

2006-2008년 봄철 부산 지역 PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도 및 금속성분의 화학적 특성

전병일^{1,*} · 황용식²

¹신라대학교 환경공학과, 617-736, 부산광역시 사상구 패법동 산 1-1
²부산대학교 석면중피증연구센터, 626-770, 경남 양산시 물금읍 범어리 1

Chemical Properties of the Metallic Elements and the Mass Concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} Observed in Busan, Korea in Springtime of 2006-2008

Byung-Il Jeon^{1,*} and Yong-Sik Hwang²

¹Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

²Korea Research Center for Asbestos-Related Diseases, Pusan National University, Geongnam 626-770, Korea

Abstracts: Twenty-four hour integrated PM₁₀ and PM_{2.5} samples were measured during springtime (March, April, and May) in Busan for three years from 2006 to 2008, and mass concentrations and metallic elements of measurement were analyzed to investigate temporal, spatial, chemical characteristics of the mass concentration and metallic elements in association with meteorological conditions including Asian Dust (AD) vs. non Asian Dust (NAD) seasons, and other air mass transport patterns. The result showed that PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{10-2.5} concentrations were on average of 126.2±89.8, 85.5±41.6, and 40.7±54.9 µg/m³, respectively, and the PM_{2.5}/PM₁₀ and PM_{10-2.5}/PM_{2.5} ratios were 0.70 and 0.48, respectively. The highest concentrations of PM were observed when air parcels were originated from both northwest sector covering Beijing and west sector including Shanghai areas.

Keywords: PM₁₀, PM_{2.5}, mass concentration, metallic element, Asian Dust

요약: 본 연구에서는 2006년부터 2008년까지 3년간 봄철에 PM₁₀과 PM_{2.5}를 채취하여 질량농도와 금속원소의 화학적 특성, 기상인자와의 관계 분석, 황사 및 비황사시의 미세먼지 특성 그리고 이동경로에 따른 농도의 특성을 고찰하였다. 연구기간동안의 PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{10-2.5} 평균농도는 각각 126.2±89.8, 85.5±41.6, 40.7±54.9 µg/m³이었으며 PM_{2.5}/PM₁₀ 및 PM_{10-2.5}/PM_{2.5} 비는 각각 0.70, 0.48이었다. 우리나라의 북서쪽인 북경을 포함한 지역과 서쪽인 상해를 포함한 지역에서 공기덩어리가 이류 할 때 가장 높은 미세먼지농도를 나타내었다.

주요어: PM₁₀, PM_{2.5}, 질량농도, 금속성분, 황사

서론

대기 중에 거동하는 10 µm 이상의 거대입자는 인체유입시에 코의 섬모나 기도 등에 걸려 폐 깊숙이 침투하기 어렵다. 그러나 10 µm 이하 미세먼지의 경우, 그 자체로서 인체피해 뿐만 아니라 금속, 유기물, 산, 이산화질소 그리고 기타 오염물질 등과 결합한 2

차 오염물질등의 영향을 상당부분 반영한다. 이들은 인체 흡입시 기관지 또는 폐 기포 부위에 도달, 침적함으로써 건강상의 피해를 유발할 수 있다(Dockery and Pope, 1994; Lipfert and Wyzga, 1995; Pope et al., 2002). 질량농도가 일정할 경우 미세먼지의 입자 크기가 감소할수록 표면적이 증가하기 때문에 인위적 오염원에서 발생하는 독성 금속성분들과 다양한 오염물질의 흡착이 용이해져서 인체에 미치는 영향도 증가한다(John et al., 1990; Simpson, 1992; Dockery et al., 1993). 또한 미국 캘리포니아 주에서는 자동차의 미세먼지로 인하여 인구 100만명 당 약 1,000명

*Corresponding author: bjeon@silla.ac.kr

Tel: 82-51-999-5056

Fax: 82-51-999-5652

정도가 매년 암에 걸려 추가 사망하는 것으로 추정되고 있다(Pope et al., 2002). 입경 2.5 μm 미만인 PM_{2.5}는 발전소나 자동차 등 화석연료의 연소나 생산 과정에서 배출되며 장거리 이동을 통해 청정한 지역에도 영향을 미칠 수 있다.

부산은 우리나라에서 두 번째로 큰 도시이자 제 1일의 항구도시로서 도시화와 산업화에 따른 자동차와 산업시설 등의 증가로 미세먼지에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 연구에서는 2006년부터 2008년까지 부산지역에서 3년간 봄철(3, 4, 5월)에 PM₁₀과 PM_{2.5}를 채취하였다. 이들 시료에 대하여 질량농도와 금속성분을 분석하여 그 질량농도와 금속원소의 화학적 특성을 알아보았다. 또한 미세먼지와 기상인자와 관계를 분석하였고, 황사시와 비황사시의 미세먼지 특성과 화학적 특성 그리고 후방 유적선(backward trajectory)을 분석하여 경로별 농도특성을 고찰하였다.

채취 및 분석 방법

본 연구를 위한 PM₁₀과 PM_{2.5}의 시료채취는 Fig. 1과 같이 신라대학교 공학관 6층 옥상에서 실시하였다. 신라대학교는 부산시 사상구 괘법동에 있으며,

측정지점의 주변은 북북동에서 남남서로 뻗어있는 백양산으로 둘러싸여 있으며 남서쪽으로 나지막한 작은 계곡이 있다. 측정지점으로부터 남서쪽 약 3 km 떨어진 지역에 사상공업지역이 위치하고 있으나, 많은 공장이 타 지역으로 이주하여 점오염원의 영향이 많이 소멸하였다. 다만, 대형 유통단지가 입지함에 따라 자동차 통행량의 증가가 뚜렷하여 선오염원에 의한 영향이 증가되고 있는 실정이다. 측정지점 주위의 점오염원은 사상지역에서 남쪽으로 5 km 떨어진 신평·장림공단에 분포하며, 남서풍이 유입될 경우에 신평·장림공단과 사상지역에서 오염물질이 이류하여 본 측정지점에 영향을 미칠 수도 있으며, 해풍이 탁월할 경우는 부산연안의 선박에서 배출되는 오염물질이 해수에서 방출되는 해염의 영향을 받을 수 있다.

