

부산지역 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도 특성

김상렬 · 정장표 · 이승묵*

경성대학교 건설 · 환경공학부

*이화여자대학교 환경공학과

(2000년 1월 14일 접수, 2000년 3월 31일 채택)

Characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ Concentration in Pusan Area

Sang-Youl Kim · Jang-Pyo Cheong · Seung-Muk Yi*

Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsoong University

**Dept. of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University*

ABSTRACT

It is necessary to improve the ambient air quality through the proper treatment and control of pollutants by designating air pollutants to regulatory ones. Especially, human took a concern for particulate matters which raised visibility reduction, public health effects and injury of property for urban areas. In order to reduce the effect of particulate matters, we need to establish proper control strategies based on the concentration characteristics of particulate matters. In this study, to evaluate the characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀, thirty-eight samples of PM_{2.5} and PM₁₀ were collected at Nam-Gu sampling site where continuous air monitoring system has been operated, from May, 1999 to November, 1999, and their concentrations for the mass and anion components(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) were analyzed. The important conclusions obtained in this study were as followings. Total average mass concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ were 35.016 and 50.293 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively, and PM_{2.5}/PM₁₀ ratio was calculated 0.692. Total average concentrations of anion components in PM_{2.5} were 1.581(Cl⁻), 3.690(NO₃⁻) and 12.825(SO₄²⁻) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and those in PM₁₀ were 2.471(Cl⁻), 5.819(NO₃⁻) and 14.414(SO₄²⁻) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively. From the correlations analysis, the correlation coefficient between mass concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ was calculated as 0.945. The correlation coefficients between PM_{2.5} and anion components were analyzed as Cl⁻ (0.025), NO₃⁻(0.788) and SO₄²⁻(0.500) respectively, and the correlation coefficients between PM₁₀ and anion components were analyzed as Cl⁻(-0.019), NO₃⁻(0.806) and SO₄²⁻(0.535) respectively.

요약문

여러 가지 대기오염물질을 규제대상으로 지정하여 대기중으로 방출되는 대기오염물질에 대한 적절한 처리와 방지를 통하여 대기질을 개선하는 작업이 필요하다. 특히 도시지역의 경우 이들 오염물질 중 시정의 악화, 인체보건학상 급·만성 장애를 초래하며, 재산상의 피해를 주는 분진에 대해 최근 관심이 모아지고 있다. 이러한 분진의 농도 증가에 따른 피해를 저감시키기 위해서는, 먼지의 농도 특성 자료에 근거한 적절한 통제전략을 수립할 필요가 있다. 이러한 배경에서 본 연구는 부산지역의 도시분진 오염도에 대한 적절한 관리를 위해 부산지역의 대기중 PM_{2.5}의 질량농도 및 수용성 음이온성분(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)의 농도 특성을 PM₁₀의 경우와 대비하여 비교·평가하였다. 시료채취기간은 1999년 5월부터 1999년 11월까지이며, 각 38회의 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 시료를 채취하여, 그 질량농도와 수용성 음이온성분(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)의 농도 특성을 분석하였다. PM_{2.5}의 전체기간동안 평균농도는 35.016 µg/m³으로 산정되었으며, PM₁₀ 평균농도(50.293 µg/m³)에 대한 PM_{2.5}의 질량농도비 평균은 0.692로 산정되었다. PM_{2.5} 중 수용성 음이온성분의 전체평균농도는 각각 1.581(Cl⁻), 3.690(NO₃⁻) 그리고 12.825(SO₄²⁻) µg/m³으로 나타났으며, PM₁₀은 각각 2.471(Cl⁻), 5.819(NO₃⁻) 그리고 14.414(SO₄²⁻) µg/m³으로 나타났다. 각 성분들간의 상관분석을 시행한 결과, PM_{2.5}와 PM₁₀ 질량농도의 상관성은 0.945로 상당히 높은 상관관계를 나타내었다. PM_{2.5} 질량농도와 각 성분들간에는 Cl⁻(0.025), NO₃⁻(0.788), SO₄²⁻(0.500), 그리고 PM₁₀ 질량농도와는 Cl⁻(-0.019), NO₃⁻(0.806), 그리고 SO₄²⁻(0.535)의 상관성을 나타내었다.

주제어 : PM_{2.5}, PM₁₀, 음이온 성분, 상관분석

1. 서론

오늘날 인구증가, 급속한 산업발달 및 교통량 증가, 그리고 생활수준의 향상에 따른 많은 양의 오염물질이 대기로 방출됨으로써 심각한 대기오염 현상을 야기시켜, 이로 인한 인간의 직·간접적인 피해 상황에 대한 관심이 고조됨과 동시에 이에 대한 적절한 통제 및 관리방안의 모색에 노력이 경주되어지고 있다.

각종 산업시설 및 교통량의 증대 등은 대기중 부유먼지의 농도를 증가시키는 중요한 원인이 되고 있으며, 최근 병리학적 연구들은 대기중 부유먼지의 농도가 인체에 미치는 영향이나 사망률 등과 높은 관련성이 있음을 보고하고 있다. 특히 도시지역의 경우 이들 부유분진 중 시정의 악화 및 인체 위해도에 있어 상대적으로 더 큰 피해를 주는 미세먼지에 대해 보다 큰 관심을 보이고 있다.^{1,2)}

대기중 부유먼지에는 인체에 유해한 다환방향족 탄화수소, 중금속, 그리고 산성침착을 유발시키는

각종 수용성 음이온성분 등이 포함되어 있다. 먼지의 제거를 위해 주요 오염원과 불특정 오염원에 대한 지속적인 배출규제정책을 시행함으로써 최근 대기중의 TSP의 농도는 점차적으로 감소하고 있지만, 인체피해도가 높고 시정악화에 크게 영향을 미치는 것으로 알려진 미세먼지의 농도는 오히려 완만한 증가추세를 보이고 있으며 실제적으로 먼지로 인해 인체에 느껴지는 체감 오염도도 오히려 증가하고 있는 실정이다.

