

## 부산지역 대기 중 초미세먼지의 화학적 조성과 오염특성 평가 연구(II)

박기형<sup>†</sup> · 조정구 · 류병순  
대기보전과

### Evaluation of Pollution Characteristics and Chemical Composition of PM2.5 in Ambient Air in Busan(II)

Gee-Hyeong Park<sup>†</sup>, Jeong-Gu Cho and Byung-Soon Ryu  
*Air Preservation Division*

#### Abstract

This research has been done to obtain preliminary data for preparing air quality standard of PM2.5, to protect public health, and to reduce fine particulate matter by surveying chemical composition to evaluate health and environmental hazardous.

It was found that ;

mean concentration of PM2.5 was 23.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  and daily mean concentration ranged from 6.7 to 59.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . High mass concentrations of PM2.5 (over 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) were observed on primarily mist, and haze episode days and stabilized air condition except Asian dust event periods. Composition of PM2.5 were 44% of ionic species, 26% of carbonic species (EC and OC), 2% of metallic elements, and 28% of the others including particle bound water, and etc. Ionic species, especially sulfate, ammonium, and nitrate, were the most abundant in PM2.5 composition and it showed high correlation coefficient with PM2.5. Metallic elements, although its concentration is low level comparing to other species, were 2% of PM2.5 and is primarily composed of soil related species like Fe, Al. From PMF receptor modelling analysis for source profile, we obtained 7 factors contributing PM2.5 concentration ; 1) soil and industry related sources (26.7%), 2) secondary particle related (22.6%), 3) seasalt related (20.0%), 4) paved road related (12.1%), 5) mobile and combustion related (10.6%), 6) coal combustion (6.1%), 7) biomass burning (2.4%).

Keywords : PM2.5, ionic species, metallic elements, carbonic species, receptor modelling, source profile

#### 서 론

본 연구는 2009년도에 수행한 『부산지역 대기중 초미세먼지의 화학적 조성과 오염특성 평가연구(I)』에 이은 2차년도 연구과제 수행결과이다. 초미세먼지(이하 PM2.5)는 기후변화 유발, 시정감소 등 환경에 미치는 영향뿐만 아니라 호흡기 및 순환기계 등 인체의 건강상 위해성이 미세먼지(이하 PM10)보다 더 크다는 연구결과들이 제시되고 있으며 향후 PM2.5의 대기환경기준 설정에 따른 자료의 확보를 위해 전년도에 이어 계속적인 연구를 수행하였다.

우리나라는 1970년대 초반 환경기준상의 5개 대기오염물질

(TSP, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO)에 대해 측정을 시작하였으며, 1995년부터 PM10 항목이 대기환경기준(24시간 평균 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 연간 평균 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 추가되었고 2001년에 기준을 강화(연간 평균 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )하였으며 2007년부터는 더욱더 강화하여(24시간 평균 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 연간 평균 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 대기 중 입자상 물질에 대해 더욱 엄격하게 관리하여 왔다. 그러나 현재의 PM10 만으로는 미세먼지의 인체에 미치는 영향과 시정감소를 정확하게 평가, 관리할 수 없다는 연구결과들이 제시되고 있다. 즉, PM10 농도가 기준이하더라도 건강상의 장애를 가져올 수 있고, 시정감소 직접적인 영향을 미치는 입자의 크기는 2  $\mu\text{m}$  이하로서 빛의 산란과 흡수효율이 매우

<sup>†</sup>Corresponding author. E-mail : green911@korea.kr  
Tel : +82-888-6816, Fax : +82-888-6817

크다는 점이 고려되어 환경부에서는 금년 환경기준을 설정하여 2015년에 대기환경기준에 PM<sub>2.5</sub> 항목 (24시간 평균  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 연평균  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 추가할 예정이다. 미세먼지에 대한 규제 및 연구가 활발히 진행되고 있는 미국에서는 1997년 PM<sub>10</sub>에서 PM<sub>2.5</sub>로의 관리를 본격화 하였으며 2006년 그 기준을 강화하였다 (24시간 평균  $65 \rightarrow 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 연간 평균  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 특히 PM<sub>2.5</sub>에 대해서는 질량농도뿐만 아니라 주요 구성성분인 황산염, 질산염, 암모늄염, 탄소(유기탄소, 무기탄소) 등에 대한 성분분석을 실시하는 화학성분 분석 측정망도 규정하고 있다.

대기 중에 부유하는 입자상 물질 중 입자의 크기가  $2.5 \mu\text{m}$  이상인 조대입자는 자연침강에 의해 쉽게 제거되지만  $2.5 \mu\text{m}$  미만의 미세입자는 바람, 습도, 기온, 대기안정도 등 기상 조건의 영향을 많이 받아 대기 중에 장기간 부유할 가능성이 높으며 자연 침강보다는 강우에 의한 세정작용 (scavenging), 즉 washout과 rainout에 의해서만 대부분 제거된다. 본 연구의 대상인 PM<sub>2.5</sub>는 인위적인 발생원에 의한 오염물질들이 더 많은 양을 차지하고 있다. 인위적인 발생원에서 배출된 오염물질은 기체상 (gas phase)의 오염물질이 대부분을 차지하며, 이 물질들이 대기 중에서 광화학반응 등에 의해 입자로 전환 (gas-to-particle conversion)된 후 대기 중에 부유하게 된다. 이러한 물질들은 호흡을 통해 인체 내로 유입되어 폐 깊숙이 침투 후 인체의 조직과 작용하게 되면 인체 보건학상으로도 심각한 문제를 유발할 수 있다는 연구 결과들이 제시되고 있다. 특히, 미세먼지에 함유되어 있는 Pb, Cd, As, Mn, Zn, Ni, Cr 등의 중금속이 인체에 흡수되어 활성산소를 생성하는 등 여러 가지 기전을 통해 호흡기 및 순환기계 뿐만 아니라 인체 질환을 야기할 수 있다는 연구결과들이 발표되고 있다. 대기 중 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 높아질 경우 폐렴, 폐기능 손실, 병원 이용률의 증가, 천식 및 다른 호흡기 관련 질환뿐만 아니라 심혈관 및 암과 관련된 사망 위험성이 증가하는 것으로 보고되어 있다. 이는 변이원성실험을 통해서도 밝혀졌는데 전반적으로 PM<sub>2.5</sub>가 PM<sub>10</sub>보다 비교적 낮은 생존율을 나타내어 독성이 더 높은 것으로 관찰되었다. 또한 대기 중에서 시정(visibility)에 주로 영향을 미치는 입자는  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 인 미세입자들이며 이들 중 황산염, 질산염 및 탄소함유 성분들이 시정감소에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

최근 들어 대기오염으로 인한 건강영향을 규명하는 연구에서는 미세입자 중 특히 인체 유해성이 상대적으로 크다고 보고된 PM<sub>2.5</sub>에 대한 관심이 높아지고 있다. PM<sub>2.5</sub>는 만성 및 급성 조기사망 호흡기계 및 심혈관계 질환으로 인한 입원, 응급실 방문 등의 건강영향과 관련이 있는 것으로 보고되고 있다. 이는 입자의 크기가 작을수록 호흡기에서 입자의 제거 속도가 느려지며, 인체 내로의 침투가 용이하고 폐나 기도 등의 인체 장기에서 흡수되기 쉬우며, 세포와의 반응성이 증가하기

때문이다

서울시의 경우 PM<sub>2.5</sub> 농도 개선에 따른 조기사망 감소의 건강편익을 2006년 농도수준과 대비하여 추산한 결과 장기노출로 인한 만성 조기사망은 미국 EPA 연평균 기준인  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성할 경우 30세 이상 인구 10만 명당 30~37명이 감소하며, WHO 연평균 기준인  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성한다면 30세 이상 인구 10만 명당 41~50명의 조기사망자가 감소하는 것으로 추산되었다. 또한 PM<sub>2.5</sub> 단기노출로 인한 급성 조기사망은 PM<sub>2.5</sub> 농도가 미국 EPA 일평균 기준인  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성한다면 전체 연령 인구 10만 명당 11~12명이 감소하며, WHO 일평균 기준인  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성한다면 전체 연령인구 10만 명당 13~14명이 감소하는 것으로 추산되는 것으로 연구되었다.

어떤 임의의 지역에서 입자상 물질로 인한 대기오염의 원인과 정도를 파악하고 그에 대한 제어대책의 수립 및 배출원 규제를 위해서는 사전에 오염원에 대한 정량정성분석이 선행되어야 하며, 이들 각 발생원에 대한 오염 기여도의 평가가 무엇보다도 중요하다.

