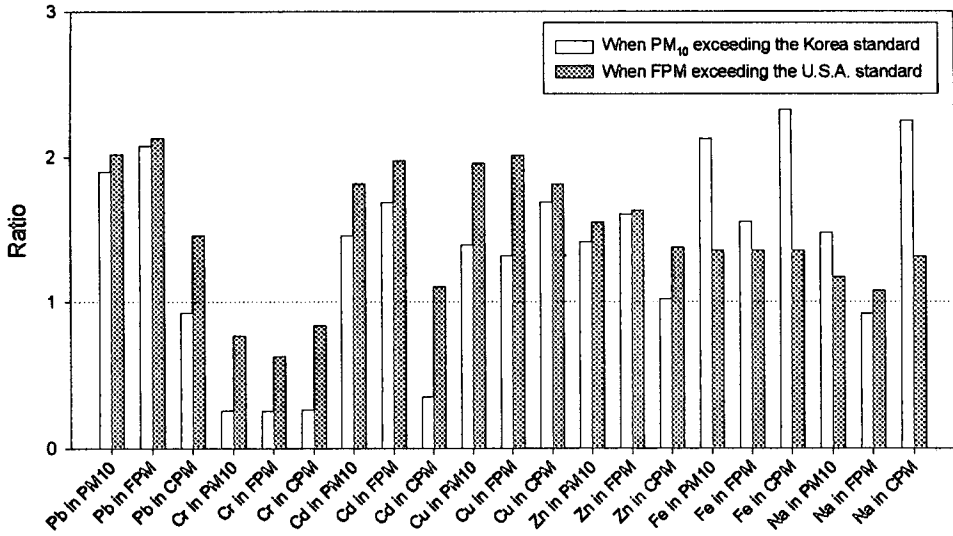


Fig. 6. The normalized values for various constituents: (a) when PM_{10} exceeds the Korean standard, and (b) when FPM exceeds the U.S.A. standard.

Table 6. Results of paired sample t-test.

(*unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

		Mean (ng/m^3)	t-value	df	Sig.			Mean (ng/m^3)	t-value	df	Sig.		
PM	Total	W.E.	69.0*	-0.581	46	0.564	Total	W.E.	28.7	-1.972	45	0.055	
		W.D.	71.6*					W.D.	34.7				
	Fine	W.E.	45.8*	-0.784	46	0.437	Cu	Fine	W.E.	20.7	-2.294	46	0.026
		W.D.	48.3*					W.D.	26.8				
	Coarse	W.E.	23.2*	-0.021	46	0.983	Coarse	W.E.	7.5	0.068	45	0.946	
		W.D.	23.3*					W.D.	7.4				
Pb	Total	W.E.	119.7	-1.645	45	0.107	Total	W.E.	299.3	0.711	45	0.481	
		W.D.	144.7					W.D.	256.3				
	Fine	W.E.	98.4	-1.896	46	0.064	Zn	Fine	W.E.	173.7	-0.476	46	0.636
		W.D.	120.7					W.D.	185.0				
	Coarse	W.E.	19.2	-0.349	45	0.728	Coarse	W.E.	125.0	1.181	45	0.244	
		W.D.	21.0					W.D.	68.4				
Cr	Total	W.E.	18.1	-1.444	45	0.156	Total	W.E.	759.5	0.128	45	0.898	
		W.D.	21.4					W.D.	749.2				
	Fine	W.E.	5.0	-1.947	46	0.058	Fe	Fine	W.E.	180.3	-0.345	46	0.732
		W.D.	8.0					W.D.	195.4				
	Coarse	W.E.	13.3	-0.317	45	0.753	Coarse	W.E.	575.3	0.418	45	0.678	
		W.D.	13.9					W.D.	549.9				
Cd	Total	W.E.	3.3	-1.703	45	0.095	Total	W.E.	2578.4	0.438	45	0.664	
		W.D.	4.2					W.D.	2441.5				
	Fine	W.E.	2.6	-2.025	46	0.049	Na	Fine	W.E.	1579.2	0.537	46	0.594
		W.D.	3.5					W.D.	1429.6				
	Coarse	W.E.	0.7	0.039	45	0.969	Coarse	W.E.	972.1	-0.125	45	0.901	
		W.D.	0.7					W.D.	988.9				