선행 연구에 의하면 분진 중에서도 호흡기관인 폐영역에 가장 높은 침착율(deposition rate)을 나타내는 것으로 보고된 입경이 0.5~10 µm 사이인 입자에 대해 많은 관심이 집중되고 있는 실정이다.^{3,4)} 또한 미세입자는 인체에 대한 위해도가 조대입자에 비교하여 매우 높을 뿐만 아니라 대기중에 장기간 체류하기 때문에 발생원으로부터 먼 거리까지 이동하여 넓은 지역에 심각한 환경문제를 야기시키는 것으로 보고되고 있다. 미국에서는 이미 PM₁₀ 기준치를 설정하여 시행해오다 PM_{2.5} 기준치(24시간 평균

65 µg/m³, 연평균 15 µg/m³)를 새로이 추가 설정하여 미연방 대기질 기준(National Ambient Air Quality standard, NAAQS)을 더욱 강화하였으며, 우리나라의 경우도 부유분진에 대한 환경기준치 설정을 1994년도까지는 TSP 항목에 대해 장·단기 기준을 시행해오다, 1995년부터 PM₁₀ 항목이 추가 설정되었으며, 조만간 PM_{2.5}에 대한 기준치 또한 설정이 이루어질 전망이다.

따라서 본 연구에서는 지리·지형적인 특성이 다른 도시와 뚜렷한 차이가 나는 부산시의 대기중 PM_{2.5}의 질량농도 및 산성우의 주원인 물질로 밝혀진 NO₃⁻와 SO₄²⁻ 등 PM_{2.5}의 수용성 음이온성분의 농도변화를 같은 기간동안 동시에 측정된 PM₁₀ 농도자료와 비교·고찰함으로써 이들의 질량농도 및 수용성 음이온성분의 월별 농도 변화 특성을 파악하였다.

2. 실험 및 분석방법

2.1. 시료채취

본 연구에 사용된 시료채취 장치는 PM_{2.5} 및 PM₁₀용 Inlet을 각각 별도로 장착한 Portable Sampler(US AIR METRICS Co.)로서, 포집원리는 일정량의 공기를 흡인펌프를 이용하여 선택적 Inlet 부분과 필터에 통과시킴으로써 대기중 분진을 필터표면에 침착시켜 먼지시료를 포집한다. 이 장치는 필터홀더 상부에 덮개 모양을 하고 있어 대기중 조대입자가 필터로 직접 침적되는 것을 방지하며, 또한 시료채취시 유량이 거의 일정하게 유지되는 특성을 가지고 있다. 시료채취시 흡입유량은 5 L/min으로 일정하게 유지하였으며, 사용한 필터는 직경이 47 mm인 섬유성 필터GF/C(Whatman Co.)이다.

본 연구의 시료채취 위치는 북쪽으로 황령산과 도시고속도로, 남쪽으로 바다와 일교통량이 많고 지하철공사가 진행되고 있는 남구 구간선도로와 근접해 있는 부산광역시 남구 대연동 소재 경성대학교 한성관 건물 옥상으로서, 지상으로부터 약 15 m의 높이에 시료채취 장치를 설치하였다. 시료채취 기간은 1999년 5월부터 1999년 11월까지 비가 오지 않는

날을 기준으로 하였으며, 채취시간은 24시간 연속 포집하는 것을 원칙으로 하여 각 38회의 시료를 채취하였다. 채취기간 중 불규칙적인 강우빈도로 인하여 시료채취 주기 및 월별 시료채취 횟수를 일정하게 맞추는 것에는 다소 어려움이 있었다.

2.2. 시료분석

시료의 질량농도 분석은 포집 전후 약 3일간 항온, 항습 상태의 전기 데시게이터에 보관하여 항량시킨 필터를 사용하여 포집한 것을 0.001 mg의 감도를 갖는 Micro balance(ATI CAHN Co. C-15)를 사용하여 구한 무게차를 포집유량으로 나누어 PM_{2.5}와 PM₁₀의 질량농도를 산정하였다. 그리고 PM_{2.5}의 수용성 음이온성분은 포집된 필터를 칭량한 다음 초순수 10 mL를 가하여 10분동안 초음파 추출기를 사용하여 용출한 것을 여과한 후 HPLC(Water Co.)를 사용하여 수용성 음이온성분(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)을 분석하였다. 본 연구에서 사용된 분석장치와 구체적인 분석조건은 Table 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상자료 분석

선행 연구에 의하면, 기상요소는 부유분진의 질량농도 및 구성물질의 농도와 상관성이 높은 것으로 보고되고 있다.¹⁾ 따라서 본 연구에서는 시료채취 기간 동안의 기상특성을 파악하기 위하여 부산 지방기상청의 기상통계자료를 이용하여 기상요소를 분석하였으며, 시간별 풍향·풍속 자료를 이용하여 월별

