

# 인천시 미세먼지(PM-10) 발생 특성 평가

유희종, 김현주, 송영재, 이충대, 하현섭

인천시보건환경연구원 환경조사과

## Evaluation of Ambient PM-10 Aerosol in Incheon

Hee-Jong Yoo, Hyun-Ju Kim, Young-Jae Song, Chung-Dae Lee, Hyun-Sup Ha

Department of Environmental Research, Incheon Research Institute of Public  
Health and Environment

### ABSTRACT

In order to maintain and manage ambient air quality, it is necessary to identify the possible sources and estimate their contributions to ambient aerosols. The aims of this study were 1) evaluate source distribution for PM-10 qualitatively and quantitatively using PCA, 2) to classify sampling sites according to the similarity of source contribution to PM-10 using CA, and 3) to evaluate the effect of sea salt on the aerosols using the enrichment factor (EF) representing the ratio of Cl/Na in aerosol to Cl/Na in sea. The PM-10 samples were collected by a PM-10 high-volume air sampler monthly in 2008 at 5 sites in Incheon city, South Korea. These samples were analyzed by ICP-AES for 9 metals including Pb, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Al and Zn by IC for 8 soluble ions including  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  and  $NH_4^+$ , and by Elemental Analyzer for total carbon. CA classified 3 groups out of 5 sites; Sinheung/Songdo/Guwol, Gaeyang, and Songhae. The closer the EF is to one, the higher the PM-10 is affected by sea salt and EF for the sampling site near seashore was 1.02 implying contribution of sea salt on the aerosol level while that for the sampling site affected by various anthropogenic sources was increased to 2.57. In conclusion, PCA and CA are suitable for identifying and estimating the sources of air pollution. EF allows for investigating the effect of sea salt on the PM-10 in the region where sea-land breezes.

## I. 서 론

### 1. 연구배경 및 필요성

우리나라는 대기환경기준의 강화 및 새로운 환경기준 항목 설정의 필요성이 지속적으로 제기됨에 따라 대기환경기준을 선진국 수준으로 강화하기 위하여 2007년부터 미세먼지(PM-10) 연간 평균치를  $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 선진국 수준까지 환경기준을 강화하였다. 인천시의 미세먼지는 2005년  $61\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2006년  $68\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2007년  $64\mu\text{g}/\text{m}^3$  으로 비교적 높았으며, 2008년에는 인천세계도시축전 및 시민건강 향상을 위하여  $57\mu\text{g}/\text{m}^3$  로서 전년도 대비 약 11% 저감을 목표로 설정한 바 있다.

미세먼지 저감을 위해서는 대기 입자상물질의 물리 화학적 특성, 오염 배출원 및 입자상물질에 대한 각 배출원의 기여도 등을 정확하게 파악하여 그 영향을 정량화하는 것은 대기질 관리 측면에서 무엇보다 중요한 과정이다. 최근 미세먼지 오염도 변화추세를 정밀하게 분석 및 평가하기 위해서 대용량의 데이터에서 통계기법이나 모델링기법을 이용하여 기존에 발견되지 않았던 내재된 패턴을 찾아내는 과정인 탐색적 통계분석기법 등을 환경 분야에 활용하고 있는 추세이다.

따라서, 본 연구에서는 주성분 분석(principal component analysis)과 군집 분석(cluster analysis) 등의 탐색적 통계기법을 이용하여 배출원 구성물질 성분비(source fingerprint) 분석 및 그룹별 오염패턴분류를 통하여 인천지역의 대기질 개선을 위한 우리시 정책 자료로서 적극 활용하고자 한다.

### 2. 연구목적

탐색적 통계기법인 주성분분석 및 군집분석을 이용하여, 인천지역 미세먼지 기여도 평가 및 발생원 규명을 통해 권역별 먼지저감 대책을 위한 정책자료 적극 활용하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 조사기간 및 대상

본 연구는 2008년 한 해 동안 인천지역 도시대기측정소 5개 지점 (송도동, 신흥동, 송해면, 구월동 및 계양동)을 대상으로 미세먼지 구성성분을 분석하였다.

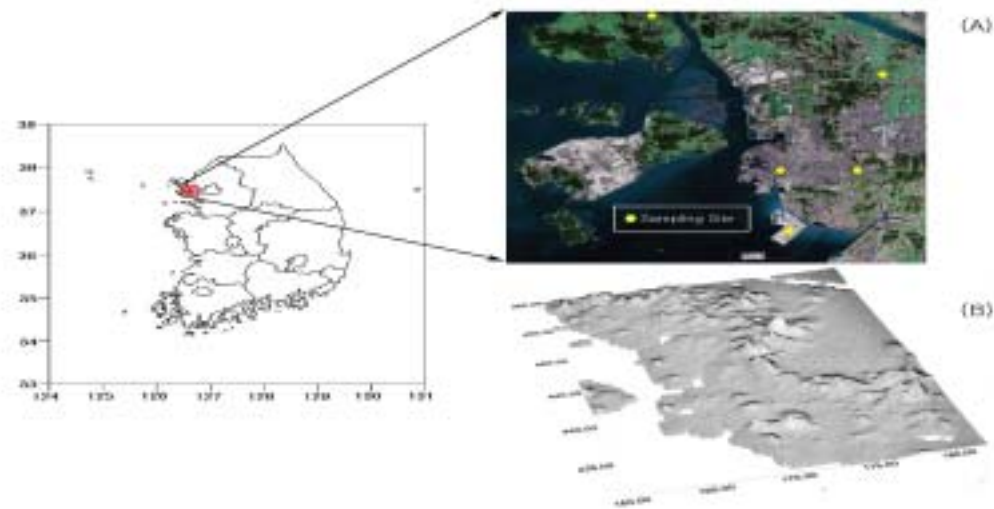


Fig. 1. Sampling areas in Incheon, 2008.

그림 1(A)은 인천의 도시대기측정망과 인천기상대의 위치를 나타내고 있으며, 그림 1(B)은 인천지역의 3차원 지형도이다. 인천은 표고 50m 이하가 87.7%로 대부분 저지대로 이루어졌으며, 경사도 20% 미만이 89.3%로서 대체적으로 완만한 지형을 형성하고 있다(인천광역시, 2000). 본 연구의 주요 흐름과정은 그림 2와 같다.

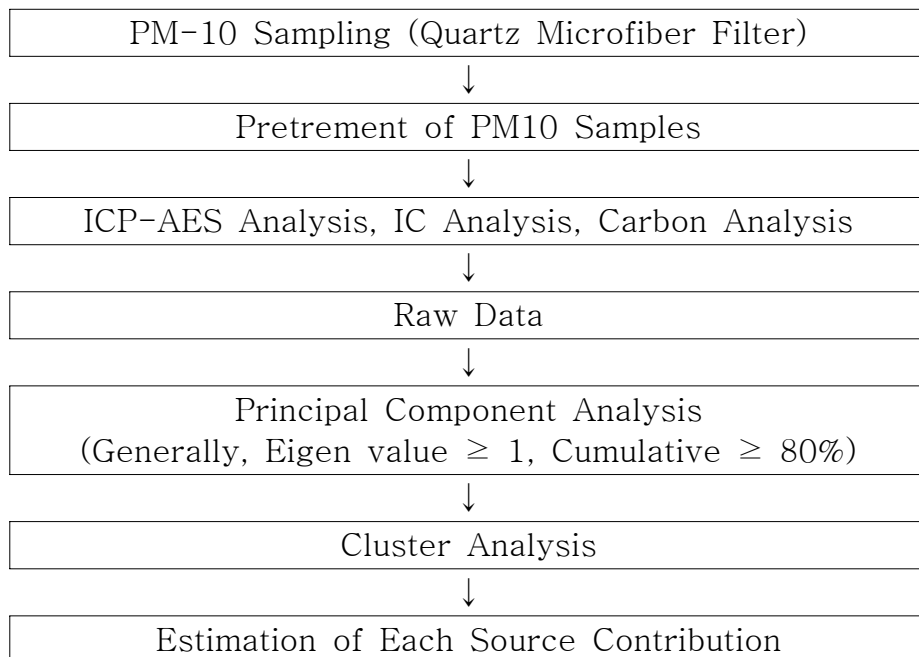


Fig. 2. A flow diagram for the study procedure.

