

大氣浮遊粉塵中 多環芳香族炭化水素 및 重金屬의 濃度

Atmospheric Concentration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Suspended Particulate

손동현 · 권창호 · 정원태 · 허문영*

중앙대학교 약학대학, *강원대학교 약학대학
(원고접수 : 1991. 2. 21)

Dong Hun Sohn, Chang Ho Kwon, Won Tae Jung, Mun Young Huh*

Chung-Ang Univ. College of Pharmacy, *Kang Won Univ. College of Pharmacy
(Received 2, February 1991)

Abstract

Total suspended particulates (TSP) in the atmosphere was collected and size-fractionated by Andersen high volume air sampler for one year (Mar. 1987~Feb. 1988) in Seoul. The concentrations of several polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals were determined to investigate the atmospheric concentrations, seasonal variations and its relationship with the size distribution of suspended particulate matter.

The arithmetic mean concentration of total suspended particulates was $200.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The concentrations of heavy metals were 2433.80 for Fe, 629.49 for Zn, 600.71 for Pb, 143.87 for Cu, and $107.21 \text{ ng}/\text{m}^3$ for Mn, respectively. The concentrations of PAHs were 3.83 for benzo(a)pyrene, 2.95 for benzo(k)fluoranthene, and $4.42 \text{ ng}/\text{m}^3$ for benzo(ghi)perylene, respectively. PAHs, Pb and Zn abounded in particles below $2.0 \mu\text{m}$, while Fe and Mn abounded in particles above $2.0 \mu\text{m}$. TSP and its chemical compositions showed the seasonal variations.

The concentrations of anthropogenic pollutants like TSP, PAHs and heavy metals in the fine particles were highest in winter and lowest in summer. PAHs and Pb analyzed showed significant correlations between each other and between TSP concentration in fine particles, indicating that the particles in which they are contained have a similar behavior in the atmosphere.

1. 서 론

대기부유 분진의 거동이나 이화학적 특성은 입자 고유의 성상과 매질인 대기 상태에 의존하며 입자의 입경, 농도, 화학조성 등은 가장 중요한 인자이다. 대기부유 분진은 발생, 소멸 기구에 따라 $2 \mu\text{m}$ 전후를 계곡으로 그 양측에 피크를 갖는 이산형분포(Bimodal distribution)을 나타내고 입경이 작은

쪽을 미세입자(fine particle), 큰쪽을 조대입자(coarse particle)라고 부르고 있다. 전자는 인공기원의 1차 입자나 대기중에서 가스로부터 입자화된 2차입자라고 알려져 있다. 후자는 주로 토사, 해염 등 자연기원의 입자로 되어 있다고 알려져 있다(Mizohata et al., 1986 ; Kasahara et al., 1984).

한편, 이들 대기부유 분진은 여러가지 화학종들이 혼재되어 있는 입자의 집합체로서 특히 중금속 및 다환방향족 탄화수소가 존재하고 있다. 따라서 이들

의 대기중 농도, 입경 및 계절적 변동 등은 대기오염 연구의 중요한 부분을 차지하고 있다(손동현 등, 1986; 이윤근 등, 1988).

이에 본 연구에서는 대기부유 분진을 $2\ \mu\text{m}$ 경계로 하여 2단 분별 포집하여 Fe, Mn, Cu, Zn, Pb 등 중금속과 Benzo(a)pyrene(이하 B(a)P), Benzo(k)fluoranthene(이하 B(k)F) 및 Benzo(ghi)perylene(이하 B(ghi)P) 등 발암성 다환 방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, 이하 PAH)를 분석하여 이들 성분의 농도와 입경분포, 계절변동 및 화학종 상호간 상관성을 검토하여 대기부유 분진중 유해성분들의 분포실태를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 대기부유 분진의 포집