Table 1. Operating conditions of HPLC

Instrument	HPLC
Column	IC-Pak™ Anion HR
Eluent	Sodium Borate/Gluconate Eluent
Flow rate	1.0 mL/min
Detector	Conductivity
Suppressor	Alltech Model 335 SPCS™

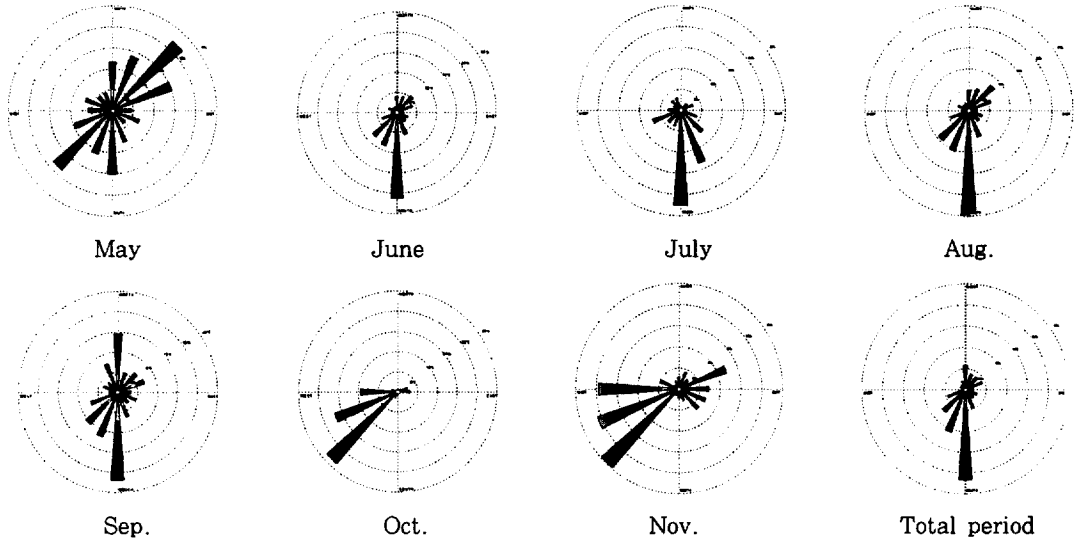


Fig. 1. Windrose for meteorological data during the study period.

풍배도를 Fig. 1에 나타내었다.

7월과 8월의 강우빈도가 다른 기간보다 상대적으로 매우 높게 나타났는데, 이로 인한 세정작용과 일사량 감소 등으로 대기중 1차 오염물질인 부유분진의 농도 및 광화학 반응 등에 의해 생성되는 2차 오염물질의 농도에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 예상된다. 연구기간 동안의 월별 풍배도를 살펴보면, 5월, 10월 및 11월을 제외한 기간의 주풍은 남풍으로 나타났으며, 전체 측정기간 동안의 주풍 또한 남풍으로 나타났다. 이것은 여름철 해풍의 영향을 많이 받는 부산의 지역적 특성이 잘 반영되고 있음을 알 수 있다. 그리고 10월과 11월의 평균풍속은 다른 달에 비해 비교적 높게 나타났다.

3.2. PM_{2.5} 및 PM₁₀의 질량농도와 수용성 음이온성분 농도

3.2.1. 질량농도

채취기간 동안의 각 38개 시료에 대해 분석된 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 질량농도 자료를 정리하여 Table 2에 나타내었으며 이를 Fig. 2와 Fig. 3에 도시하였다. 연구기간 중 PM_{2.5}의 평균농도는 35.016 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 산정된 반면, PM₁₀의 평균농도는 50.293 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 분석되었다. 월별 평균농도를 살펴보면

PM_{2.5} 및 PM₁₀의 질량농도는 강우량과 강우빈도가 높은 7월과 8월 및 평균풍속이 높게 관측되어 대기 희석효과가 클 것으로 예상되는 10월과 11월의 월 평균농도가 낮게 측정된 특징을 보이고 있었다. PM_{2.5}의 월평균 농도의 순서는 5월(60.273) > 9월(46.685) > 6월(36.975) > 11월(30.835) > 10월(28.945) > 8월(24.702) > 7월(21.046) 순으로 5월에 가장 높았으며, PM₁₀ 또한 5월(89.454) > 9월(58.702) > 6월(55.105) > 11월(50.784) > 10월(43.983) > 8월(33.612) > 7월(27.778) 순으로 PM_{2.5}의 월별 평균 농도 변화와 동일한 경향을 보였다.

그리고 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 일별 최고 농도도 6월달 중 동일한 채취일에 발생되었으며, 그 농도는 각각 82.299, 116.611 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다.

PM_{2.5}의 질량농도는 동북아 대기오염 장거리이동과 환경보전 협력방안에 관한 조사(II)와 관련하여 비교적 부유분진의 농도가 높은 계절인 겨울철에 남해안 배경농도로 부산 동백섬에서 측정된 평균농도인 32.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 조금 높게 산정되었는데,⁵⁾ 이는 인위적 오염원이 거의 없는 비교적 청정지역인 동백섬과는 달리 측정위치가 교통량이 매우 많은 남구 간선도로와 근접해 있으며, 또한 지하철공사로 인해 부유분진이 많이 발생하는 주거지역이었기 때문에 부유분진의 농도가 낮은 여름철임에도 불구하고