## 2. 시료채취 및 분석방법

부유분진 중 공기역학적 직경(aerodynamic diameter)  $10\mu\text{m}$ 이하의 분진(PM-10)은 고용량 시료채취장치 high-volume air sampler를 사용하여 평균  $1.13\text{m}^3/\text{min}$ 의 유량을 약 24시간 동안 시료채취를 하였다. 본 연구에 사용된 high-volume air sampler는 inlet으로 분진함유 공기가 유입되어 가속노즐(acceleration jet)을 통과하여  $10\mu\text{m}$ 보다 큰 입자상 물질은 PM-10 inlet의 충돌판(collection shim)에 관성 충돌하여 부착되고  $10\mu\text{m}$ 보다 작은 입자상 물질은 상승하는 공기의 흐름을 따라 운송되고 여지에 쌓여 채취된다.

또한 PM-10 high-volume air sampler의 정확한 흡입유량을 산정하기 위하여 유량보정을 수행하였는데, 보통 3-4주에 1회 정도 Axial blower의 carbon brushes(Model GBI)를 교환한 후 Slack-Tube Manometers (USA, Dryer Instruments Inc.)와 high volume orifice fit(USA, Graseby/GMW)를 이용하여 EPA Method TO-13의 calibration of sampling systems 항목에 의거하여 유량보정을 수행하였다. 시료의 채취에 사용된 여지는 수정섬유여지 (quartz micro fiber filter, QM-A,  $8\times 10$ , Whatman)를 사용하였다. 이 여지는 재질이  $\text{SiO}_2$ 로서, 약  $500^\circ\text{C}$ 까지의 고온에 견딜 수 있으며, 시료의 채취 시  $\text{SO}_2$ 나  $\text{NO}_2$ 에 의해 여지의 표면에 생성되는  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  등과 같은 생성물(artifact)이 거의 발생되지 않아 부유분진의 채취에 적합하다. 여지는 시료채취 전후로 3일간 항온, 항습상태의 전자 데시케이터(Sanplatec Corp., Model Oyin 09678BN)내에 보관하여 항량시킨 후  $0.01\text{mg}$ 의 감도를 갖는 전자저울 (A&D Co., Model HM-202)로 칭량하였다. 칭량 전후의 무게차를 분진의 무게로 간주하였으며 이를 유량으로 나누어 분진농도를 계산하였다.

표 3.3에 PM-10 시료의 채취방법과 계절별 시료의 수 및 각 분석방법을 나타내었다. 미세입자의 물리적 화학적 특성을 알아보기 위하여 질량농도를 비롯해  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ 의 8가지 수용성성분과 Al, Mn, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb 등 9개항목 원소성분을 분석하였다.

### 1) 금속원소 성분 분석

대기 중 PM-10을 채취한 여지는 무기원소 및 이온성분의 분석을 위하여 자체 제작한 스테인레스재질 펀처(stainless steel puncher, 직경  $38\text{mm}$ )를 이용하여 원형으로 일정부분을 절취하였으며, 절취된 여지를 전처리하였다. 수정 섬유여지에 채취된 대기 중 PM-10의 무기원소 분석을 위한 전처리방법은 미국 EPA가 1992년 10월 13일에 고시한 CWA(Clean Water Act)의 microwave 전처리법을 준용하여 Questron (Questron 사, Model Q-15

MicroPrep)을 이용한 질산-염산 전처리 방법을 사용하였다. 채취된 시료는 직경 38mm의 스테인레스 펀치를 이용하여 일정한 크기로 절취하여 PFA liner에 넣은 후 유해 중금속 측정용 61% 질산 7mL와 35% 염산 3mL를 가한 후 power 4와 3에서 각각 6분씩 가온하여 무기원소 성분을 추출하였다. 무기원소 성분을 추출한 후, 여과 여지 (filter paper, NO. 5B, 110mm, Advantec MFS Inc.)를 이용하여 시료의 잔재물을 여과하였으며 초순수를 가하여 50mL 로 mass up 하였다. 전처리가 끝난 시료는 폴리프로필렌 재질의 50mL centrifuge tube (Corning Co. USA)에 담아 냉장고에서 4℃로 보관하였다.

## 2) 이온성분 분석

수용성 이온성분의 농도를 분석하기 위하여 이온크로마토그래피(Dionex사, Model DX-400)를 이용하였으며, 수용성 이온성분을 분석하기 위하여 펀치한 여지를 초순수수에 침적시켜 초음파 추출기로 추출하는 전처리 방법을 이용하였다(Appel, 1993). 여지를 직경 38 mm의 스테인레스 펀치를 이용하여 일정한 크기로 절취하여 100mL 비이커에 넣은 후 초순수 30mL를 가하여 비이커를 초음파 추출기 (Model 5210R-DTH, Branson Ultrasonics Corp., USA)에 넣어 30분간 추출하였다. IC 분석시 컬럼 막힘 현상을 방지하기 위하여 직경 47mm, pore size 0.45 $\mu$ m의 sterile 막여지(Whatman 사)를 이용하여 추출된 용액을 여과하였다.

## 3. 자료처리

본 사업에서는 통계전문 프로그램(SAS)을 이용하여 탐색적 통계기법인 주성분분석(principal component analysis)과 군집분석(cluster analysis)을 사용하였다. 주성분 분석은 자료가 가지고 있는 정보를 발견하기 위해서 자료에 포함된 사례들의 펼쳐져 있는 방향 또는 경향을 발견하기 위한 고전적 통계기법이라고 할 수 있다. 대기 에어로졸의 발생원 해석에서 관측항목은 입자 중의 중금속 성분농도에 해당하며, 해석결과로 추출된 주성분(principal component)은 가상적이지만 발생원 종류(source type)를 나타낸다고 할 수 있다. 군집분석은 사전 지식을 가지고 있지 않는 사례들 또는 변수들에 대해서 탐색적으로 이들 사이에 존재하는 유사성을 먼저 검토하는 동종 집단(groups) 또는 군집(clusters)으로 분류하는 기법이다.

# III. 결과 및 고찰

## 1. 기상인자 영향 분석

그림 3의 2008년도 풍향 및 풍속의 출현빈도를 도식화한 바람장미

(windrose)로서 대상지역의 바람특성을 직관적으로 파악할 수 있기 때문에 대기오염분야에서 자주 이용되고 있다. 서풍계열의 우세가 두드러지며 해안에서 멀어질수록 풍속이 감소하고 서풍의 빈도가 줄어 해풍의 강도가 미치는 영향이 줄어드는 것을 알 수 있다.

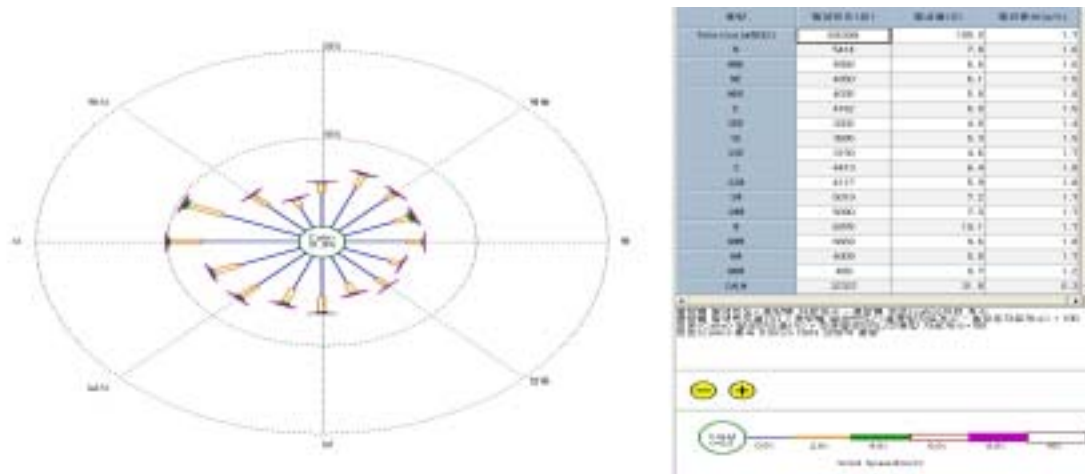


Fig. 3. Windrose and wind speed in Incheon, 2008.

