

# 집진장치의 특성 및 성능평가 기술



이 해 문

(KIMM, 시험평가부)

'90 - '94 경희대학교 자연과학대학 환경학과 (학사)  
'94 - '96 경희대학교 대학원 대기오염 전공 (석사)  
'96 - 현재 한국기계연구원 연구원



김 우 현

(KIMM, 시험평가부)

'78. 2 동아대학교 공과대학 환경공학과 (공학사)  
'92. 8 부경대학교 공과대학 환경공학과 (공학석사)  
'81 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이 정 규

(KIMM, 시험평가부)

'83. 2 동명전문대 전기과  
'88 - 현재 한국기계연구원

## 1. 서론

대기중의 입자상 오염물질은 기체상 매질속에 고체 및 액체입자가 부유되어 있는 상태의 에어로솔(aerosol)로 정의되어지며, 입자상 오염물질은 인체의 악영향 및 가시도 감소 등으로 인해 대기오염에서 중요한 오염물질로 간주되고 있다. 또한 입자상 오염물질은 그 모양과 크기가 다양하여 0.0001 $\mu\text{m}$  ~ 10,000 $\mu\text{m}$ 의 분포를 보이며, 액적이나 건조분진 모두가 입자상 오염물질에 속한다<sup>[1, 2]</sup>. 이러한 입자상 오염물질은 발생하는 오염원 또한 다양하여, 연소 및 파쇄 등의 인위적인 과정에서 주로 발생하며, 이미 배출된 오염물질의 재비산 또한 커다란 역할을 한다. 또한 자연적으로 배출되는 원인으로 화산폭발, 산불, 꽃가루, 그리고 해염 등을 들 수 있다<sup>[3]</sup>. 자연적인 오염원에서 배출되는 입자상 오염물질은 입자의 공기역학적 직경이 10 $\mu\text{m}$  이상의 비교적 큰 입자가 생성되나, 인위적인 오염원에서 배출되는 입자상 오염물질은 대부분이 10 $\mu\text{m}$  이하의 미세입자가 주 분포를 이루며, 또한 연소 과정과 같은 기작은 공기역학적 직경이 1 $\mu\text{m}$  미만인 초미세입자들을 생성시킨다<sup>[4]</sup>. 이러한 미세입자들은 입경이 작은 반면 상대적으로 입자의 표면적이 크기때문에 여러가지 가스상 오염물질들의 흡착이 용이하여 인체에 유해할 뿐 아니라 빛의 산란 및 흡수로 인한 가시도 감소에도 커다란 영향을 미치게 된다<sup>[5, 6, 7]</sup>. 그러므로 이러한 유해물질 배출과정에서 입자상 오염물질들을 제어하기 위해 원심력집진기, 전기집진기, 여과집진기 그리고 세정탑 등의 집진설비를 설

치하고 있으며, 또한 정부에서도 대기중 총부유분진(TSP) 및 PM-10을 공동으로 규제하고, 배출허용기준치를 초과할 때에는 부과금을 납부토록 하는 규제제도를 취하고 있다. 또한 일부 특정도시에 대해서는 일정용량 이상의 연료를 사용하는 사업장에 한하여 TMS(Telemetering System)설치를 의무규정으로 하고 있으며, 각 지방 환경관리청에서 5분마다 자료를 받는 5분 데이터시스템을 적용하고 있다. 그리고 추후 이 제도를 전국적으로 확대하여 나갈 계획이다. 이러한 여러가지 문제를 볼 때 산업체에서는 연소설비의 성능 뿐만이 아닌 집진장치의 성능확인 및 문제점 해결에도 많은 관심을 가질 것으로 기대되어 본 고에서는 집진장치의 효율산정 및 문제점 확인 그리고 해결책 마련에 관해 논하고저 한다.