대기부유 분진(Total Suspended Particulate : 이하 TSP로 약함)을 Andersen High Volume Air Sampler(Sibata Dylec, Model HVC-1000)를 사용하여 서울특별시 동작구 흑석동 중앙대학교 약학대학 4층 옥상에서 1987년 3월부터 1989년 2월까지 매 회 24시간 동안 $566\ \ell/\text{min}$ 의 유량으로 흡인하여 40회 포집하였다. 포집기간 중 30회는 입경 $2.0\ \mu\text{m}$ 이상과 $2.0\ \mu\text{m}$ 이하로 나누어 2단 분별 포집하였다. 또한 10회는 분별포집하지 않고 TSP를 포집하였다. 포집량의 산출은 석영섬유여지를 포집 전에 $\text{NaHSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 포화수용액의 항온항습 데시케이터(25°C , 50%) 내에 보관하여 항량이 되게 한 뒤에 평량하였으며, 전후의 중량차에 의하여 분진량을 산출하였다.

2.2 PAHs의 분석

back-up filter(Type AHQ-630, $20 \times 25\ \text{cm}$)를 둘로 접어서 직경 40 mm의 belt punch로 절취하여 세절후 공전 원심 침전관에 넣고 ethanol 2 ml를 가해 여지를 적시고 benzene 6 ml를 가해 초음파 장치내에서 15분간 추출 후 기포를 제거하고 다시 15분간 추출하였다. 이 추출액을 3,000 rpm에서 30분간 원심분리하였다. 그 상층액 2 ml를 침전관에 옮기고 5%-NaOH 수용액 3 ml를 가해 vortex mixer로 약 1분간 격렬히 교반하여 3,000 rpm에서 15분간 원심분리하였다. 이 benzene 층 1 ml를 진공 농축장치에서 감압 농축한 후 acetonitrile 0.5 ml에 용해시키고 clarification한 후 검액으로 하였다.

원형 filter(Type 2500 QAST, 30 cm in diameter)는 여지의 1/8을 절취하여 세절후 공전 원심 침

전관에 넣고 ethanol 10 ml, benzene 30 ml를 가해 초음파 장치내에서 15분간 추출 후 기포를 제거하고 다시 15분간 추출하였다. 이 추출액 20 ml를 취하여 감압 농축한 후 benzene 4 ml에 용해시켰다. 용해액 3 ml를 취하여 5%-NaOH 수용액 3 ml를 가하고 vortex mixer로 약 1분간 격렬히 교반하여 3,000 rpm으로 15분간 원심분리하였다. 이 benzene 층 2 ml를 취하여 감압 농축한 후 acetonitrile 0.5 ml에 용해시키고 clarification한 후 검액으로 한 다음 검액중의 PAH를 Perkin Elmer LS-3 형광분석 광도계를 장착한 Waters HPLC를 이용하여 정량하였다. Precolumn을 Zorbox ODS($4.5\ \text{mm} \times 25\ \text{cm}$ Shimadzu Co.)로 사용하였으며 이동상으로 94%-Acetonitrile을 사용하여 유량 2 ml/min로 하여 Benzo(a)pyrene, Benzo(k)fluoranthene 및 Benzo(ghi)perylene을 분리하였으며 이들의 검출은 Excitation wavelength 370 nm, Emission wavelength 460 nm에서 형광 강도를 측정하여 각각의 검량선을 작성하고 검액중의 PAH 농도를 검량선에 의해 구하였다(Shiozaki et al., 1984).

2.3 중금속의 분석

원형 filter는 1/8을 취하고 back-up filter는 둘로 접어서 직경 40 mm belt punch로 절취하여 세절한 후, 고주파출력 200 W의 조건으로 Plasma Chamber(Model PC-103, Yamato Co.)에서 약 80분간 완전 회화시키고 10%- HNO_3 (for harmful metals analysis, Hayashi Pure Chemical Industries LTD.) 100 ml를 가하여 시계정시를 넣고 Hot plate에서 약 2시간 용출시킨 후 온시여과(동양여지 No. 5 C)하였다. 여액을 Hot plate에서 증발건조시키고 0.5 N- HNO_3 용액으로 10.0 ml로 한 후 검액으로 하여 Atomic absorption spectrophotometer(Perkin Elmer, Model 2308)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대기중 부유분진, 중금속 및 다환방향족 탄화수소의 농도

표 1에 1987년 3월부터 1989년 2월까지 1년간 부유분진을 포집하여 부유분진을 포집하여 부유분진을 비롯한 중금속 및 PAH의 1년 평균 농도를 조대, 미세 및 총입자로 나타내었다. 부유분진은 $200.44\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었으며 이는 환경기준의 연평균농도인 $150\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다.