조 등(2003)에 의하면, 인천지역의 주 풍향은 북서풍으로서 그 빈도가 11.0%로서 크게 우세하지는 않으나 남서풍과 북풍 등이 고르게 나타나고 있다. 특히, 인천지역에서 제일 빈도수가 적은 풍향은 북동풍인데, 서울의 주 풍향이 북동풍과 서풍이라는 점과 비교된다. 인천지역의 계절별 풍향은 봄과 여름에 남서풍, 가을과 겨울에 북서풍이 우세하며, 풍향별 평균풍속은 봄 4.1m/sec, 여름 3.0m/sec, 가을 3.4m/sec, 겨울 4.2m/sec로 보고되었다.

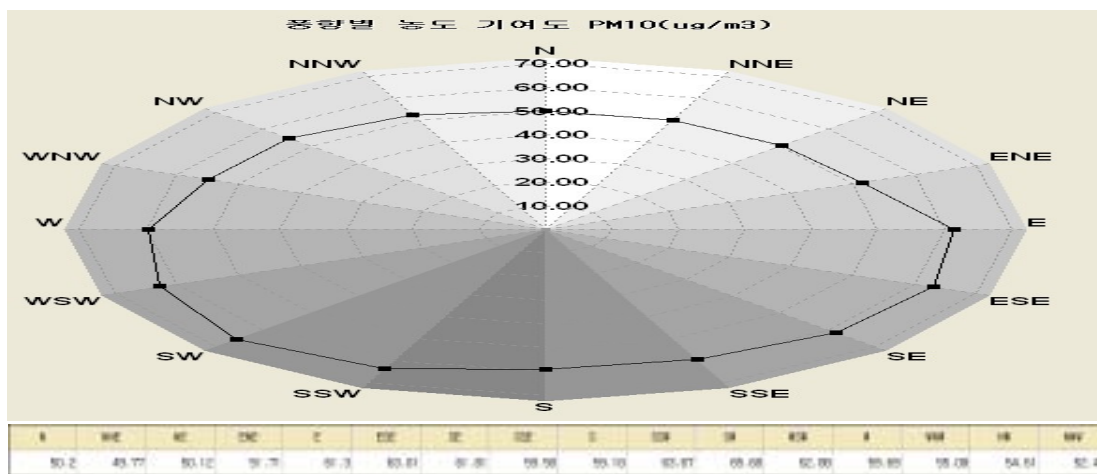


Fig. 4. Wind direction attribution to PM-10 in Incheon, 2008.

그림 4는 우리시 15개 도시대기측정망 자료를 이용하여 풍향별 미세먼지를 분석한 자료로서, 서풍계열과 동풍계열이 상대적으로 미세먼지 증가에 높게 기여하는 것으로 나타났으며, 서풍이 불 때 해안도시 특성상 해안을 따라 건설된 공장 등에 미세먼지 오염도가 증가하고 있으며, 동풍이 불 때 우리시 동쪽에 위치한 경기도의 오염원에 의한 영향을 다소 받는 것으로 판단된다.

## 2. PM-2.5, PM-10 및 분율(PM-2.5/PM-10) 조사 결과

표 1는 인천시를 비롯한 각 도시의 PM-10 및 PM-2.5 오염도를 나타낸 것으로서, 인천시 PM-2.5 농도와 PM-10 농도는  $31.0\mu\text{g}/\text{m}^3$  및  $60.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 각각 나타났으며, PM-2.5/PM-10 분율은 51.7로 조사되었으며, 이는 서울시 57.6, 영국 63.3 등 국내외 다른 도시의 분율과 비교해 볼 때 상대적으로 낮게 나타난 점으로 보아, 비산먼지 등 비교적 큰 입자조성에 의하여 미세먼지 오염도가 증가한 것으로 판단된다.

Table 1. Summary on the PM-2.5, PM-10 and mass fraction of PM-2.5 and PM-10 by country

Location	Measurement Periods	PM-2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM-10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	(PM-2.5/PM-10) *100	Reference
Incheon, Korea (urban)	Feb '08 -Oct '08	31.0	60.0	51.7	This study 2008
Seoul, Korea (urban)	Aug '02 -Jan '03	33.8	58.7	57.6	환경부
Maryebond, U.K (urban)	July '97 -May '98	23.1	36.5	63.3	Harrison et al., 2001
Rochester, U.K (urban)	July '97 -May '98	13.3	19.5	68.2	Harrison et al., 2001
Ruhr, Germany (urban)	Sep '97 -Oct '97	25	37.5	66.7	Kuhlbushc et al., 2001
Egbert, Canada (rural)	'92-'94	10	16	62.5	Jeffrey et al., 1997

## 3. 대기 중 미세먼지 성분분석 결과

### 1) 중금속 질량농도 분포

그림 5는 미세먼지 중 항목별 중금속 농도분포( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 알아보면 Pb 0.052, Cd 0.003, Cr 0.004, Cu 0.262, Fe 0.978, Mn 0.044, Ni 0.006, Al 0.469, Zn 0.209 로서, 중금속 중 Fe과 Al이 가장 많은 부분을 차지하였다.

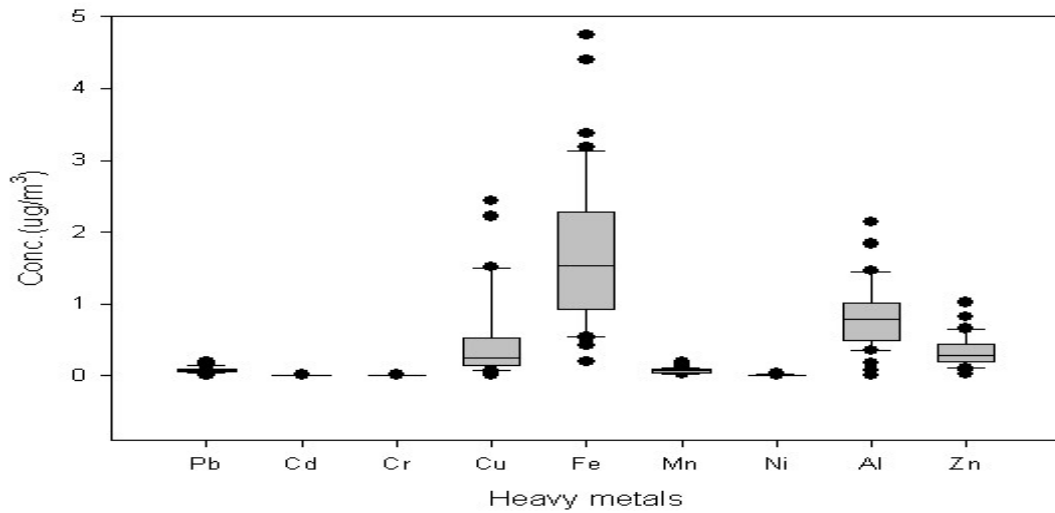


Fig. 5. Box-whisker plot for variation of heavy metal component in PM-10 in Incheon, 2008.

표 2는 조사지점별 미세먼지 중 중금속 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 나타낸 것으로서 신흥동지점이 가장 높았고, 송해면이 가장 낮은 농도분포를 보였다. 각 지점별 중금속 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 알아보면, 송도동 Pb 0.049, Fe 0.732, Al 0.455, Zn 0.162, 구월동 Pb 0.061, Fe 1.243, Al 0.516, Zn 0.277, 계양동 Pb 0.058, Fe 1.059, Al 0.462, Zn 0.266, 신흥동 Pb 0.063, Fe 1.472, Al 0.604, Zn 0.254, 송해면 Pb 0.029, Fe 0.385, Al 0.307, Zn 0.087 로 각각 나타났다.