## 2. 입자의 특성

집진장치에서 입자상 오염물질 포집의 기본원리는 중력, 원심력, 관성충돌, 전기력, 흡착 등이며 이러한 기본원리를 이용한 중력침강조(gravity settler), 원심력집진기(cyclone), 전기집진기(electrostatic precipitator), 세정집진기(scrubber), 그리고 여과집진기(fabric filter) 등의 집진장치가 널리 쓰이고 있다<sup>[3, 4]</sup>. 또한 최근에는 여과집진기의 여과포에 코로나를 걸어 전기집진기와 여과집진기의 복합적인 성질을 지니고 있는 집진장치 개발 등 제진의 기본원리를 복합적으로 이용하여 입자상 오염물질 뿐 아니라 가스상 오염물질의 효과적인 제어를 위한 연구개발이 수행되고 있다. 이러한 집진장치의 설계 및 효율을 산정하기 위해서는 입자의 물리, 화학적 특성을 파악하는 것이 대단히 중요하다. 이러한 입자의 특성으로는 입자의 물리적 직경과 공기역학적 직경을 들 수 있으며 이러한 직경을 구하기 위해 입자의 밀도, 입자를 구성하고 있는 화학성분 등의 파악 또한 중요하다.

### 2.1 물리적 직경

입자의 물리적 직경으로는 입자를 정확하게 두 부분으로 나누는 선을 직경으로 보는 Martin's diameter와 입자의 가장 먼 곳을 선으로 이었을 때, 그 선을 직경으로 보는 Feret's diameter 그리고 입자의 중심점으로부터 여러방향으로 선을 그어 평균을 구하여 입경을 구하는 방법이 있다<sup>[4, 8]</sup> 그림 1은 입자의 물리적 직경을 보여주는 그림이다.

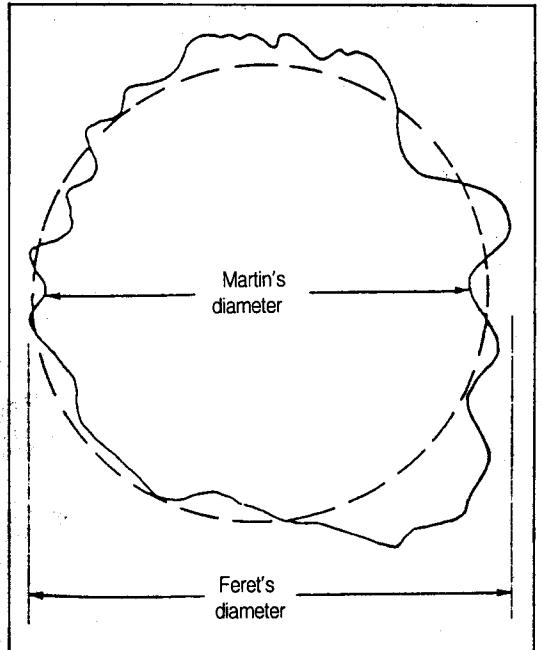


그림 1. 입자의 물리적 직경 측정법

### 2.2 공기역학적 직경

가시적으로 확인을 할 수 있는 직경이 물리적 직경이라면 입자의 밀도와 모양을 고려한 입경은 공기역학적 직경이라 한다. 이 공기역학적 직경은 실제 입자상 오염물질의 포집을 위한 후처리 장비의 설계에 있어 고려해야 할 입자의 특성중 가장 중요한 것으로 일반 물리적 직경에 밀도의 제곱근과 형태인자(shape factor)를 곱해

주므로써 구할 수 있다<sup>[9, 10]</sup>. 공기역학적 직경을 구하는 식은 다음과 같다.

$$D_a = \chi D_p(\rho)^{1/2} \quad (1)$$

여기서

- $D_a$  : 공기역학적 직경
- $\chi$  : 형태인자
- $D_p$  : 물리적 직경
- $\rho$  : 입자의 밀도

### 3. 입자의 특성확인 방법

오염원에서 배출되는 입자의 특성을 파악하기 위해 배출입자를 한꺼번에 분석하는 방법(bulk analysis)도 있으나, 이 방법은 각각의 입자마다 지니고 있는 특성을 고려할 수 없으며, 집진을 위해 기본적으로 고려해야 하는 공기역학적 직경을 구할 수 없기 때문에, 전자주사현미경(SEM)과 EDX(Energy Dispersive X-ray analysis)를 이용한 입자 개개의 분석이 필수적으로 행해져야 한다. 그림 2는 SEM과 EDX로 입자 개개의 물리, 화학적 특성을 파악하기 위한 집진장치에서 배출된 시료의 전처리 과정을 나타낸 것이다.