부산은 남동쪽에 해안을 끼고 있는 전형적인 연안환경의 도시이므로 연안을 중심으로 한 지역과 비교적 내륙쪽인 지역과는 대기오염 배출환경, 지형 및 기상학적 배경이 다르다. 미세먼지는 오염물질 배출량 및 화학반응, 지형적 조건 그리고 기상조건 등 다양한 인자와 관련되어 있으며 특히, 기상조건은 배출된 오염물질의 확산 정도를 결정하는 중요한 변수이다. 향후 미세먼지 농도해석을 위해서는 국지기상 및 종관기상 상태를 고려하여 대기오염도를 평가하는 것이 무엇보다도 필요하다.

본 연구에서는 향후 PM<sub>2.5</sub>에 대한 대기환경기준 적용과 환경보건학적 위해성 평가를 위한 구성성분을 조사함으로써 부산 시민의 건강보호와 PM<sub>2.5</sub> 저감방안을 제시하고자 하였으며, 이를 위해 2년간의 연구기간을 통해 미세먼지 구성성분의 변화 경향과 성분분석 자료의 통계분석 및 수용모델을 이용하여 발생원을 추정하고 이에 대한 저감방안을 제시하고자 하였다.

#### 미세먼지 배출 현황

부산은 배산임해의 지형 구조를 가지고 있어 많은 교통량을 처리할 수 있는 도로망의 형성에 취약한 구조를 가지고 있으나 교통량은 지속적으로 증가하고 있으며 항만이 도심 인근에 위치하고 있어 항만화물의 시내도로 통과 등으로 기간 도로 교통망의 계속적인 확충에도 불구하고 교통체증은 가중되고 있다. Table 1에서 보는 바와 같이 부산시의 자동차 등록대수가 1992년 46만대에서 2007년 약 100만대로 넘어서면서 대기오염의 주요 배출원이 되고 있다.

**Table 1. Vehicle registration by year in Busan**

(unit : number)

year item	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Total (I.R. <sup>1)</sup> )	812,369 (6.8)	862,699 (6.2)	921,084 (6.8)	955,366 (3.7)	966,417 (1.2)	979,969 (1.4)	994,292 (1.5)	1,010,286 (1.6)	1,038,954 (2.8)	1,116,719 (7.4)
Passenger	547,405	589,257	638,173	667,191	679,433	699,786	718,357	735,941	769,463	851,684
Bus	92,069	87,697	87,903	85,833	83,048	76,791	73,780	71,609	69,904	68,011
Truck	167,899	180,393	189,023	195,601	196,740	196,099	194,622	194,713	191,635	189,029
Special	4,996	5,352	5,985	6,741	7,196	7,293	7,533	7,823	7,952	7,995
Foreign (I.R.)	3,053 (6.5)	3,546 (16.1)	4,435 (25.1)	5,626 (26.9)	6,374 (13.3)	7,422 (16.4)	8,373 (12.8)	9,403 (12.3)	21,410 (127.7)	55,655 (160.0)

<sup>1)</sup>I.R. : Increasing rate(%)

**Table 2. Emission standard for manufactured vehicle**

Vehicle	Pollutants	~ 2002.7.	2002.7. ~	2006.1. ~
Gasoline	NOx(g/km)	0.25	0.12	0.031
	HC(g/km)	0.16	0.056	0.05
Diesel	NOx(g/kWh)	6.0	5.0	3.5
	Particulate(g/kWh)	0.15	0.1	0.02

자동차 배출가스는 차종과 제작년도에 따라 다르나 소형차와 제작년도가 최근 연식일수록 배출가스에 대한 허용기준이 엄격하게 적용되고 있다. Table 2에는 제작차 배출허용기준을 나타내었으며 2006년 이후부터 적용된 제작차 배출허용기준을 휘발유차는 미국에서 2004년 이후 적용한 초저공해차(ULEV) 수준으로, 경유차는 유럽에서 2005년 이후 적용한 유럽 4단계(EURO-4) 수준으로 각각 강화하였다. 강화된 기준에 맞추기 위하여 엔진이 차세대 전자제어식으로 바뀌고, 매연저감장치(DPF)와 같은 후처리 장치도 도입되고 있다. 특히 경유차에서 주로 배출되는 오염물질 중에 질소산화물과 무기탄소를 포함하는 미세먼지가 문제가 되고 있다. 부산시는 인구가 밀집되어 있고 차량 정체시간이 길며 도로주변과 거주지역과의 거리가 짧고 항만 관련 화물차 등 경유가 연료인 대형 화물차량의 운행이 빈번하여 시민들이 느끼는 체감 오염도가 더욱 높으므로 이에 대한 대책이 시급한 실정이다. 특히 자동차에서 배출되는 미세먼지의 주요 구성요소인 탄소성분(유기 및 무기탄소)은 국립환경과학원 조사결과 지역적으로 다소 차이는 있으나 PM2.5 조성의 30~50%를 차지하므로 대기 중 PM2.5의 저감을 위해서는 자동차 관련 정책도 중요한 부분이라 할 수 있겠다.

입자상 물질의 배출원으로 대기배출시설이 있으며 Table 3에서 보는 바와 같이 2009년말 현재 부산지역의 대기배출업소는 총 2,191개소이며 Table 4와 같이 2003년 이후로 계속

감소추세였다가 2008년 소폭 증가 후 2009년 다시 감소하였다. 업종별로는 Table 5에서 보는 바와 같이 금속제품제조업이 703개소로 32.7%를 차지하고 있으며, 연간 대기오염물질 발생량이 2 ton 미만인 5종 사업장이 1,039개소로 전체의 48.3%를 차지하고 있다.

Table 6은 부산지역에서 발생하는 미세먼지의 부분별 배출량을 나타낸 것이다. 미세먼지 발생량의 상당부분이 이동오염원이며 비산먼지가 포함되었을 경우 그 기여도는 80%이상을 차지하는 것으로 나타나 있다.

**Table 3. Air pollutants emission facilities by scale**

Total	Class				
	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5
2,225	33	85	158	913	1,036

**Table 4. Air pollutants emission facilities in Busan**

Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
No.	2,426	2,283	2,191	2,189	2,156	2,234	2,191

Table 5. Classification by industry(2009)

Total	metal	chemistry	refinery	rubber plastic	nonmetal	leather	wood	pulp	food	fiber	etc.
2,191	703	85	3	166	66	36	66	3	42	72	949

Table 6. Emissions of PM10 in Busan

(unit : kg/year)

year		energy industry combustion	non-industry combustion	manufacturing combustion	production process	road	non-road	waste treatment	Total
2004	dust scattering(N)	104,018	116,100	90,129	95,661	1,820,314	763,841	4,122	2,994,185
	ratio(%)	3.5	3.9	3.0	3.2	60.8	25.5	0.1	
	dust scattering(Y)	104,018	116,100	90,129	95,661	19,311,431	763,841	4,122	20,485,302
	ratio(%)	0.5	0.6	0.4	0.5	94.3	3.7	0.0	
2005	dust scattering(N)	397,586	106,234	141,694	32,531	1,748,404	776,214	3,299	3,205,962
	ratio(%)	12.4	3.3	4.4	1.0	54.5	24.2	0.1	
	dust scattering(Y)	397,586	106,234	141,694	32,531	8,015,574	776,214	3,299	9,473,132
	ratio(%)	4.2	1.1	1.5	0.3	84.6	8.2	0.0	
2006	dust scattering(N)	359,217	262,055	285,612	38,845	1,591,754	931,758	16,450	3,485,691
	ratio(%)	10.3	7.5	8.2	1.1	45.7	26.7	0.5	
	dust scattering(Y)	359,217	262,055	285,612	38,845	7,760,366	931,758	16,450	9,654,303
	ratio(%)	3.7	2.7	3.0	0.4	80.4	9.7	0.2	
2007	dust scattering(N)	82,000	232,000	237,000	41,000	1,506,000	828,000	17,000	2,959,000
	ratio(%)	2.8	7.8	8.0	1.4	50.9	28.0	0.6	
	dust scattering(Y)	82,000	232,000	237,000	41,000		828,000	17,000	
	ratio(%)								

1)dust scattering(N) : 비산먼지 미포함

2)dust scattering(Y) : 비산먼지 포함

### 재료 및 방법

#### 시료채취 및 분석

본 연구는 2년에 걸쳐 행해졌으며 1차 년도는 2009년 1월부터 10월까지, 2차년도 2010년 3월부터 10월말까지 수행되었다. 본 연구의 수행을 위해 시료의 채취는 부산지역을 대표할 수 있는 연제구 연산동 소재 종합대기측정소에서 행하였다. 이 지점은 주거지역에 해당되며 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 지리적으로 부산지역의 중심부에 위치해 있다. 연구대상지점 주변은 아파트, 빌라, 주택 등 주거단지로 구성되어 있으며, 측정소를 기점으로 남동 방향 160 m 지점에 왕복 8차선 도로가 인접하고 있으며 북동방향 300 m 지점에 연산교차로가 위치해 있다.