또한 총 포집횟수인 40회중 24시간 평균치가 환경

기준인 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 횟수는 6회였다. 한편 2 μm 이하의 입자들인 미세입자 농도는 104.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 총입자의 약 56%가 흡입성분진(Respirable dust)로 나타났다. 이는 본 조사지역이 각종 화석연료 연소 등에 의해 발생하는 미세입자의 영향을 크게 받고 있는 것으로 파악된다.

한편, 중금속의 농도를 살펴보면 Fe 2,433.80, Zn 626.49, Pb 600.71, Cu 143.87 및 Mn 107.62 ng/m^3 으로서 Fe>Zn>Pb>Cu>Mn 순이었다. 또한 각 중금속의 F/T는 Fe 0.30, Mn 0.34, Cu 0.47, Zn 0.59 및 Pb 0.69로서 Fe와 Mn은 조대입자쪽에 많이 분포하여 Zn과 Pb는 미세입자쪽에 많이 분포하는 것으로 나타났다.

또한 다환방향족 탄화수소의 농도를 살펴보면 B(a)P 3.83, B(k)F 2.95 및 B(ghi)P 4.42 ng/m^3 으로서 대기농도는 B(ghi)P>B(a)P>B(k)F 순으로서 Matsushita 등(1989)의 보고와 같았다.

Sawicki(1962)에 의하면 B(a)P/B(ghi)P의 농도 비가 0.6 정도이면 주로 액체연료, 1.5 정도이면 고체연료에 의해 PAH가 발생한다고 보고한 바 있다. 본 조사지역에서의 연간 평균농도에 있어서 B(a)P/B(ghi)P의 비는 0.86으로서 석탄이나 연탄 등 고체연료보다 벙커C유, 디젤 및 자동차 가솔린 등의 액체연료에서 더 많은 PAH 발생량이 기인되는 것 같다.

3.2 대기중 부유분진, 중금속 및 다환방향족 탄화수소 농도의 월별 변동

그림 1에 대기중 부유분진, 중금속 및 다환방향족

탄화수소 농도를 월별로 나타내었다. 그림에서 나타낸 것처럼 대기중 각 화학종들의 농도는 심한 변동을 나타내었다.

부유분진의 경우 7, 8, 9월에 농도가 낮은 것은 여름철에 자주 발생하는 강우에 의한 rain out 효과로 판단되며 반면에 12월부터 이듬해 5월까지의 농도는 높은편이었다. 이는 난방용 연료의 소비증가로 인하여 부유분진의 발생량이 많아지기 때문으로 보인다.

중금속의 경우, Fe와 Mn 농도의 월별 변동이 거의 유사하였으며 Pb와 Zn 또한 유사하였다. 이같은 사실은 이들 두 금속들이 환경중 거동을 같이 하기 때문으로 판단된다.

한편 다환방향족 탄화수소의 경우에는 다른 화학종들에 비하여 월별 변동의 폭이 매우 컸다. 즉 3월부터 8월까지의 봄과 여름철의 농도의 9월부터 이듬해 2월보다 매우 작은 농도를 나타내었다. 이같은 농도변화는 다환방향족 탄화수소의 발생원이 주로 자동차 배기가스와 난방용 액체 및 고체 화석연료인 탓도 있겠지만 기온 및 일사량과 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 일반적으로 PAH들은 기온이 높고 일사량이 많을 때 승화 또는 광분해되기 때문에 그 농도가 낮아진다고 Yamasaki 등(1983)이 보고하고 있다. 또한 월별 B(a)P/B(ghi)P의 변화를 살펴보면 6, 7, 8월에는 각각 0.41, 0.40, 0.46으로 낮으며 12, 1, 2월에는 각각 0.87, 1.14, 1.23으로서 높았다. 이것은 여름철의 PAH는 주로 액체연료에서 유래되며, 겨울철의 PAH는 고체연료에서 유래되는 비중이 크다는 것을 시사해 준다.