PM₁₀과 PM_{2.5}의 채취는 2006년부터 2008년까지 3년간 봄철(3, 4, 5월)에 실시하였다. 측정일수는 총 102일(2006년 35일, 2007년 33일, 2008년 34일)로, 주중에 강우가 없는 날을 대상으로 오전 9시에 시작하여 다음날 오전 9시까지 24시간 채취하였다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 채취는 Mini Volume Air Sampler(Air Metrics, Springfield, OR, USA)를 사용하였으며 (Balauf et al., 2001), 흡인유속은 5.0 L/min으로 조정

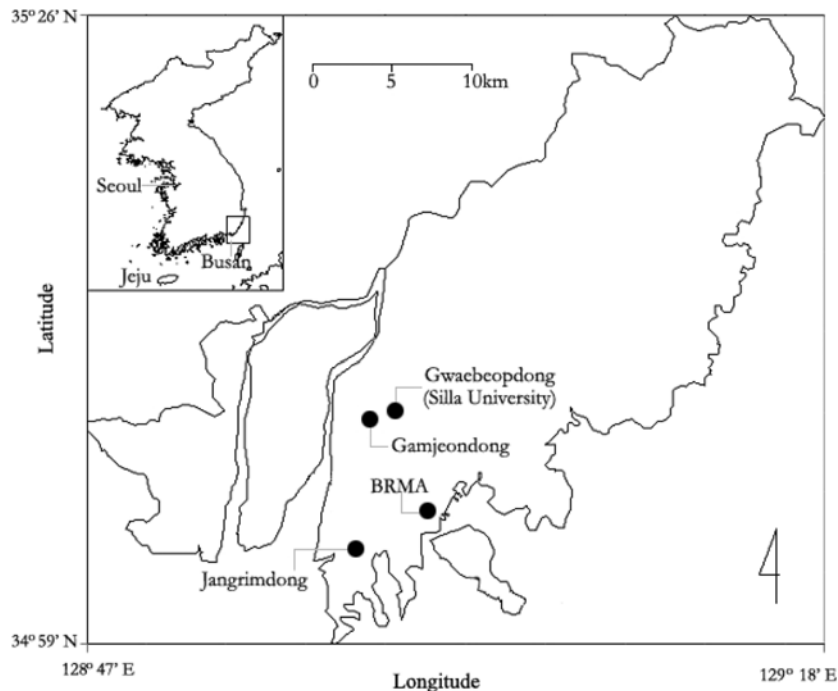


Fig. 1. Position of sampling site and air quality monitoring stations in Busan.

Table 1. QA/QC results using spike sample

Element	Quality control standard (PerkinElmer pure #N9300281)			Spike sample recovery(%)				Mean
	Labeled (mg/mL)	Measured (mg/mL)	NIST SRM	5 ng/mL	10 ng/mL	20 ng/mL	40 ng/mL	
Cd	100	98.9	3108	100.81	101.92	101.01	101.06	101.20
Co	100	99.7	3113	102.48	106.06	99.42	99.36	101.83
Fe	100	99.5	3126a	95.38	95.98	99.05	96.36	96.69
Mn	100	99.3	3132	99.94	101.88	101.04	100.37	100.81
Ni	100	100.0	3136	100.00	104.80	101.65	102.08	102.13
Pb	100	99.3	3128	98.63	102.44	102.07	101.89	101.26

하여 47 mm QMA Filter(Whatman Co.)에 24시간 PM₁₀과 PM_{2.5} 시료를 흡인 채취하였다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도를 측정하기 위하여 여과지를 항온(20 °C), 항습(50%) 조건의 건조장치(automatic dry/up desiccator, SIBATA DUV-12)에 최소 2일간 건조하고, 감도가 0.01 mg인 전자저울(Sartorius microbalance, Germany)로 시료채취 전·후의 중량차로 농도를 구하였다. PM₁₀과 PM_{2.5} 중의 미량 금속 성분을 정량하기 위하여 질산·염산 초음파 추출법으로 전처리한 후 ICP/AES를 이용하여 Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, V, Zn을 분석하였다. ICP/MS를 이용하여 Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Co, Sr, Ti, Pb를 정량하였다. 또한 ICP/AES를 이용한 Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, V 및 Zn의 정량분석시 검출한계는 각각 3, 8, 3, 20, 7, 15, 2, 2 및 4 µg/L이었다. 그리고 ICP/MS를 이용한 Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Co, Sr, Ti 및 Pb의 정량분석 시 검출한계는 각각 0.09, 0.2, 0.2, 0.07, 0.4, 0.9, 0.02, 3 및 0.04 ng/L이었다. Table 1은 recovery test를 이용하여 QA/QC를 수행한 자료로서 기지시료(spike sample)의 주입량을 감안하여 농도별 회수율을 나타

내었다. 기상자료는 신라대학교에서 남남동쪽으로 약 10 km 떨어진 부산지방기상청(BRMA; Busan Regional Meteorological Administration)에서 측정한 기온, 상대습도, 풍속, 운량을 사용하였다.

결과 및 고찰

PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도 특성

Table 2와 Table 3은 2006년부터 2008년까지 봄철의 부산지역 PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, PM_{2.5}/PM₁₀ 비, PM_{10-2.5}/PM_{2.5} 비를 연별과 월별로 나타낸 것이다. 최근 3년간의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 그리고 PM_{10-2.5}의 농도는 각각 126.2±89.8, 85.5±41.6, 40.7±54.9 µg/m³로 나타났다. 우리나라의 PM₁₀ 연간 기준치인 50 µg/m³에 비해서 상당히 높은 농도를 나타내었다. 이는 본 연구에서의 시료측정이 주중에 강우가 없는 봄철을 대상으로 하였기 때문이다. 또한 PM_{2.5}의 기준치는 아직 우리나라에는 설정되지 않은 상태이나, 미국의 연간 기준치인 15 µg/m³에 비해서 매우 높은 농도를 나타내고 있다(US EPA, 1997). 또한 3년간의 평균

Table 2. Average concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{10-2.5}, average ratios of PM_{2.5}/PM₁₀ and PM_{10-2.5}/PM_{2.5} at sampling site

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM _{10-2.5} (µg/m ³)	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{10-2.5} /PM _{2.5}
2006 (n=35)	128.0±59.5	85.1±28.9	42.9±38.2	0.70±0.14	0.50±0.33
2007 (n=33)	154.4±138.6	108.7±55.1	45.7±87.6	0.77±0.11	0.34±0.25
2008 (n=34)	97.0±27.2	63.5±21.4	33.5±14.5	0.65±0.13	0.60±0.36
2006-2008 (n=102)	126.2±89.8	85.5±41.6	40.7±54.9	0.70±0.13	0.48±0.33

Note: n=number of samples

Table 3. Monthly average concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{10-2.5}, monthly average ratios of PM_{2.5}/PM₁₀ and PM_{10-2.5}/PM_{2.5} at sampling site

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM _{10-2.5} (µg/m ³)	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{10-2.5} /PM _{2.5}
March (n=34)	105.1±36.9	75.9±30.1	29.2±16.8	0.72±0.13	0.44±0.32
April (n=34)	149.6±141.3	93.8±56.3	55.8±88.9	0.68±0.13	0.53±0.36
May (n=34)	123.9±48.3	86.9±32.5	37.0±25.7	0.71±0.13	0.46±0.32

PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 0.70으로 북미에서 측정된 전형적인 PM_{2.5}/PM₁₀의 비인 0.60보다 높은 값을 나타내었다 (Dockery and Pope, 1994). 이는 봄철을 대상으로 하였고 우리나라에 자주 발생하는 황사발생일이 포함되었기 때문이라고 판단된다. 미세입자(PM_{2.5})와 조대입자(PM_{10-2.5})의 비는 평균 0.48로, 미세입자의 양이 조대입자보다 약 2배 정도 높은 값을 나타내었다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 교통밀도가 높고 국지적인 요란이 작으면 그 비는 증가하나, 우리나라 같이 조대입자가 포함된 황사가 내습해 오면 그 비는 감소한다. Table 3에서 4월의 미세먼지 농도가 3월과 5월에 비해 높은 값을 나타내었다. 이는 본 측정지 중에 고농도의 황사발생일이 5일이 포함되어 있기 때문이다. 이의 증거로 4월의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.68로 3월(0.72)과 4월(0.71)에 비해 낮았으며, 또한 PM_{10-2.5}/PM_{2.5} 비도 0.53으로 조대입자의 비율이 타월에 비해 높게 나타났으며, 모든 항목에 대한 4월의 표준편차가 다른 월에 비해 크게 나타났다.

