

## 부산지역 대기 중 미세먼지(PM2.5)의 화학적 조성과 오염특성 평가 연구(Ⅲ)

박기형<sup>†</sup> · 정재원 · 조정구  
대기보전과

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

Park Gee-hyeong<sup>†</sup>, Jeong Jae-won and Cho Jeong-goo  
Air Preservation Division

#### Abstracts

This research has been performed 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.

On 3th year study, We can conclude like that ;

The Mean concentration of PM2.5 at central city site (Yeonsan) and industrial site (Hakjang) were 22.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  and 31.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  relatively. and the daily mean concentration ranged from 3.8 to 86.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  at Yeonsan and 10.0 to 107.0 at Hakjang. The 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. The Compositions of PM2.5 at Yeonsan and Hakjang were 43.5% and 55.7% of ionic species, 25.3% and 21.1% of carbonic species (EC and OC), 2.6% and 3.7% of metallic elements, and 28.5% and 19.5% of the others including particle bound water, and etc. Ionic species, especially sulfate, ammonium, and nitrate, were the most abundant in PM2.5 composition at both sites and it showed high correlation coefficient with PM2.5. From PMF receptor modelling analysis for source profile, we obtained 6 factors contributing PM2.5 concentration ; Yeonsan site - 1)soil and industry, 2)steel, 3)secondary particulate, 4) coal power plant, 5)Zinc smelter, 6)sea-salt related sources, Hakjang site- 1)industry, 2)sea-salt, 3)Zinc smelter, 4)soil and paved road, 5)secondary particulate, 6)steel related sources.

**Key words** : PM2.5, ionic species, metallic elements, carbonic species, receptor modelling, source profile

#### 서론

본 연구는 2009, 2010년도에 수행한 『부산지역 대기 중 초미세먼지의 화학적 조성과 오염특성 평가연구(Ⅰ), (Ⅱ)』에 이은 3차년도 연구과제 수행결과이다. 미세먼지(이하 PM2.5, 공기동력학적 직경이 2.5  $\mu\text{m}$ 보다 작은

입자상 물질을 말함. 환경정책기본법에 따라 2015년부터 적용되는 대기환경기준상 PM2.5는 미세먼지 PM2.5이며, 본 연구에서도 미세먼지 PM2.5로 명명하나 학계에서는 초(극)미세먼지라고도 함)는 환경적으로는 시정감소, 기후변화 등을 유발시키고, 건강상으로는 호흡기 및 순환기계 등에 영향을 미쳐 위해성을 증가시킨다는 연구결과

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail : green911@korea.kr

Tel : +82-51-309-2927, Fax : +82-51-309-2929

들이 제시되고 있다<sup>1)2)3)</sup>. 특히, 건강상 위해성이 미세먼지(이하 PM10)보다 더 크다는 연구결과들이 제시되고 있으며, 향후 PM2.5의 대기환경기준 설정에 따른 자료의 확보 및 일반 도심지역과 공업지역의 농도 수준 및 조성성분에 따른 오염특성을 파악하기 위해 지속적인 연구를 수행하였다.

우리나라는 1978년 2월 SO<sub>2</sub>에 대한 기준을 최초로 설정하였으며, 1983년에는 CO, NO<sub>2</sub>, TSP, O<sub>3</sub>, HC에 대한 환경기준을, 1991년 2월에는 Pb에 대한 환경기준을 신규로 적용하였으며, 1995년부터는 PM10 미세먼지에 대한 환경기준을 설정하였고(24시간 평균 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 연간 평균 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 2001년에 그 기준을 강화하였으며(연간 평균 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2007년부터는 더욱 더 강화하여(24시간 평균 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 연간 평균 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 대기중 입자상 물질에 대해 더욱 엄격하게 관리하여 왔다.<sup>4)</sup> 그러나 PM10 농도가 기준 이하라 하더라도 건강상의 장해를 가져올 수 있고, 시정감소에 직접적인 영향을 미치는 입자의 크기는 2  $\mu\text{m}$  이하로서 빛의 산란과 흡수효율이 매우 크다는 점이 고려되어 환경부에서는 2011년에 환경정책기본법을 개정하여 2015년부터 대기환경기준에 PM2.5 항목(24시간 평균 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 연평균 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 추가하였다. 미세먼지에 대한 규제 및 연구가 활발히 진행되고 있는 미국에서는 1997년 PM10에서 PM2.5로의 관리를 본격화 하였으며 2006년 그 기준을 강화하였다(24시간 평균 65  $\rightarrow$  35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 연간 평균 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).<sup>5)</sup> 특히 PM2.5에 대해서는 질량농도뿐만 아니라 주요 구성성분인 황산염, 질산염, 암모늄염, 탄소(유기탄소, 무기탄소) 등에 대한 성분분석을 실시하는 화학성분 분석 측정망도 규정하고 있다.

일반적으로 대기 중에 부유하는 입자상 물질 중 입자의 크기가 2.5  $\mu\text{m}$  이상인 조대입자는 자연침강에 의해 비교적 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 대부분이 자연침강보다는 강우에 의한 세정작용, 즉 washout과 rainout에 의해서만 제거된다. 본 연구의 대상인 PM2.5는 인위적인 발생원에 의한 2차 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)되어 2차 입자로서 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 있으며 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<sup>6)7)</sup>. 대기 중 PM2.5의 농도가 높아질 경우 폐렴, 폐기능손실, 병원 이용률의 증가, 천식 및 다른 호흡기 관련 질환뿐만 아니라 심혈관 및 암과 관련된 사망 위험성이 증가하는 것으로 보고되어 있다<sup>8)</sup>. 이는 변이원성 실험을 통해서도 밝혀졌는데 전반적으로 PM2.5가 PM10보다 비교적 낮은 생존율을 나타내어 독성이 더 높은 것으로 관찰되었다<sup>9)</sup>. 또한 대기 중에서 시정(visibility)에 주로 영향을 미치는 입자는 0.1~10  $\mu\text{m}$ 인 미세입자이며 이들 중 황산염, 질산염 및 탄소함유 성분들이 시정감소에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

PM2.5는 만성 및 급성 조기사망<sup>10)11)12)</sup>, 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<sup>13)</sup>.

PM2.5 농도 개선에 따른 조기사망 감소의 건강편익을 분석한 서울의 경우<sup>14)</sup> 2006년 농도수준과 대비하여 추산한 결과 장기노출로 인한 만성 조기사망은 미국 EPA 연평균 기준을(15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 달성할 경우 30세 이상 인구 10만 명당 30~37명이 감소하며, WHO 연평균 기준을(10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 달성한다면 30세 이상 인구 10만 명당 41~50명의 조기사망자가 감소하는 것으로 추산되었다. 또한 PM2.5 단기노출로 인한 급성 조기사망은 PM2.5 농도가 미국 EPA 일평균 기준을(35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 달성한다면 전체 연령 인구 10만 명당 11~12명이 감소하며, WHO 일평균 기준을(25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 달성한다면 전체 연령인구 10만 명당 13~14명이 감소하는 것으로 연구되었다.

어떤 임의의 지역에서 입자상 물질로 인한 대기오염의 원인과 정도를 파악하고 그에 대한 발생원 억제대책의 수립 및 배출원 규제를 위해서는 사전에 오염원에 대한 정량·정성분석이 선행되어야 하며, 이들 각 발생원에 대한 오염 기여도의 평가가 무엇보다도 중요하다<sup>15)</sup>.

부산은 남동쪽에 해안을 끼고 있는 전형적인 연안환경의 도시이므로 연안을 중심으로 한 지역과 비교적 내륙쪽인 지역과는 대기오염 배출환경, 지형 및 기상학적 배경

이 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 무엇보다 필요하다.

본 연구에서는 향후 PM2.5에 대한 대기환경기준 적용과 환경보건학적 위해성 평가를 위한 구성성분을 조사함으로써 부산 시민의 건강보호와 PM2.5 저감방안을 제시하고자 하였으며, 도심지역과 공업지역의 PM2.5 조성파악과 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 도로교통망의 지속적인 확충에도 불구하고 교통체증은 가중되고 있다. Table 1에서 보는 바와 같이 부산시의 자동차 등록대수가 1992년 46만대에서 계속 증가하여 2007년 약 100만대로 넘어섰으며, 2010년말 현재 114만대로서 대기오염의 주요 배출원이 되고 있다.

자동차 배출가스는 차종과 제작년도에 따라 다르나 소

형차와 제작년도가 최근 연식일수록 배출가스에 대한 허용기준이 엄격하게 적용되고 있다. 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<sup>17)</sup> 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 2에서 보는 바와 같이 2010년말 현재 부산지역의 대기배출업소는 총 1,942개소이며 2007년 이후로 계속 감소추세였다. 업종별로는 Table 3에서 보는 바와 같이 금속제품제조업이 703개소로 32.7%를 차지하고 있으며, 연간 대기오염물질 발생량이 2 ton 미만인 5종 사업장이 1,039개소(2010년 기준)로 전체의 45.4%를 차지하고 있다.

Table 1. Air pollutants emission facilities by scale<sup>16)</sup>

(unit : vehicle)

Year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Total	862,699	921,084 (6.8)	955,366 (3.7)	966,417 (1.2)	979,969 (1.4)	994,292 (1.5)	1,010,086 (1.6)	1,038,954 (2.9)	1,116,719 (7.5)	1,147,311 (2.7)
Passenger	589,257	638,173 (8.3)	667,191 (4.5)	679,433 (1.8)	699,786 (3.0)	718,357 (2.7)	735,941 (2.4)	769,463 (4.6)	851,684 (10.7)	885,945 (4.0)
Buses	87,697	87,903 (0.2)	85,833 (-2.4)	83,048 (-3.2)	76,791 (-7.5)	73,780 (-3.9)	71,609 (-2.9)	69,904 (-2.4)	68,011 (-2.7)	64,531 (-5.1)
Truck	180,393	189,023 (4.8)	195,601 (3.5)	196,740 (0.6)	196,099 (-0.3)	194,622 (-0.8)	194,713 (0.0)	191,635 (-1.6)	189,029 (-1.4)	188,731 (-0.2)
Special	5,352	5,985 (11.8)	6,741 (12.6)	7,196 (6.7)	7,293 (1.3)	7,533 (3.3)	7,823 (3.8)	7,952 (1.6)	7,995 (0.5)	8,104 (1.4)
Motor cycle	112,816	106,904 (-5.2)	107,180 (0.3)	106,639 (-0.5)	105,584 (-1.0)	106,115 (0.5)	109,477 (3.2)	112,143 (2.4)	112,130 (0.0)	113,007 (0.8)

\* ( )안은 증감율을 나타냄, 총 차량대수에 이륜자동차(motor cycle)은 포함 안됨.