Table 2. Summary of mass concentration data for PM_{2.5} and PM₁₀

Month	n	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5} /PM ₁₀	
May	4	Mean	60.273	89.454	0.670
		S.D	15.911	18.438	0.111
		Range	36.407~68.316	66.194~107.454	0.550~0.815
June	7	Mean	36.975	55.105	0.634
		S.D	25.657	33.191	0.088
		Range	11.422~82.299	22.611~116.644	0.505~0.741
July	6	Mean	21.046	27.778	0.736
		S.D	11.671	14.266	0.117
		Range	6.001~41.482	11.768~53.149	0.510~0.823
Aug.	5	Mean	24.702	33.612	0.758
		S.D	8.343	13.506	0.095
		Range	11.996~32.289	14.136~49.965	0.646~0.849
Sep.	6	Mean	46.685	58.702	0.774
		S.D	22.625	22.606	0.124
		Range	21.807~81.639	29.322~85.050	0.603~0.960
Oct.	4	Mean	28.945	43.983	0.639
		S.D	11.289	12.479	0.105
		Range	12.907~38.239	25.433~52.524	0.507~0.728
Nov.	6	Mean	30.835	50.784	0.627
		S.D	12.271	23.962	0.128
		Range	14.313~42.890	23.686~87.616	0.466~0.796
Total	38	Mean	35.016	50.293	0.692
		S.D	19.942	26.805	0.118
		Range	6.001~82.299	11.768~116.644	0.466~0.960

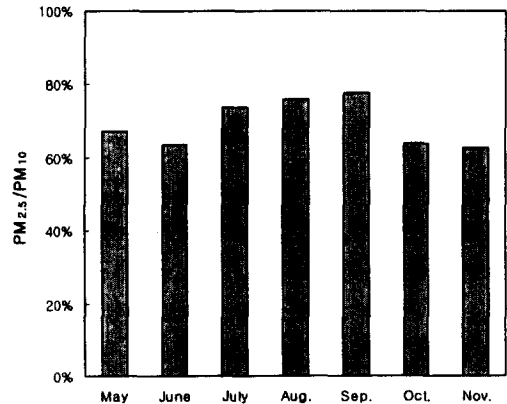


Fig. 2. Monthly variation of mass concentration for PM_{2.5} and PM₁₀.

Fig. 3. Monthly percentage fraction of PM_{2.5}/PM₁₀.

고 높게 측정된 것으로 사료된다. 반면 1997년 여름철 서울지역에서 측정된 $PM_{2.5}$ 의 평균농도($38.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 1996년 여름철 청주지역에서 측정된 $PM_{2.5}$ 의 평균농도($43.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다는 상대적으로 낮게 측정되었다.⁶⁾ 이것은 여름철 해풍의 영향을 많이 받는 지역적 특성상 대기희석 효과가 어느 정도 영향을 미쳤기 때문인 것으로 사료된다.

총 38회의 시료 중 5회(16%)가 미국의 24hr- $PM_{2.5}$ 기준치이며, 1998년 설정된 부산시 24hr- $PM_{2.5}$ 지역환경기준치이기도 한 $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다. 또한 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 질량농도비의 평균값은 0.692로 나타났다. 이것은 $PM_{2.5}$ 의 농도가 PM_{10} 의 약 30~70%를 차지한다고 보고한 미국의 선행 연구와 비교해 볼 때 다소 상한치에 수렴하는 수준을 보이고 있었다.^{7,8)} 월별 질량농도비는 Fig. 3에 도시된 바와 같이 9월(0.774) > 8월(0.758) > 7월(0.736) > 5월(0.670) > 10월(0.639) > 6월(0.634) > 11월(0.627) 순으로 9월이 가장 높게 산정되었다. 장마와 태풍이 잦은 7월과 8월에 질량농도비가 높게 산정된 것은 기상요소 변화에 따른 영향 배출원의 차이와 더불어 미세입자 보다는 조대입자 영역의 분진이 강우량 등의 기상요소로 인한 대기 세정 및 비산억제효과를 상대적으로 더 많이 받았기 때문인 것으로 사료된다. 연구기간 중 실측된 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 월별 변화 경향을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2와 Fig. 3에 도시된 바와 같이 7월과 8월, 그리고 9월에 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 절대 질량농도가 다른 기간보다 상대적으로 낮게 측정된 반면, 질량농도비는 상대적으로 높게 나타내고 있는 특징을 보이고 있다.

3.2.2. 수용성 음이온성분 농도

각각 38개의 여지에서 용출된 시료를 HPLC로 분석하여 얻은 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 중의 음이온 성분의 농도 자료를 정리하여 Table 3과 Table 4에 나타내었다. $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 의 수용성 음이온 성분 농도의 월별 변화경향을 살펴보면 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 경우 다같이 분석된 각 음이온 성분간의 월별변화경향의 뚜렷한 유사성은 찾아보기 어려우며, 다만 NO_3^- 및 SO_4^{2-} 경우는 $PM_{2.5}$ 의 월별 농도 변화 경향과 PM_{10} 의 월별 농도 변화 경향이 비슷한 양상을 보이고 있다.

$PM_{2.5}$ 중 수용성 음이온성분의 농도를 보면, Cl^- 의 경우 6월($2.240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 5월(2.139) > 8월(1.921) > 7월(1.866) > 11월(1.456) > 9월(0.635) > 10월(0.626) 순으로 6월에 월별 평균농도가 가장 높게, NO_3^- 의 경우 5월($6.016 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 11월(5.674) > 6월(4.453) > 10월(3.415) > 9월(3.223) > 8월(1.670) > 7월(1.599) 순으로 5월에 가장 높게 산정되었다. 그리고 SO_4^{2-} 의 경우 5월($24.306 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 6월(16.260) > 7월(15.320) > 8월(12.115) > 9월(9.844) > 11월(8.618) > 10월(3.260) 순으로 5월에 가장 높게 산정되었다.