Table 1. TSP, Heavy metals and PAH concentrations.

Chemical Species	Coarse		Fine		Total		F/T*	
	(n)	Mean	(n)	Mean	(n)	Mean	(n)	Mean
TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	30	79.33	30	104.46	40	200.44	30	0.56
Heavy Metals (ng/m^3)								
Mn	30	71.85	30	39.29	40	107.62	30	0.34
Zn	30	255.12	30	347.18	40	626.49	30	0.59
Cu	30	69.75	30	69.39	40	143.87	30	0.47
Fe	30	1640.59	30	710.94	40	2433.80	30	0.30
Pb	30	167.36	30	388.39	40	600.71	30	0.69
PAHs (ng/m^3)								
B(a)P	14	0.22	14	2.09	24	3.83	14	0.89
B(k)F	14	0.19	14	1.84	24	2.95	14	0.90
B(ghi)P	14	0.32	14	3.35	24	4.42	14	0.91

*F/T=Fine particle (<2 μm)/(Fine particle (<2 μm)+Coarse particle (>2 μm)

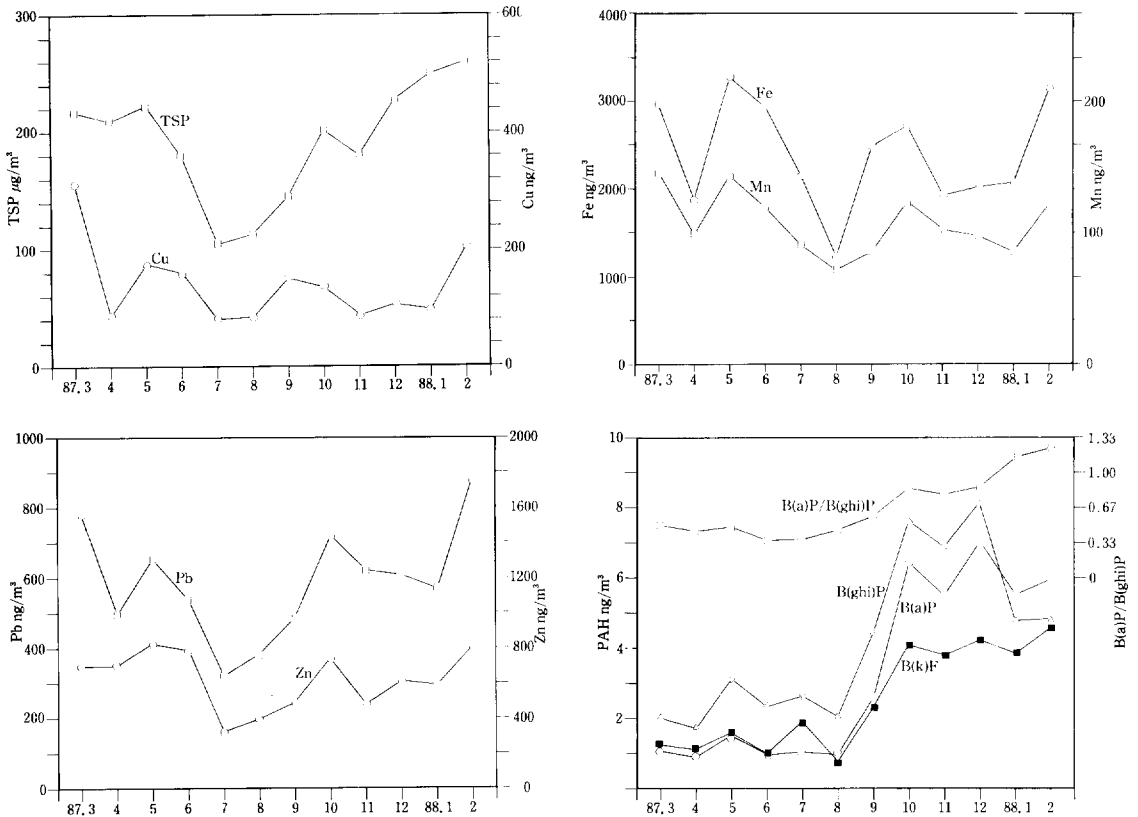


Fig. 1. Monthly variations of TSP, heavy metal and PAH concentrations (1987. 3~1988. 2).

3.3 대기중 화학종들의 계절별 입경분포

표 2에 부유분진과 중금속의 계절별 입경분포를 나타내었다. 부유분진의 경우 여름철에는 미세입자의 농도가 $70.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮았으며 봄철에는 조대입자의 농도가 $101.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 가장 높았다. 이는 주로 미세입자가 화석연료 연소와 같은 인위발생원에서 유래되기 때문에 난방용연료의 소비가 많은 겨울철에 특히 미세입자의 농도가 높아지는 것으로 보인다.