Table 2. Air pollutants emission facilities by scale<sup>18)</sup>

Year	Total	Class				
		Class1	Class2	Class3	Class4	Class5
2010	1,942	32	70	118	841	881
2009	2,160	31	77	141	863	1,048
2008	2,191	33	87	148	884	1,039

District	Total	Class				
		Class1	Class2	Class3	Class4	Class5
Yeonjae-gu	21	-	-	1	12	8
Sasang-gu	612	2	17	22	282	289

Table 3. Classification by industry(2009)

Total	Metal	Chem-istry	Refinery	Rubber plastic	Non-metal	Leather	Wood	Pulp	Food	Fiber	Etc.
2,191	703	85	3	166	66	36	66	3	42	72	949

### 재료 및 방법

#### 시료채취

본 연구는 3차년도에 걸쳐 행해졌으며 1차년도 2009년 1~10월, 2차년도 2010년 3~10월, 3차년도 2012년 1~10월말까지 수행되었다. 본 연구의 수행을 위해 시료의 채취는 부산지역의 중심위치에 있는 연제구 연산동 소재 종합대기측정소 및 사상구 학장동 소재 대기오염측정소에서 행하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 연산동 지점(A)은 지리적으로 부산지역의 중심부에 위치하고 주변은 아파트, 빌라, 주택 등 주거단지로 구성되어 있으며,

학장동 지점(B)은 공업지역으로 사상공업지역 내부에 위치하고 있으며 주변은 철강, 주물 등의 사업장으로 둘러싸여 있다.

시료 채취시간은 00 LST부터 다음날 00 LST까지 24시간 연속채취를 기본으로 하였으며, 12 LST부터 다음날 12 LST까지 한 경우도 있었다. 시료채취에 사용된 장비는 PMS-102 (Korea, APM Eng., Co.)로 시료채취유량은 16.7 L/min을 유지하여 입경이 2.5 μm 이하 (cut-off 50%)인 미세 입자상물질들만 선택적으로 채취하였다.

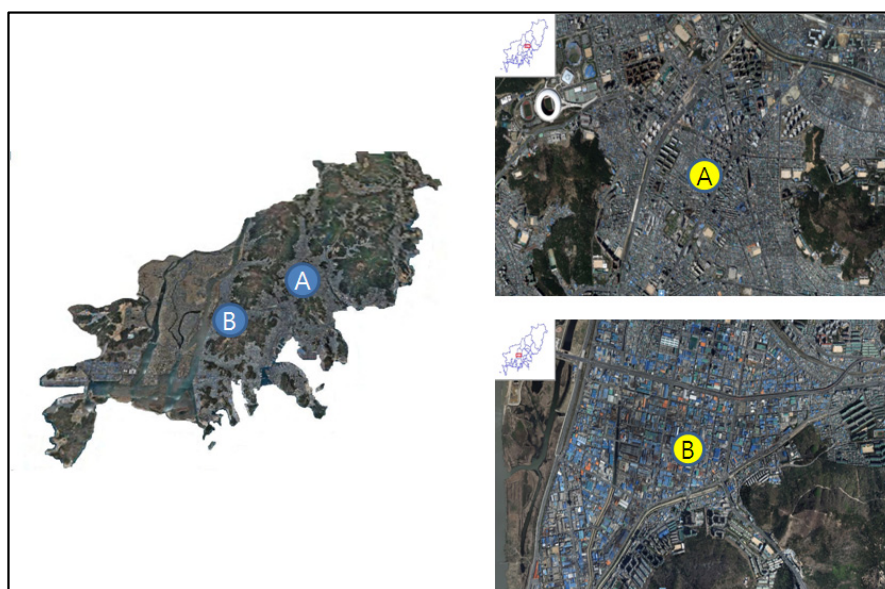


Fig. 1. Sampling site (A : Yeonsan-dong(residential), B : Hakjang-dong(industrial)).

### 중량농도의 측정

시료채취에 사용된 여지는 QMA 석영여지 ( $\phi$  47 mm, Whatman 社)이며, 시료채취 전 항온( $20 \pm 2$  °C) 및 항습 ( $45 \pm 5\%$ ) 조건이 유지되도록 24시간동안 데시케이터내에 보관한 뒤 무게를 측정하였다. 채취한 시료는 현장에서 PTFE 재질의 테이프로 밀봉한 다음, 실험실로 운반 후 항온 항습 데시케이터에 시료를 24시간 동안 보관한 뒤 무게를 측정하여 시료채취 전·후의 무게차에 의해 중량 농도를 산출하였다.

### 성분 분석

#### 이온성분 분석

이온성분의 분석을 위해 채취한 여지의 1/4을 절취한 뒤 유리관에 넣은 다음 탈이온교환수 (비저항 18.2M $\Omega$ -cm) 10 mL를 넣어 초음파 추출기에 넣은 뒤 120 분동안 이온성분을 추출하였으며, 그 과정은 Fig. 2(a)와 같다. 추출액은 멤브레인 필터 (pore size 0.45  $\mu$  m)로 입자상 물질을 제거한 다음 분석시까지 냉장보관 (4°C) 하였다. 음이온 성분 ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )은 이온크로마토그래프 (Dionex, ICS-3000)로 분석하였으며 분석조건은 Table 4와 같다. 양이온 중  $\text{NH}_4^+$  성분은 자동분석기기 (BLTEC STAT-2000)로 분석하였으며, 그 외 양이온 성분 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ )은 ICP-OES (Varian, 720-ES)로 분석하였으며 분석조건은 Table 5와 같다.

#### 금속성분 분석

금속성분의 분석을 위해 채취한 여지의 1/2을 분해용기

(Teflon vessel)에 넣고 12% 질산 (미량분석용) 10 mL를 첨가하였다. 분해용기의 마개를 닫은 뒤 microwave 안에 넣고 Fig. 2 (b)와 같이 프로그램을 설정한 뒤 금속성분을 분해(추출)하였다. 추출액은 centrifuge tube에 옮긴 뒤 산 (acid) 용액으로 10 mL로 맞춘 뒤 분석시까지 냉장보관 하였으며 ICP-OES (Varian, 720-ES)로 분석하였다.

Table 4. Analytical conditions of IC for anions

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	Chromeleon (Dionex Inc.)

Table 5. Analytical conditions of ICP-OES for cations

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

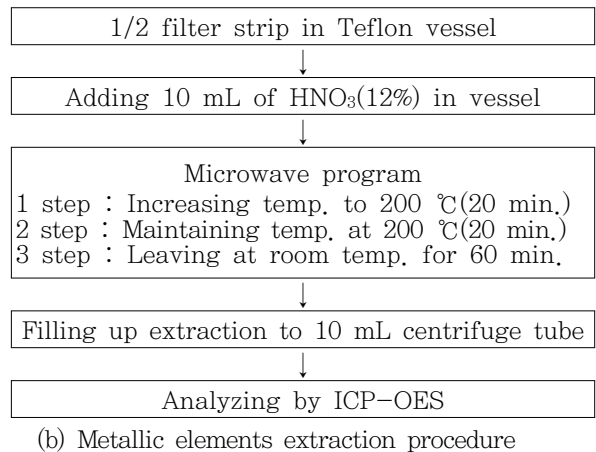
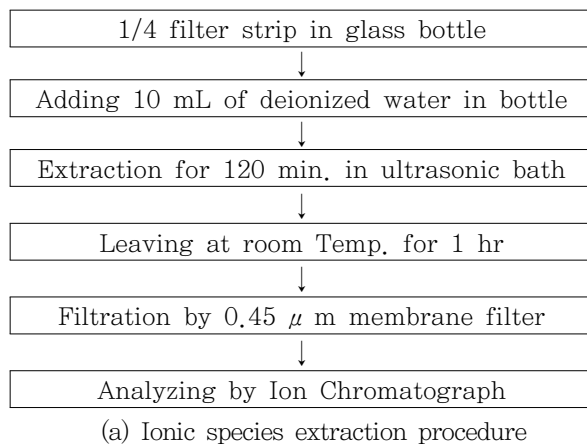
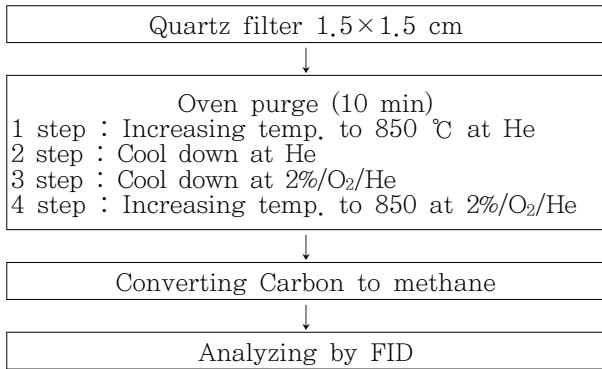


Fig. 2. Extraction procedure for the determination of chemical compositions associated with PM2.5.

**탄소성분 분석**

탄소성분의 분석을 위해서 채취한 남은 여지의 1/4에서 1.5×1.5 cm를 사용하였으며, 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 나뉘는데 본 연구에서는 미국 NIOSH (National Institute of Safety and Health)의 TOT 방법을 이용하여 분석하였으며, 분석조건은 Fig. 3과 같다.