## 2) 수용성 이온성분 농도분포

그림 6는 미세먼지 중 이온성분 무게분율(%)을 나타낸 것으로서, 각 항목별 평균농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 알아보면  $\text{Na}^+$  0.371,  $\text{Cl}^-$  1.491,  $\text{SO}_4^{2-}$  9.534,  $\text{NO}_3^-$  7.484,  $\text{NH}_4^+$  4.214 농도 분포로서, 이온 성분 중에서  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ 가 대부분을 차지하였다. 표 3는 조사지점별 이온성분( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 나타낸 것으로서 계양동이 가장 높았고, 송해면이 가장 낮은 농도분포를 보였다. 각 지점별 이온성분 분포를 알아보면, 송도동  $\text{Na}^+$  0.796,  $\text{Cl}^-$  1.421,  $\text{SO}_4^{2-}$  9.559,  $\text{NO}_3^-$  7.922,  $\text{NH}_4^+$  3.679, 구월동  $\text{Na}^+$  0.697,  $\text{Cl}^-$  1.848,  $\text{SO}_4^{2-}$  8.362,  $\text{NO}_3^-$  7.351,  $\text{NH}_4^+$  3.884, 계양동  $\text{Na}^+$  0.626,  $\text{Cl}^-$  1.442,  $\text{SO}_4^{2-}$  13.842,  $\text{NO}_3^-$  11.341,  $\text{NH}_4^+$  7.231, 신흥동  $\text{Na}^+$  1.103,  $\text{Cl}^-$  1.901,  $\text{SO}_4^{2-}$  8.556,  $\text{NO}_3^-$  6.764,  $\text{NH}_4^+$  3.404 그리고 송해면  $\text{Na}^+$  0.719,  $\text{Cl}^-$  1.491,  $\text{SO}_4^{2-}$  9.534,  $\text{NO}_3^-$  7.484,  $\text{NH}_4^+$  4.214를 보였다.



Table 2. Summary on the heavy metal components in PM-10( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Items	송도동	구월동	계양동	신흥동	송해면	평균
Pb	0.049	0.061	0.058	0.063	0.029	0.052
Cd	0.002	0.004	0.002	0.002	0.003	0.003
Cr	0.003	0.006	0.004	0.005	0.002	0.004
Cu	0.275	0.758	0.107	0.104	0.068	0.262
Fe	0.732	1.243	1.059	1.472	0.385	0.978
Mn	0.037	0.056	0.048	0.060	0.018	0.044
Ni	0.006	0.007	0.005	0.009	0.003	0.006
Al	0.455	0.516	0.462	0.604	0.307	0.469
Zn	0.162	0.277	0.266	0.254	0.087	0.209

해염 주성분은  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  등으로 알려져 있으며(US EPA, 1999a; Hopke, 1985), 반면,  $\text{Cl}^-$ 은 해염의 주성분이지만  $\text{Na}^+$ 만이 높은 농도를 보이면서  $\text{Cl}^-$ 과  $\text{Na}^+$ 이 낮은 상관성을 보일 경우 인위적 오염원에 의한 영향으로 알려져 있다.

일반적으로 해염(fresh sea salt)은  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$ 의 비가 1.8로 알려져 있으며(Gustafsson and Franzen, 2000; Finlayson-Pitts and Pitts, 2000) 반면, aged sea salt는  $\text{Na}^+$ 의 기여가 높고  $\text{Cl}^-$ 의 경우는  $\text{NaCl}$ 이 가스상 황산( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )과 반응에 의해  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 로 변환되어  $\text{Cl}^-$ 이 고갈되기 때문에 낮은 기여를 하게 된다(Lee et al., 2002; Qin et al., 2002; Song et al., 2001; Xie et al., 1999).

$$\text{EF Na(Cl)} = \frac{(\text{Cl/Na})_{\text{aerosol}}}{(\text{Cl/Na})_{\text{seawater}}} \text{-----} \text{ (식 1)}$$

식 (1)의 농축계수(enrichment factor; EF)가 1에 가까우면  $\text{Cl}^-$ 와  $\text{Na}^+$ 는 해염입자에 기원한 것으로 간주하며, 농축계수값이 1보다 크게 되면 인위적 오염원에서 배출된 것으로 간주한다(Yatin et al., 2000). 조사지점별 농축계수는 송도동 1.48, 구월동 2.60, 계양동 2.73, 신흥동 1.02, 송해면 1.93 으로서, 해염입자에 의한 영향은 신흥동과 송도동이 가장 큰 영향을 받았으며, 계양동이 상대적으로 가장 적은 영향을 받는 것으로 나타났다.  $\text{Ca}^{2+}$ 는 도로포장시 사용하는 석회석에서 발생하며 자동차운행에 따른 마모 등에 의해 주로 배출되는 도로분진(road dust)의 marker로 알려져 있으며

(Finlayson-Pitts and Pitts, 2000) 본 조사지점 중에서는 신흥동지역이 대형차량에 의한 주변포장도로에 의해 영향을 많이 받는 것으로 조사되었다.

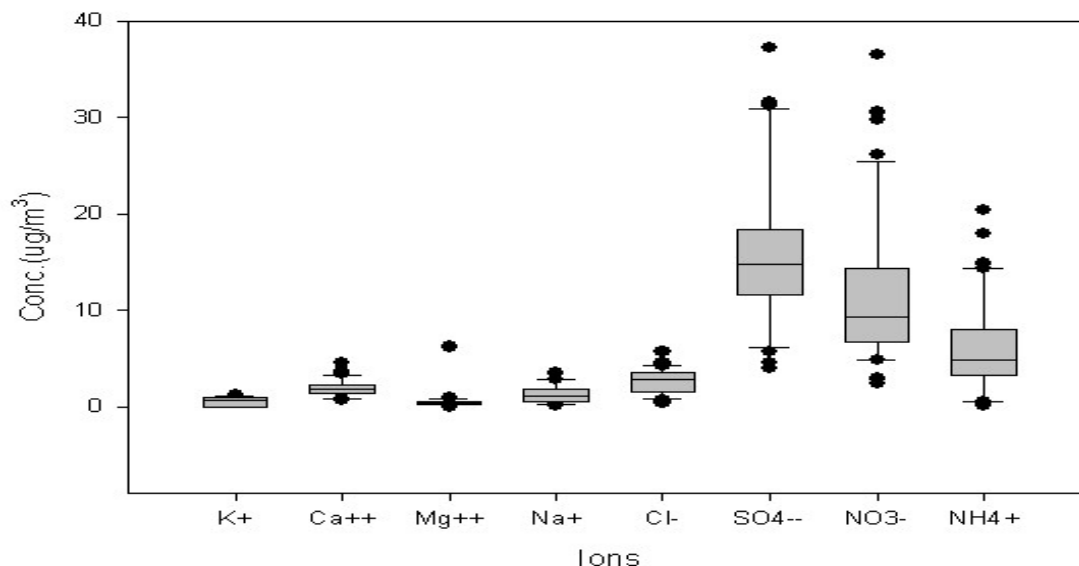


Fig. 6. Box-whisker plot for variation of water soluble ions in PM-10 in Incheon, 2008.

특히, 이온성분 중 2차 오염원(secondary aerosol)로 분류되는  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  등이 가장 높게 조사되었으며 황산염-질산염-암모니아염은 대도시를 비롯하여 오염이 심한지역에서 스모그와 함께 미세입자농도가 높아질 때 가장 중요한 성분들로 보고되었다.

Table 3. Summary on water soluble ion in PM-10( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Items	송도동	구월동	계양동	신흥동	송해면	평균
$\text{K}^+$	0.281	0.422	0.451	0.395	0.307	0.371
$\text{Ca}^{2+}$	1.260	1.237	1.138	1.528	0.499	1.132
$\text{Mg}^{2+}$	0.239	0.223	0.207	0.498	0.138	0.261
$\text{Na}^+$	0.796	0.697	0.626	1.103	0.376	0.719
$\text{Cl}^-$	1.421	1.848	1.442	1.901	0.841	1.491
$\text{SO}_4^{2-}$	9.559	8.362	13.845	8.556	7.349	9.534
$\text{NO}_3^-$	7.922	7.351	11.341	6.764	4.039	7.484
$\text{NH}_4^+$	3.679	3.884	7.231	3.404	2.870	4.214
Enrichment Factor	1.43	2.47	2.57	1.02	1.86	1.87

Kadowaki(1976)과 조기철(1996)에 의하면 미세먼지내  $\text{NO}_3^-$ 는  $\text{NHO}_3$ 와  $\text{NH}_3$ 의 반응에 의해  $\text{NaNO}_3$  형태로 대기중에 존재하는 것으로 알려져 있다. 해안지역에서는  $\text{NO}_2$ 와  $\text{HNO}_3$  등이 기체상 질소산화물과 조대영역에서 존재하는 염기성 해염입자의 반응으로 인해  $\text{NO}_3$ 는 조대입자의 영역에 존재하며 황사 등의 조대영역의 토양입자의 농도가 높을 때에는 기체상 질소산화물과 토양입자와의 반응에 의해  $\text{NO}_3$ 는 조대입자의 영역에 존재한다(Gae et al., 1996).