Fig. 2는 신라대학교에서 채취된 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 산포도와 상관성을 나타낸 것으로 결정계수(r^2)가 0.82로 높게 나타났으며, PM₁₀ 중의 PM_{2.5}의 기여율이 65-75%(평균 약 70%)를 나타내고 있다. 채취지점에서의 PM₁₀과 PM_{2.5}는 비슷한 오염원에 의해 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다.

본 채취지점에서 Mini-Vol을 이용하여 중량분석으로 측정된 미세먼지 농도와 부산광역시에서 운영하는 대기오염자동측정망에서 β -ray 선의 흡수법으로 측정된 미세먼지의 농도를 서로 비교하는 것은 매우 의미가 있다고 본다. Fig. 3은 본 연구의 채취장소인 신라대학교와 부산광역시에서 운영하는 대기질 자동측정

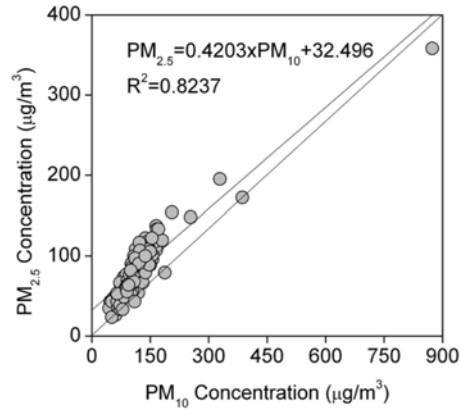


Fig. 2. Average concentration of and PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{10-2.5}, average ratios of PM_{2.5}/PM₁₀ and PM_{10-2.5}/PM_{2.5} at sampling site.

망인 감전동(PM₁₀)과 장림동(PM_{2.5})에서 측정된 농도를 비교하여 나타낸 것이다. PM₁₀의 비교지점인 감전동(PM₁₀만 측정함)은 본 채취장소와 남서쪽으로 약 2 km 떨어진 매우 가까운 곳이고, PM_{2.5}의 비교지점인 장림동(PM₁₀, PM_{2.5} 동시에 측정함)은 본 채취지점과 남서쪽으로 약 10 km 떨어진 지점이다(Fig. 1).

PM₁₀은 본 지점과 가까이 위치해 있고 비슷한 지역용도를 가진 감전동과의 상관도는 매우 높은 값($r^2=0.91$)을 보였다. 그러나 본 채취지점과 멀리 떨어져 있고 지역용도도 다소 차이가 있는 PM_{2.5}는 상관도가 다소 낮은 값($r^2=0.55$)을 나타내었다. 본 연구지점에서 측정된 미세먼지의 농도는 β -ray 선 흡수법으로 측정된 농도보다 높게 나타났다. Connell et al. (2005a)의 연구에서도 TEOM(Tapered Element Oscillating Microbalance)에 의해 측정된 농도

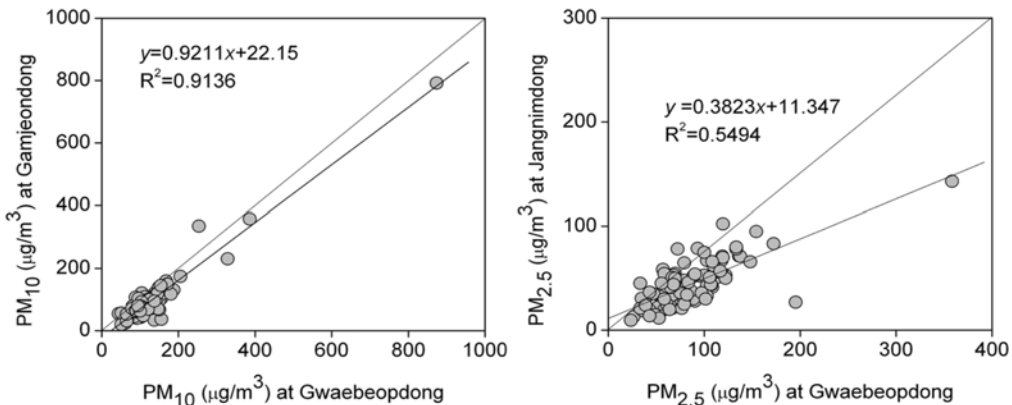


Fig. 3. Scatter plots of this site versus air quality automatic network.

Table 4. Mass concentration and metallic elements in springtime PM₁₀ and PM_{2.5} at sampling site for 2006-2008

	PM ₁₀				PM _{2.5}			
	2006 (n=35)	2007 (n=33)	2008 (n=34)	Mean (n=102)	2006 (n=35)	2007 (n=33)	2008 (n=34)	Mean (n=102)
Mass	128.0	154.4	97.0	126.2	85.1	108.7	63.5	85.5
Al	542	1001	471	667	284	430	171	294
Ca	2844	2262	2998	2707	1990	1105	2422	1847
Cd	1.28	1.95	1.27	1.50	0.92	1.74	1.09	1.24
Co	0.88	1.49	0.93	1.09	0.40	0.82	0.60	0.60
Cr	24.9	25.8	38.2	29.6	15.5	20.8	32.9	23.0
Cu	13.1	38.7	37.6	29.6	7.64	29.8	19.5	18.8
Fe	1040	1689	1019	1244	475	835	526	609
K	461	1078	922	814	244	832	716	592
Mg	595	706	558	618	332	283	376	331
Mn	51.0	130.2	56.8	78.6	29.2	88.8	44.6	53.6
Na	2175	1798	1253	1742	1277	1358	1192	1276
Ni	8.81	17.6	17.6	14.6	4.41	13.7	13.6	10.5
Pb	43.2	76.1	47.7	55.3	29.4	65.6	38.3	44.1
Si	4796	2429	7599	4965	2309	1659	4485	2824
Sr	7.47	14.6	7.25	9.69	3.96	6.70	4.59	5.06
Ti	16.0	43.9	26.5	28.5	6.82	21.2	15.2	14.3
V	23.6	10.1	12.4	15.4	19.2	7.31	11.7	12.7
Zn	172	401	173	246	109	331	132	189

The unit of mass concentration is $\mu\text{g}/\text{m}^3$, while all the rest are ng/m^3 .

($12.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 FRM(Federal Reference Method)에 의해 측정된 농도($18.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 낮게 측정된 바가 있다. 이는 β -ray 선 흡수법으로 미세먼지 농도를 측정하는 경우, 시료 유입구를 가열할 할 때 반휘발성(semi-volatile) 물질인 질산암모늄, 반 휘발성 유기화합물 등이 손실되기 때문에 판단된다(Allen et al., 1997).