#### 3.1 SEM과 EDX를 이용한 입자분석법

그림 2에서와 같이 전처리된 시료를 이용하여 입자의 특성을 파악하기 위해서 입자의 크기에 따라 알맞은 배율을 선택하여 그림 3과 같이 secondary electron image와 back scattered electron image를 나타낸 후 back scattered electron image상에서 입자의 중심으로부터 각 방향의 평균거리를 구해 물리적 직경을 구한다. 그리고 각 입자에 대한 EDX분석을 통해 얻은 각 화학성분의 무게를 이용하여 다음과 같은 식으로 밀도를 산정한다.

$$\rho_P = \frac{100}{\frac{W_A\%}{\rho_A} + \frac{W_B\%}{\rho_B} + \frac{W_C\%}{\rho_C}} \quad (2)$$

여기서

- $\rho_P$  : 입자의 밀도
- $W_{A,B,C} \%$  : A, B, C라는 화학성분의 무게 %
- $\rho_{A,B,C}$  : A, B, C라는 화학성분의 밀도

이렇게 얻은 입자의 물리적 직경( $D_p$ )과 입자의 밀도( $\rho_p$ )로 식(1)을 이용하여 입자의 공기역학적 직경( $D_a$ )를 구한다. 또한 입자의 질량을 구하기 위해 입자의 투영면적으로 구한 입자의 부피에 입자의 밀도( $\rho_p$ )를 곱해준다. 그러나 EDX로 입자의 화학성분을 분석할 때, 입자 전체에 대한 분석이 불가능하므로 생길 수 있는 오차가 문제시 되기는 하나, 기존에 bulk analysis와 EDX분석자료의 비교에 관한 연구를 보면 입자