**Fig. 3. Carbon Analysis Procedure.**

**발생원 추정을 위한 PMF 수용모델링**

대기오염물질의 효율적 제어와 관리방안을 마련하기 위해서는 오염원에 대한 정량-정성분석이 선행되어야 하며, 이를 위해서는 수용체(receptor)에서 오염물질의 물리-화학적 특성을 분석한 후 오염원의 확인 및 오염원의 정량적 기여도를 평가하는 수용모델의 연구가 반드시 필요하다<sup>19)</sup>. 수용모델(receptor model)은 크게 이화학적

분석분야와 여기서 도출된 자료에 입각하여 결과를 해석하는 응용통계학적 분석분야로 나눌 수 있다. 이화학적 분석분야는 수용체에서 입자상 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(spatial series analysis-GIS), 화학질량수지법(chemical mass balance : CMB), 회귀분석법(regression analysis), 군집분석법(cluster analysis), 주성분분석법(principal component analysis : PCA), 인자분석법(factor analysis), 목표변환인자분석법(target transformation factor analysis : TTFA), 양행렬인자분석법(positive matrix factorization : PMF), 전문가 시스템(expert system), UNMIX 등이 있다. 각종 다변량 통계분석 방법론 중 가장 진화한 인자분석법인 PMF (Positive Matrix Factorization)는 오염원 분류표(source profile)나 오염원 목록(source inventory) 등 모델링 수행을 위해 요구되는 필수 입력자료가 구축되지 않은 지역이나 국가에 응용하기 적합한 모델로서 상대적으로 간편하면서도 비교적 정확한 영향 배출원 기여도를 평가할 수 있다는 장점에 의해 최근 입자상 물질에 의한 오염원 파악과 기여도 산정에 적용사례가 늘어나고 있는 추세이다<sup>20)</sup>.

**결과 및 고찰**

**기상현황**

측정 기간동안의 기상조건은 Table 6 및 Fig. 4에 나타내었다. 연산동과 학장동 지점의 평균기온은 각각 17.5, 16.0℃였으며, 시간별 평균 기온은 각각 -6.6~35.7℃, -9.3~35.4℃의 범위였다. 주풍향은 Fig. 4에서 보는 것

**Table 6. Meteorological conditions at each site(2012)**

Meteor. Statistics	Temperature(°C)		Wind Direction		Wind speed(m/s)		Relative Humidity(%)	
	Yeonsan	Hakjang	Yeonsan	Hakjang	Yeonsan	Hakjang	Yeonsan	Hakjang
Mean	17.5	16.0	WSW	WNW	1.2	2.7	62.8	54.9
Median	18.4	17.2	-	-	1.1	2.6	65.3	57.5
Max.	35.7	35.4	-	-	4.4	10.1	99.2	86.7
Min.	-6.6	-9.3	-	-	0.0	0.3	11.3	2.2

과 같이 연산동 및 학장동 지점은 각각 서남서(WSW), 서북서(WNW)가 주를 나타내었다. 평균풍속은 연산동과 학장동 지점 각각 1.2 m/s, 2.7 m/s였으며, 시간별 평균 풍속은 각각 0.0~4.4 m/s, 0.3~10.1 m/s의 범위로 학장동 지점의 풍속이 높게 나타났다. 평균 상대습도는 연산동 및 학장동 지점 각각 62.8%, 54.9%로 연산동 지점이 높게 나타났으며, 시간별 평균 상대습도는 각각 11.3~99.2%, 2.2~86.7%의 범위였다.

미세먼지 농도 경향

Fig. 5는 2012년 1월부터 11월까지 연산동과 학장동의 월별 미세먼지(PM10, PM2.5)의 농도 경향을 나타내고 있으며, 연구기간 부산지역의 PM10의 평균농도는 43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이었으며, 최저는 8월(33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 최고는 5월(58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이었으며, PM2.5의 평균농도는 28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이었으며, 최저는 8월(20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 최고는 5월(38  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )으

로 PM10과 PM2.5 비슷한 경향을 나타내었으며, 강우량이 많은 하절기에 낮은 농도를 나타내었고 강우량이 적은 동절기에 높은 농도를 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 도심지역인 연산동은 평균에 근접하는 농도를 나타내었으나, 공업지역인 학장동은 90 percentile 이상의 농도수준에 해당되었다.

특히 동절기에 비해 하절기에 PM10 및 PM2.5가 상대적으로 낮은 농도를 나타내었는데, 김신도 등<sup>21)</sup>의 연구에 따르면 하절기에는 혼합고가 높아 대기의 확산능력이 강할 뿐만 아니라, 강우량과 강우빈도가 늦여름에 집중됨으로서 오염된 공기를 세정시키는 효과가 있어 농도가 낮아지는 경향이 있지만, 반대로 동절기에는 표면의 냉각효과로 인해 대기가 정체하는 빈도가 높고 난방을 위한 연료 사용의 증가와 여름과 가을철에 비해 상대적으로 혼합고가 낮아 확산이 어려워 농도가 높아지는 경향이 있다.

일반적으로 입자상 물질의 구성성분은 이온성분, 탄소성분, 금속성분, 그 외 기타성분들로 구성되어 있으며, 지

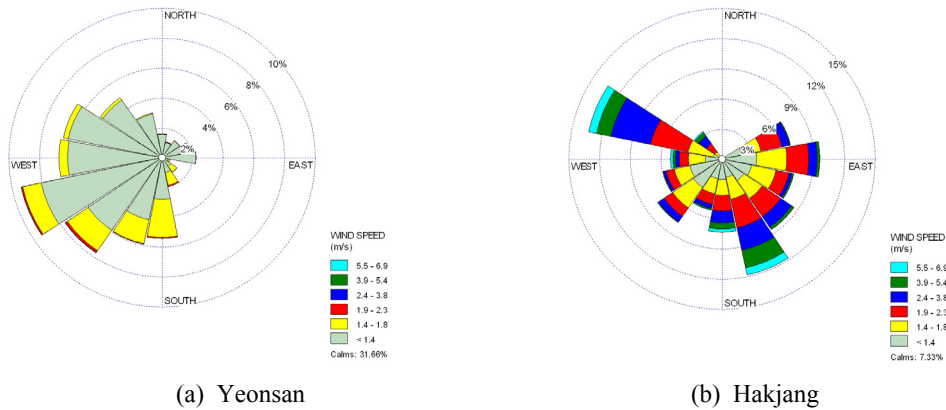


Fig. 4. Windrose at each site(2012).

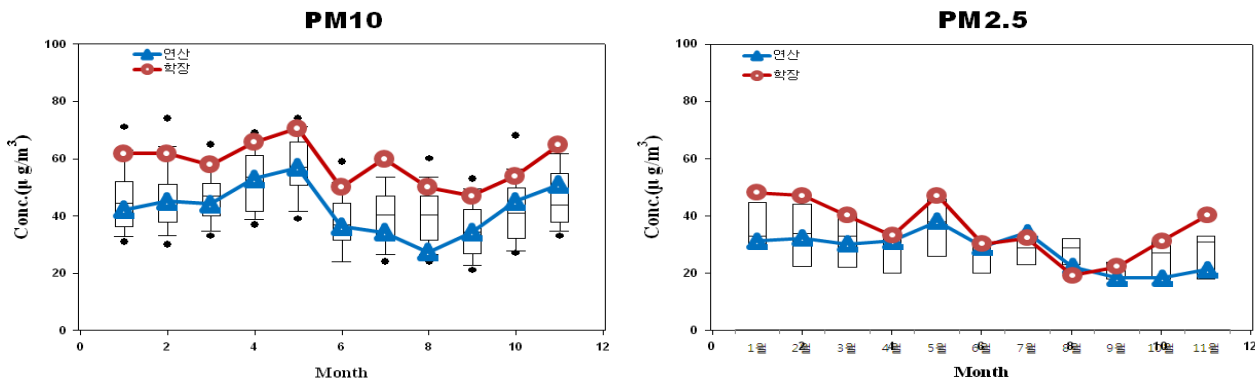


Fig. 5. Monthly PM10 and PM2,5 concentration in Yeonsan and hakjang(2012).

역적인 특성에 따라 다소 차이는 있으나 PM2.5의 경우 그 조성 비율은 이온성분 > 탄소성분 > 금속성분의 순으로 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> 등 가스상 물질이 대기중에서 체류하는 동안 각종 화학반응에 의해 입자로 전환되어 2차 입자의 형태로서 이것에 해당되는 이온성분이 가장 많은 양의 차지하는 것으로 알려져 있다<sup>22)</sup>.

Fig. 6은 자동측정방식( $\beta$ -ray method)과 여과지의 무게차를 이용하여 농도를 산정하는 중량농도 산정방식(filter mass method)으로 산정된 농도를 비교한 그래프로서 연산동 및 학장동 지점 모두  $\beta$ -ray 투과방식이 1.15배 정도 높은 것으로 나타났으며, 두 방식은 70~73%정도의 상관성이 있는 것으로 나타났다.

PM2.5의 조성분석

PM2.5의 농도 및 조성

2012년 연구기간 동안 연산동 지점의 PM2.5 평균농도

(범위)는 25.5(8.3~86.5)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 2009~2010년 수행한 선형 연구 결과인 23.2(6.7~59.8)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 약간 높은 수준이었다.

본 연구에서 PM2.5의 조성은 Fig. 7과 같이 이온성분, 탄소성분, 금속성분, 그리고 기타 결합수를 포함한 기타 성분으로 구성되어 있다. 연산동 지점의 경우 이온성분 44.7%, 탄소성분 25.3%, 금속성분 3.5%, 기타 26.5%로 구성되어 있으며, 학장동 지점의 경우 이온성분 53.5%, 탄소성분 19.2%, 금속성분 4.7%, 기타 22.6%로 구성되어 공업지역의 이온성분 및 금속성분 비율이 도심지역에 비해서 다소 높게 나타났다.

이온성분의 조성 및 농도경향

PM2.5 중 이온성분은 연산동과 학장동 지점 각각 44.7%, 53.5% 정도 차지하여 공업지역인 학장동 지점의 이온성분 비율이 더 높게 나타났다. 이온성분별로는 연산

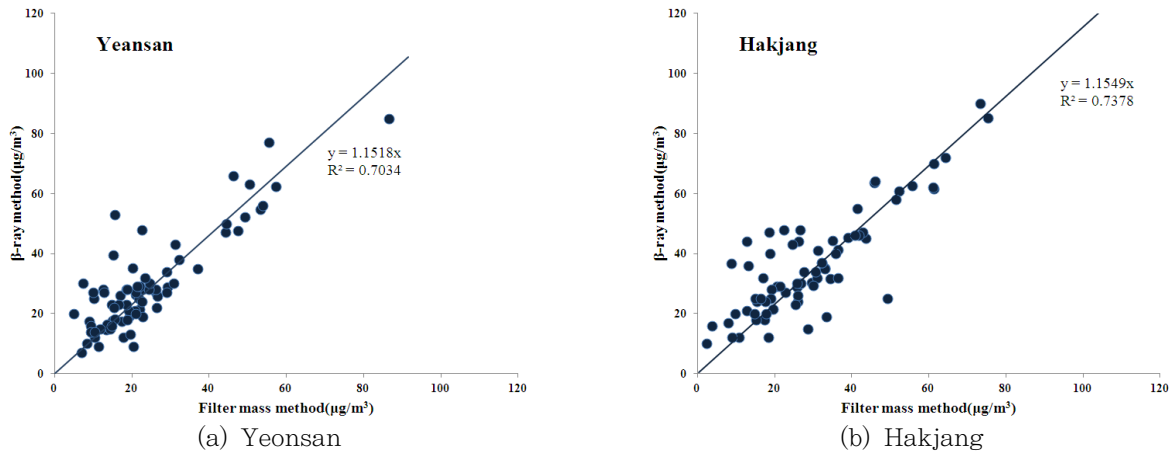


Fig. 6. Concentration comparison between filter mass method and  $\beta$ -ray method.