시료 채취시간은 09:00부터 다음날 09:00까지 24시간 연속 채취를 기본으로 하였다. 시료채취에 사용된 장비는 PMS-102 (Korea, APM Eng., Co.)로 시료채취유량은 16.7 L/min을 유지하여 입경이 2.5  $\mu$ m 이하(cut-off 50%)인 미세 입자상물질들만 선택적으로 채취되도록 하였다.

#### 중량농도의 측정

시료채취에 사용된 여지는 Zefluor™ supported PTFE(pore size 2.0  $\mu$ m,  $\Phi$  47 mm, Pall Corp.)이며, 시료채취 전 항온(20 $\pm$ 2  $^{\circ}$ C) 및 항습(45 $\pm$ 5%) 조건이 유지되도록 24시간동안 데시케이터내에 보관한 뒤 무게를 측정하였다. 채취한 시료는 현장에서 PTFE 재질의 테이프를 밀봉한 다음 실험실로 운반 후 항온 항습 데시케이터에 시료를 24시간 동안 보관한 뒤 무게를 측정하여 시료채취 전후의 무게차에 의해 중량농도를 산출하였다.

**이온성분 및 금속성분 분석**

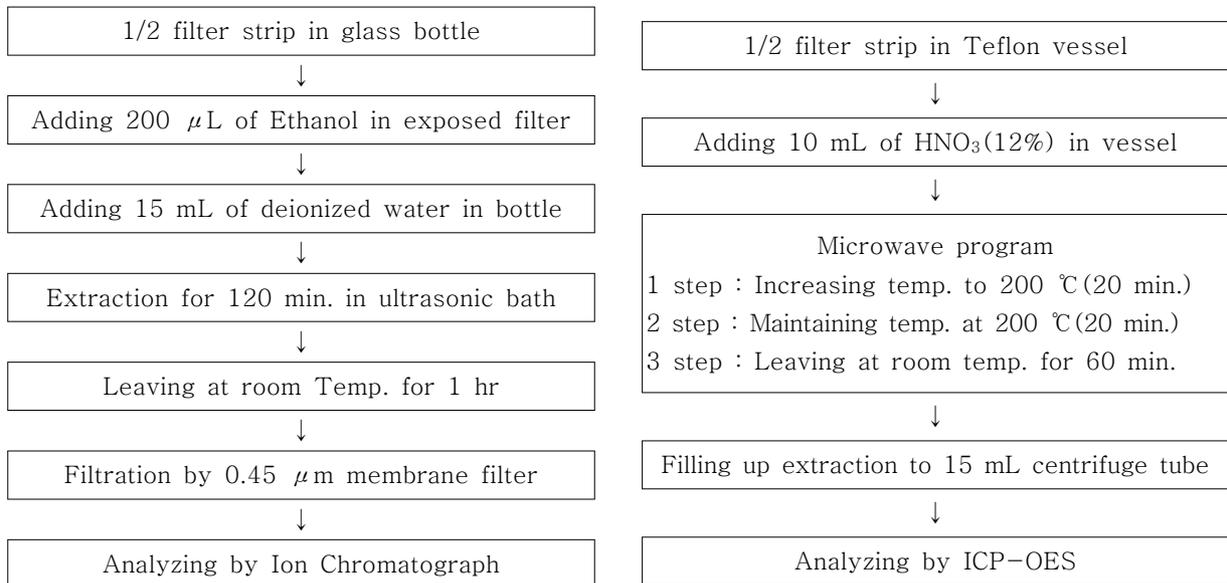
이온성분의 분석을 위해 시료를 채취한 여지의 1/2을 절취한 뒤 유리관에 넣은 다음 에탄올 200  $\mu$  L를 여지의 시료 채취면에 골고루 뿌려 여지가 물에 잘 적셔지도록 하였다. 여기에 탈이온교환수 (비저항 18.2M $\Omega$ -cm) 15 mL를 넣어 초음파 추출기에 넣은 뒤 120 분동안 이온성분을 추출하였으며 그 과정은 Fig. 2와 같다. 추출액은 멤브레인 필터 (pore size 0.45  $\mu$  m)로 입자상 물질을 제거한 다음 분석시까지 냉장보관 (4 $^{\circ}$ C) 하였다. 음이온 성분 (Cl $^{-}$ , NO $_3^{-}$ , SO $_4^{2-}$ )은 이온크로마토그래프 (Dionex, ICS-3000)로 분석하였으며 분석조건은 Table 7과 같다. 양이온 중 NH $_4^{+}$  성분은 자동분석기기

(BLTEC STAT-2000)로 분석하였으며, 그 외 양이온 성분 (Na $^{+}$ , K $^{+}$ , Mg $^{2+}$ , Ca $^{2+}$ )은 ICP-OES (Varian, 720-ES)로 분석하였으며 분석조건은 Table 8과 같다.

금속성분의 분석을 위해 절취한 나머지 부분을 분해용기 (Teflon vessel)에 넣고 12% 질산 (미량분석용) 10 mL를 첨가하였다. 분해용기의 마개를 닫은 뒤 microwave 안에 넣고 Fig. 2(오른쪽)와 같이 프로그램을 설정한 뒤 금속 성분을 분해(추출)하였다. 추출액은 centrifuge tube에 옮긴 뒤 산 (acid) 용액으로 15 mL로 맞춘 뒤 분석시까지 냉장보관 하였으며 ICP-OES (Varian, 720-ES)로 분석하였다.



**Fig. 1. Sampling location for this study.**



**Fig. 2. Extraction procedure for the determination of chemical compositions associated with PM $_{2.5}$ .**

**Table 7. Analytical conditions of IC for anion**

Type	Conditions
Eluent	KOH(10 mM ~ 45 mM gradient)
Flow rate	1.0 mL/min
Injection volume	20 $\mu$ L
Column	Ionpac AG 19-4 mm, AS 19-4 mm (Dionex Inc.)
Suppressor	ASRS II ULTRA-4mm(Dionex Inc.)
Detector	Conductivity Detector (Dionex Inc.)
Viewer	Chromleon (Dionex Inc.)

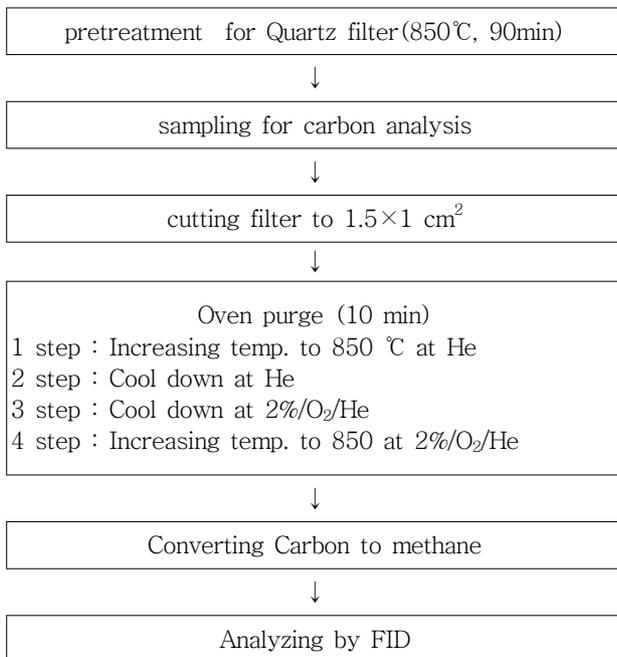
**Table 8. Analytical conditions of ICP-OES for cation**

Variables	Conditions
Power	1.2 kW
Plasma gas flow	15 L/min
Auxiliary gas flow	1.5 L/min
Nebulizer gas flow	0.75 L/min
RF power	1100 Watts
Replicates	3 Times

**결과 및 고찰**

**탄소성분 분석**

탄소성분의 분석을 위해서 석영(Quartz) 필터( $\phi$  47 mm, whatman)를 사용하였으며, 시료 채취된 여지를 전기로에 넣은 다음 850 $^{\circ}$ C에서 90분간 전처리하여 유기물을 완전 분해하였다. 탄소분석은 탄소분석기(Sunset OCEC carbon aerosol analyzer)를 이용하였다. 탄소 분석방법은 크게 열산화법(Selective thermal oxidation method), 원소분석 방법(Elemental analysis method), 열광학적 반사도법(Thermal-optical reflectance method : TOR), 열광학적 투과도법(Thermal-optical transmittance method : TOT)으로 나뉘지는데 본 연구에서는 미국 NIOSH (National Institute of Safety and Health)의 TOT 방법을 이용하여 분석하였으며, 분석조건은 Fig. 3과 같다.