금속성분의 특성

Table 4는 최근 3년간 부산지역의 봄철에 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5} 중의 금속성분을 조사하여 나타낸 것이다. PM₁₀과 PM_{2.5} 중의 금속이온의 농도는 지각기원인 Al, Ca, Fe, Si성분의 농도가 높게 나타났으며, 인위적 기원인 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb는 낮은 농도를 나타내었다. 본 연구지역이 해안에 가까이 있으므로 해양기원인 Na가 높게 나타났는데, 2008년의 농도는 특히 높게 나타났다. 18개 금속성분의 평균 함은 각각 $13.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM₁₀)과 $8.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{2.5})으로 평균농도의 10.4%(PM₁₀), 9.4%(PM_{2.5})를 각각 차지하였다. 18개 금속성분 중에서 지각성분인 Si가 가장 풍부하였는데, 전체 PM₁₀농도의 3.9%, PM_{2.5}농도의 3.3%를 각각 차지하였다.

3년간 평균 PM₁₀의 경우, Na>Si>Ca>Fe>K>Al----

Cu>Ti>Ni>Sr>Cd>Co 순으로 지각기원의 성분이 높은 농도를 나타내었으며, 인위적인 기원의 성분이 낮은 농도를 나타내었다. PM_{2.5}의 경우도 PM₁₀과 비슷하게 Na>Si>Ca>Fe>K>Mg----Cu>Ti>Ni>Sr>Cd>Co 순으로 나타났다. 2007년이 대부분의 성분에서 2006년, 2008년보다 높은 농도를 나타내었다. 이는 2007년의 질량농도가 타 년도에 비해 매우 높은 농도를 나타낸 것에서 유추해 볼 수 있다. 그러나 Ca, Cr, Na, Si는 2008년도에 가장 높은 농도를 나타내었다. 본 관측지점이 해안과 가까이 있으므로 해서 Na의 농도가 다른 연구에 비해서 상당히 높은 농도를 나타내었으며, 서울의 농도(PM₁₀: $699 \text{ ng}/\text{m}^3$, PM_{2.5}: $309 \text{ ng}/\text{m}^3$)보다 PM₁₀은 2.5배, PM_{2.5}는 4.1배나 높은 농도를 나타내었다(Kim et al., 2003). PM₁₀ 중의 Ca, Cr의 농도도 서울보다 높은 농도를 나타내었으나, 그 외의 농도는 대부분 서울이 부산보다 높은 농도를 나타내었다. 그리고 미세입자인 PM_{2.5} 중의 Ca, Na, K, Mg, Mn, V, Cr은 서울보다 높은 농도를 나타내어 PM₁₀과는 다른 결과가 보였다(최규훈 외, 2003).

미세먼지농도와 기상인자와의 관련성

미세먼지농도에 미치는 기상인자의 영향을 고찰한다는 것은 고농도 미세먼지발생을 미리 예측한다는

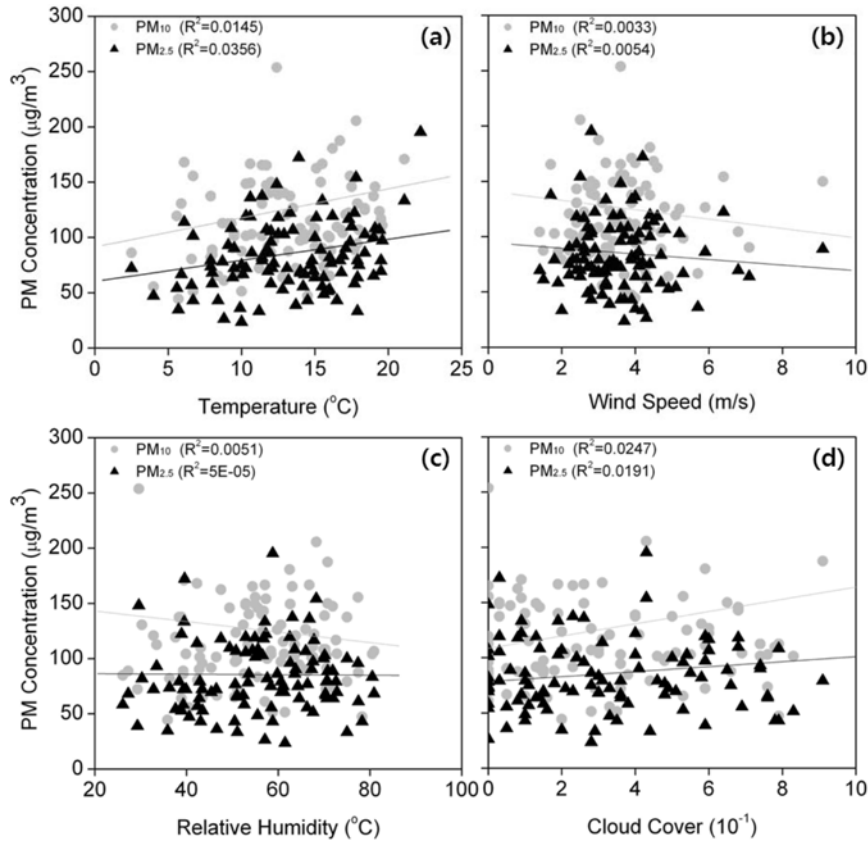


Fig. 4. Correlations between PM concentration data and meteorological parameters : (a) temperature, (b) wind speed, (c) relative humidity, (d) cloud amount.

측면에서 매우 중요한 의미를 가질 수 있다. Fig. 4는 부산지방기상청에서 관측한 일평균기온, 상대습도, 풍속, 운량을 미세먼지와의 관련성을 나타낸 것으로 통계적으로 매우 유의한 상관을 보여주지는 못하였다. 그러나 PM₁₀과 PM_{2.5}농도에 미치는 기상조건의 영향을 알 수 있었다. Fig. 4a는 일평균기온에 따른 PM₁₀과 PM_{2.5}농도를 나타낸 것으로 기온이 증가함에 따라 미세먼지의 농도가 증가하고 있다. 이는 여러 연구에서 언급하였듯이 광화학반응에 의한 2차 에어로졸생성의 결과라고 할 수 있다(Drewnick et al., 2004; Samat et al., 2006, Wojas and Almqvist, 2007). Fig. 4b는 일평균풍속에 따른 미세먼지의 농도를 나타낸 것으로 풍속이 증가함에 따라 미세먼지의 농도는 감소한다. 풍속의 증가는 오염물질의 확산에 중요한 인자로 작용하고 있다는 것을 알 수 있다(DeGaetano and Doherty, 2004; Connell et al., 2005b). Fig. 4c는 상대습도에 미세먼지농도의 변화를 나타낸 것으로 상대습도가 증가할수록 미세먼지농도

는 감소하였다. 상대습도가 증가하면 미세먼지에 수증기가 흡착되면서 액화 및 응축과정이 일어나 지면으로 침적되면서 부유하는 미세먼지의 농도가 감소할 수 있다(Wojas and Almqvist, 2007; Tecer et al., 2008). Fig. 4d는 운량에 따른 미세먼지농도의 변화를 나타낸 것으로 운량이 많을수록 미세먼지 농도는 증가하였다. Tecer et al.(2008)은 운량이 7.3(1/10)이상 일 때의 고농도 미세먼지 발생은 운량이 1.29(1/10)일 때 보다 두 배 이상 크다고 하였다.