W.E.: weekend, W.D.: weekday, df: degree of freedom

낮아 난방연료의 소모가 많고, 강수량이 적어 세정 효과가 발생하지 않으며, 대기가 안정되어 풍속이 느릴 때 PM₁₀ 및 FPM이 고농도로 빈번히 관측되었으며 동시에 Cr을 제외한 무기원소도 높게 관찰되었다.

3.6 주중과 주말의 오염도 비교

일반적으로 인간의 산업활동은 1주일 주기로 이루어지며, 동시에 대기 중으로 미치는 영향은 “주중-휴일 변화”를 보일 수 있다 (Simmonds and Kevin, 1997). “주중-휴일의 오염도 변화”를 규명하거나 정량화 하는 것은 대기 중에 미치는 인위적인 활동을 평가할 때 매우 중요한 정보를 제공한다. 이러한 연구는 인간의 산업활동이 도심에서의 기후변화를 야기 시키는지 여부를 규명할 때 시도된 바 있다 (Gordon, 1994, 1995; Fujibe, 1987; Nicholson, 1965). 인간의 산업활동에 의해 인위적으로 발생하는 오염도를 파악하고 이를 정량화하기 위해 t-검정을 수행하였다. 이를 위해 측정기간동안의 자료를 주중(월~금요일)과 휴일(토, 일요일 및 공휴일) 자료로 구분하였다. 또한 이 때 주중과 휴일의 오염도는 서로 독립적으로 발생하지 않을 수 있으므로 (즉 주중의 오염도가 휴일의 오염도에 영향을 미칠 수 있으므로), 독립표본 t-검정으로 평가를 내리는 것은 적절하지 않을 수 있다. 이를 위해 해당 주일의 주중과 휴일의 농도를 평균을 내어 이를 서로 쌍으로 하여 대응표본 t-검정을 실시하였다. t-검정 결과는 표 6에 요약하였다.

통계적으로 유의한 차이가 발생한 경우는 주로 FPM 내 무기원소였으며, 이러한 경우 모두 휴일의 농도가 주중의 농도보다 낮게 관찰되었다. 즉, FPM 내 Cd와 Cu의 농도는 주말의 농도가 주중에 비해 각각 0.9 ng/m³ (25%), 6.0 ng/m³ (23%) 가량 낮게 나타났다 (95% 신뢰수준), Pb와 Cr의 농도는 주말 농도가 주중 농도보다 각각 22.4 ng/m³ (19%), 3.0 ng/m³ (37%) 가량 낮게 나타났다 (90% 신뢰수준). 또한 PM₁₀ 영역에서의 Cd와 Cu의 농도도 주말이 주중에 비해 각각 0.9 ng/m³ (21%), 6.0 ng/m³ (17%) 가량이 낮게 나타났다 (90% 신뢰수준). 한편, 주말 농도가 주중에 비해 오히려 낮게 나타나는 경우도 있었으나, 표에서 보는 바와 같이 통계적으로는 유의하지 않았다. 이처럼 주중과 주말간에 농도차가 현

저하다는 사실로 또한, 통계적으로 유의한 사례가 FPM에 집중된 사실로 미루어, 인간의 산업활동도가 지역대기오염에 차지하는 영향이 매우 큼을 알 수 있었다.