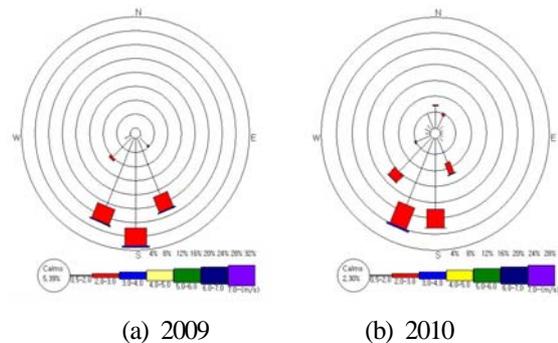
**Fig. 3. Analytical condition for carbon analysis.**

**기상현황**

측정 기간동안의 기상조건은 Table 10 및 Fig. 4에 나타나 있었다. 2009년과 2010년은 시료 채취시기가 달라 기상 관측값이 다소 차이가 있었다. 2009년과 2010년의 평균기온은 각각 15.0, 20.6 $^{\circ}$ C였으며 시간별 평균 기온은 각각 -5.9~31.9 $^{\circ}$ C, 1.2~35.4 $^{\circ}$ C의 범위였다. 주풍향은 Fig. 4에서 보는 것과 같이 대체적으로 남풍계열의 바람이 주를 이루었다. 평균풍속은 2009년과 2010년 각각 1.3, 1.4 m/s였으며, 시간별 평균 풍속은 각각 0.3~4.2, 0.3~3.6 m/s의 범위였다. 평균 상대습도는 2009년과 2010년 각각 50.9, 61.1%였으며 시간별 평균 상대습도는 각각 2.3~87.4, 8.4~98.4%의 범위였다.

**Table 10. Meteorological conditions during sampling period**

Meteor.	Temperature ( $^{\circ}$ C)		Wind Direction		Wind speed(m/s)		Relative Humidity(%)	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Mean	15.0	20.6	S	SSW	1.3	1.4	50.9	61.1
Median	16.1	20.9	-	-	1.2	1.3	52.9	61.6
Max.	31.9	35.4	-	-	4.2	3.6	87.4	98.4
Min.	-5.8	1.2	-	-	0.3	0.3	2.3	8.4



**Fig. 4. Windrose during sampling period.**

### 초미세먼지 중량농도 및 구성성분

2009~2010년 연구기간 동안 PM<sub>2.5</sub>의 평균농도는 23.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (중앙농도: 20.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이었으며, 일별 측정값의 농도는 6.7~59.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 나타내었다. Fig. 5는 연구기간동안의 일별 측정농도를 시계열 그래프로 나타낸 것으로 2015년부터 적용될 PM<sub>2.5</sub> 기준과 비교해보면 총 116회의 시료채취일 중 3회 기준초과 (24시간 평균 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )하는 것으로 나타나 2.6%의 기준 초과율을 나타내었다. 특히 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상(미국 EPA 24시간 평균기준)인 날이 116일 중 17일로 14.7%였으며, 그 때의 기상조건은 대부분 박무, 연무현상으로 인하여 시정이 좋지 않은 상태였다.

특히 동절기에 비해 하절기에 PM<sub>2.5</sub>가 상대적으로 낮은 농도를 나타내었는데, 하절기에는 혼합고가 높아 대기의 확산능력이 강할 뿐만 아니라, 강우량과 강우빈도가 늦여름에 집중됨으로서 오염된 공기를 세정시키는 효과가 있어 농도가 낮아지는 경향이 있다. 반대로 동절기에는 표면의 냉각효과로 인해 대기가 정체하는 빈도가 높고 난방을 위한 연료사용의 증가와 여름과 가을철에 비해 상대적으로 혼합고가 낮아 확산이 어려워 농도가 높아지는 경향이 있다.

일반적으로 입자상물질의 구성성분은 이온성분, 탄소성분, 금속성분, 그 외 기타성분들로 구성되어 있으며, 지역적인 특성에 따라 다소 차이는 있으나, PM<sub>2.5</sub>의 경우 그 조성 비율은 이온성분 > 탄소성분 > 금속성분의 순으로 이온성분이 가장 많은 양의 차지하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 PM<sub>2.5</sub> 중 이온성분, 탄소성분, 금속성분에 대해서 조사하였으며, 그 결과 Fig. 6과 같이 이온성분이 44%, 탄소성분이 26%, 금속성분이 2% 정도였고, 수분을 포함한 그 외 기타성분이 28% 정도로 나타났다. PM<sub>2.5</sub>의 조성비는 더 세분해서 보면 이온성분의 경우 음이온 35%, 양이온 13%, 탄소성분의 경우 유기탄소 20%, 무기탄소 6%, 금속성분 2% 전후로 나타나 2009년 국립환경과학원 조사 결과에 따른 서울, 인천, 대전, 광주, 대구 등의 지역에 비해 이온성분의 농도수준은 낮은 편이나 그 조성비는 10% 정도 높게 나타났다.

### 이온성분 농도 경향

PM<sub>2.5</sub> 중 이온성분은 44% 정도 차지하였으며, 그중 음이온이 29%, 양이온이 15% 정도 차지하는 것으로 나타났다. Table 10에 이온성분에 대한 통계분석결과(평균값, 중앙값, 표준편차, 최대, 최소)를 나타내었으며, Fig. 7에는 이온성분별 농도를 boxplot로 나타내었다. 각 이온성분의 농도를 보면 음이온의 경우  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ 이온의 평균농도(범위)는 각각 4,232 (0.323~13,004), 2,250 (0.046~15,654), 0,368 (0.000~2,259)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 양이온의 경우  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  이온이 각각 2,106 (0.167~16,391), 0,518 (0.004~2,159), 0,478 (0.015~1,342), 0,261 (0.000~2,383), 0,068 (0.001~0,568)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 음이온 중에는  $\text{SO}_4^{2-}$ ,

양이온 중에는  $\text{NH}_4^+$ 이 가장 높은 농도를 나타내었다. Fig. 8은 PM<sub>2.5</sub>를 구성하는 이온성분의 구성비를 나타낸 그래프이다. 이온성분 중  $\text{SO}_4^{2-}$ 이 가장 많은 양을 차지하였고,  $\text{SO}_4^{2-}$  중 해염(seasalt)의 영향을 제외한 비해염(non-seasalt) 성분이 전체 황산염의 98%정도 차지하여 대부분이 인위적인 발생원에서 대기중으로 배출되어 화학반응에 의해 2차입자로 생성된 것으로 보인다.

이온성분은 nss- $\text{SO}_4^{2-}$  40%,  $\text{NO}_3^-$  22%,  $\text{NH}_4^+$  20%,  $\text{Ca}^{2+}$  5%,  $\text{Na}^+$  5%,  $\text{Cl}^-$  4%,  $\text{K}^+$  2%,  $\text{Mg}^{2+}$  1%, ss- $\text{SO}_4^{2-}$  1%의 구성비를 나타내었으며, nss- $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  등 2차기원 입자가 80%이상을 차지하여 이들의 생성기원인  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  등의 대기중 배출을 줄여야 PM<sub>2.5</sub>의 농도를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 MOUDI cascade impactor (MSP corp., 11단)를 이용하여 입경별로 시료를 채취한 후 수용성 이온성분을 분석한 결과를 나타낸 그래프이다. 이온성분별 입경분포는 입자의 크기가 2.5  $\mu\text{m}$  이하인 미세입자 영역에서  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$  등이 상대적으로 높은 기여율을 나타내었으며, 2.5  $\mu\text{m}$  이상의 조대입자 영역에는  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  등의 해염 및 자연발생원( $\text{NO}_3^-$  제외)의 기여율이 높게 나타났다.

### 탄소성분 농도 경향

탄소입자는 유기탄소(organic carbon : OC)와 무기탄소(elemental carbon : EC)으로 분류된다. OC 성분은 연료의 연소 등 주로 저온 연소에 의해 공기중으로 직접적으로 배출되는 일차 오염물질이기도 하며, 대기중에서 화학반응에 의해 입자상 물질로 생성되는 이차 오염물질이기도 하다. 반면 EC 성분은 주로 연소과정에서 발생하는 일차 오염물질로 알려져 있으며 대표적으로 디젤 엔진에서 배출되는 탄소성분이 여기에 해당된다. 대기 중 OC와 EC는 같은 오염원으로부터 배출되므로 EC의 농도는 탄소성분의 기원을 해석하는 중요한 인자로 활용되고 있다. 미국 동부지역에서는 PM<sub>2.5</sub>의 25~40%, 서부지역에서는 50~75%를 차지하는 것으로 나타났다. 국내의 경우 2008~2009년 국립환경과학원의 조사결과 7대 대도시의 경우 탄소성분(OC, EC)은 PM<sub>2.5</sub>의 대략 24% (유기탄소:16%, 무기탄소:8%) 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 탄소성분이 26% (유기탄소:19%, 무기탄소:7%) 정도로 나타났다. 7개 대도시의 평균보다 유기탄소가 더 많은 부분을 차지하였다.

Table 11에는 탄소성분(유기탄소, 무기탄소)에 대한 통계값(평균값, 중앙값, 표준편차, 최대, 최소)을 나타내었다. 유기탄소는 평균 4.459  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 농도범위가 2.439~15.917  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 무기탄소는 평균 1.541, 농도범위는 1.102~7.149  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다.