황사시와 비황사시의 미세먼지 특성

본 연구기간인 최근 3년간(2006-2008) 부산지역의 황사발생일은 총 20일(11회)이었고, 그 중 본 연구에서 미세먼지를 채취한 날은 2006년에 5일(4회), 2007년 3일(2회)로 총 8일로 미세먼지 총 채취일 102일 중에서 황사발생일은 8일이었다. Table 5는 총채취일(102일) 및 황사발생일(AD: Asian Dust) 그리고 비황사발생일(NAD: Non Asian Dust)로 구분하여 질량농

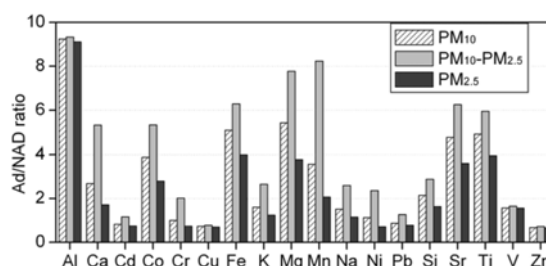
Table 5. Elemental concentration (ng/m^3) in PM_{10} and coarse particle ($\text{PM}_{10-2.5}$) and fine particle ($\text{PM}_{2.5}$) fractions for Asian dust (AD) and non Asian dust (NAD) at sampling site

	PM_{10}			Coarse ($\text{PM}_{10-2.5}$)			Fine ($\text{PM}_{2.5}$)		
	All	AD	NAD	All	AD	NAD	All	AD	NAD
Mass	126.2	302.1	111.2	40.7	147.4	31.6	85.5	154.7	79.7
Al	667	3742	405	374	2109	226	294	1632	179
Ca	2707	6411	2392	859	3414	642	1847	2997	1749
Cd	1.50	1.25	1.52	0.25	0.29	0.25	1.24	0.95	1.27
Co	1.09	3.45	0.89	0.49	1.97	0.37	0.60	1.48	0.53
Cr	29.6	29.7	29.6	6.63	12.4	6.14	23.0	17.3	23.5
Cu	29.6	22.0	30.2	10.8	8.52	11.0	18.8	13.4	19.2
Fe	1244	4789	942	635	2823	449	609	1966	493
K	814	1244	778	223	522	197	592	722	581
Mg	618	2488	459	287	1461	188	331	1027	272
Mn	78.6	233	65.4	25.0	131	15.9	53.6	102	49.5
Na	1746	2535	1678	471	1085	419	1275	1450	1260
Ni	14.6	16.3	14.4	4.06	8.65	3.67	10.5	7.64	10.7
Pb	55.3	48.8	55.9	11.3	13.9	11.0	44.1	34.9	44.9
Si	4965	9771	4555	2140	5377	1865	2824	4394	2691
Sr	9.69	35.6	7.48	4.64	20.5	3.28	5.06	15.1	4.20
Ti	28.5	107	21.8	14.3	61.3	10.3	14.3	45.8	11.6
V	15.5	23.4	14.9	18.7	4.22	2.56	12.8	19.2	12.3
Zn	246	170	253	57.7	42.7	59.0	189	127	194

도와 금속성분의 농도를 나타낸 것이다. 황사는 중부 및 동부 아시아의 건조지대나 고비 및 오로도스 사막의 남쪽에 퇴적된 황토로부터 발생하여 중위도 및 열대북태평양 그리고 북미대륙까지 영향을 미친다 (Guo et al., 2004). 우리나라의 경우, 황사는 주로 3월에서 5월 사이에 주로 발생하여 최근에는 겨울에도 종종 발생하기도 한다(전병일, 2003).

먼지 질량농도를 보면, 황사시 PM_{10} 농도는 $302.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비황사시의 $111.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 약 3배 정도 높은 농도를 나타내었으며, 황사시 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 $154.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비황사시의 $79.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 2배 정도 높은 농도를 나타내었다. 황사시의 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비는 0.51이었고, 비황사시는 0.72로 황사시에 조대입자의 비율이 높다는 것을 알 수 있다. 표에서도 보듯이 황사시의 $\text{PM}_{10-2.5}$ 농도가 $147.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비황사시의 $31.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 무려 4.7배나 높은 값을 나타내었다. 따라서 황사시의 미세입자에 대한 조대입자 비율 $\text{PM}_{10-2.5}/\text{PM}_{2.5}$ 은 0.95로 비황사시의 0.40에 비해 매우 높은 비를 나타내었다.

Fig. 5는 Table 5를 근거로 하여 금속성분이 황사에 어느 정도의 영향을 받았는지를 알아보기 위해 황사시와 비황사시 금속성분의 농도비(AD/NAD)를 나타낸 것이다. 모든 입자영역에서 Al, Co, Fe, Mg,

**Fig. 5.** Metals elements concentration ratios between Asian dust (AD) and Non Asian Dust (NAD).

Mn, Sr, Ti 등은 비황사시에 비해 황사시의 농도가 3배 이상 높은 비를 나타내었다. 특히 Al은 약 9배 이상으로 가장 높은 증가율을 나타내었으며, 이들 모두 지각기원으로 황사발생시 중국이나 몽골의 사막으로부터 날아오는 물질로 알려져 있다. 인위적 기원인 Cd, Cr, Cu, Pb, Zn 등은 1정도나 그 이하의 값을 나타내었다. Ca, Co, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si, Sr, Ti, 등은 조대입자영역에서 특히 높은 농도증가율을 나타내었다. Cu, Zn은 세 영역 모두 황사시의 농도가 비황사시의 농도보다 낮게 나타났다. 이들 원소들은 비황사시의 인위적인 오염원에서 배출되는 양이 더 많다는 것을 의미한다. Cd과 Pb은 PM_{10} 과 미세입자영역에서는 비황사시가 높았으나 조

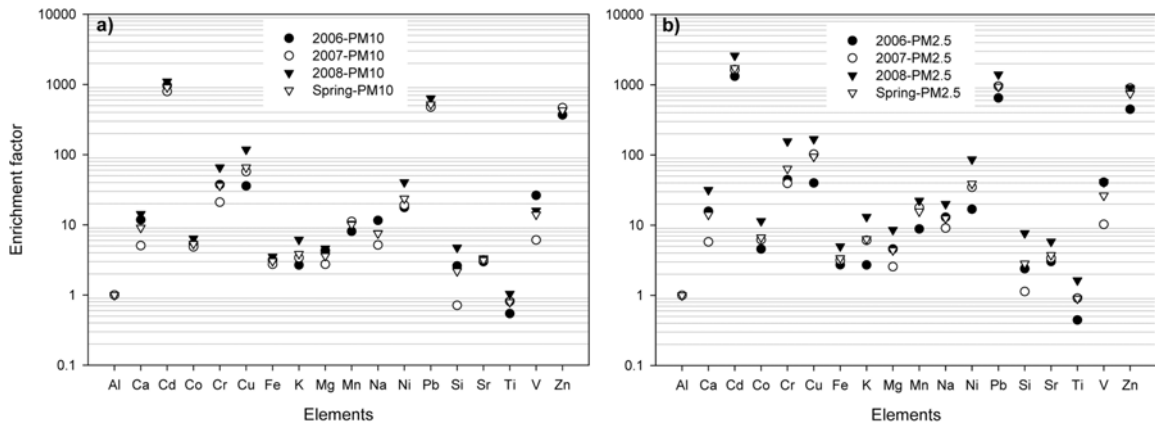


Fig. 6. Enrichment factor of each element relative to crustal composition and normalized by Al at Busan: a) PM₁₀ and b) PM_{2.5}.