4. 결 론

수원시 대기질 개선 관리방안을 위한 기초자료의 축적을 목표로 1996년 12월 1일부터 97년 11월 31일까지 총 318회에 걸쳐 경희대학교 자연과학대학 5층 옥상에서 dichotomous sampler를 사용하여 FPM과 CPM을 채집하였다. 분진시료는 AAS를 사용하여 Pb, Cr, Cd, Cu, Zn, Fe, Na 등 총 7개의 무기원소성분을 분석하였다. 이들 자료와 기상정보를 이용하여 각종 기초통계분석을 수행하였다. 그에 따른 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

본 측정지점에서의 PM₁₀ 평균농도는 69.6 µg/m³였으며, FPM과 CPM은 각각 46.3, 23.3 µg/m³로 나타났다. 또한 분진의 농도와 무기성분은 계절에 따라 커다란 변동을 보였으며 대부분의 경우 겨울과 봄철에 최고값을, 여름철에 최저값을 보였다. 본 연구기간 중 PM₁₀ 농도 측정결과를 보면, 우리나라 PM₁₀ 기준을 총 8회 초과한 것으로 나타났다. 반면, 미국 FPM 기준을 초과한 경우는 총 69회 발생하여 FPM의 오염이 상대적으로 심각함을 알 수 있었다.

PM₁₀과 FPM은 Cr을 제외한 모든 무기원소들과 양의 상관성을 보여 주었다. 그러나, 온도, 상대습도, 풍속과는 음의 상관관계를 보였다. 또한 PM₁₀과 FPM 중 Pb, Cd, Cu는 서로 강한 상관성이 나타나, 이 원소들이 동일한 오염원에서 배출되었을 가능성을 시사하였다.

CPM은 Fe과 항상 강한 양의 상관성을 보였으나, 기타 무기원소나 기상인자와는 상관도가 매우 약했으며 통계적으로 유의하지 않았다. 한편, 분진의 농도는 풍향에 따라 농도의 변화가 크지 않았으나, 무기원소의 경우 풍향에 따라 농도의 변화가 크게 나타났다. 한편, 본 연구에서 무기원소의 FPM과 CPM 크기영역별 편중정도를 독립표본 t-검정을 통하여 조사하였는데 Pb, Cd, Cu, Zn는 FPM 영역에 유의성을 가지고 편중되어 있었으며, Cr, Fe, Na는 CPM 영역에 편중되어 있었다.

마지막으로 인간의 인위적 산업활동이 대기 중에

영향을 미치는지 여부를 정량화하기 위해 주말과 주중의 오염도 변화를 통계적으로 분석하였다. 통계적으로 유의한 차이는 주로 FPM에서 발생하였으며, Pb, Cr, Cd, Cu의 주말 농도가 주중에 비해 각각 18, 38, 25, 23% 가량이 낮게 나타났다. 또한 Cd, Cu의 경우 PM₁₀ 영역에서도 통계적으로 유의한 차이가 관찰되었다.