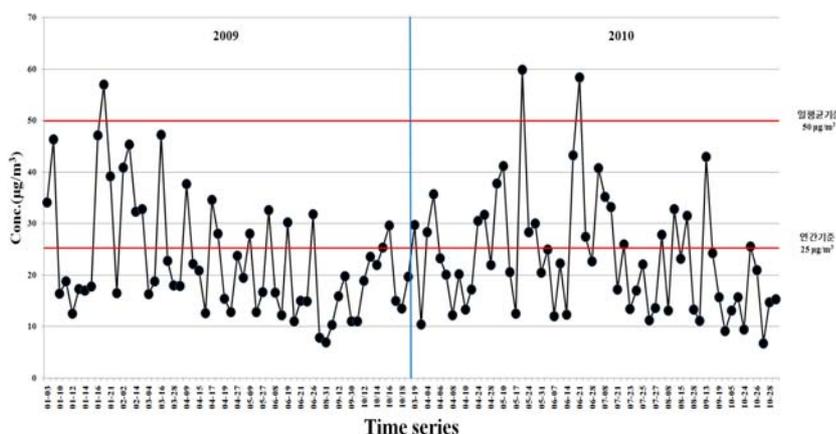


Fig. 5. Time series concentration of PM2.5.

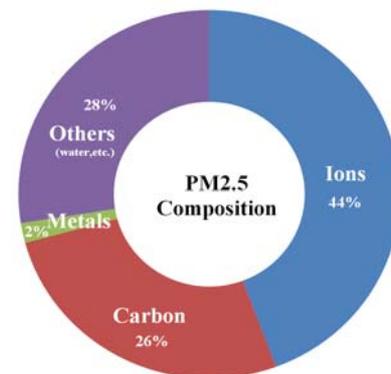


Fig. 6. Composition of PM2.5.

Table 10. Statistical result of PM2.5 and ionic species(2009~2010)

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

Year	Statistics	PM2.5	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
2009 ~2010	Mean	23.2	0.368	2.250	4.232	0.478	2.106	0.261	0.068	0.518
	Median	20.3	0.238	1.101	3.264	0.542	1.142	0.099	0.061	0.430
	SD	11.4	0.469	2.669	3.143	0.270	2.287	0.351	0.068	0.355
	Max	59.8	2.259	15.654	13.004	1.342	16.391	2.383	0.568	2.159
	Min	6.7	0.000	0.046	0.323	0.015	0.167	0.000	0.001	0.004
			TA(Total Anions) = 6.850 TA/PM2.5 = 0.30				TC(Total Cations) = 3.431 TC/PM2.5 = 0.15			

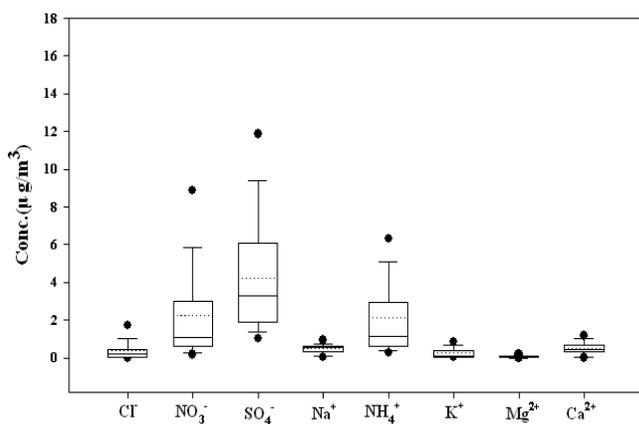


Fig. 7. Boxplot for ionic species.

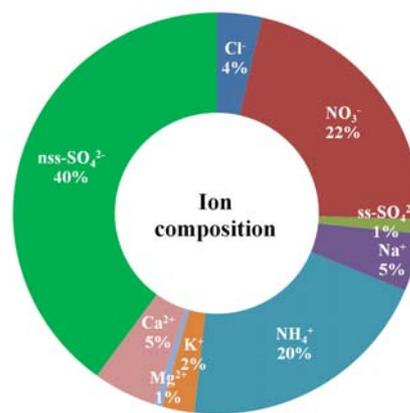


Fig. 8. Composition of Ionic species.

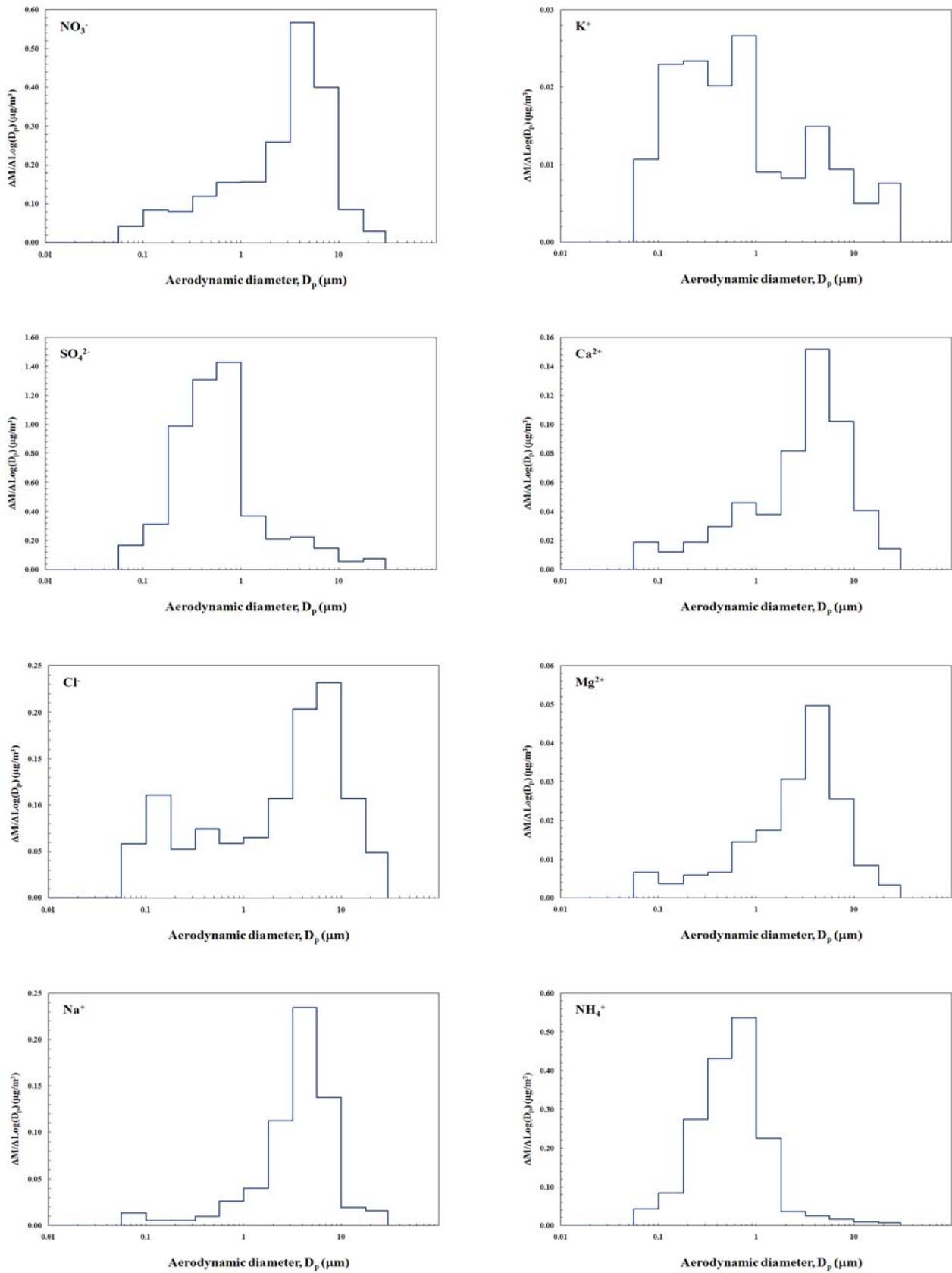


Fig. 9. Size distribution of ionic species in PM2.5.

**Table 11. Statistical result of Carbon (unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

Statistics	Organic Carbon	Elemental Carbon	Total Carbon	OC/EC
Mean	4.459	1.541	6.048	2.894
Median	4.143	1.287	5.357	-
SD	2.439	1.102	3.178	-
Max	15.917	7.149	19.946	-
Min	1.085	0.000	0.085	-

**금속성분 농도 경향**

분석대상 금속성분(crustal, trace)은 Fe, Al, Zn, Pb, Mn, Cu, Ba, V, Ni, As, Cr, Se, Cd, Sr, Co 등 15개 항목이며 이 성분들은 발생원을 규명하는데 중요한 성분들로 알려져 있다. 미국 EPA에서는 오염원 분류표(source profile)를 발생원의 추정에 이용하고 있으며, PMF(Positive matrix factorization) 모델링 결과 해석시 참고하였다.