그러나 도시지역에서 자동차에 의해 주로 발생하는 질소산화물은 대부분 2차 에어로졸의 생성으로 인한 미세입자영역에 존재하는 것으로 알려져 있다(한진석, 1997). 한 등의 연구에 의하면 질산염이온은 겨울철이 여름과 가을철에 비해 높은 특성을 보여주고 있으며, 이는 겨울철 미세입자 농도가 증가하는 현상에 질산염이온이 상당히 기여하고 있다고 하였다.  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 입경분포가 일반적으로 극 미세입자 영역( $0.08 \sim 0.43 \mu\text{m}$ )과 미세입자영역( $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ )에서 높은 피크를 보이며 대기중의 존재형태가 해염 입자중의  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 나  $\text{MgSO}_4$  또는 토양입자중의  $\text{CaSO}_4$  등의 1차 발생원에 의한 영향보다는  $\text{SO}_2$ 의 산화에 의한 산성미스트나 황산염입자의 2차 생성 등에 의한 인위적인 발생원에 의한 영향인 것으로 알려져 있다.  $\text{NH}_4^+$ 의 경우  $\text{SO}_4^{2-}$ 와 마찬가지로 인위적인 오염물질로서 미세입자 영역에 존재하는 것으로 알려져 있으며  $\text{NO}_3^-$ 와 함께  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 염 형성반응으로 중화에 기여하는 물질이다.

### 3) 탄소성분 농도분포

대기 중 입자상 탄소성분(carbonaceous particle or total carbon; TC)은 크게 유기탄소(organic carbon; OC), 원소탄소(elemental carbon; EC), 탄산염탄소(carbonate carbon; CC)로 분류될 수 있으며, 대기 중 에어로졸의 중요한 부분을 차지하고 있다. 유기탄소는 오염원에서 입자형태로 직접 배출되거나 (1차 유기탄소), 광화학반응 등에 의해 입자로 변환된다(2차 유기탄소). 유기탄소는 입자상 탄소성분의 약 50 ~ 60 % 정도를 차지하고 있는 것으로 알려져 있다. 반면에 원소탄소의 경우는 대부분이 화석연료의 연소에 의해 대기중으로 직접 배출되는 1차 오염물질이다. 원소탄소는 일부가 토양, 도로분진, 공업 활동에 의해 대기중으로 배출된다. 탄산염 탄소의 경우는 토양과 같은 지각에서 유래하며 대부분이  $2 \mu\text{m}$  이상인 거대입자 영역에 포함된다. 또한 탄산염 탄소는 전체 입자상 물질농도의 1% 이하를 차지하고 있어 입자상 탄소성분에서 차지하는 양은 거의 무시될 정도이다(Kim et al., 2000; Gray and Cass, 1998; US EPA, 1994; Dasch and Cadle, 1989).

본 연구에서는 2008년 2월부터 9월까지 채취한 여지를 원소분석기(Elemental Analyzer; EA)를 이용하여 PM-10 중 포함된 입자상 탄소성분을 분석하였다. 본 연구에서 사용한 원소분석기는 기기특성상 원소탄소와 유기탄소를 분리하지 못하기 때문에 분석결과는 입자상 탄소성분의 농도만을 측정하였다. 본 연구기간동안 입자상 탄소성분의 전체 평균농도는  $12.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며, 최소값은  $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최대값은  $43.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다.

본 연구지역의 입자상 탄소농도는 미국 LA 근처의 도시지역 Santa Barbara ( $8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 과 헝가리 K-pusztta 지역 ( $8.0 \sim 13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 그리고 서울 ( $19.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 유사한 범위를 나타냈다(Gelencser et al., 2000, Kim et al., 1999; Chow et al., 1996). 미세먼지 중 총탄소가 약 20.3 %를 차지하는 것으로 조사되었으며, Harrison et al.,(1970년)는 영국 공업도시인 버밍엄지역에서 미세먼지는 약 18% 정도를 원소탄소가 차지하는 것으로, Quero et al., (2001)은 스페인의 도시지역에서 입자상 탄소성분이 차지하는 비율이 미세먼지의 약 12 ~ 20 % 정도를 차지하는 것으로 보고된 바 있다. Hwang et al.,(2003)은 서울지역에서 입자상 총탄소농도가 2001년 ( $16.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 1999년 ( $14.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 2000년 ( $13.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )로서 연도별 미세먼지에 대한 입자상 탄소성분과의 비는 1996년도에 24.6%, 2000년에 16.4%, 2001년에 11.8%로 보고한 바 있다.

Table 4. Comparison of total carbon in PM-10 by country

Sampling site	Period	Area	Particle	TC
This Study	Feb ~ Oct, 2008	Urban	PM-10	20.8
Seoul, Korea	13 ~ 22 June, 1994	Urban	PM-10	19.5
Santa Barbara, CA, USA	Oct. ~ Dec. 1989	Urban	PM-10	8.8
K-pusztta, Hungary	May, June, 1997	Urban	PM-10	8.0~13.2
Castello, Spain	12 ~ 23 July, 1999	Urban	PM-10	2.9~6.8
Paris, France	Fall, 1984	Urban	PM-10	5.8
	Winter, 1986~1987	Urban	PM-10	20.5
Fif, France	Spring, 1986~1987	Urban	PM-10	8.4
	Summer, 1984~1987	Urban	PM-10	6.3
Landes, France	Fall, 1984	Rural	PM-10	1.8

대기 환경학에서 입자상 탄소성분과 보건학적으로 중요한 이유는 첫 번째,

인간의 건강에 악영향을 미치기 때문인데, 특히 원소탄소의 경우 독성물질로서 인간과 동물의 호흡기 계통을 자극하며 동물실험 결과 발암물질로 알려져 있다. 두 번째로 입자상 탄소성분은 시정감소에 중요한 역할을 담당하고 있으며 결국에는 기후변화에도 영향을 미치게 된다. 특히, 0.1 ~ 1.0  $\mu\text{m}$  범위의 원소탄소가 주로 시정감소에 기여를 하는 것으로 알려져 있다. 또한 원소탄소는 대기 중 체류시간이 길기 때문에 장거리 이동하여 다른 지역에도 피해를 주게 된다. 세 번째는 대기 중  $\text{SO}_2$ 가  $\text{SO}_4^{2-}$ 로 산화하는데 촉매로서의 역할을 하여  $\text{SO}_4^{2-}$  농도를 증가시키는 역할을 하게 된다(Hansen et al., 2001; Hies et al., 2000; Gray and Cass, 1998; Hansen and McMurry, 1990; Dasch and Cadle, 1989).

#### 4) 주요 구성성분간 상관성 분석 결과

Table 5. Correlation coefficient between components in PM-10

	Pb	Fe	Mn	Zn	$\text{Na}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$
Pb	1.00								
Fe	0.21	1.00							
Mn	0.30	0.92	1.00						
Zn	0.65	0.55	0.66	1.00					
$\text{Na}^+$	0.03	0.03	0.15	0.09	1.00				
$\text{Cl}^-$	0.43	0.17	0.19	0.30	0.57	1.00			
$\text{SO}_4^{2-}$	0.25	-0.24	-0.20	-0.16	0.18	0.38	1.00		
$\text{NO}_3^-$	0.53	-0.06	-0.04	0.18	0.11	0.40	0.60	1.00	
$\text{NH}_4^+$	0.38	-0.23	-0.25	-0.04	-0.22	0.19	0.75	0.72	1.00

표 5는 미세먼지내 성분간 상관성 분석자료로서, Pb와 Zn은 0.65, Pb와  $\text{NO}_3^-$ 는 0.53로서 자동차 관련(motor vehicle) 오염원에 영향을 받아 비교적 높은 상관성을 보인 것으로 추정된다. Fe와 Mn은 0.92, Fe와 Zn은 0.55, Mn와 Zn은 0.66으로서 산업 공정 관련한 오염원 영향에 의해 다소 높은 상관성을 보인 것으로 추정된다. 한편,  $\text{Na}^+$ 와  $\text{Cl}^-$ 는 0.57로서 해안에 인접한 도시특성상 해염에 의한 영향으로 인하여 다소 높게 나타났으며,  $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NO}_3^-$ 는 0.60로서 연소시 발생한  $\text{NO}_x$ 와  $\text{SO}_x$ 가 황산이온 및 질산이온으로 변환되었고,  $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NH}_4^+$ 는 0.75,  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{NH}_4^+$ 는 0.72로서 기름 및 석탄 연소(oil, coal combustion)등의 영향으로 인하여 높은 상관성을 보였다.