PM_{10} 중 수용성 음이온성분의 농도를 보면, Cl^- 의 경우 11월($3.064 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 8월(2.789) > 5월(2.777) > 6월(2.628) > 10월(2.543) > 7월(1.959) > 9월(1.535) 순으로 11월에 월별 평균농도가 가장 높게 산정되었으며, NO_3^- 의 경우 5월($9.448 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 11월(8.426) > 9월(6.867) > 6월(6.013) > 10월(4.567) > 8월(2.937) > 7월(2.930) 순으로 5월에 가장 높게 산정되었다. 그리고 SO_4^{2-} 의 경우 5월($26.528 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 7월(17.435) > 6월(16.278) > 8월(14.584) > 9월(11.948) > 11월(9.735) > 10월(4.395) 순으로 5월에 가장 높게 산정되었다. 이와 같은 결과로부터 질량농도의 월별 변화 경향이 대단히 유사한데 비해 각 성분들의 월별 농도 변화 추세는 다소 차이가 남을 알 수 있다. 이러한 이유중 하나는 대기중 오염물질의 농도에 영향을 미치는 배출원이 시간적 특성에 따라 다르기 때문인 것으로 사료된다.

측정기간 중 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 중 수용성 음이온 각 성분별 평균농도를 보면, $PM_{2.5}$ 의 경우 SO_4^{2-} ($12.825 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NO_3^- ($3.690 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Cl^- ($1.581 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타났으며, PM_{10} 의 경우도 SO_4^{2-} ($14.414 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NO_3^- ($5.819 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Cl^- ($2.471 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타났다.

선행 연구에 의하면, Cl^- 의 도심지역에서의 대기 중 평균농도는 약 $0.2 \sim 6.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위에 있다고 보고하고 있으며, SO_4^{2-} 는 $10 \sim 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위에 있다고 보고하고 있다.^{9,10)}

1997년 서울지역에서 측정된 $PM_{2.5}$ 중 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 평균농도($3.43, 8.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 1996년 청주지역에서 측정된 평균농도($1.11, 9.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비교해 보면, NO_3^- 는 청주지역 보다는 높고 서울지

Table 3. Summary of concentration data for anion components in PM_{2.5}

Month	n		Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
			Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
May	4	Mean	2.139	6.016	24.306
		S.D	0.927	2.887	12.738
		Range	1.112~3.100	1.741~7.349	8.120~38.675
June	7	Mean	2.240	4.453	16.260
		S.D	0.230	4.499	4.226
		Range	1.882~2.512	0.175~12.017	12.195~22.603
July	6	Mean	1.866	1.599	15.320
		S.D	0.503	1.493	5.264
		Range	1.359~2.741	0.148~4.453	10.262~22.654
Aug.	5	Mean	1.921	1.670	12.115
		S.D	0.640	0.800	5.655
		Range	0.850~2.528	0.488~2.720	5.412~19.231
Sep.	6	Mean	0.635	3.223	9.844
		S.D	0.670	1.876	2.829
		Range	0.034~1.484	1.345~5.206	8.481~13.206
Oct.	4	Mean	0.626	3.415	3.260
		S.D	0.503	1.883	3.030
		Range	0.064~1.284	1.062~5.612	0.102~6.713
Nov.	6	Mean	1.456	5.674	8.618
		S.D	1.057	3.037	3.189
		Range	0.064~2.755	1.593~9.437	6.183~13.459
Total	38	Mean	1.581	3.690	12.825
		S.D	0.883	2.996	7.630
		Range	0.034~2.755	0.148~12.017	0.102~38.675

Table 4. Summary of concentration data for anion components in PM₁₀

Month	n		Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
			Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
May	4	Mean	2.777	9.448	23.528
		S.D	1.283	4.699	12.453
		Range	1.654~4.513	2.718~13.648	10.493~40.842
June	7	Mean	2.628	6.013	16.278
		S.D	0.597	4.568	5.130
		Range	1.817~3.665	2.118~12.589	10.402~24.488
July	6	Mean	1.959	2.930	17.435
		S.D	1.155	2.890	4.681
		Range	0.677~3.320	0.794~8.695	14.248~26.282
Aug.	5	Mean	2.789	2.937	14.584
		S.D	1.123	0.543	5.263
		Range	1.164~4.318	2.439~3.768	9.564~20.214
Sep.	6	Mean	1.535	6.867	11.948
		S.D	1.552	3.075	1.431
		Range	0.267~4.222	3.619~11.095	10.567~14.341
Oct.	4	Mean	2.543	4.567	4.395
		S.D	1.756	2.878	3.593
		Range	1.159~5.062	2.032~8.004	0.308~8.290
Nov.	6	Mean	3.064	8.426	9.735
		S.D	1.169	4.175	3.665
		Range	0.830~4.222	2.638~12.687	6.101~14.584
Total	38	Mean	2.471	5.819	14.414
		S.D	1.221	4.018	7.794
		Range	0.267~5.062	1.569~13.648	0.308~40.842

역과는 비슷한 농도수준을 나타냈으며, SO_4^{2-} 는 두 지역 보다 다소 높은 농도수준을 나타내었다.⁶⁾ 또한 부산시 주거지역(보건환경연구원 옥상)에서 1995년 5월에서 10월까지 Annular Denuder System을 사용하여 측정된 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 평균농도 ($3.412, 9.316 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비교해 볼 때, 전체적으로 다소 높은 농도수준을 나타내었다.^{11,12)}