대입자영역에서는 황사기가 높았다. 최규훈 외(2003)는 서울지역 황사와 비황사기간의 비교연구에서 Al의 AD/NAD 비가 미세먼지와 조대입자 내에서 각각 약 6과 3.5를 나타내었고, Cr, Pb, Cu, Mo, Cd를 비롯한 위해성 중금속성분들의 AD/NAD 농도비는 대부분 1 미만으로 나타났다. 김민영 외(2003)는 황사 현상 발생 시 토양기원 원소인 Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Sr 및 V의 PM₁₀ 중 농도는 비황사시보다 4.3-9.1배의 고농도를 보였다고 하였다. Lee et al.(2004)은 황사기간 전·후의 입자상 오염물질 연구에서 황사기간에 포집된 Al, Mg, Fe, Mn, Ca, Ni, Cr의 농도가 비황사기에 비해 월등히 높았다고 하였다. 인위적 기원으로 볼 수 있는 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 V은 황사시와 비황사시에 유의한 차이를 보이지 않았으며, 황사 전·후의 차이가 뚜렷하지 않았다(한진석 외, 2004).

지각농축계수

지각농축계수(enrichment factor: EF)는 지각 및 비지각오염원의 기여율을 평가하기 위해 사용하는 것으로서 EF가 10보다 작으면 그 원소는 지각물질이 우세하게 포함된 것을 의미하고 주로 토양오염원(지각)으로 유래되었다고 간주하며, EF가 10보다 크면 그 원소는 에어로졸에서 농축되었고 비광물(비지각물질)이 원인이라고 추정할 수 있다(Kim et al., 2003).

Fig. 6은 PM₁₀과 PM_{2.5}로부터 구해진 각종 금속 성분들의 지각농축계수를 나타낸 것이다. 대기부유분진 중 각 원소의 농도를 기준으로 각 원소의 지각농축계수를 계산하여 나타낸 것이다. 기준물질을 Al로 하

고 각 원소의 지각 구성비는 식 (1)을 사용하여 구하였다.

$$EF = \frac{[x/Al]_{sample}}{[x/Al]_{crust}} \quad (1)$$

여기서, [x/Al]은 대기부유분진 중 또는 토양 중의 원소 x와 Al의 농도비를 나타낸다. Al은 토양입자 유래의 전형적인 원소이기 때문에 EF값이 높을수록 인위적인 발생원 유래의 원소라고 할 수 있다.

부산지역의 미세먼지는 Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V, Zn 등이 10 이상으로 비지각오염원으로 간주될 수 있고, Co, Fe, K, Si, Sr, Ti 등은 10 이하의 값으로 지각기원의 오염원이라고 할 수 있다. 토양기원으로 알려진 Ti의 EF는 PM₁₀과 PM_{2.5}에서 각각 0.8과 0.9로 나타났으며, 배에서 사용되는 중질유의 연소에 의해 유래되는 V의 EF는 14로 비교적 높게 나타나 부산이 해안지역임을 알 수 있게 되었다. 인위적인 금속에 의해 EF 값이 차이가 크게 나는 이유는 방출원의 종류와 방출강도에 따라 다르기 때문이다(Kim et al., 2003).

Fig. 7은 황사시와 비황사시의 미세먼지(PM₁₀과 PM_{2.5}) 중 미량금속성분의 지각농축계수를 나타낸 것이다. PM₁₀과 PM_{2.5} 중 Co, Fe, Mg, Si, Sr, 및 Ti은 비황사시 뿐만 아니라 황사시에도 지각농축계수가 10 이하로서 자연발생원에 기인하는 것으로 추정된다. 그러나 Cr, Ni과 V의 경우, 비황사시에는 지각농축계수가 10이상을 보였으나, 황사시에는 10 이하로서 Al과 같은 토양성분의 농도가 상대적으로 증가하는 원인에 기인하는 것으로 판단할 수 있다(전병일 외,

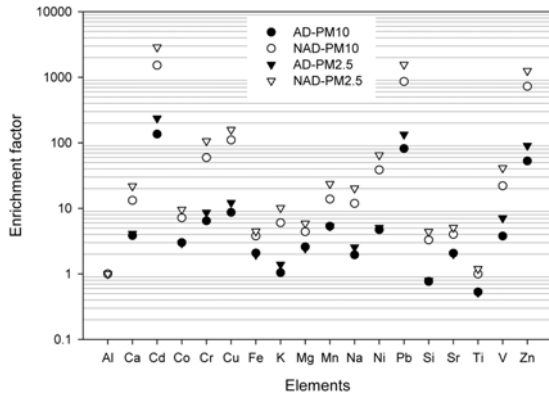


Fig. 7. Comparison of enrichment factors during Asian dust and non Asian dust for each element in PM₁₀ and PM_{2.5} aerosols.

2005). 특히, 인위적 기원을 갖는 Cd, Cu, Pb 및 Zn 은 지각농축계수가 10 이상이지만 황사시기에 급격히 감소하는 경향을 보였다. 따라서 PM₁₀과 PM_{2.5} 중 미량금속성분의 지각농축계수는 비황사시기보다 황사시에 낮게 나타났다. 이는 황사기간 중 많은 양의 지각물질이 수송되어 영향을 주었기 때문이다(Kim et al., 2003). 인위적 기원인 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V 및 Zn 의 황사/비황사 지각농축계수비는 PM₁₀의 경우 평균 10.5%였으며, PM_{2.5}의 경우 9.3%로서 황사시 지각농축계수가 감소함을 보였다.

이동경로에 따른 농도의 특성

본 연구지역에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}농도 및 금속성분 농도가 공기덩어리의 이동과 어떠한 연관성을 가지고 있는가를 조사하기 본 연구기간의 시료채취일을 대상으로 역궤적 추적 분석(backward trajectory analysis)을 하였다. 대기오염물질의 장거리수송을 연구하기 위해서는 오염물질이 배출되고 수송되는 지역을 대상으로 오염물질의 이동경로를 파악하는 것이 중요하다(신선아 외, 2006; 국립환경연구원, 2000). 채취일에 대한 공기를 추적하기 위해서 미국의 해양·기상청(NOAA)에 의해 개발된 HYSPLIT-4 모형을 사용하여 기류의 이동방향을 추적하였다(Draxler and Hess, 1997). 중국에서 발생한 대기오염물질의 경우, 대략 4일 이내에 한반도에 도달하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 부산지역에 영향을 미치는 공기덩어리의 궤적을 알아본다는 차원에서 역궤적의 모사시간을 48시간으로 하고 6시간 간격으로 하였다. 공기덩어리의 착지점의 좌표는 신라대학교로

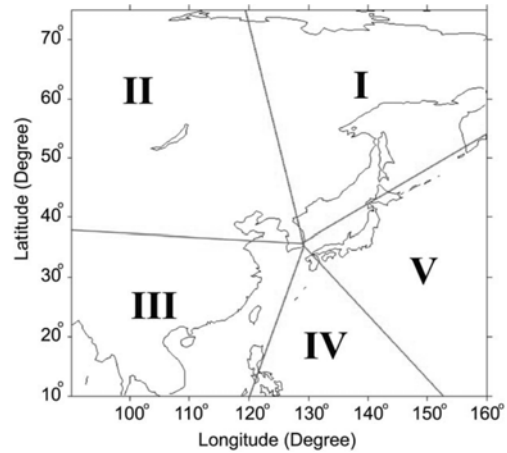


Fig. 8. Divided 5-sectors in Northeast Asia according to source distribution.