대기중 중금속 농도의 계절변동을 살펴보면 미세입자쪽의 농도가 큰 금속인 Pb, Zn의 농도는 여름철에는 가장 낮은 경향을 나타내었으며 겨울철을 비롯한 다른 계절에는 그 농도가 높은 편이었다. 한편 조대입자쪽의 농도가 높은 금속인 Fe, Mn 등은 봄철에 가장 높은 것으로 보아서 이들 금속들은 이때쯤 중국대륙으로부터 불어오는 황사현상의 영향을 많이 받는 것 같다(이민희 등, 1988).

한편 다환방향족 탄화수소 등은 여름철에 비해 겨울철에 매우 높았으며 여름철에는 광화학반응 등에

의해 PAH의 변질이 일어나기 쉬우며 또한 고온이기 때문에 부유분진으로부터 PAH의 휘발이 일어나기 쉽기 때문이라고 판단된다. 또한 PAH들은 거의 90% 이상이 미세입자 중에 편중되어 있었다. 이처럼 대기중의 PAH 대부분이 페로네 침입율이 높은 부유입자 중에 존재하고 있기 때문에 이들 흡입성 분진중의 발암성 PAH가 환경발암과 관련이 클 것으로 판단된다.

3.4 각 화학종들간의 상관성

여러 화학종들간의 상관 matrix를 미세입자와 조대입자로 나누어 표 3에 나타내었다. 미세입자 중에서는 부유분진과 B(a)P, B(k)F 및 B(ghi)P와의 상관 계수(r)가 각각 0.87, 0.90, 0.90으로서 매우 컸으며, PAH 상호간의 상관관계는 B(a)P-B(k)F($r=0.93$), B(a)P-B(ghi)P($r=0.98$) 및 B(k)F-B(ghi)P($r=0.97$)로서 매우 높은 상관성을 갖고 있었다. 이 같은 사실은 미세입자와 PAH들의 발생원이 유사하다는 점을 시사해 준다. 또한 Pb-PAH, Pb-TSP들

Table 2. Seasonal variations of TSP, heavy metals and PAHs with regards to size distribution.