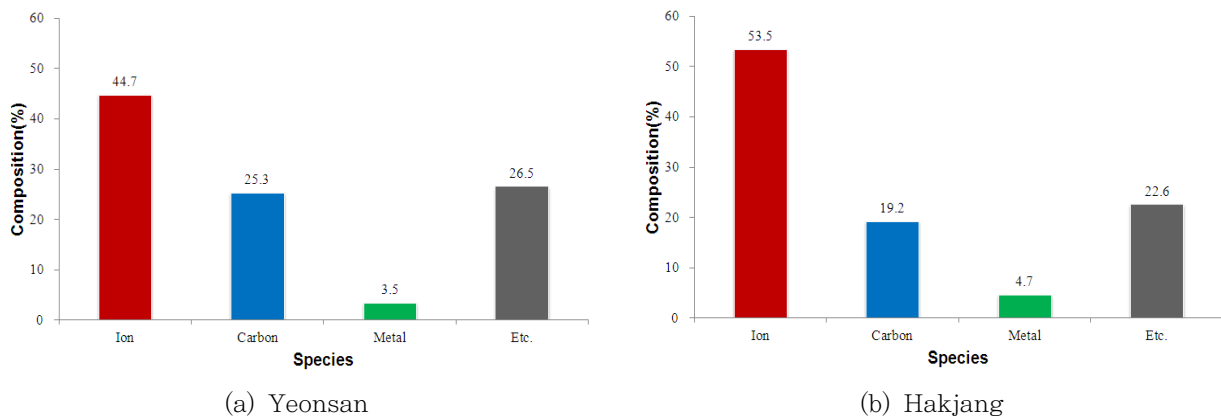


Fig. 7. Composition of PM2.5 at each site.



동 지점에서 양이온 12.3%, 음이온 39.7%였으며, 학장동 지점에서 양이온 14.3%, 음이온 42.7% 차지하는 것으로 나타났다.

Table 7은 연산동 지점의 이온성분에 대한 통계분석결과(평균값, 중앙값, 표준편차, 최대, 최소)이며, Fig. 7(a)에는 이온성분별 농도를 boxplot로 나타내었다. 각 이온성분의 농도(범위)를 보면 음이온의 경우  $nss-SO_4^{2-}$  5.724 (0.158~31.703)  $\mu g/m^3$ ,  $ss-SO_4^{2-}$  0.051(0.002~0.272)  $\mu g/m^3$ ,  $NO_3^-$  3.124(0.005~15.558)  $\mu g/m^3$ ,  $Cl^-$  0.427(0.008~1.978)  $\mu g/m^3$ , 양이온의 경우  $NH_4^+$  2.290 (0.064~11.206)  $\mu g/m^3$ ,  $Na^+$  0.202(0.008~1.085)  $\mu g/m^3$ ,  $K^+$  0.148(<0.001~0.597)  $\mu g/m^3$ ,  $Mg^{2+}$  0.142 (<0.001~1.596)  $\mu g/m^3$ ,  $Ca^{2+}$  0.105(<0.001~0.307)  $\mu g/m^3$ 로 나타나 2009~2010년 연산동에서 수행한 연구결과 농도 수준 대비 전반적으로 음이온 성분은 높고, 양이온 성분은  $NH_4^+$  이온을 제외한 성분들이 낮게 나타났다.

Table 8은 학장동 지점의 이온성분에 대한 통계분석결과

과(평균값, 중앙값, 표준편차, 최대, 최소)이며, Fig. 8(b)에는 이온성분별 농도를 boxplot로 나타내었다. 각 이온성분의 농도(범위)를 보면 음이온에 해당하는  $nss-SO_4^{2-}$  7.807(0.362~25.532)  $\mu g/m^3$ ,  $ss-SO_4^{2-}$  0.101(0.005~0.594)  $\mu g/m^3$ ,  $NO_3^-$  4.818 (0.702~18.873)  $\mu g/m^3$ ,  $Cl^-$  0.807(0.033~3.722)  $\mu g/m^3$ , 양이온의 경우  $NH_4^+$  2.812(0.050~16.276)  $\mu g/m^3$ ,  $Na^+$  0.403(0.021~2.368)  $\mu g/m^3$ ,  $K^+$  0.264 (0.000~1.055)  $\mu g/m^3$ ,  $Mg^{2+}$  0.277(0.000~0.914)  $\mu g/m^3$ ,  $Ca^{2+}$  0.795(0.385~1.617)  $\mu g/m^3$ 로 나타났다. 연산동과 학장동 지점 모두 음이온 중에는  $SO_4^{2-}$ , 양이온 중에는  $NH_4^+$ 이 가장 높은 농도를 나타내었다.

Fig. 9는 각 지점에서의 이온성분 조성을 나타낸 것으로 도심지역인 연산동 지점의 경우  $nss-SO_4^{2-}$  46.9%,  $NO_3^-$  25.6%,  $NH_4^+$  18.8%,  $Cl^-$  3.5%,  $Na^+$  1.7%,  $K^+$  1.2%,  $Mg^{2+}$  1.2%,  $Ca^{2+}$  0.9%,  $ss-SO_4^{2-}$  0.4%의 구성비를 나타내어 2차 입자에 해당하는  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$  등이 91%를 차지하였다. 그리고 학장동 지점의 경우

Table 7. Statistical result of PM2.5 and ionic species at Yeonsan(2012)

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

Statistical parameter	PM2.5	$Cl^-$	$NO_3^-$	$ss-SO_4^{2-}$	$nss-SO_4^{2-}$	$Na^+$	$NH_4^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$
Mean	25.5	0.427	3.124	0.051	5.724	0.202	2.290	0.148	0.142	0.105
Median	21.4	0.312	2.037	0.037	4.084	0.148	1.518	0.129	0.042	0.095
SD	14.5	0.392	3.648	0.050	5.417	0.199	2.387	0.118	0.310	0.076
Max.	86.5	1.978	15.558	0.272	31.703	1.085	11.206	0.597	1.596	0.307
Min.	8.3	0.008	0.005	0.002	0.158	0.008	0.064	<0.001	<0.001	<0.001
		TA(Total Anions) = 9.326 TA/PM2.5 = 0.366				TC(Total Cations) = 2.887 TC/PM2.5 = 0.113				

\*ss : seasalt(해염), nss : non-seasalt(비해염)

Table 8. Statistical result of PM2.5 and ionic species at Hakjang(2012)

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

Statistical parameter	PM2.5	$Cl^-$	$NO_3^-$	$ss-SO_4^{2-}$	$nss-SO_4^{2-}$	$Na^+$	$NH_4^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$
Mean	32.8	0.807	4.818	0.101	7.807	0.403	2.812	0.264	0.277	0.795
Median	29.7	0.516	3.740	0.062	6.396	0.248	2.257	0.234	0.197	0.763
SD	17.1	0.791	3.656	0.126	5.103	0.503	2.836	0.213	0.275	0.240
Max.	107.3	3.722	18.873	0.594	25.532	2.368	16.276	1.055	0.914	1.617
Min.	8.7	0.033	0.702	0.005	0.362	0.021	0.050	<0.001	<0.001	0.385
		TA(Total Anions) = 13.534 TA/PM2.5 = 0.413				TC(Total Cations) = 4.551 TC/PM2.5 = 0.188				

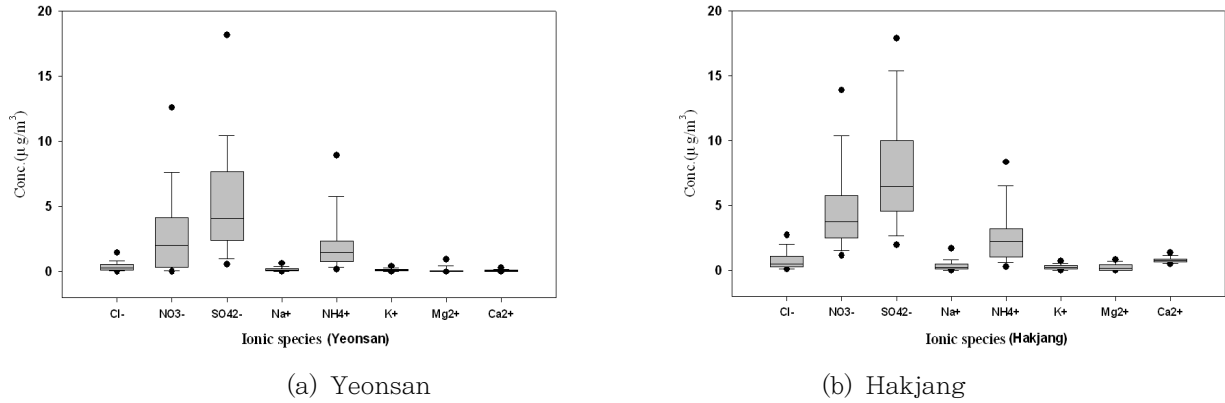


Fig. 8. Boxplot for ionic species at each site.