본 연구는 장기간 지속적으로 구축된 자료를 이용하여, 그동안 단편적, 부수적 및 상식적으로 간주했던 연구부분을 객관화하고자 각종 통계분석을 시도하였다. 특히 본 연구를 통해 점차 관심이 집중되고 있는 FPM에 대한 수원지역의 방대한 자료가 구축되었다고 사료되며, 이들 자료는 추후 대기환경기준의 설정과 대기질 관리 측면에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 강병욱, 이학성, 김희강(1997) 청주지역 산성 가스상물질과 미세입자의 계절 변동 특성, 한국대기보전학회지, 13(5), 333-343.
- 강창국, 한진석, 차준석, 나진균, 김병곤, 안준영, 김소영(1997) 서울지역 입자상 오염물질 중 금속성분의 농도분포, 한국대기보전학회 춘계학술대회, 103-104.
- 강충민, 이학성, 강병욱, 김희강(1998) 서울지역의 산성가스물질과 PM_{2.5} 농도의 특성, 한국대기보전학회 춘계학술대회, 29-30.
- 기상월보(1996. 12. ~ 1997. 11.) 한국기상청.
- 김기현, 이강웅(1998) 이온성분의 환경거동과 기상인자와의 관계, 한국대기보전학회지, 14(5), 479-490.
- 김성우, 김윤신(1997) 공단지역 미세입자중 중금속 분석, 한국대기보전학회 추계학술대회, 31-32.
- 배민석, 김영준(1998) 시화지구 대기분진 중 중금속 및 이온성분의 물리화학적 특성에 관한 연구, 한국대기보전학회 춘계학술대회, 35-37.
- 손동헌, 권창호, 정원태, 허문영(1991) 대기부유분진중 다환방향족탄화수소 및 중금속의 농도, 한국대기보전학회지, 7(1), 17-22.
- 신훈중, 이태정, 김동술(1996) 대기부유분진 중 미량 금속원소의 입경별 농도분포에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12(1), 67-77.
- 안준영, 강창국, 한진석, 나진균(1997) 미세입자상오염물질 중 수용성이온성분과 탄소성분 측정, 한국대기보전학회 추계학술대회, 41-42.
- 이종훈, 김용표, 문길주, 김희강, 정용승, 이종범(1997) 우리나라 청정지역에서 측정된 PM_{2.5} 입자의 특성, 한국대기보전학회지, 13(6), 439-450.
- 이태정, 김동술(1997) 수원지역 입자상 오염물질의 오염원 기여도의 추정, 한국대기보전학회지, 13(4), 285-296.
- 장지훈(1994) 호흡성분진중 중금속의 실내외농도에 관한 조사연구, 한양대학교 환경과학대학원 석사학위논문.
- 전준민, 김동술, 이영재, 김윤신(1997) 여천공단내 부유분진중 중금속의 농도 경향, 한국대기보전학회 추계학술대회, 33-34.
- Batterman, S.A., J.A. Fay, and D. Golomb(1987) Significance of regional source contributions to urban PM-10 concentrations, JAPCA., 37, 1286-1291.
- Chow, J.C. (1995) Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles, J. Air & Waste Manage. Assoc., 45, 320-382.
- Eleftheriadis, K., D. Balis, I.C. Ziomas, I. Colbeck, and M. Nikolaos(1998) Atmospheric aerosol and Gaseous species in Athens, Atmos. Environ., 32(12), 2183-2194.
- Finlayson-Pitts, B.J. and J.N. Pitts, Jr. (1986) *Atmospheric Chemistry*, John Willey & Sons.
- Fujibe, F. (1987) Weekday-weekend differences of urban climate, part I; temporal variation of air temperature and other meteorological parameters in the central Tokyo, J. Meteor. Soc. Japan., 65, 923-929.
- Gordon, A.H. (1994) Weekdays warmer than weekends?, Nature, 367, 325-326.
- Gordon, A.H. (1995) Wet thursdays revised, Weather, 50, 29-30.
- Huo, D., Y. Lu, and H.M. Kingston(1998) Determination and correction of analytical biases and study on chemical mechanisms in soil samples using EPA protocol, Environ. Sci. Technol., 32, 3418-3423.
- Kim, K.H., D.S. Kim, and T.J. Lee(1997) The temporal variabilities in the concentrations of airborne lead and its relationship to aerosol behavior, Atmos. Environ., 31(20), 3449-3458.
- Loo, B.W. and C.P. Cork(1988) Development of high efficiency virtual impactors, Aerosol Science and Technology, 9, 167-176.
- Nicholson, G. (1965) Wet thursdays again, Weather, 20, 322-

323.

Simmonds, I. and K. Kevin (1997) Weekly cycle of meteorological variations in Melbourne and role of pollution and anthropogenic heat release, *Atmos. Environ.*, 31(11), 1589-1603.

Somerville, M.C, S. Mukerjee, D.L. Fox, and K.S. Robert (1994) Statistical approaches in wind sector analyses for assessing local source impacts, *Atmos.*

Environ., 28(21), 3483-3493.

U.S. EPA (1997) *National Ambient Air Quality Standards For Particulate Matter; Final Rule*, Code of Federal Regulations, Part 50, Title 40, 62(138).

Whitby, K.T., R.B. Husar, and B.Y.H. Liu (1972) The aerosol size distribution of Los Angeles smog, *J. of Col. & Inter. Sci.*, 39, 203.