Table 6. Comparison of major components in PM-10 by country

구분		$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	Heavy metals	Total Carbon
This Study (PM-10)	인천시	16.1	11.5	10.4	20.8
	송도동	17.2	13.5	10.5	17.8
	구월동	15.0	11.4	12.1	25.4
	계양동	19.0	13.2	9.1	20.3
	신흥동	13.0	10.2	13.3	17.3
	송해면	16.3	9.0	7.0	18.0
서울 전농동('07, 3)		17.2	14.6	14.9	25.8 (OC:19.4, EC:6.4)
인천 용현동 ('07, 3)		16.9	12.5	15.0	22.6 (OC:16.9, EC:6.5)

표 6 및 그림 7은 미세먼지 주요 구성성분인  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Heavy metals 및 Total Carbon 등 기준으로 미세먼지 기여도를 평가한 결과, Total Carbon >  $\text{SO}_4^{2-}$  >  $\text{NO}_3^-$  > Heavy metals 순서로 나타났다. 지점별로는 모든 지점에서 Total Carbon가 가장 높았으나,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  및 Heavy metals 농도는 지점별로 약간의 순위 변동을 보였다. 서울 전농동과 인천 용현동지점을 대상으로 실시한 조사결과('07년 3월)에서는 두 지점에서 모두 Total Carbon >  $\text{SO}_4^{2-}$  > Heavy metals >  $\text{NO}_3^-$  순서를 보였다.

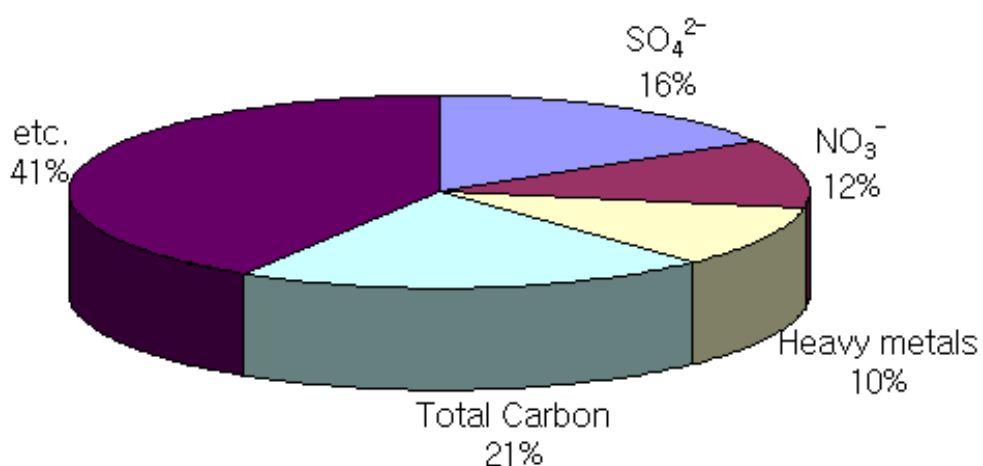


Fig. 7. Average component contributions to PM-10 mass concentration in Incheon, 2008.

#### 4. 탐색적 통계기법을 이용한 미세먼지 오염원 패턴 분류

##### 1) 주성분 분석 (PCA; principal component analysis)

여러 개( $p \geq 2$ )의 양적변수(quantitative variable)들 사이의 공분산행렬과 상관행렬을 이용하여 이 변수들의 선형결합으로 표시되는 주성분(principal component)을 찾고 이 중에서 중요한  $m(\leq p)$ 개의 주성분으로 전체변동의 대부분을 설명하는 다변량 분석법이다. 주성분분석은 다변량분석법 중 가장 기본적인 분석방법으로서, 서로 상관이 있는 여러 종류의 관측특성을 가진 정보를 상관이 없는 몇 개의 종합 특성값으로 요약하여 자료의 특성을 설명하는 기법이다. 대기 에어로졸의 발생원 해석에서 관측항목은 입자중의 중금속 성분농도에 해당하며, 해석결과로 추출된 주성분(principal component)은 가상적이지만 발생원 종류(source type)를 나타낸다고 할 수 있다. 이 주성분 분석의 결과에서 주성분의 인자 부하량은 어떤 발생원과 원소간의 상관관계를 의미하며 그 특성원소의 배출원과 연관 지을 수 있다. 본 연구에서는 관측한 중금속 성분의 단위가 모두 같기 때문에 공분산행렬을 이용하여 주성분분석을 실시하였다. 표 7는 미세먼지내 성분분석 결과를 토대로 주성분분석을 실시한 결과를 보여주고 있다. 제 1 주성분의 고유치(eigen value)가 11.9334로서 전체정보의 51.1%, 제 2 주성분은 8.4768로서 전체 정보의 36.33, 제 3 주성분은 2.5528로서 10.94%, 제 4 주성분은 0.3714로서 1.59%의 정보를 설명하고 있다. 일반적으로 주성분의 채택할 때 기준에 따라 고유치가 1이상인 성분을 선택하나, 본 연구에서는 전체정보를 모두 설명하고자 주성분 4개를 채택하였다.

Table 7. Eigenvalues of covariance matrix by principal component analysis

Item	Eigen value	Difference	Proportion	Cumulative
1	11.9334	3.4565	0.5114	0.5114
2	8.4768	5.9240	0.3633	0.8747
3	2.5528	2.1814	0.1094	0.9841
4	0.3714	0.3714	0.0159	1.0000

표 8는 주성분의 형성시 계수가 되는 고유벡터를 나타낸 것으로 고유벡터(eigenvectors)는 주성분 방향과 크기로서 이를 통하여 각 주성분의 의미를

파악할 수 있다. 주성분점수에 의한 주요 오염원 분류를 보여주는 표 5에서 알 수 있듯이, 제 1 주성분은 TC,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  가 양의 상관관계로서 전체의 약 51.14%를 차지하였으며 포장도로 먼지오염원(paved road dust)로 추정된다. 일반적으로 포장도로의 자동차에 의한 특성은 PM-10, PM-2.5 및  $\text{NO}_2$  성분간 매우 높은 상관성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 탄소성분의 경우 자동차 오염원의 marker로 알려져 있으며, Zn 의 경우 타이어의 마모시에 다량 배출하는 것으로 알려져 있다(황인조와 김동술, 2003a; Hopke, 1985). 제 2 주성분은  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  등이 강한 양의 상관관계로서 전체의 약 36.33%를 차지하였으며 미세먼지 2차 오염원(secondary pollution)으로 추정된다. 특히, 황산염-질산염-암모니아염은 대도시를 비롯하여 오염이 심한지역에서는 스모그와 함께 미세입자농도가 높아지는 것으로 알려져 있다.