미세입자속에 포함된 NO_3^- 는 지역 오염원, 고속도로의 차량, 그리고 디젤 자동차 등으로부터 배출된 NO_x 와 NH_3 가 반응해서 주로 생성되며, SO_4^{2-} 는 지역오염원, 석유 및 석탄연료 사용, 공업지역 및 공공기관의 보일러 등으로부터 배출된 SO_2 와 NH_3 가 반응하여 주로 생성된다. 또한 SO_4^{2-} 의 발생원으로 해염입자가 많은 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.¹³⁾ 따라서 본 채취지점에서 산성우의 주원인 물질로 밝혀진 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 농도가 비교적 높게 나타난 것은 본 연구의 시료채취지점이 일교통량이 많은 도시고속도로, 남구 주간선도로, 그리고 바다와 근접한 지역적 특성을 가지고 있기 때문으로 사료된다.

측정기간 중 수용성 음이온성분의 월별 평균농도 변화를 Fig. 4, Fig. 5, 그리고 Fig. 6에 나타내었다. Cl^- 의 월별 농도 변화 경향은 $\text{PM}_{2.5}$ 의 9월과 10월을 제외한 기간 동안 다른 성분에 비해 상대적으로 안정적인 변화 특성을 나타낸 반면, NO_3^- 는 다른 기간에 비해 7월과 8월에 상당히 낮게 나타났다. SO_4^{2-} 는 여름철 광화학 반응에 의해 SO_2 가 H_2SO_4 로 변환되어 SO_4^{2-} 입자의 생성이 빠르게 진행되어 일반적으로 높은 농도치를 나타내는 것으로 알려져 있지만, 본 연구에서는 여름철인 7월과 8월에 다른 기간에 비해 그다지 높은 농도 변화 특성은 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는, Cl^- 의 경우 주발생원이 해염입자라는 선행 연구 결과와 측정기간 중 주풍이 남풍, 즉 해풍이었던 결과로부터 바다와 근접한 부산의 지역적 특성상 비교적 안정적인 농도 변화 특성을 나타내고 있는 것으로 사료된다. 반면 SO_4^{2-} 의 경우 광화학반응이 활발히 진행되는 여름철 중 7월과 8월은 잦은 강우로 인한 대기 세정효과에 의해 대기중 농도의 저하가 일어남에 따라 상대적으로 5월에 비해 낮은 농도값을 나타낸 것으로 사료된다.

$\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 중 수용성 음이온성분의 평균기여

Fig. 4. Monthly variation of Cl^- concentration in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} .

Fig. 5. Monthly variation of NO_3^- concentration in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} .

Fig. 6. Monthly variation of SO_4^{2-} concentration in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} .

Fig. 7. Composition percentage of anion components in PM_{2.5}.

Fig. 8. Composition percentage of anion components in PM₁₀.

도를 보면 Fig. 7과 8에 나타난 바와 같이, PM_{2.5}의 경우 SO₄²⁻(38%) > NO₃⁻(9%) > Cl⁻(4%) 순으로, 그리고 PM₁₀의 경우 SO₄²⁻(31%) > NO₃⁻(11%) > Cl⁻(5%) 순으로 나타났다. 이는 부산지역에 NO₃⁻ 및 SO₄²⁻의 인위적 발생원이 많이 존재하기 때문에 이들 성분들의 기여도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 거제도 지역에서 측정된 결과와 비교해 보면, 인위적인 오염원이 거의 존재하지 않는 거제도에서는 NO₃⁻ 및 SO₄²⁻의 기여도가 낮은 반면 해염입자 등의 자연발생원에 의해 많이 생성되는 Cl⁻의 평균 기여도가 상대적으로 높게 나타났다.¹⁴⁾ PM_{2.5}와 PM₁₀ 각각에 있어 수용성 음이온성분이 차지하는 비율을 농축계수(EF : enrichment factor)를 사용하여 계산한 결과를 보면, Fig. 9에 나타난 바와 같이, Cl⁻과 NO₃⁻의 경우에는 PM₁₀ 중에 존재하는 비율이

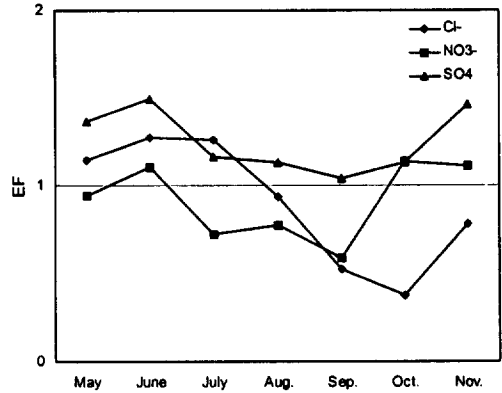


Fig. 9. Monthly variation of enrichment factor values for anion components.