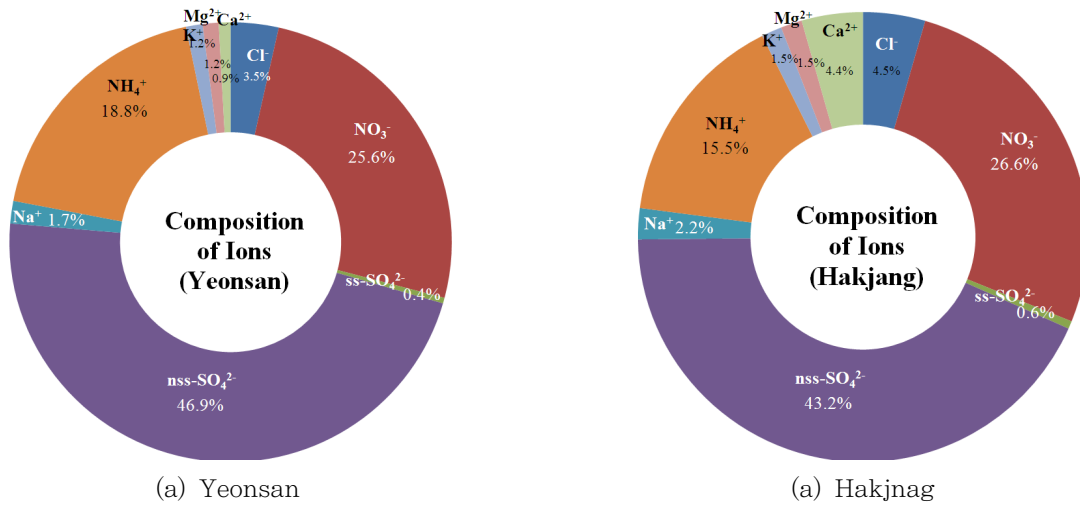


Fig. 9. Composition of Ionic species at each site.

nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 43.2%, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 26.6%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 15.5%, Cl<sup>-</sup> 4.5%, Ca<sup>2+</sup> 4.4%, Na<sup>+</sup> 2.2%, Mg<sup>2+</sup> 1.5%, K<sup>+</sup> 1.5%, ss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 0.6%의 구성비를 나타내었고 2차 입자의 구성 성분이 85%를 차지하였다.

**탄소성분의 조성 및 농도 경향**

탄소입자는 유기탄소 (organic carbon : OC, 이하 OC)와 무기탄소 (elemental carbon : EC, 이하 EC)로 구분되며, OC는 연료의 연소 등 주로 저온 연소에 의해 공기중으로 직접적으로 배출 되는 1차 오염물질이기도 하며, 대기중에서 화학반응에 의해 입자상 물질로 생성되는 2차 오염물질이기도 하다. 반면 EC 성분은 주로 연소과정에서 발생하는 1차 오염물질로 알려져 있으며 대표적으로 디젤 엔진에서 배출되는 탄소성분이 여기에 해당된다.

대기 중 OC와 EC는 같은 오염원으로부터 배출되므로 EC는 탄소성분의 기원을 해석하는 중요한 인자로 활용되고 있다. 2008~2009년 국립환경과학원의 조사결과<sup>17)</sup> 7대 도시의 경우 탄소성분(OC, EC)은 PM2.5의 대략 24% (유기탄소:16%, 무기탄소:8%) 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 PM2.5중 탄소성분은 도심지역에서 25.3% (유기탄소:19.3%, 무기탄소:6.0%), 학장동 지점에서 21.1% (유기탄소:16.0%, 무기탄소:5.1%)를 차지하였다. Table 9에는 각 지점별 탄소성분에 대한 통계값 (평균, 중앙값, 표준편차, 최대, 최소)을 나타내었다. 연산동 지점의 OC 및 EC 평균농도(농도범위)는 각각 3.6674(0.8968~7.8985), 1.1431(0.0000~4.0976) µg/m<sup>3</sup>, 학장동 지점의 OC 및 EC 평균농도(농도범위)는 각각 4.7801(2.1003~11.3165), 1.5091(0.4780~3.9339)

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 공업지역인 학장동 지점에서 OC 및 EC의 농도는 높게 나타났으나, PM2.5의 구성비는 도심 지역인 연산동 지점에서 다소 높게 나타났다. 2009~2010년 연산동에서 수행한 연구결과와 비교할 때 OC와 EC 모두 다소 낮은 농도 수준으로 나타났으나, OC/EC의 비율은 높게 나타났다.

**금속성분의 조성 및 농도 경향**

분석대상 금속성분(crustal, trace)은 Fe, Al, Zn, Pb, Mn, Cu, V, Ni, As, Cr, Se, Cd, Sr, Co, Mo, Ti 등 16개 항목이며, 이 성분들은 발생원을 규명하는데 중요한 성분들로 알려져 있다. 미국 EPA에서는 오염원 분류표 (source profile)<sup>23)</sup>를 발생원의 추정에 이용하고 있으며,

PMF (Positive matrix factorization) 모델링 결과 해석 시 참고하였다. Table 10, 11에는 금속성분에 대한 통계 값(평균, 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 3~4%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 나타내었다. 각 지점별로 중금속 성분의 농도(범위)를 보면 연산동 지점의 경우 Fe 195.56(12.88~739.71)  $\text{ng}/\text{m}^3$ , Al 386.24(<0.01~2061.78)  $\text{ng}/\text{m}^3$ , Zn 96.12(<0.01~659.70)  $\text{ng}/\text{m}^3$ , Pb 24.98(0.18~82.98)

**Table 9. Statistical result of Carbon species**

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

Statistical parameter	Yeonsan				Hakjang			
	OC	EC	TC	OC/EC	OC	EC	TC	OC/EC
Mean	3.667	1.143	4.817	3.21	4.780	1.509	6.289	3.17
Median	3.605	0.842	4.142	-	4.354	1.421	5.657	-
SD	1.720	0.981	2.571	-	2.063	0.827	2.806	-
Max.	7.898	4.098	11.190	-	11.317	3.934	15.250	-
Min.	0.897	<0.001	1.580	-	2.100	0.478	2.820	-

**Table 10. Statistical result of metallic species at Yeonsan(2012)**

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

Species Statistics	Fe	Al	Zn	Pb	Mn	Cu	V	Ni	As	Cr	Se	Cd	Sr	Mo	Ti
Mean	195.56	386.24	96.12	24.98	28.34	14.77	5.49	7.56	16.42	3.63	3.50	0.46	8.72	26.45	16.06
Median	158.35	232.23	77.15	23.27	26.04	15.31	1.13	1.89	17.69	0.00	0.61	0.00	7.92	32.34	17.91
SD	146.19	455.82	90.01	17.26	19.92	6.77	11.53	10.94	8.99	10.52	6.29	1.29	5.49	14.80	8.69
Max	739.71	2061.78	659.70	82.98	99.19	36.75	24.63	40.82	39.45	49.71	27.30	10.67	27.08	50.91	36.00
Min	12.88	<0.01	<0.01	0.18	3.24	3.08	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.37

**Table 11. Statistical result of metallic species at Hakjang(2012)**

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

Species Statistics	Fe	Al	Zn	Pb	Mn	Cu	V	Ni	As	Cr	Se	Cd	Sr	Mo	Ti
Mean	549.60	452.09	284.64	44.80	89.75	30.04	4.52	15.77	15.48	0.42	4.24	0.54	6.42	23.36	13.70
Median	374.18	251.33	255.23	43.82	55.95	29.74	2.91	13.86	15.28	0.00	0.00	0.34	4.20	21.96	10.07
SD	483.96	548.62	182.92	28.03	82.68	20.20	4.54	12.49	10.03	2.22	6.46	0.75	5.79	16.60	10.10
Max	2107.66	2372.53	777.12	172.42	299.61	96.48	17.16	64.34	46.58	17.79	23.62	4.47	29.69	50.11	48.08
Min	11.98	11.41	22.68	4.60	2.58	3.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.07	<0.01	1.64

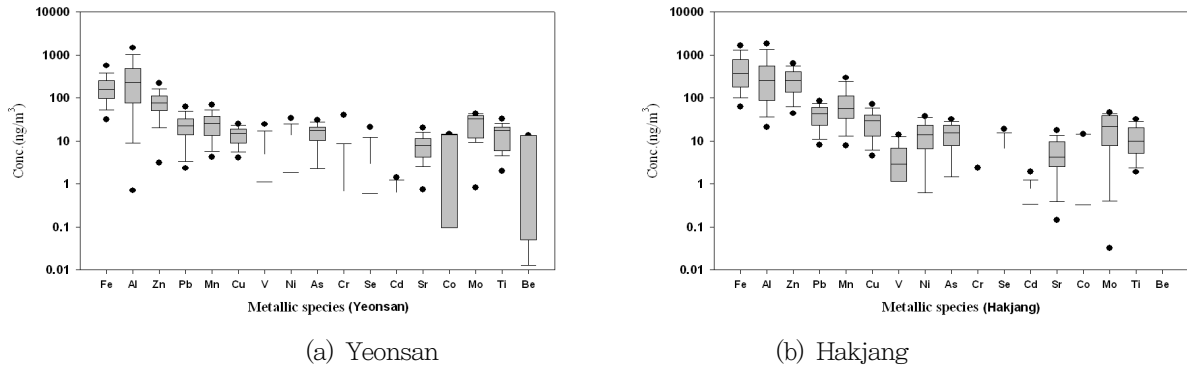


Fig. 10. Boxplots for metallic elements.

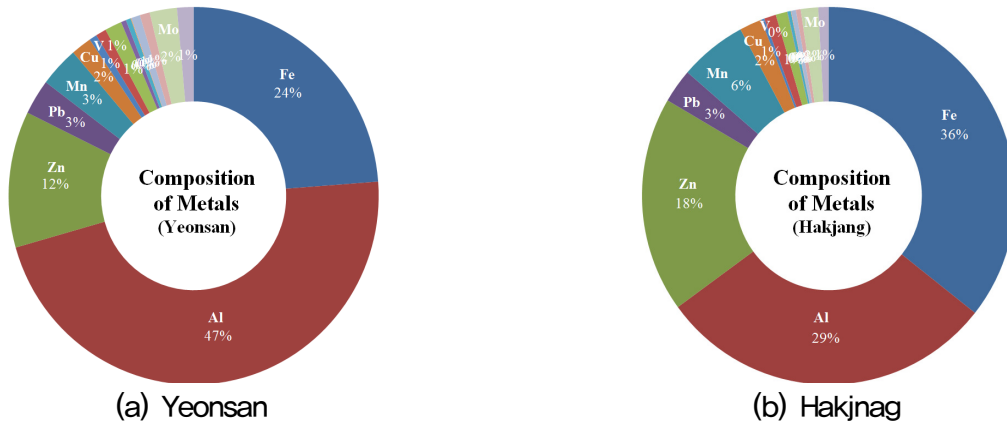


Fig. 11. Composition of metallic elements.

ng/m<sup>3</sup>, Mn 28.34(3.24~99.19) ng/m<sup>3</sup>, Cu 14.77 (3.24~99.19) ng/m<sup>3</sup> 등으로 나타났으며, 학장동 지점의 경우 Fe 549.60(11.98~2107.66) ng/m<sup>3</sup>, Al 452.09 (11.41~2372.53)ng/m<sup>3</sup>, Zn 284.64(22.68~777.12) ng/m<sup>3</sup>, Pb 44.80(4.60~172.42) ng/m<sup>3</sup>, Mn 89.75 (2.58~299.61) ng/m<sup>3</sup>, Cu 30.04(3.03~96.48) ng/m<sup>3</sup> 등으로 나타났다. 2009~2010년 연산동에서 수행한 연구 결과(PM2.5의 2%)와 비교하면 PM2.5 중 차지비율이 다소 3.3%로 다소 높아졌는데 특히 Fe, Al 등 토양 및 암석 기원의 성분농도 기여율이 높게 나타났다.