Table 8. Eigenvector of factors by principal component analysis

Item	prin1	prin2	prin3	prin4
Pb	0.0008	-0.0015	0.0036	0.0042
Cd	0.0006	-0.0008	-0.0024	-0.0033
Cr	0.0004	0.0000	0.0025	0.0020
Cu	0.1348	-0.0737	0.0706	-0.3262
Fe	0.0217	-0.1212	0.2571	0.6046
Mn	0.0014	-0.0039	0.0108	0.0140
Ni	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Al	-0.0072	-0.0330	0.0628	0.0275
Zn	0.0178	-0.0070	0.0307	0.0970
$\text{K}^+$	0.0098	-0.0042	-0.0602	-0.0262
$\text{Ca}^{2+}$	-0.0166	-0.0418	0.3346	0.0139
$\text{Mg}^{2+}$	-0.0526	-0.0674	0.1029	0.2408
$\text{Na}^+$	-0.0363	-0.0369	0.2098	-0.0666
$\text{Cl}^-$	0.0188	-0.0936	0.1892	0.1678
$\text{SO}_4^{2-}$	0.1479	0.7419	-0.2693	-0.1338
$\text{NO}_3^-$	0.1898	0.4576	0.7659	-0.1183
$\text{NH}_4^+$	0.1451	0.3703	-0.2297	0.6311
TC	0.9471	-0.2551	-0.0757	-0.0108
source type	paved road dust	secondary aerosol	constructional & industrial	soil-related



제 3 주성분은  $\text{NO}_3^-$  및 대부분의 중금속 성분이 약한 양의 상관관계로서 전체의 약 10.94%를 차지하였으며, 이는 산업 및 공업관련 지역 오염원 (constructional and industrial)으로 추정된다. 제 4 주성분은 전체성분간 약한 상관관계인 반면, Fe과  $\text{NH}_4^+$ , Al 등이 양의 상관관계로서 전체의 약 1.59%를 차지하였으며 토양 및 해염(soil and sea water) 등 자연 발생원으로 추정된다.

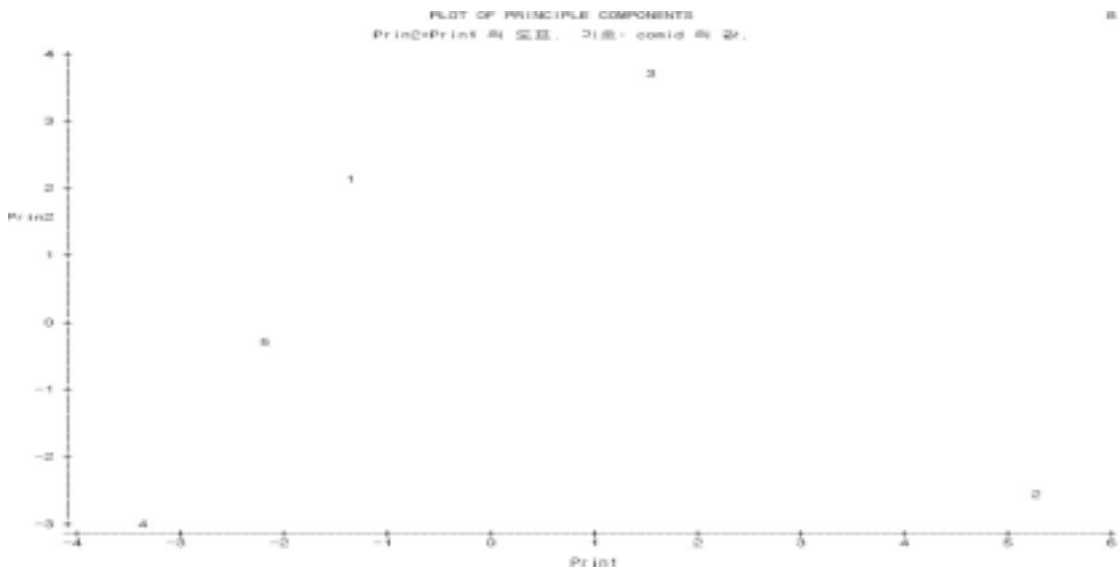


Fig. 8. Plot of prin2\*prin1 by principal component analysis.  
[OB1(송도동), OB2(구월동), OB3(계양동), OB4(신흥동), OB5(송해면)].

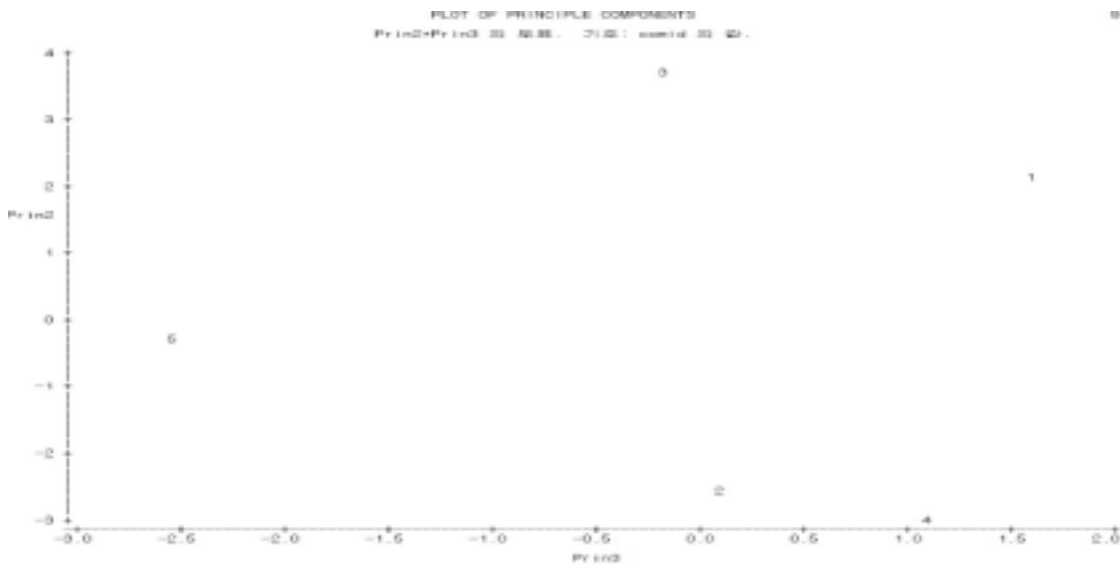


Fig. 9. Plot of prin2\*prin3 by principal component analysis.

## 2) 군집분석 (Cluster Analysis)

군집분석은 관측대상이 지니고 있는 다양한 유사성을 바탕으로 동일한 군집으로 결합하거나 여러 대상들을 몇 개의 동질적인 군집으로 구분하는 통계 기법이다. 군집분석은 사전적 정보를 가지고 분석하지 않고 표본을 몇 개의 소규모 집단으로 분류하는데 이용되고 있다. 이 분석법의 기본 원리는 두 대상의 유사성을 측정함으로써 구해진다. 유사성은 각 개체들이 지닌 특성에 대한 관측치를 거리로 측정한 것이다. 미세먼지 주요성분 분석 자료를 이용하여 군집분석(계층적 분석의 ward법)결과 그룹분류를 보여주는 덴드로그램(dendrogram)은 그림 10과 같다.

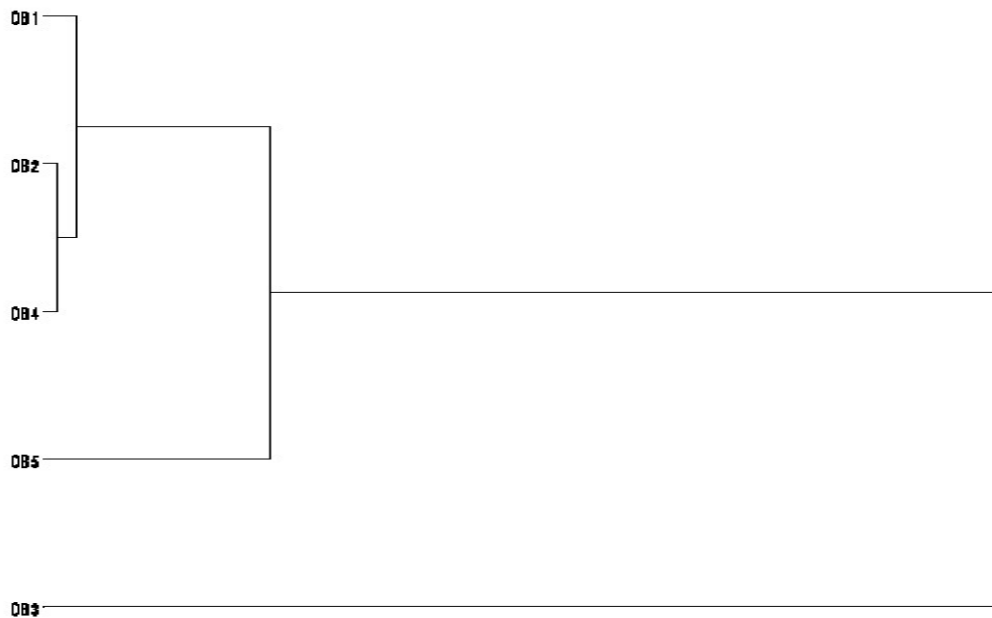


Fig. 10. Dendrogram by cluster analysis (Ward's method).