위도 N35006' 경도 E129002' 지점을 설정하였으며, 부산지역에 미치는 장거리 오염물질의 영향을 고려하여 공기덩어리의 이동고도는 1000 m로 하였다(한진석 외, 2006; Khan et al., 2010). 장거리수송의 영향을 고찰하기 위해 동북아시아를 Fig. 8과 같이 5개 권역으로 구분하여 그 영향을 알아보았다. I권역은 북한의 동부와 동해안을 포함하는 권역이고, II권역은 북경을 중심으로 산둥반도와 발해만 연안지역이 포함되는 구역이다. III권역은 상해를 중심으로 중국 남부지방과 동지나해를 포함하는 권역이며, IV권역은 중국과 일본사이의 해양으로서 인위적인 배출원이 거의 없는 권역이며, V권역은 일본을 포함하는 태평양권역이다.

Table 6은 채취일에 대한 역궤적 분석의 결과로서 이동경로에 따른 미세먼지농도를 나타낸 것이다. I권역은 전체 채취일 102일 중에 20일(19.6%)이었고 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 각각 105.1 µg/m³과 76.8 µg/m³이었으며, II권역은 49일(48.0%)로 가장 높은 발생빈도를 나타내었고 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 각각 142.2 µg/m³와 93.3 µg/m³이었다. 우리나라 봄철의 기후패턴이 주로 북서쪽에서 남동쪽으로 이동하는 이동성 고기압으로 영향을 받고 있기 때문에 발생빈도가 가장 높았다. III권역의 발생일수는 6일(5.9%)로 가장 적었으나, PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 가장 높은 142.5 µg/m³와 105.1 µg/m³을 각각 나타내었다. 제II권역과 III권역이 몽골이나 중국방향으로서 봄철의 황사에 의한 자연적인 오염원과 중국 동해안에 위치한 공업지대로부터 날아오는 인위적인 오염원이 더해져 미세먼

Table 6. Occurrence frequency, PM₁₀, and PM_{2.5} concentration (µg/m³) according to divided sector in Busan

Sector	Frequency	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)
I	20(19.6%)	105.1	76.8
II	49(48.0%)	142.2	93.3
III	6(5.9%)	142.5	105.1
IV	17(12.5 %)	120.8	85.1
V	10(8.3%)	87.2	56.2

Table 7. Annual occurrence frequency of divided sector in Busan

Sector Year	2006	2007	2008	Total
I	5	6	9	20
II	21	17	11	49
III	0	4	0	4
IV	5	6	8	18
V	4	0	6	10
PM ₁₀ concen. (µg/m ³)	128.0	154.4	97.0	
PM _{2.5} concen. (µg/m ³)	85.1	108.7	63.5	

지농도가 높아졌다고 할 수 있다. IV권역과 V권역은 각각 17일(12.5%)과 10일(8.3%)이었으며, PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 제II권역과 III권역보다 비교적 낮았으며, 특히 태평양으로부터 들어오는 제V권역의 경우의 미세먼지농도는 가장 낮았다.

Table 7은 연도별 이동경로의 발생횟수와 각 연도의 PM₁₀과 PM_{2.5}농도를 나타낸 것이다. 2008년의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도가 97.0 µg/m³과 63.5 µg/m³로 타 연도에 비해 낮은 농도를 나타내었다. 이는 표에서 보다시피 2008년의 경우, 우리나라의 북서쪽으로부터 이동하는 공기괴인 II와 III영역의 발생빈도가 11일로 2006년과 2007년의 21일에 비해 작았으며, 반면에 일본과 우리나라 남해안 및 태평양으로부터 들어오는 공기괴인 IV와 V영역이 14일로 2006년과 2007년의 9일과 6일에 비해 높은 빈도를 나타내고 있다. 또한 2008년은 지구온난화의 영향으로 북서풍이 약화되면서 중국 내륙 및 사막지역에서 날아오는 봄철 황사의 영향이 최근 약화되었기 때문으로 분석된다(기상청, 2009). 한진석 외(2006)가 1997년부터 2004년까지 우리나라 서해상을 기준으로 분석한 결과에 의하면 I권역 10%, II권역 51%, III권역 13%, IV권역 5%, V권역이 11%로 중국내륙으로부터의 영향인 II, III권역이 전체의 64%를 차지하였으며, 이러한 경우 SO₂, NO_x 농도가 다른 주변지역보다 높은 농도가 관측되었다. He et al.(2003)은 우리나라 서해안의 태안에 도달하

는 공기덩어리의 대부분이 북서쪽에서 기원한다고 하였고, 특히 봄과 겨울의 공기덩어리는 여름과 가을에 비해 더욱 더 탁월하다고 하였다.

요약 및 결론

2006년부터 2008년까지 부산지역 봄철 PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도와 금속원소의 화학적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PM₁₀ 및 PM_{2.5} 그리고 PM_{10-2.5}의 평균 농도는 각각 126.2±89.8, 85.5±41, 6,40.7±54.9 µg/m³이었으며, PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 0.70이었고, PM_{10-2.5}/PM_{2.5} 비는 0.48이었다.
- 2) 금속이온의 농도는 Al, Ca, Fe, Si성분의 농도가 높게 나타났으며, Cd, Co, Cu, Ni, Sr, Ti 등은 낮은 농도를 나타내었다.
- 3) 일평균기온과 운량이 높을수록 PM₁₀과 PM_{2.5}농도는 증가하였고, 반대로 풍속과 상대습도가 증가할수록 PM₁₀과 PM_{2.5}농도는 감소하였다.
- 4) 황사시 PM₁₀과 PM_{2.5}는 각각 302.1, 154.7 µg/m³로 비황사시의 111.2, 79.7 µg/m³보다 높은 농도를 나타내었으며, 황사시의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 0.51로 비황사시의 0.72에 비해 낮았다. Al, Co, Fe, Mg, Mn, Sr, Ti 등은 비황사시에 비해 황사시의 농도가 3배 이상 높았으며, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn 등은 거의 차이가 없었다.
- 5) Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V, Zn 등의 지각농축계수는 10 이상이었으며, Co, Fe, K, Si, Sr, Ti 등은 10이하의 값을 나타내었다. PM₁₀과 PM_{2.5} 중 Co, Fe, Mg, Si, Sr, 및 Ti은 비황사시 뿐만 아니라 황사시에도 지각농축계수가 10 이하였으며, Cr, Ni과 V은 비황사시와 황사시에 큰 차이를 보였다.
- 6) 우리나라의 북서쪽인 북경을 포함한 지역과 서쪽인 상해를 포함한 지역에서 공기덩어리가 이루어질 때 가장 높은 미세먼지를 나타내었고, 태평양에서 이루어질 때 가장 낮은 농도를 나타내었다. 우리나라 봄철 미세먼지농도는 이동해 오는 공기덩어리의 이동경로에 의해 큰 영향을 받고 있다.