Season	TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Mn (ng/m^3)				Zn (ng/m^3)			
	Coarse	Fine	Total	F/T*	Coarse	Fine	Total	F/T	Coarse	Fine	Total	F/T
Spring	101.43	115.27	216.70	0.55	75.69	55.14	130.83	0.43	332.62	407.05	739.67	0.56
Summer	63.01	70.13	133.14	0.53	68.16	26.33	94.49	0.26	239.16	258.53	497.69	0.56
Fall	80.54	96.87	177.41	0.54	70.21	34.05	104.26	0.32	205.77	363.63	569.40	0.64
Winter	58.34	197.76	251.71	0.69	76.35	46.30	102.97	0.38	218.57	384.21	676.83	0.67

Season	Cu (ng/m^3)				Fe (ng/m^3)				Pb (ng/m^3)			
	Coarse	Fine	Total	F/T*	Coarse	Fine	Total	F/T	Coarse	Fine	Total	F/T
Spring	78.16	114.48	192.64	0.55	1839.79	883.47	2723.26	0.35	181.39	461.12	642.51	0.70
Summer	58.88	52.85	111.74	0.48	1577.20	541.33	2118.53	0.24	159.79	252.92	412.71	0.62
Fall	73.85	51.63	125.48	0.41	1661.74	709.44	2371.18	0.30	169.13	438.92	608.05	0.72
Winter	64.79	37.04	145.08	0.43	1169.78	706.70	2495.02	0.38	142.65	425.02	696.86	0.77

Season	B(a)P (ng/m^3)				B(k)F (ng/m^3)				B(ghi)P (ng/m^3)			
	Coarse	Fine	Total	F/T*	Coarse	Fine	Total	F/T	Coarse	Fine	Total	F/T
Spring	0.13	1.03	1.16	0.88	0.14	1.19	1.32	0.89	0.20	2.12	2.32	0.90
Summer	0.11	0.89	1.00	0.89	0.13	1.25	1.39	0.90	0.23	2.19	2.42	0.91
Fall	0.41	4.11	4.51	0.91	0.29	2.97	3.26	0.91	0.52	5.51	6.03	0.92
Winter	—	—	5.96	—	—	—	4.23	—	—	—	5.46	—

*F/T = Fine particle ($<2 \mu\text{m}$)/(Fine particle ($<2 \mu\text{m}$) + Coarse particle ($>2 \mu\text{m}$))

Table 3. Correlation coefficient matrices between variables.

a) Fine

	TSP	B(a)P	B(k)F	B(ghi)P	Fe	Pb	Cu	Mn	Zn
TSP	1.0000								
B(a)P	0.8696**	1.0000							
B(k)F	0.8958**	0.9275**	1.0000						
B(ghi)P	0.9005**	0.9780**	0.9650**	1.0000**					
Fe	0.6709*	0.4044	0.6071*	0.4846	1.0000				
Pb	0.7633**	0.8290**	0.8676**	0.8708**	0.3782	1.0000			
Cu	0.2555	0.0588	0.2042	0.1745	0.4122	0.2039	1.0000		
Mn	0.6255*	0.4296	0.5259	0.4853	0.7599**	0.4065	0.6501*	1.0000	
Zn	0.7683*	0.5993*	0.7835**	0.7061**	0.6372*	0.6421*	0.5230	0.6923**	1.0000

b) Coarse

	TSP	B(a)P	B(k)F	B(ghi)P	Fe	Pb	Cu	Mn	Zn
TSP	1.0000								
B(a)P	0.2938	1.0000							
B(k)F	0.3031	0.9478**	1.0000						
B(ghi)P	0.2959	0.9709**	0.9733**	1.0000					
Fe	0.9554**	0.1390	0.1487	0.1380	1.0000				
Pb	0.7016**	0.1999	0.2251	0.1958	0.7377	1.0000			
Cu	0.6684*	0.1988	0.2034	0.1449	0.6786*	0.7023**	1.0000		
Mn	0.9419**	0.2415	0.2785	0.2651	0.9652**	0.6207*	0.6435*	1.0000	
Zn	0.6460*	0.1620	-0.0062	0.0016	0.6933**	0.7232**	0.2553	0.5487	1.0000

*P < 0.05 **P < 0.01

간에도 높은 상관성이 나타났으며 Fe-Mn도 비교적 높은 상관성을 나타내었다.

한편 조대입자 중에서는 TSP-Mn, TSP-Fe의 상관계수와 각각 0.94, 0.96으로 매우 높았으며 Fe-Mn 또한 0.97로서 매우 높았다. 이는 조대입자중 이들 중금속의 배출원이 동일하다는 것을 나타내주고 있는 것 같다.