Table 12에는 금속성분에 대한 통계값(평균값, 중앙값, 표준편차, 최대, 최소)을 나타내었으며, Fig. 10에는 금속성분별 농도를 boxplot로 나타내었다. 본 연구에서는 Si 등 지각 및 토양 구성성분 등 일부 항목의 분석값이 없어 금속성분이

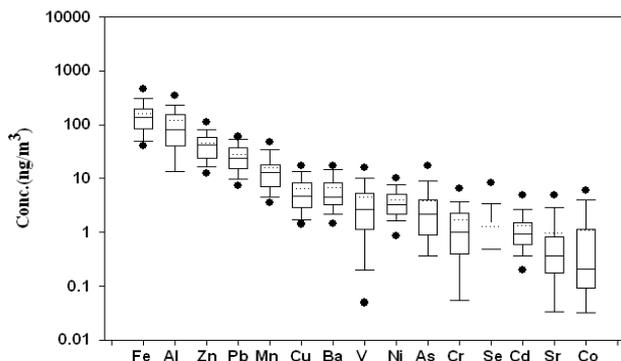
PM2.5 성분중 2%에 지나지 않으나, 실제로는 이보다 높은 10~20% 정도 차지하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 날림먼지와 지각 및 토양의 주요 성분인 Fe과 Al이 PM2.5 함유성분 중에서도 높은 농도를 나타내어 PM10 함유량과 유사한 결과를 나타내었으나 단지 전체 금속성분 중에서 차지하는 비율이 줄어든 것이다. 항목별 평균농도(범위)는 Fe, Al, Zn, Pb, Mn, Cu 등이 각각 161.113 (17.901~6.984), 119.5본 (0.000~본 2.483), 45.984 (6.100~1이.679), 27.4백 (2.188~본.408), 16.046 (1.277~90.607), 6.545 (0.176~50.7백 )  $\text{ng}/\text{m}^3$  등으로 나타났다. 녹지지역인 부산 기장에서 2001년 PM2.5 중 금속성분의 측정 결과를 보면 Fe 119.52, Al 208080, Zn 48.61, Pb 3.67, Mn 9.9, Cu 4.57  $\text{ng}/\text{m}^3$ 로 Fe과 Al의 농도차가 약간 나지만 항목별로 비슷한 경향을 나타내었다.

연구기간동안 PM2.5 중 금속성분의 조성 변화는 이온성분과 같이 PM2.5의 농도 경향과 비슷한 양상을 나타내었다. 금속성분은 PM2.5 중량농도의 2%를 차지하였으며 금속성분간 구성비는 Fig. 11과 같다. 금속성분 간 성분별 구성비(%)는 Fe(40) > Al(30) > Zn(12) > Pb(7) > Mn(4) > Cu(2) > Ba(2) > V(1) > Ni(1) > As(1) 의 순으로 토양 및 지각성분인 Fe과 Al이 높은 비율을 차지했다.

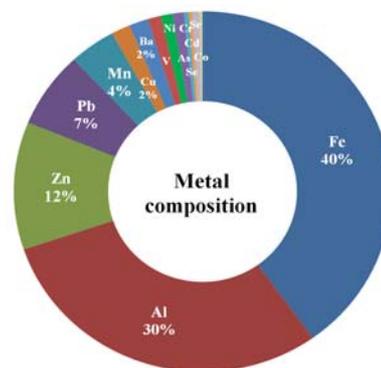
**Table 12. Statistical result of metallic species**

(unit :  $\text{ng}/\text{m}^3$ )

year	Metal Statistics	Fe	Al	Zn	Pb	Mn	Cu	Ba	V	Ni	As	Cr	Se	Cd	Sr	Co
2009 ~2010	Mean	161.113	119.589	45.984	27.429	16.046	6.545	6.663	4.471	4.061	3.831	1.672	1.278	1.358	0.974	1.108
	Median	134.595	81.520	42.351	23.740	12.840	4.756	4.524	2.648	3.212	2.130	1.007	0.483	0.935	0.366	0.207
	SD	119.732	143.778	27.794	16.033	13.662	6.066	6.268	5.630	2.867	5.585	2.071	2.162	1.457	1.611	1.791
	Max	674.479	892.483	143.689	81.408	90.607	50.729	40.711	32.746	16.932	31.446	11.903	10.303	8.638	9.089	7.545
	Min	17.901	0.000	6.100	2.188	1.277	0.176	0.662	0.000	0.123	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



**Fig. 10. Boxplot for metallic elements.**



**Fig. 11. Composition of metallic elements.**

Table 13. Correlation matrix for PM2.5 composition(2009~2010)

	PM2.5	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	nssSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ssSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	OC	EC
PM2.5	1.000											
Cl <sup>-</sup>	0.316**	1.000										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.479**	0.594**	1.000									
nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.440**	-0.175	0.109	1.000								
ss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.285**	0.325**	0.217*	0.122	1.000							
Na <sup>+</sup>	0.285**	0.325**	0.217*	0.122	1.000	1.000						
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.437**	-0.007	0.264**	0.681**	0.403**	0.403**	1.000					
K <sup>+</sup>	0.268**	-0.098	0.249**	0.536**	0.445**	0.444**	0.645**	1.000				
Mg <sup>2+</sup>	0.524**	0.362**	0.738**	0.092	0.250**	0.250**	0.255**	0.210*	1.000			
Ca <sup>2+</sup>	0.312**	0.201*	0.499**	0.228**	0.471*	0.471**	0.420**	0.456**	0.631**	1.000		
OC	0.326**	0.066	0.018	0.422**	0.252*	0.252*	0.514**	0.320**	0.147	0.167	1.000	
EC	0.575**	0.260	0.505**	0.369**	0.232*	0.232*	0.436**	0.344**	0.602**	0.434**	0.581**	1.000

\*\* : 상관계수는 0.01 수준에서 유의함.  
 \* : 상관계수는 0.05 수준에서 유의함.

항목별 상관분석

상관분석은 구성성분간의 상관관계를 알아보는데 유용한 분석이며, 그 결과가 항목간의 인과관계를 의미하지는 않는다. 상관계수는 -1에서 1사이의 값을 가지며 상관계수가 0에서 1에 근접할수록 양(+)의 상관성이 높아지며, 0에서 -1에 근접할수록 음(-)의 상관성 높아짐을 의미한다. Table 13은 PM2.5의 구성성분에 대한 상관분석 결과를 표로 나타낸 것이며, 상관계수 중 \*\*, \*로 표시한 것은 각각 0.01, 0.05 수준에서 유의한 값을 의미한다.

상관분석결과 이온성분 및 탄소성분간 비교적 높은 상관성(상관계수 0.5이상)을 나타내는 항목들은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Cl<sup>-</sup> (0.594), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-nssSO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (0.681), K<sup>+</sup>-nssSO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (0.536), K<sup>+</sup>-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (0.645), Cl<sup>-</sup>-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (0.651), Cl<sup>-</sup>-Mg<sup>2+</sup> (0.602), Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup> (0.580), Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup> (0.580), nssSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-K<sup>+</sup> (0.580), nssSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (0.561), PM2.5- Mg<sup>2+</sup> (0.524), Mg<sup>2+</sup>-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (0.738), Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup> (0.631), PM2.5-EC (0.575), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-EC (0.505), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-OC (0.514), Mg<sup>2+</sup>-EC (0.602) 등 이었으며 PM2.5의 농도변화와 상관성이 있는 항목들로 이온 및 탄소성분 모두가 유의하게 상관성이 있었으나 대부분 상관계수가 0.5 이하로 비교적 낮게 나타났다. 그러나 2차 입자에 해당하는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(0.479), nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(0.440), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(0.437) 및 무기탄소(EC) 성분이 다른 항목들에 비해 높게 나타나 이들이 PM2.5 농도에 상대적 기여율이 높은 것으로 판단된다.

발생원 추정을 위한 PMF 수용모델링

대기오염물질의 효율적 제어와 관리방안을 마련하기 위해

서는 오염원에 대한 정량정성분석이 선행되어야 하며, 이를 위해서는 수용체(receptor)에서 오염물질의 물리·화학적 특성을 분석한 후 오염원의 확인 및 오염원의 정량적 기여도를 평가하는 수용모델의 연구가 반드시 필요하다.