참고문헌

국립환경연구원, 2000, 장거리이동 대기오염물질의 공간분포 및 변화에 관한 연구(III). 국립환경연구원, 216 p.

- 기상청, 2009, 기상청보도자료(2009. 6. 25), 3 p.
- 김민영, 조석주, 김광래, 이민환, 2003, 황사기간 중 $PM_{2.5}$, PM_{10} , TSP 농도 특성에 관한 연구. 한국지구과학회지, 24, 315-324.
- 신선아, 한진석, 김진도, 2006, 수용모델(CMB)을 이용한 한반도에서 관측된 황사의 발원지추정과 기여도에 대한 연구. 한국대기환경학회지, 22, 157-166.
- 전병일, 2003, 부산지역 PM_{10} 농도의 시간 및 공간적 특성. 한국환경과학회지, 12, 1033-1041.
- 전병일, 황용식, 이혁우, 양아름, 김현정, 설재환, 강영진, 김택훈, 장현석, 2005, 2004년 부산지역 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 중의 금속 농도 특성. 한국지구과학회지, 26, 573-583.
- 최규훈, 김기현, 강창희, 이진홍, 2003, 황사와 비황사기간의 중금속 농도분포 특성: 2001년 황사기간에 대한 비교연구. 한국대기환경학회지, 19, 45-56.
- 한진석, 김영미, 안준영, 공부주, 최진수, 이상욱, 이석조, 2006, 장거리 대기오염물질 이동량의 공간적 분포와 변화 추이. 한국대기환경학회지, 22, 99-106.
- 한진석, 김영성, 문광주, 안준영, 김정은, 류성운, 김영준, 공부주, 이석조, 2004, 2001년 11월 오염시기와 2002년 봄 황사시기 제주도 고산에서의 미량원소 농도 변화. 한국대기환경학회지, 20, 143-151.
- Allen, G., Sioutas, C., Koutrakis, P., Reiss, R., Lurmann, F.W., and Roberts, P.T., 1997, Evaluation of the TEOM method for measurement of ambient particulate mass in urban areas. Journal of Air and Waste Management Association, 47, 682-689.
- Baldauf, R.W., Lane, D.D., Marotz, G.A., and Wiener, R.W., 2001, Performance evaluation of the portable MiniVol particulate matter sampler. Atmospheric Environment, 35, 6087-6091.
- Connell, D.P., Withum, J.A., Winter, S.E., Statnick, R.M., and Bilonick, R.A., 2005a, The Steubenville Comprehensive Air Monitoring Program (SCAMP): Analysis of short-term and episodic variations in $PM_{2.5}$ concentrations using hourly air monitoring data. Journal of the Air and Waste Management Association, 55, 559-573.
- Connell, D.P., Withum, J.A., Winter, S.E., Statnick, R.M., and Bilonick, R.A., 2005b, The Steubenville Comprehensive Air Monitoring Program(SCAMP): Associations among fine particulate matter, co-pollutants, and meteorological conditions. Journal of the Air and Waste Management Association, 55, 481-496.
- DeGaetano, A.T. and Doherty, O.M., 2004, Temporal, spatial and meteorological variations in hourly $PM_{2.5}$ concentration extremes in New York City. Atmospheric Environment, 38, 1547-1558.
- Dockery, D.A. and Pope, C.A., 1994, Acute respiratory effects of particular air pollution. Annual Review Public Health, 15, 107-132.
- Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X., Splenger, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris Jr., B.G., and Speizer, F.E., 1993, An association between air pollution and mortality in six US cities. The New England Journal of Medicine, 329, 1753-1759.
- Draxler, R.R. and Hess, G.D., 1997, Description of the HYSPLIT_4 modeling system. NOAA Technical Memorandum ERL ARL_224, 25 p.
- Drewnick, F., Schwab, J.J., Jayne, J.T., Canagaratna, M., Worsnop, D.R., and Demerjian, K.L., 2004, Measurement of ambient aerosol composition during the PMTACS-NY 2001 using an aerosol mass spectrometer, Part I: Mass concentrations. Aerosol Science and Technology, 38, 92-103.
- Guo, Z.G., Feng, J.L., Fang, M., Chen, H.Y., and Lau, K.H., 2004, The elemental and organic characteristics of $PM_{2.5}$ in Asian dust episodes in Qingdao, China, 2002. Atmospheric Environment, 38, 909-919.
- He, Z., Kim, Y.J., Ogunjobi, K.O., and Hong, C.S., 2003, Characteristics of $PM_{2.5}$ species and long-range transport of air masses at Taean background station. South Korea, Atmospheric Environment, 37, 219-230.
- John, W., Wall, S.M., Ondo, J.L., and Winklmay, W., 1990, Modes in the size distribution of atmospheric inorganic aerosol. Atmospheric Environment, 24A, 2349-2359.
- Khan, M.F., Shirasuna, Y., Hirano, K., and Masunaga, S., 2010, Characterization of $PM_{2.5}$, $PM_{2.5-10}$ and $PM_{>10}$ in ambient air, Yokohama, Japan. Atmospheric Research, 96, 159-172.
- Kim, K.H., Choi, G.H., Kang, C.H., Lee, J.H., Kim, J.Y., Youn, Y.H., and Lee, S.R., 2003, The chemical composition of fine and coarse particles in relation with the Asian Dust events. Atmospheric Environment, 37, 753-765.
- Lee, B.K., Jun, N.Y., and Lee, H.K., 2004, Comparison of particulate matter characteristics before, during, and after Asian dust events in Incheon and Ulsan, Korea. Atmospheric Environment, 38, 1535-1545.
- Lipfert, F.W. and Wyzga, R.E., 1995, Air pollution and mortality: Issues and uncertainties. Journal of Air and Waste Management Association, 45, 949-966.
- Pope, C.A., Burnett, R., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewskik, D., Ito, K., and Thurston, G.D., 2002, Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long term exposure to fine particulate air pollution. Journal of the American Medical Association, 287, 1132-1141.
- Sarnat, S.E., Coull, B.A., Schwartz, J., Gold, D.R., and Suh, H.H., 2006, Factors affecting the association between ambient concentrations and personal exposures to particles and gases. Environmental Health Perspectives, 114, 649-654.
- Simpson, R.W., 1992, A statistical analysis of particulate data sets in Brisbane, Australia. Atmospheric Environment, 26B, 99-105.
- Tecer, L.H., Suren, P., Alagha, O., Karaca, F., and Tuncel,

- G., 2008, Effect of meteorological parameters on fine and coarse particulate matter mass concentration in a coal-mining area in Zonguldak, Turkey. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 58, 543-552.
- US Environmental Protection Agency, 1997, National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter, Final Rule. *Federal Register*, 1997, 62, Part II, EPA, 40 CFR Part 50, 110 p.
- Wojas, B. and Almquist, C., 2007, Mass concentrations and metals speciation of PM_{2.5}, PM₁₀, and total suspended solids in Oxford, Ohio and comparison with those from metropolitan sites in the Greater Cincinnati region. *Atmospheric Environment*, 41, 9064-9078.

2010년 3월 31일 접수
2010년 4월 22일 수정원고 접수
2010년 5월 10일 채택