PM_{2.5}에서 보다 높았으며, SO₄²⁻의 경우에는 반대로 PM_{2.5} 중에 존재하는 비율이 PM₁₀에서 보다 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 Wall 등에 의한 연구 결과와도 잘 부합된다.¹⁵⁾

3.3. 상관분석

분석된 각 성분들간의 상관관계를 분석하여 Table 5에 정리하였다. Table 5로부터 PM_{2.5}와 PM₁₀ 질량농도의 상관성은 0.945으로 상당히 높은 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다. PM_{2.5} 및 PM₁₀ 질량농도와 수용성 음이온성분의 상관관계를 보면, Cl⁻의 경우 매우 낮은 상관관계(0.025, -0.019)를 나타내고 있는 반면, NO₃⁻와 SO₄²⁻의 경우 PM_{2.5}에 0.788, 0.500의 상관성을 나타내고 있으며, PM₁₀에는 0.806, 0.535의 상관성을 나타내었다. 이와 같은 상관분석 결과로부터 부산지역의 경우, PM_{2.5} 및 PM₁₀ 질량농도는 Cl⁻과는 상관성이 거의 없는 것으로 나타났으며, NO₃⁻, SO₄²⁻와는 비교적 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 NO₃⁻, SO₄²⁻, organic carbon, elemental carbon, NH₄⁺와 Pb 등이 미세입자의 주된 구성성분들이라고 보고하고 있는 선행연구 결과와도 잘 부합된다.¹⁶⁾ 그리고 PM_{2.5}과 PM₁₀의 수용성 음이온성분 상호간에도 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있었다.

회귀분석을 통한 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도의 상관성을 평가한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. PM_{2.5} 질량농도를 종속변수로, PM₁₀ 질량농도를 독립변수로

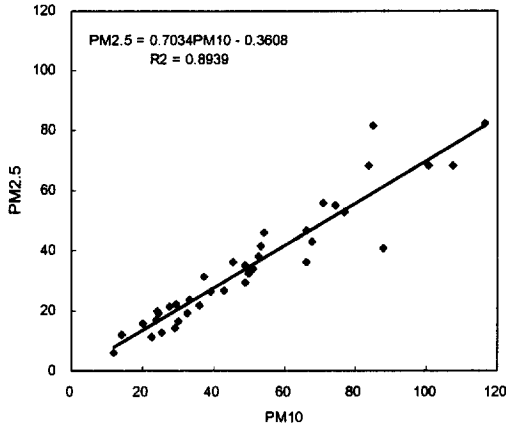


Fig. 10. Linear regression to PM_{2.5} - PM₁₀.

하여 산정된 일차선형 회귀식의 기울기 및 절편은 각각 0.7034, -0.3608로 나타났다. 그리고 결정계수는 0.8939로 높은 값을 보였으며, 이 값은 유의수준 1%에서 통계적으로 유의적인 것으로 나타났다.

본 연구의 결과와 미국 각 지역에서 이루어진 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 연구결과를 정리하여 Table 6에 나타내었다.⁸⁾ 본 연구의 결과를 미국 각 지역에서의 연구결과와 비교해 볼 때, PM_{2.5} 및 PM₁₀의 질량농도수준과 PM₁₀에 대한 PM_{2.5}의 질량농도비는 미국의 각 지역에 비해 다소 높은 값을 나타내고 있으며, 그 상관성 정도는 비슷한 수준을 보이고 있었다.⁸⁾

4. 결 론

본 연구는 부산시 대기중 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도 변화 특성을 규명하기 위한 목적으로 1999년 5월에서 11월까지 각 38회의 시료를 채취하여 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) PM_{2.5}의 질량농도 특성을 보면, 평균농도는 $35.016 \pm 19.942 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 계산되었으며,

Table 5. Correlation matrix of complete data set

		PM _{2.5}				PM ₁₀			
		Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	mass	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	mass
PM _{2.5}	Cl ⁻	1							
	NO ₃ ⁻	0.114	1						
	SO ₄ ²⁻	0.584	0.406	1					
	mass	0.025	0.788	0.500	1				
PM ₁₀	Cl ⁻	0.344	0.016	0.128	-0.159	1			
	NO ₃ ⁻	0.137	0.919	0.408	0.768	0.111	1		
	SO ₄ ²⁻	0.525	0.414	0.962	0.532	0.107	0.425	1	
	mass	0.096	0.818	0.507	0.945	-0.019	0.806	0.535	1

Table 6. Comparison of correlation characteristics between PM_{2.5} and PM₁₀ studied in various sites

Elements Site	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		PM _{2.5} /PM ₁₀	Corr. coeff. (r^2)	Relation function
	PM _{2.5}	PM ₁₀			
Northeast	21.54	34.28	0.62	0.87	PM _{2.5} =0.83PM ₁₀ -0.34
Southeast	16.32	29.19	0.55	0.63	PM _{2.5} =0.43PM ₁₀ +3.61
Industrial Midwest	17.62	29.02	0.60	0.86	PM _{2.5} =0.52PM ₁₀ +2.09
Southwest	13.28	37.56	0.35	0.77	PM _{2.5} =0.15PM ₁₀ +7.49
Northwest	17.29	29.85	0.57	0.90	PM _{2.5} =0.72PM ₁₀ -4.42
S. California	26.76	54.10	0.49	0.87	PM _{2.5} =0.66PM ₁₀ -9
Pusan (this Study)	35.02	50.29	0.69	0.89	PM _{2.5} =0.70PM ₁₀ -0.36

월별 최대농도는 5월에 60.273 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 그리고 장마기간과 태풍의 영향을 많이 받은 7월과 8월에는 상대적으로 낮은 농도값을 나타내었다. 또한 같은 시기에 측정된 PM₁₀ 평균농도(50.293 \pm 26.805 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 대한 PM_{2.5}의 질량농도비 평균은 0.692로 계산되었으며, 비가 자주 온 7월과 8월에 PM_{2.5}와 PM₁₀의 절대질량농도가 다같이 낮은 수준임에도 불구하고, 질량농도비는 높게 산정된 특징을 보이고 있다.