수용모델(receptor model)은 크게 이화학적 분석분야와 여기서 도출된 자료에 입각하여 결과를 해석하는 응용통계학적 분석분야로 나눌 수 있다. 이화학적 분석분야는 수용체에서 입상 물질 또는 가스상 오염물질을 분석하여 자료를 얻는 과정이며, 응용통계학적 분석분야는 획득한 자료를 바탕으로 오염원의 확인, 분리, 그리고 정량화하는 과정을 말한다. 여기에는 농축계수법 (enrichment factor), 시계열분석법 (time series analysis), 신경망분석법 (neural network), 공간분석법 (spacial analysis-GIS), 화학질량수지법 (chemical mass balance), 회귀분석법(regression analysis), 군집분석법 (cluster analysis), 주성분분석법 (principal component analysis), 인자분석법 (factor analysis), 목표변환인자분석법 (target transformation factor analysis), 양행렬인자분석법 (positive matrix factorization : PMF), 전문가 시스템 (expert system), UNMIX 등이 있다. 각종 다변량 통계법 (방법론 시계열가장 진화한 인자분석법인 PMF (Positive Matrix Factorization)은 오염원 분류표(정량적)나 오염원 목록(정량적) 등 모델링 수행을 위해 요구되는 필수 입력자료가 구축되지 않은 지역이나 국가에 적용하기 적합한 모델로서 상대적으로 간편하면서도 비교적 정확한 영향 배출원 기여도를 평가할 수 있다는 장점에 의해 최근 입상

물질에 의한 오염원 파악과 기여도 산정에 적용사례가 늘어나고 있는 추세이다.

본 연구에서는 최적의 오염원 수 및 오염원 분류표를 결정하고 물리적으로 가장 합리적인 모델링 결과를 산출하기 위하여 오염원의 수와 FPEAK 값을 변경하여 모델링을 수행하였으며 최적의 오염원 수를 7개로 정하였으며 그 결과를 Fig.12의 오염원 분류표(source profile)에 나타내었다.

첫 번째 오염원은 토양 및 산업관련 발생원으로 추정하였으며, 기여율은 26.7%로 나타났다. Fe, Al, Zn, Mn, As 등이 주요 물질들로서 Fe, Al 등은 토양의 주요 구성성분이며 Zn, Mn, As 등은 석탄을 연료로 하는 주요 산업시설의 배출 물질이다.

두 번째 오염원은 2차 입자(secondary particle)관련 발생원으로 추정하였으며, 기여율은 22.6%로 나타났다.  $ss-SO_4^{2-}$  및  $NH_4^+$ 는 대기중에서 입자상으로 전환된 주요 2차 입자이다. 주 발생원은 발전소 등 고정배출원 및 선박 등 이동배출원 등이다.

세 번째 오염원으로 해염(seasalt) 관련 발생원으로 추정하였으며, 기여율은 20.0%로 나타났다.  $Cl^-$ ,  $ss-SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,

$Mg^{2+}$  등은 모두 해양기원 발생 물질들이며 부산지역은 남동쪽으로 바다가 끼고 있어 내륙에 비해 상대적으로 영향을 많이 받는다.

네 번째 오염원은 포장도로 관련 발생원으로 추정하였으며, 기여율은 12.1%로 나타났다. 포장도로에서 비산되는 물질들로 Pb, Ni, Se, Sr 등이 주로 기여하는 것으로 조사되었다.

다섯 번째 오염원은 이동발생원(자동차, 선박 등) 및 먼오염원(난방관련) 발생원으로 추정하였으며, 기여율은 10.6%로 나타났다.  $NO_3^-$ (기여율 80%)가 주로 기여하는 것으로 조사되었으며, 겨울철이 다른 계절에 비해 높은 기여도를 나타내어 겨울철 난방관련 오염원의 영향이 큰 것으로 판단된다.

여섯 번째 오염원은 석탄연소 발생원으로 추정하였으며, 기여율은 6.1%로 나타났다. 화력발전소등 석탄을 연료로 하는 보일러에서 배출되는 주요 물질은 Ba, V 등이다.

마지막으로 일곱 번째 오염원은 생체(biomass) 소각 관련 발생원으로 추정하였으며, 기여율은 2.4%로 나타났다.  $K^+$ 는 생체 소각의 주요 추적자(tracer)로 널리 이용되고 있으며 주로 가을과 겨울철 도시외곽의 벚집 등의 소각이 주 발생원으로 판단된다.

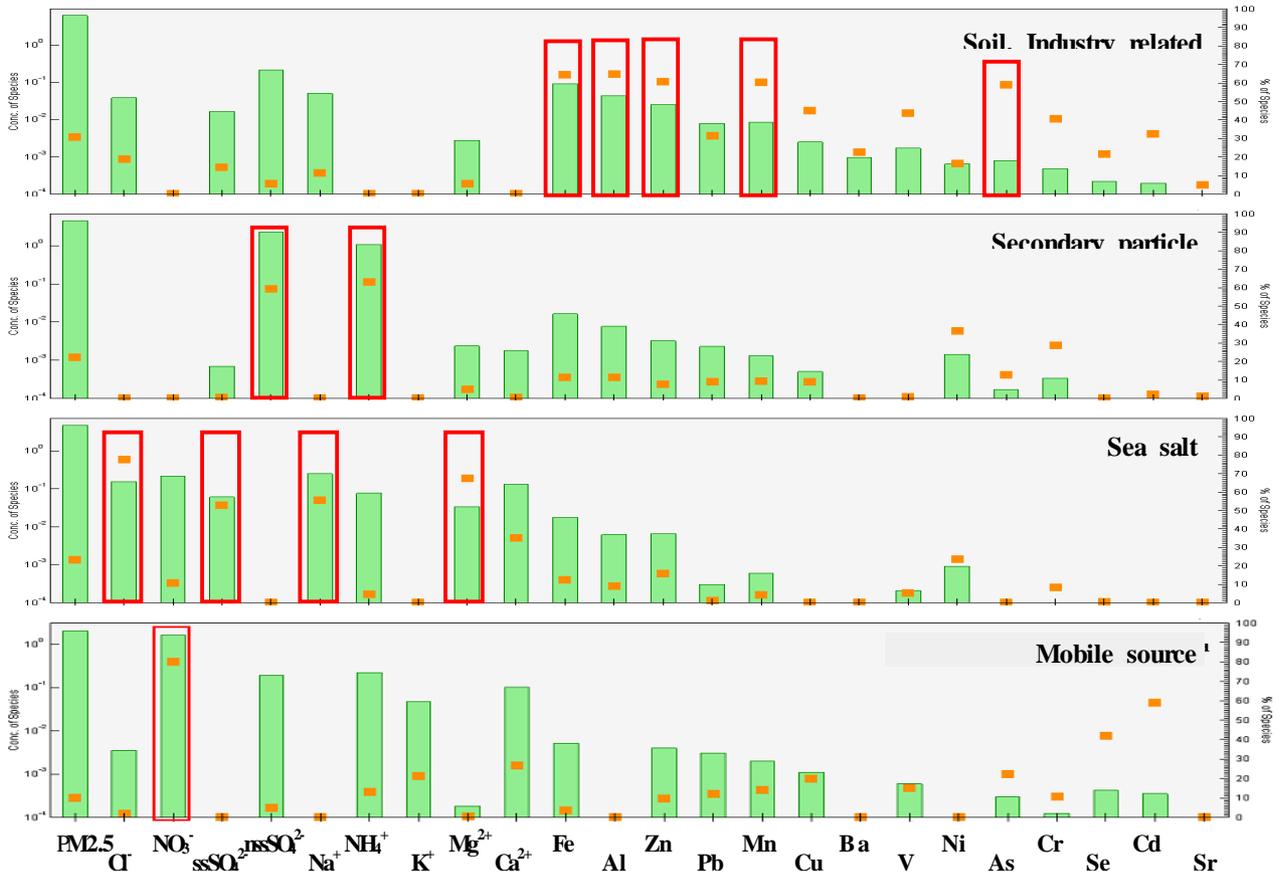


Fig. 12. Source profiles of the resolved sources measured at study area(continued).