Fig. 11은 각 지점에서의 금속성분에 대한 조성비를 나타낸 것으로 도심지역인 연산동 지점(a)의 경우 금속성분간 성분별 구성비는 Al(47%) > Fe(24%) > Zn(12%) > Pb(3%) > Mn(3%) > Cu(2%) > Mo(2%)의 순이었으며, 학장동 지점(b)의 경우 Fe(36%) > Al(29%) > Zn(18%) > Mn(6%) > Pb(3%) > Cu(2%) > Mo(2%)의 순으로 두 지점 모두 토양 및 지각의 구성성분인 Fe, Al의 조성비가

연산동 및 학장동 지점 각각 71, 65%를 차지하였다.

항목별 상관분석

PM2.5 구성성분의 항목별 상관성을 알아보기 위해 상관분석을 행하였다. Table 12는 연산동 지점에서의 상관분석 결과로서 PM2.5 중량농도, 이온성분 및 기상항목간 비교적 높은 상관성 (r=0.5이상)을 나타내는 항목들은 PM2.5-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(0.756), PM2.5-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(0.832), PM2.5-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(0.885), PM2.5-K<sup>+</sup> (0.690), Cl<sup>-</sup>-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(0.529), Cl<sup>-</sup>-Na<sup>+</sup>(0.910), Cl<sup>-</sup>-Temp(-.510), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(0.881), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-K<sup>+</sup>(0.505), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (0.760), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-K<sup>+</sup>(0.637), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-K<sup>+</sup>(0.511) 등이었으며 PM2.5의 중량농도와 상관성이 있는 항목들로 Mg<sup>2+</sup>를 제외하고는 대부분 유의한 상관성이 있는 것으로 나타났다.

Table 12. Correlation matrix for PM2.5 composition at Yeonsan

Yeonsan	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>	Temp.	WS	Hum.
PM2.5	1.000											
Cl <sup>-</sup>	<b>0.457**</b>	1.000										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.756**</b>	<b>0.529**</b>	1.000									
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>0.832**</b>	0.288**	0.534**	1.000								
Na <sup>+</sup>	0.420**	<b>0.910**</b>	0.404**	0.277*	1.000							
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>0.885**</b>	0.451**	<b>0.881**</b>	<b>0.760**</b>	0.387**	1.000						
K <sup>+</sup>	<b>0.690**</b>	0.497**	<b>0.505**</b>	<b>0.637**</b>	0.448**	<b>0.511**</b>	1.000					
Mg <sup>2+</sup>	0.172	0.086	-0.137	0.350**	0.297**	0.078	0.267*	1.000				
Ca <sup>2+</sup>	0.314**	0.155	0.065	0.285*	0.231*	0.075	0.414**	0.332**	1.000			
Temp.	-0.256*	<b>-0.510**</b>	-0.481**	-0.071	-0.300**	-0.282*	-0.420**	0.179	0.092	1.000		
WS	0.165	-0.087	-0.098	0.203	-0.018	-0.018	0.131	0.272*	0.294*	0.056	1.000	
Hum.	-0.123	-0.176	-0.160	-0.086	-0.051	-0.099	-0.281	0.177	0.132	0.482**	0.128	1.000

\*\* : 상관계수는 0.01 수준에서 유의함.

\* : 상관계수는 0.05 수준에서 유의함.

Table 13. Correlation matrix for PM2.5 composition at Hakjang

Hakjang	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>	Temp.	WS	Hum.
PM2.5	1.000											
Cl <sup>-</sup>	<b>0.577**</b>	1.000										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.880**</b>	<b>0.650**</b>	1.000									
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.463**	0.152	0.396**	1.000								
Na <sup>+</sup>	<b>0.528**</b>	<b>0.855**</b>	<b>0.560**</b>	0.255*	1.000							
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>0.816**</b>	<b>0.552**</b>	<b>0.859**</b>	0.394**	0.427**	1.000						
K <sup>+</sup>	<b>0.682**</b>	<b>0.570**</b>	<b>0.692**</b>	0.492**	<b>0.544**</b>	<b>0.521**</b>	1.000					
Mg <sup>2+</sup>	0.084	0.081	0.202	<b>0.640**</b>	0.103	0.043	0.482**	1.000				
Ca <sup>2+</sup>	0.132	0.150	0.217	<b>0.545**</b>	0.185	0.076	0.349**	<b>0.738**</b>	1.000			
Temp.	-0.450**	<b>-0.702**</b>	<b>-0.533**</b>	0.121	<b>-0.591**</b>	-0.484**	<b>-0.505**</b>	0.161	0.167	1.000		
WS	-0.393**	<b>-0.522**</b>	<b>-0.549**</b>	-0.153	-0.413**	-0.431**	-0.378**	-0.110	-0.155	0.355**	1.000	
Hum.	-0.211	-0.357**	-0.187	0.104	-0.363**	-0.170	-0.354**	0.074	0.098	0.592**	0.087	1.000

Table 13은 학장동 지점에서의 상관분석 결과이며, PM 2.5 중량농도, 이온성분 및 기상항목간 비교적 높은 상관성 ( $r=0.5$ 이상)을 나타내는 항목들은  $PM_{2.5}-Cl^{-}$ (0.577),  $PM_{2.5}-NO_3^{-}$ (0.880),  $PM_{2.5}-NH_4^{+}$ (0.816),  $PM_{2.5}-K^{+}$ (0.682),  $Cl^{-}-NO_3^{-}$ (0.650),  $Cl^{-}-Na^{+}$ (0.855),  $Cl^{-}-NH_4^{+}$ (0.552),  $Cl^{-}-K^{+}$ (0.570),  $Cl^{-}-Temp$ (0.702),  $Cl^{-}-WS$ (0.522),  $NO_3^{-}-Na^{+}$ (0.560),  $NO_3^{-}-NH_4^{+}$ (0.859),  $NO_3^{-}-K^{+}$ (0.692),  $NO_3^{-}-Temp$ (0.533),  $NO_3^{-}-WS$ (0.549),  $SO_4^{2-}-Mg^{2+}$ (0.640),  $SO_4^{2-}-Ca^{2+}$ (0.545),  $Na^{+}-K^{+}$ (0.544),  $Na^{+}-Temp$ (0.591),  $K^{+}-Temp$ (0.505),  $Mg^{2+}-Ca^{2+}$ (0.738)이었으며  $PM_{2.5}$  중량농도와 상관성이 있는 항목들로는  $Mg^{2+}$ 와  $Ca^{2+}$ 를 제외하고는 대부분 유의한 것으로 나타났다.

### PM2.5 발생원 추정

본 연구에서는 최적의 오염원 수 및 오염원 분류표를 결정하고 물리적으로 가장 합리적인 모델링 결과를 산출하기 위하여 오염원의 수와 FPEAK 값을 변경하여 모델링을 수행하여 최적의 오염원 수를 각각 6개로 정하였으며, 그 결과를 Fig.12, 13의 오염원 분류표(source profile)에 나타내었다.

먼저 Fig.12에는 도심지역인 연산동 지점에서의 오염원 분류표를 나타내었으며, 첫 번째 오염원은 Al, Cu, Pb, As, Sr, Co, Mo, Ti 등이 주요 물질들로 토양 및 산업관련 발생원으로 추정하였다. 두 번째 오염원은 Fe, Mn, Ni 등이 주요물질로서 제철관련 산업이 주요 발생원인 것으로 추정된다. 세 번째 오염원은  $NO_3^{-}$ , nss-