OB1(송도동), OB2(구월동), OB3(계양동), OB4(신흥동), OB5(송해면)

표 9는 계층적 군집분석의 최대분산(Ward's minimum variance)값을, 표 10은 군집 연관성(cluster history) 구체적으로 나타내 주고 있다. 그림 10 및 표 9 ~ 10을 종합분석 한 결과, 3개 그룹으로 분류되었으며 제 1 그룹은 구월동/신흥동/송도동과 제 2 그룹은 송해면, 제 3그룹은 계양동으로 구분되었다. 제 1 그룹(구월동, 신흥동, 및 송도동)은 인위적 오염원과 토양기원 오염원성분이 상호 공존하는 특성을 지닌 지역이었고, 제 2 그룹(송해면)은 인위적 오염원이 매우 낮고, 또한 PM-2.5에 비해 PM-10이 일반지역(>0.50)에 비해 0.39로서 매우 낮은 자연적 비산먼지 오염에 의한 배경농도 특성을 지닌 지역이었고, 반면 제 3 그룹은 매립지 및 인근도로 대형 차량

등에 높은 PM-10와 PM-2.5 농도이면서,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  및  $\text{NH}_4^+$  등 인위적 2차 오염원 함께 상승하는 복합적 오염특성을 지닌 지역으로 판단된다.

Table 9. Ward's minimum variance cluster analysis

Item	Eigen value	Difference	Proportion	Cumulative
1	12.1863	1.3207	0.4362	0.4362
2	10.8656	6.2655	0.3889	0.8251
3	4.6000	4.3140	0.1647	0.9898
4	0.0000	0.2860	0.0102	1.0000

Table 10. Cluster history by cluster analysis

NCL	Cluster Joined		FREQ	SPRSQ	RSQ	PSF	PST2
4	OB2	OB4	2	0.0105	0.990	31.4	.
3	OB1	CL4	3	0.0259	0.964	26.5	2.5
2	CL3	OB5	4	0.1839	0.780	10.6	10.1
1	CL2	OB3	5	0.7797	0.000	.	10.6

## IV. 결론 및 정책건의

### 1. 결론

○ 인천지역미세먼지(PM-10) 구성성분은 총탄소 20.8%, 황산염 16.1%, 질산염 11.5%, 금속산화물 10.4%, 기타 41.2% 차지함.

○ 해염에 의한 미세먼지 오염영향 지표인 농축계수(Enrichment Factor)는 송도동 1.48, 구월동 2.60, 계양동 2.73, 신흥동 1.02, 송해면 1.93으로서, 신흥동과 송도동은 해염입자에 의한 영향이 큰 반면, 계양동은 상대적으로 적게 영향을 받았음.

○ 주성분분석(principal component analysis) 결과에 의하면, 제 1 주성분은 Total Carbon,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  가 양의 관계로서 전체성분의 약 51.14%를 설명하고 있는 부분으로서, 포장도로 자동차 먼지오염원(paved road dust)로 추정된다. 포장도로의 자동차에 의한 특성은 PM-10, PM-2.5

및  $\text{NO}_2$  상호간 매우 높은 상관성을 보였으며, 제 2 주성분은  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  등이 강한 양의 상관관계를 보였으며 전체의 약 36.33%를 설명하고 있는 부분으로서 미세먼지 2차오염원(secondary pollution)으로 추정되며, 제 3 주성분은  $\text{NO}_3^-$  및 대부분의 중금속 성분이 약한 양의 관계를 보인 가운데 전체 성분의 약 10.94%를 설명하고 있으며, 이는 산업 및 공업관련 지역 오염원(constructional and industrial)으로 추정되며, 제 4 주성분은 전체적으로 성분간 약한 상관성을 보인 가운데, Fe과  $\text{NH}_4^+$  등이 양의 관계로서 전체의 약 1.59%를 설명하고 토양 및 해염입자(soil-related and sea salt)로 추정됨.

○ 관측대상의 유사성을 바탕으로 동질적 군집을 구분하는 통계적 군집분석(cluster analysis)의 덴드로그램(dendrogram)에 따르면, 구월동/신흥동/송도동, 송해면, 그리고 계양동의 3개 그룹으로 분류되었음.

## 2. 정책건의

### 1. 미세먼지특성에 따른 오염원 차별적 관리

- 내륙권역은 주로 자동차 등 이동 오염원에 의한 초미세입자들에 의해 먼지오염도가 상승한 것으로 나타나, 우선적으로 자동차 배출가스 관련하여 대기질 종합대책과 연계하여 중장기적인 관점에서 접근할 문제라고 판단됨.

- 연안권역은 바다 해염영향 및 항만인근 도로부문의 재비산 먼지 등에 의해 입경이 큰 비산먼지가 비교적 많은 부분을 차지하고 있어, 도로 재비산먼지 관리를 위한 도로청결 시스템 체계적 운영이 필요한 것으로 사료되며,

- 특히, 도로변 재비산먼지 제거를 위한 살수차량 운영시 도로변에 주차되어 있는 차량이 도로먼지 제거차량 운영에 방해가 되어 청소효율을 크게 저하시키므로 도로변 주정차 단속 및 요일제 주정차시스템 도입 등 다각적인 대안이 필요함.

### 2. 도시대기측정망 과학적 평가 및 활용

- 기존에 설치된 도시대기측정망과 이동측정시스템을 종합적으로 활용하여 장거리 오염원 이동영향 및 해염에 의한 자연 오염영향 등을 다변량 통계기법 및 모델링 등 새로운 연구방법을 도입하여 과학적평가 및 연구가 필요함.

- 인천항 주변지역 등 환경오염 우심지역의 적극적 관리를 위하여 인근 도시대기 측정망자료를 활용하여 기상인자와 연계하여 주변지역 장기 오염추세파악과 병행하여 현장조사를 실시하여 국부적 오염원을 집중 관리할 필요가 있음.

### 3. 초미세먼지(PM-2.5) 환경기준설정 대책 마련

초미세먼지는 인체에 미치는 건강 영향이 크며 선진국에서는 최근 들어 중점관리 대상으로 규제하고 있으며, 국내에서는 2008년부터 국립환경과학원이 전국 광역시와 공동으로 PM-2.5 관련한 연구사업을 추진중에 있으며, 조만간 국가 환경기준항목에 도입할 예정이므로 인천시 초미세먼지 발생특성 평가 및 중장기 관리 대책마련이 절실히 필요한 실정임.

## V. 참고문헌

- 김병화, 김동술 (2000) 수원지역 대기중 PM2.5와 PM10의 환경거동에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16(2), 89-101.
- 황인조, 김동술 (1998) Submicron 부유분진의 화학적 조성 및 분포에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 14(1), 11-23.
- 황인조 (2003) PMF 모델을 이용한 대기중 PM-10 오염원의 정량적 기여도 추정, 경희대학교 대학원 환경학과 박사논문.
- 전병일 (2007) 2005년 봄철 부산 서부지역 PM10, PM2.5의 금속성분 특성, 환경영향평가학회, 16(5), 327-340.
- 환경부 (2003) 대도시 대기질 관리방안 조사 연구 (2002).
- 남보현 등 (2002) 분산주성분 분석을 이용한 실내환경 중 PM-10 오염의 패턴분류.
- 한진석 등 (1993) 대기중 Aerosol의 수용성성분과 존재형태의 해석(다변량 해석을 중심으로).
- 한진석 등 (2005) PMF를 이용한 제주도 고산지역 대기중 탄소성 미세입자의 발생원 추정, 한국환경대기학회.
- 신찬성 (2003) 제주 배경농도지역 대기 에어로졸 조성의 장기변동 및 특성에 관한 연구, 제주 대학교 화학과 박사학위논문.
- 이화여자대학교 (2008), 수도권지역 미세먼지 오염현상 해석 및 이차먼지 생성을 예측