- 2) PM_{2.5} 중 Cl⁻의 농도 특성을 보면, 전체평균농도는 1.581 \pm 0.883 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 계산되었으며, 월별 최대 평균농도는 6월에 2.240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 그리고 Cl⁻의 월별 농도 변화는 다른 성분에 비해 상대적으로 안정된 변화 특성을 나타내었다.
- 3) PM_{2.5} 중 NO₃⁻의 농도 특성을 보면, 장마기간인 7월과 태풍이 잦은 8월에 상대적으로 낮은 농도값을 나타내고 있으며, 전체평균농도는 3.690 \pm 2.996 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 월별 최대 평균농도는 5월에 6.016 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다.
- 4) PM_{2.5} 중 SO₄²⁻의 농도 특성을 보면, 전체평균농도는 12.825 \pm 7.630 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 산정되었으며, 5월에 24.306 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 최대 농도치를 나타내었다. 그리고 광화학반응이 많이 일어나는 것으로 알려진 여름철 중 7월과 8월은 잦은 강우로 인하여 다른 기간에 비해 상대적으로 높은 농도 변화 특성은 나타나지 않았다.
- 5) PM₁₀ 중 수용성 음이온성분의 농도 특성을 보면, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 각각 전체평균농도가 2.471 \pm 1.221, 5.819 \pm 4.018, 14.414 \pm 7.794 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 산정되었으며, 월별 농도의 변화 특성은 PM_{2.5} 중 수용성 음이온성분과 유사한 경향을 보였다.
- 6) 각 성분들간의 상관분석을 시행한 결과, PM_{2.5}와 PM₁₀ 질량농도의 상관성은 0.945로 상당히 높은 상관관계를 나타내었으며, PM_{2.5} 질량농도와 수용성 음이온성분의 상관성은 NO₃⁻(0.788) > SO₄²⁻(0.500) > Cl⁻(0.025) 순으로 Cl⁻ 제외하고는 비교적 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났다. PM₁₀ 또한 NO₃⁻(0.806)

> SO₄²⁻(0.535) > Cl⁻(-0.019) 순으로 나타났다.

- 7) 회귀분석을 통하여, PM_{2.5} = 0.7034PM₁₀ - 0.3608(r=0.8939, P=0.01)과 같은 회귀식을 얻을 수 있었으며, 미국에서 행해진 연구결과와 비교할 때 그 상관성 정도는 비슷한 수준이었다.

사 사

본 연구는 2000년도 경성대학교 교비지원과제의 일환으로 수행되었으며, 그 지원에 감사를 드리는 바입니다.

참 고 문 헌

1. 정장표, 부산시 부유분진의 특성과 오염원 기여도에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문(1993).
2. Tomatis, L. Ed., Air pollution and human cancer, Springer Verlag Berlin Heidelberg, Germany, pp. 9~34(1990).
3. Lippmann, M. and Albert, R., "The effect of particle size on the regional deposition of inhaled aerosols in the human respiratory tract," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **30**, 257(1969).
4. Chan, T. L. and Lippmann, M., "Experimental measurements and empirical modelling of the regional deposition of inhaled particles in humans," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **41**, 399(1980).
5. 문길주 등, "동북아 대기오염 장거리이동과 환경보전협력방안에 관한 조사(II)", 한국과학기술연구원(1997).
6. 이학성, 강충민, 강병욱, 김희강, "서울지역 여름철과 겨울철 산성 오염물질의 농도 특성에 대한 연구," *한국대기환경학회지*, **15**(2), 113~120(1999).
7. Chow, J. C., Watson, J. G., Lu, Z., Lowenthal, D. H., Frazier, C. A., Solomon,

- P. A., Thuillier, R. H., and Magliano, K., "Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX," *Atmos. Environ.*, **30**(12), 2079~2112(1996).
8. U. S. EPA., Air Quality Criteria for Particulate Matter, EPA-600/P-95/001aF, pp. 6-071~6-105(1996).
9. Daisey, J. M., Miguel, A. H., de Andrade, J. B., Pereira, P. A., and Tanner, R. L., "An overview of the Rio de Janeiro aerosol characterization study," *JAPCA*, **37**, 15~23(1987).
10. Chevone, B. I., Herzfeld, D. E., Krupa, S. V., and Chappelka, A. H., "Direct effects of atmospheric sulfate deposition on vegetation," *JAPCA*, **36**, 813~815(1986).
11. 정장표, Annular Denuder System을 이용한 부산시 대기중 산성 에어로졸의 농도특성, 경성대학교 환경공학과 석사학위논문(1996).
12. 김영태, Annular Denuder System을 이용한 대기 에어로졸중 황산염과 질산염의 농도특성, 경성대학교 환경공학과 석사학위논문(1996).
13. FACA National and Regional Strategies Workgroup, PM_{2.5} Composition and Source, U. S. EPA Research(1997).
14. 장영환, 거제도 배경농도 측정지역의 산성 에어로졸 및 PM_{2.5}의 특성, 경성대학교 환경공학과 석사학위논문(1999).
15. U. S. EPA., Air Quality Criteria for Particulate Matter, EPA-600/P-95/001aF, pp. 3-16~3-18(1996).
16. Seinfeld, J. H., Atmospheric chemistry and physics of air pollution, Wiley Interscience, New York(1986).