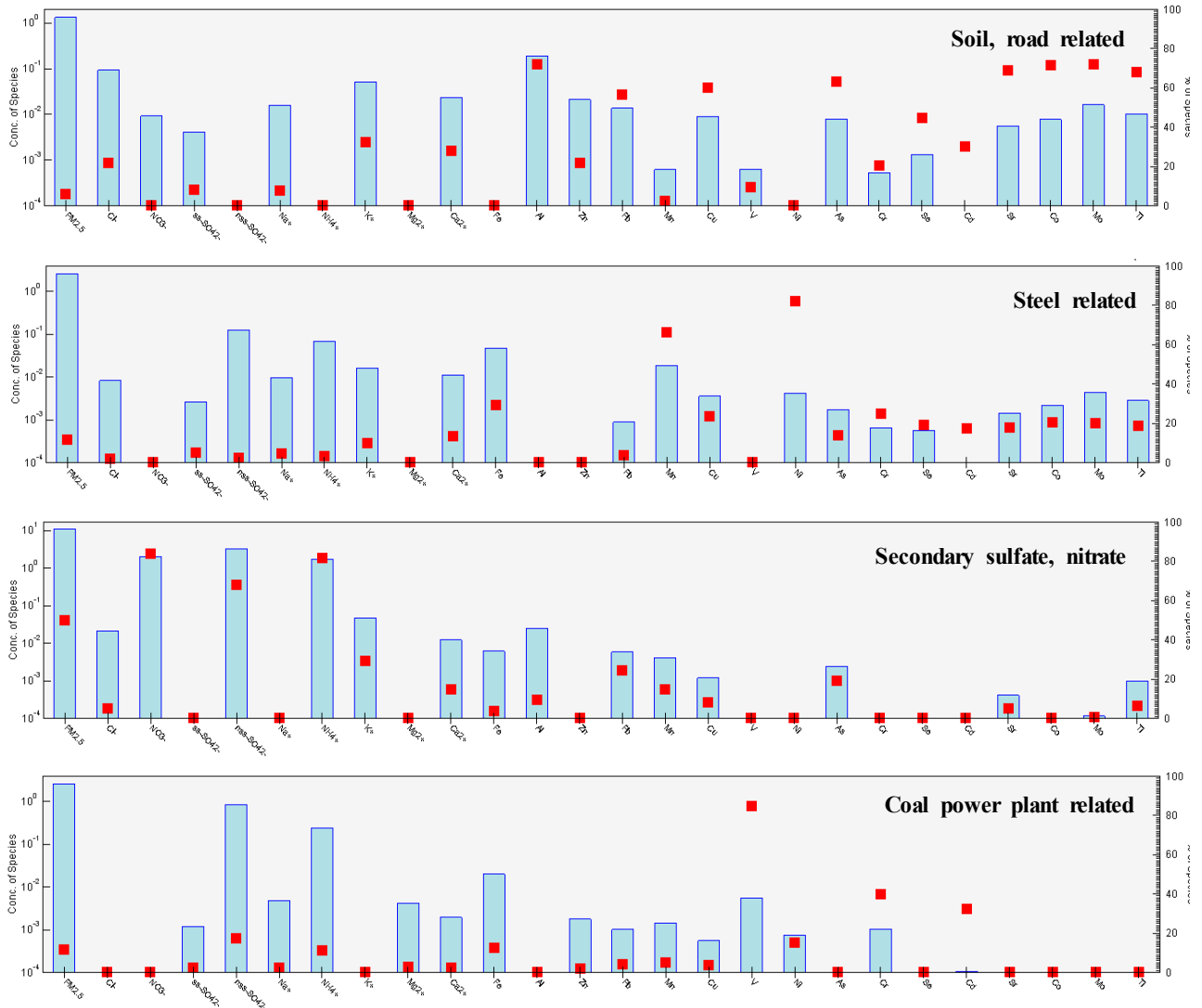


Fig. 12. Source profiles of the resolved sources measured at Yeosan(continued).

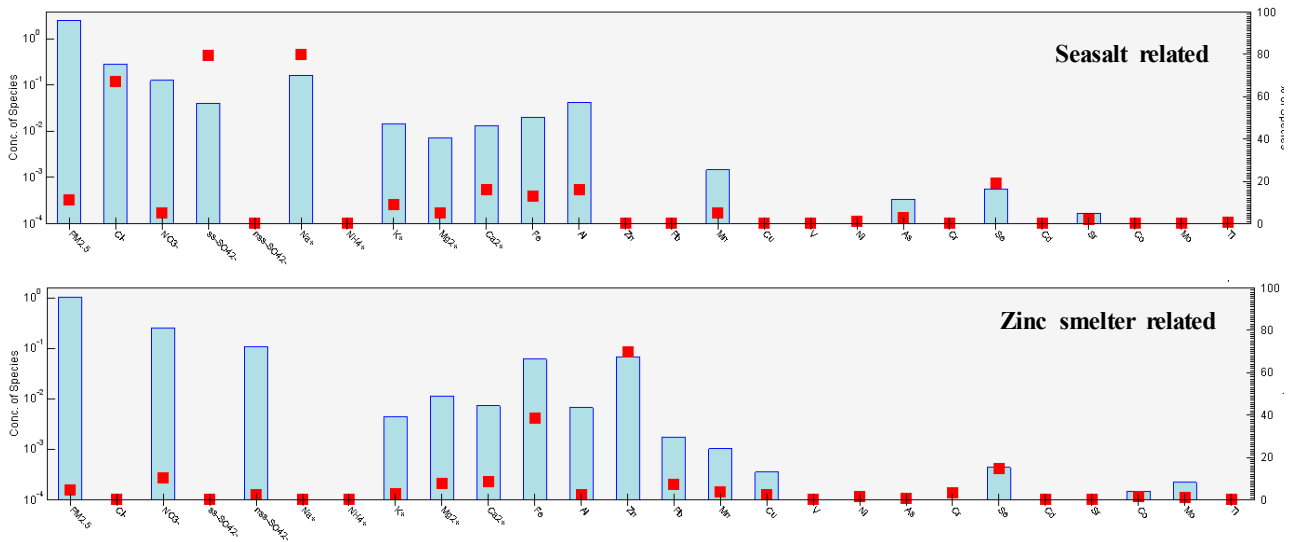


Fig. 12. Source profiles of the resolved sources measured at Yeonsan.

$SO_4^{2-}$  및  $NH_4^+$  등이 주요 물질로서 2차 입자(secondary particle)관련 발생원으로 추정하였다. 네 번째 발생원은 V, Cr 등이 주요 물질로서 석탄을 사용하는 화력발전소를 발생원으로 추정하였다. 다섯 번째 오염원은 Zn, Fe 등

이 주요물질로서 아연제련 관련 사업장을 발생원으로 추정하였다. 마지막으로 여섯 번째 오염원은  $Cl^-$ ,  $ss-SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$  등이 주요물질로서 해염(seasalt) 관련 발생원으로 추정하였다.

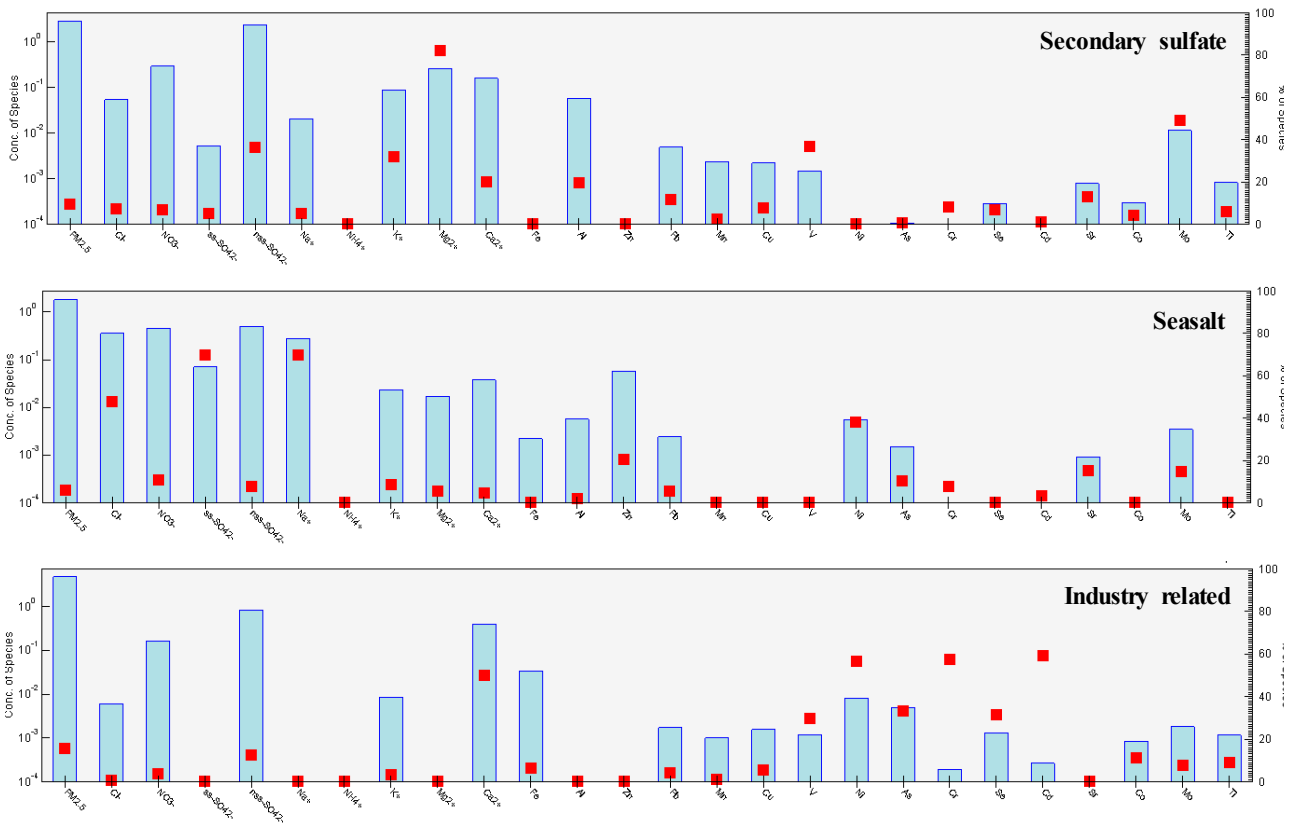


Fig. 13. Source profiles of the resolved sources measured at Hakjang(continued).