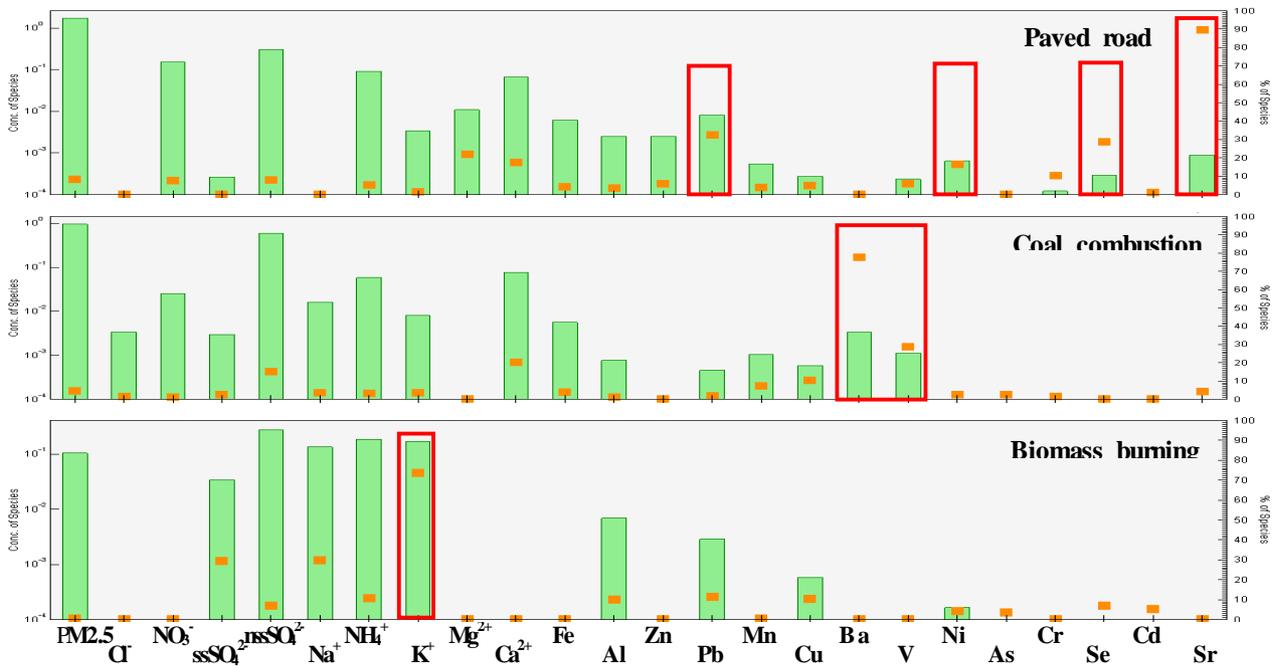


Fig. 12. Source profiles of the resolved sources measured at study area.

결론

본 연구는 향후 PM2.5에 대한 대기환경기준의 적용과 환경 보건학적 위해성 평가를 위한 구성성분을 조사함으로써 부산 시민의 건강보호와 PM2.5 저감 방안을 제시하기 위해 2년간의 연구기간동안 PM2.5의 구성성분 변화 경향과 성분분석 자료의 통계분석 및 수용모델을 이용한 발생원 추정과 이에 대한 저감방안을 제시를 목적으로 하고 있으며 그 결론은 다음과 같다.

1. PM2.5의 평균농도는 23.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 일평균 농도 범위는 6.7~59.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2014년 적용 예정인 대기환경기준(일평균 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 대비 초과율이 2.6%였다. 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상(US EPA 24시간 평균)의 고농도 발생일은 14.7%에 해당하였으며, 그 때의 기상조건이 대부분 박무, 연무 현상과 저풍속, 안정된 대기 등의 요인으로 고농도 현상을 보인 것으로 판단된다.
2. PM2.5의 구성은 이온성분이 44%, 탄소성분 26%, 금속성분이 2%, 그리고 입자결합수를 포함한 그 외 성분들이 28%정도를 차지하여 이온성분이 PM2.5의 주요 구성요소로 나타났다.
3. 이온성분은 PM2.5의 44%(음이온 30%, 양이온 15%) 정도를 차지하였고  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^-$ 의 순으로 높은 비율을 차지하였으며, 상관분석 결과에서도 이 물질들과 높은 상관성을 나타내었다. 특히 이 물질들은 2차입자를 형

성하는 대표적인 성분들로 폐포에 침착 가능한 양이 상대적으로 높기 때문에 대기중으로 배출되는 1차 물질인  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$  등의 배출량 저감정책이 반드시 필요한 것으로 판단된다.

4. 탄소성분의 경우 평균(범위)는 유기탄소(OC) 4,459(2,439~15,917)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 무기탄소(EC) 1,541 (1,102~7,149)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 PM2.5의 26% (OC:19%, EC:7%)를 차지하였으며 OC가 EC의 3배정도 높게 나타나 국내 다른 대도시와 유사한 경향을 나타내었다. 탄소성분의 주배출원이 자동차 관련이므로 대기중 PM2.5의 농도를 낮추기 위해서는 자동차 배출 가스 관련 대책도 고려되어야 할 것이다.
5. 금속성분은 PM2.5의 2%로 매우 적은 부분이나 Fe, Al 등 토양기원 원소들은  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  등 산화물의 형태로 존재하기 때문에 실제 PM2.5 중량의 10%정도 차지하는 것으로 알려져 있다. 금속성분의 구성비(%)는 Fe(40), Al(30), Zn(12), Pb(7), Mn(4), Cu(2) 등으로 Fe, Al 등 토양관련 성분들이 70% 이상을 차지하였다. PM2.5 성분 중 구성비는 낮지만 상대적으로 높은 인체 위해성으로 관리가 필요한 부분이다.
6. 오염원 확인과 정량적 기여도 평가를 위한 PMF를 이용한 수용모델링 결과 7개의 발생원을 추정할 수 있었으며 발생원별 오염원 분류 결과, 1) 토양 및 산업관련 (26.7%) 2) 2차 입자 관련 (22.6%), 3) 해염 (seasalt) 관련 (20.0%), 4) 포장도로 관련 (12.1%), 5) 자동차, 선박 등 이동오염원

연소관련 (10.6%) 6) 석탄연소관련 (6.1%) 7) 생체(biomass) 소각 관련 (2.4%) 발생원으로 파악할 수 있었으며 향후 이러한 발생원에 대한 체계적인 관리가 되어야 PM2.5뿐만 아니라 대기오염물질의 저감을 효율적으로 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 활용방안 및 제언

#### 1. 활용방안

PM2.5의 부산지역 대기환경기준 설정을 위한 정책자료 및 저감대책 방안 제시

#### 2. 제언

- 1) 사업장 배출허용기준은 총먼지이고, 대기환경기준은 PM10으로 배출허용기준을 현재의 총먼지에서 미세먼지로 일원화 필요
- 2) 배출원의 다양화로 인한 배출원 규명 및 배출량 산정의 어려움이 있으므로 4~5종 대기배출시설의 개선 및 대기오염물질 비산배출 억제를 위한 기술지원 강화, 주요 배출원 파악 및 정확한 배출량 산정 필요
- 3) 선박 등 상대적으로 배출허용기준 적용에 취약한 대기오염물질 배출시설의 관리 강화
- 4) 도로변 미세먼지의 감소, 차량 통행 및 바람에 의한 재비산 먼지의 억제를 위한 도로 청결시스템의 적극 도입

### 참 고 문 헌

1. Donaldson K and MacNee W., "Potential mechanism of adverse pulmonary and cardiovascular effects of particulate air pollution(PM10)", *International journal of Hygiene and Environmental Health*, 203, pp.411~415(2001).
2. US EPA, National Air Quality and Emission Trends Report, EPA-454/R-97-013, Research Triangle Park, NC 27711(1996).
3. 장지영, 양지연, 임은희, 박민석, 김수환, 최인홍, 신동천, "대기 중 미세먼지에 대한 인체 영향 평가 : 변이원성과 세포 독성 중심으로" .
4. Eftim, S.E., J.M. Samet, H. Janes, A. McDermott, and F. Dominici, "Fine Particulate matter and mortality: a comparison of the six cities and American Cancer Society cohorts with a medicare cohort", *Epidemiology*, 19(2), pp.209~216(2008).
5. Zeger, S.L, F. Dominici, A. McMermott, and J.M. Samet, "Mortality in the medicare population and chronic exposure to fine particulate air pollution in urban centers(2000-2005)", *Environ. Health Perspect.*, 116(12), pp.1514~1619(2008).
6. Franklin, M., A. Zeka, and J. Schwartz, "Association between PM2.5 and all-cause specific-cause mortality in 27 US communities", *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 17(3), pp.279~287(2007).
7. World Health Organization, "Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone, and nitrogen dioxide"(2003).
8. 배현주, 신지영, 박찬구, 정권, 이상열, 김민영, 박정임, "서울시 대기 중 PM2.5 농도 개선과 조기사망 감소 효과", *한국대기환경학회지*, 26(1), pp.10~20(2010).
9. 황인조, 김동술, "PMF 모델을 이용한 대기 중 PM10-오염원의 확인", *한국대기환경학회지*, 19(6), pp.701~717(2003).
10. 부산광역시, 2010년 시정백서
11. 국립환경과학원, "PM2.5 물리·화학적 특성에 관한 연구 (I)" (2009).
12. 국립환경과학원, "황사 및 미세먼지 중 PM2.5 성분분석에 관한 연구" (2008).
13. U.S. Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/scram001>, Protocol for Applying and Validating the CMB Model for PM2.5 and VOC
14. 박기형, "배경지역의 PM2.5에 관한 연구", *동아대학교석사학위논문*(2001).
15. 황인조, "미국 서부 국립공원 지역의 PM2.5에 대한 오염원 확인 및 기여도추정", *한국대기환경학회지*, 26(1), pp.21~33(2010).
16. 오미석, 이태정, 김동술, "PMF 모델을 이용한 용인-수원경계지역에서의 부유분진의 크기별 오염원 확인", *한국대기환경학회지*, 25(2), pp.108~121(2009).