4. 결 론

대기부유 분진중 중금속과 다환방향족 탄화수소의 농도, 입경분포 및 계절변동을 파악할 목적으로 1987년 3월부터 1988년 2월까지 1년간 서울특별시 동작구 흑석동 소재 중앙대학교 4층 옥상에서 대기부유 분진을 포집하고 함유된 중금속과 다환방향족 탄화수소를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 부유분진의 연평균 농도는 $200.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이였으며 미세입자 분율(F/T)는 0.56으로서 미세입자중 분포가 다소 컸다.

2. 중금속의 연 평균 농도는 Mn 107.62, Zn 626.49, Cu 143.87, Fe 2,433.80 및 Pb 600.71 ng/m^3 으로서 Pb와 Zn은 미세입자쪽에, Mn과 Fe는 조대입자쪽에 많이 분포하였다.

3. 다환방향족 탄화수소의 연 평균 농도는 Benzo(a)pyrene 3.83, Benzo(k)fluoranthene 2.95 및 Benzo(ghi)perylene 4.42 ng/m^3 으로서 거의 90% 이상이 미세입자 중에 분포하고 있었다.

4. 부유 분진, 중금속 및 다환방향족 탄화수소의 농도는 대부분 여름철이 낮고 겨울철이 높은 계절변동을 나타내었다.

5. 미세입자 중에서는 부유분진과 다환방향족 탄화수소 및 다환방향족 탄화수소 상호간의 상관성이 매우 높았으며, 조대입자 중에서는 부유분진과 Fe, Mn 및 Fe와 Mn 상호간에 상관성이 높았다.

참 고 문 헌

손동현, 이규식, 허문영(1986) 부유분진중 다환방향족

탄화수소에 관한 연구, 약학회지, 30(6), 323 - 328.

손동현, 허문영(1986) 도시대기중 부유 입자상 물질, 염화물, 질산염 및 황산염의 농도와 입경분포, 대기보전학회지, 3(2), 27 - 33.

이민희 한의정, 신찬기, 한진석(1988) 황사현상시 분진의 입도 분포와 화학조성에 관한 연구, 대기보전학회지, 4(2), 57 - 66 (1988).

이용근, 김남춘, 명노승, 황규자(1988) 이탄 필터 샘플러에 의한 대기 부유분진의 포집 및 금속 성분의 계절별 거동에 관한 연구, 대기보전학회지, 4(2), 20 - 27.

Kasahara, M. Takahashi, K. and Shimada, M. (1984) Identification and apportionment of release sources of particulate matters in the atmosphere, J. Japan Soc. Air Pollut., 19(5), 337 - 358.

Matsushita, H., Kuo, C.T., Imamiya, S., Tabucanon, M.S. and Koottatep, S. (1989) Comparative study of carcinogenic particulates in Bangkok, Chiang Mai and Tokyo, J. Japan Soc. Air Pollut., 24(3), 234 - 243.

Mizohata, A., Matsuda, Y., Sakauoto, K. and Kadowaki, S. (1986) Chemical composition of particulate air pollutants, J. Japan Soc. Air Pollut., 21(2), 83 - 103.

Sawicki, E., Hauser, T.R., Elbert, W.C., Fox, F.T. and Meeker, J.E. (1962) Polynuclear aromatic hydrocarbon composition of the atmospheric in some large American cities, Ind. Hyg., J., March-April, 137 - 144.

Shiozaki, T., Tanabe, K. and Matsushita, H. (1984) Analytical method for polynuclear aromatic hydrocarbons in airborne particulates by high performance liquid chromatography, J. Japan Soc. Air Pollut., 19 (4), 300 - 307.

Yamasaki, H., Tsujino, Y. and Kuwata, K. (1983) Factor analysis on pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air, J. Japan Soc. Air Pollut., 18(1), 8 - 17.