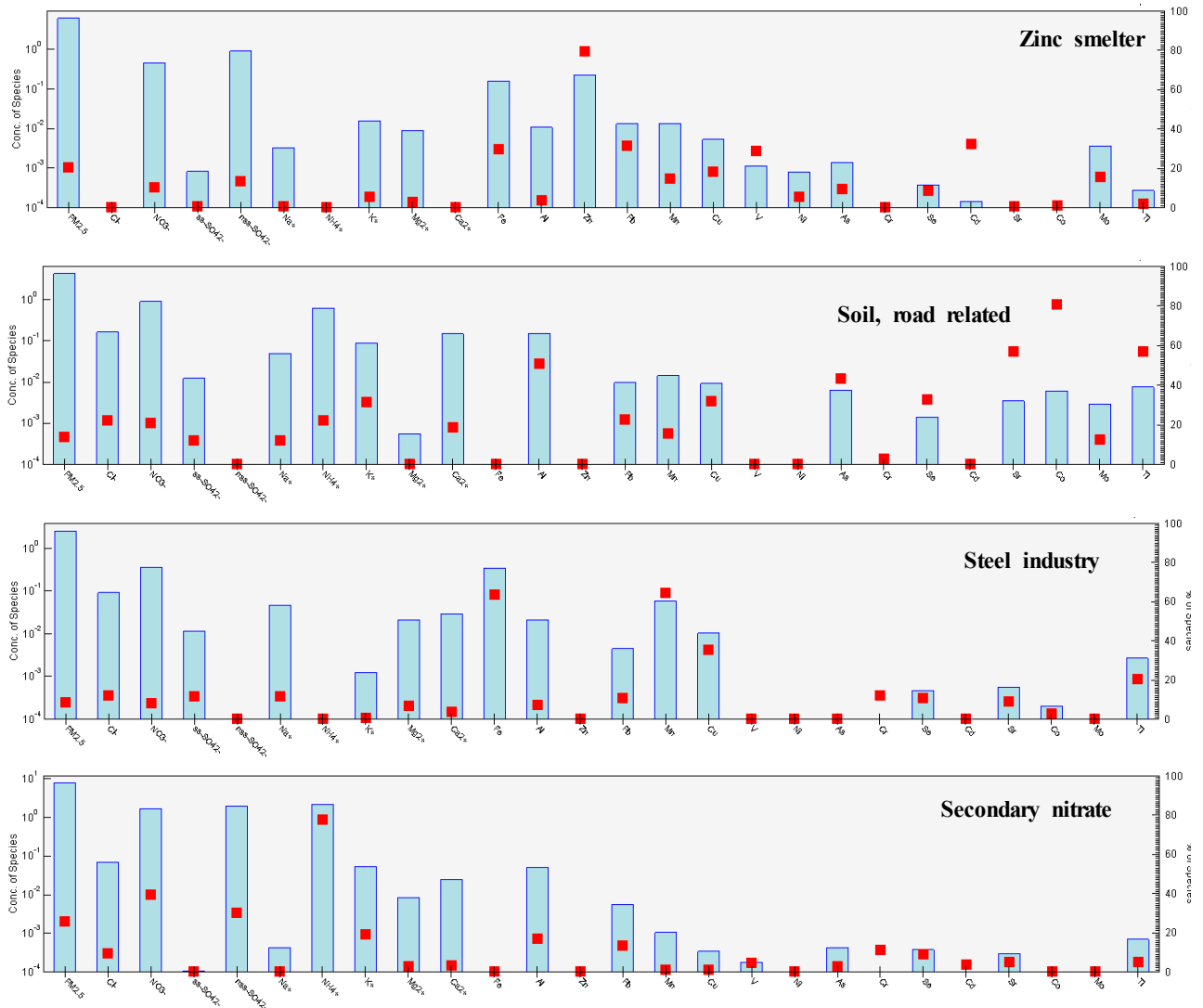


Fig. 13. Source profiles of the resolved sources measured at Hakjang.

다음으로 Fig.13에는 학장동 지점에서의 오염원 분류 표를 나타내었으며, 첫 번째 오염원은  $Ca^{2+}$ , Ni, Cr, Cd 등이 주요 물질들로 주물 등 산업관련 발생원으로 추정하였다. 두번째 오염원은  $Cl^-$ ,  $ss-SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$  등이 주요물질로서 해양기원 발생원으로 추정하였다. 세번째 오염원은 Fe, Zn 등이 주요물질로서 아연 제련관련 산업이 주요 발생원으로 추정하였다. 네 번째 오염원은 Al, Pb, Cu, As, Se, Sr, Co 등이 주요물질로서 토양 및 포장도로 관련 발생원으로 추정하였다. 다섯 번째 오염원은  $NO_3^-$ ,  $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$  등이 주요 물질로서 2차 입자관련 발생원으로 추정하였다. 마지막으로 여섯 번째 Fe, Mn Cu 등이 주요물질로서 제철관련 발생원으로 추정하였다.

### 결론 및 제언

본 연구는 향후 PM2.5에 대한 대기환경기준의 적용과 환경보건학적 위해성 평가를 위한 구성성분을 조사함으로써 부산 시민의 건강보호와 PM2.5 저감 방안을 제시하기 위해 3년간의 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. 연산동 지점(도심지역)의 PM2.5 평균농도(2009~2010년 평균)는  $25.5(23.2) \mu g/m^3$ , 일평균 농도 범위(2009~2010)는  $8.6\sim 86.5(6.7\sim 59.8) \mu g/m^3$ 이었고, 학장동 지점(공업지역)의 PM2.5 평균농도는



32.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 일평균농도 범위는 8.7~107.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며 공업지역(제련, 주물 등이 주업종)의 농도수준이 30%정도 높게 나타났다.

- PM2.5성분의 구성비는 연산동 지점(도심지역)에서 이온성분 44.7%, 탄소성분 25.3%, 금속성분 3.3%, 그리고 입자결합수를 포함한 기타 성분들이 26.5%정도를 차지하였으며, 학장동 지점(공업지역)에서 이온성분 53.5%, 탄소성분 19.2%, 금속성분 4.7% 기타 성분들이 22.6%를 차지하여 도심 및 공업지역 모두 이온성분이 PM2.5의 가장 많은 부분을 차지하였다.
- PM2.5 중 이온성분은 도심과 공업지역에서 각각 44.7%, 53.5%를 차지하여 PM2.5의 구성성분중 가장 많은 비율을 차지하였으며, 이온성분 간 구성비는  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+$ 의 순으로 나타났고, 특히 이 물질들은 가스에서 입자로 전환된 2차 입자의 대표적인 성분들로서 PM2.5중 차지하는 비율은 연산동 및 학장동 지점 각각 41.0%, 45.5%로 비교적 높은 비율을 차지하여, 결국 PM2.5의 발생 억제를 위해서는 대기중으로 배출되는 1차 물질인  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$  등의 배출량 저감정책이 필요한 것으로 판단된다.
- PM2.5 중 탄소성분은 도심과 공업지역에서 각각 25.3%, 19.2%를 차지하여 이온성분 다음으로 높은 구성비를 차지하였으며, 두 지점 모두 유기탄소가 무기탄소의 3배정도 높게 나타나 국내 다른 대도시와 유사한 경향을 나타내었고, 탄소성분의 주배출원이 자동차이므로 대기중 PM2.5의 농도 수준을 낮추기 위해서는 자동차 배출가스 관련 대책도 필요하다.
- PM2.5 중 금속성분은 도심과 공업지역에서 각각 3.3%, 4.7%를 차지하여 PM2.5중 구성비는 상대적으로 적으나, 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. 특히 Fe, Al 등 토양관련 성분들이 70% 이상을 차지하고 있으며 그 외 성분들은 미량으로 존재하지만 상대적으로 높은 인체 위해성으로 관리가 필요한 부분이다.
- 오염원 확인과 정량적 기여도 평가를 위한 PMF를 이용한 수용모델링 결과 도심 및 공업지역에서 각각 6개의 발생원을 추정할 수 있었으며 발생원별 오염원 분류 결과 연산동 지점의 경우 1) 토양 및 산업, 2)제철 관련, 3)2차 입자, 4)화력발전소, 5)아연제련, 6)해염(seasalt) 관련 발생원으로 파악할 수 있었고, 학장동 지점의 경우 1)산업 2)해염, 3)아연 제련, 4)토양 및

포장도로, 5)2차 입자 6)제철관련 발생원으로 추정하였으며 향후 이러한 발생원에 대한 체계적인 관리가 되어야 PM2.5뿐만 아니라 대기오염물질의 저감을 효율적으로 할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 본 연구결과를 토대로 다음과 같이 제언하고자 한다.

- 현재 배출허용기준은 총먼지로 규제하고 대기환경기준은 미세먼지(PM10)로 관리되고 있으므로 향후 배출허용기준을 현재의 먼지에서 미세먼지로의 법적 보완 필요한 것으로 판단된다.
- 규모가 작은 업종의 대기배출시설 개선 및 대기오염물질 비산배출 억제를 위한 기술지원을 강화해야 하며, 주요 배출원 파악 및 정확한 배출량 산정이 필요한 것으로 판단된다.
- 선박 등 상대적으로 배출허용기준 적용에 취약한 미세먼지 및 대기오염물질 배출시설에 대한 관리가 강화되어야 할 것으로 판단된다.
- 마지막으로 도로 청결시스템을 효율적으로 운영하여 도로면 재비산 먼지를 제거하여 대기중 미세먼지의 농도를 감소시켜야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 강충민, 박성균, 선우영, 강병욱, 이학성, “서울시 미세먼지(PM2.5)의 호흡기질환 사망과의 연관성 연구”, *한국대기환경학회지* 제22권 제5호, pp.554~563(2006).
- Philip R.S. Johnson and John J. Graham, “Analysis of Primary Fine Particle National Ambient Air Quality Standard Metrics”, *Air & Waste Manage. Assoc.* 56, pp.206~328(2006).
- 우정현, “수도권 미세먼지 환경 개선을 위한 미국의 대기환경정책 사례 조사 연구”, *한국대기환경학회지* 제25권 제6호, pp.579~593(2009).
- 환경부, 2011년 환경백서
- 미국 환경성 홈페이지(<http://www.epa.gov>)
- 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).
- 이용기, 이기중, 이재성, 신은상 “미세먼지 입경농도 분포의 지역별 특성”, *한국대기환경학회지* 제28권 제

- 6호, pp.666~674 (2012).
8. US EPA, National Air Quality and Emission Trends Report, EPA-454/R-97-013, Research Triangle Park, NC 27711(1996).
  9. 장지영, 양지연, 임은희, 박민석, 김수환, 최인홍, 신동천, "대기 중 미세먼지에 대한 인체 영향 평가 : 변이원 성과 세포 독성 중심으로 "
  10. 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).
  11. 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), 1514~1619(2008).
  12. 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).
  13. World Health Organization, "Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone, and nitrogen dioxide"(2003).
  14. 배현주, 신지영, 박찬구, 정권, 이상열, 김민영, 박정임, "서울시 대기 중 PM2.5 농도 개선과 조기사망 감소 효과", *한국대기환경학회지*, 26(1), pp.10~20(2010).
  15. 황인조, 김동술, "PMF 모델을 이용한 대기 중 PM10-오염원의 확인", *한국대기환경학회지*, 19(6), pp.701~717(2003).
  16. 부산광역시, 2011년 통계연보
  17. 국립환경과학원, "PM2.5 물리·화학적 특성에 관한 연구(I)"(2009).
  18. 부산광역시, 2011년 통계연보
  19. 황인조, "미국 서부 국립공원 지역의 PM2.5에 대한 오염원 확인 및 기여도추정", *한국대기환경학회지*, 26(1), pp.21~33(2010).
  20. 오미석, 이태정, 김동술, "PMF 모델을 이용한 용인-수원경계지역에서의 부유분진의 크기별 오염원 확인", *한국대기환경학회지*, 25(2), pp.108~121(2009).
  21. 김신도, 김창환, "서울지역 미세먼지의 물리화학적 특성", *서울도시연구*, 제9권 제3호, pp.23~33(2008).
  22. 국립환경과학원, "황사 및 미세먼지 중 PM2.5 성분 분석에 관한 연구"(2008).
  23. U.S. Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/scram001>, Protocol for Applying and Validating the CMB Model for PM2.5 and VOC