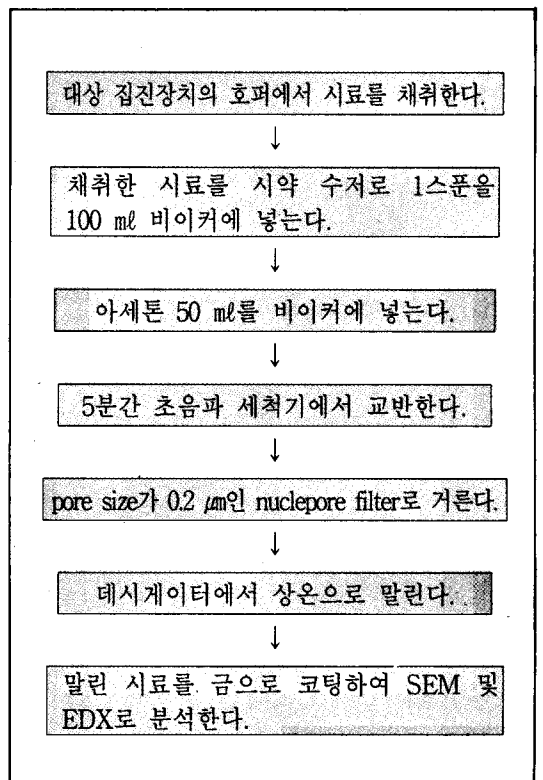


그림 2. 집진장치에서 채취한 시료의 전처리 과정<sup>[8]</sup>

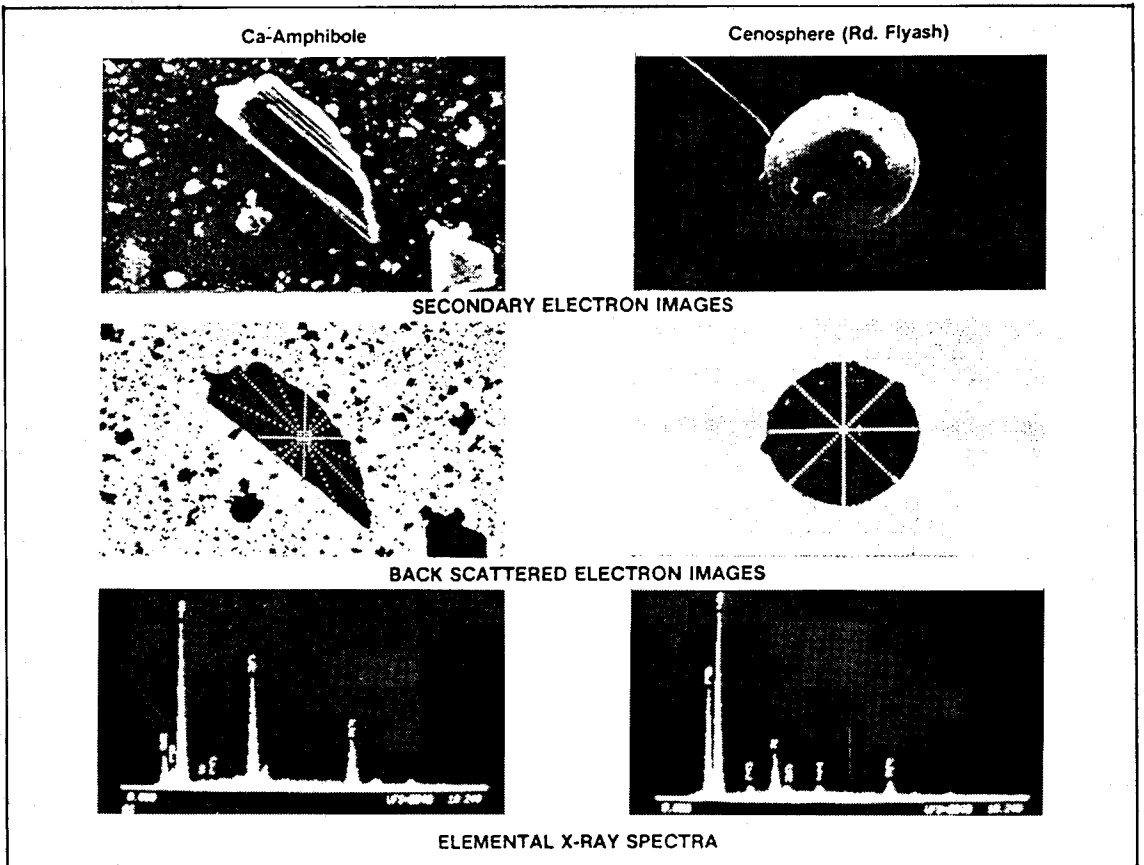


그림 3. SEM 및 EDX를 이용한 입자의 형상과 화학성분 peak.

의 포집 매질인 filter와 입자의 화학성분에 따라 차이가 있는 것으로 보고된 바 있으므로<sup>[10]</sup>, 이러한 문제점은 적절한 filter의 재질 선택으로 어느 정도 해결할 수 있다. 또한 입자상 물질을 SEM으로 분석하는데 있어 또 하나의 문제점은 그러한 입자상 물질이 자신들을 배출한 개체(즉 여기서는 집진장치를 말한다.)를 어느정도 대표할 수 있는나 하는 것으로, 이러한 대표성 확인을 위해서는 통계적인 방법이 필요하다<sup>[11]</sup> 그러므로 일단 많은 수의 입자를 분석하는 것이 필요하며 이를 위해 SEM 분석을 위해 입자포집 매질로 사용한 nuclepore filter를 일정 등분으로 나누어 각 등분마다 일정한 갯수의 입자를 분석한 후 각 등분의 분석자료와 서로 비교하여 재현성 검증을 해야 한다. 재현성 확인을 위해

EDX로 분석한 각 입자별 화학성분의 무게를 이용하여 입자군 분석이라는 응용통계적인 방법을 통해 입자군을 분리한 후 각 입자군별로 재현성 검증을 행하는 것이 필요하다<sup>[11]</sup>. 표 1은 기존에 연구된 입자군 분석을 통한 재현성 실험 결과이다. 표 1에서 보듯이 Pb-Br 입자군을 제외하고는 평균 오차가 10%미만인 것으로 나타나, 어느정도 재현성이 있다는 것을 확인할 수 있으며, 또한 표 2에서 보듯이 무게별 오차를 조사한 결과 무게가 감소할 수록 오차가 커지며, 무게가 증가할 수록 오차가 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 낮은 무게값을 지니는 입자군은 오차가 크기는 하지만 전체적으로 그 입자군이 차지하는 무게는 작으므로 어느 정도는 무시할 수 있다.

표 1. SEM을 이용하여 분석한 입자군의 재현성 실험

(단위:Wt %)

입자군	원실험	재현성 실험
Si-rich	6.7	7.1
Ca-rich	19	20.6
Fe-rich	2.6	2.1
Ca-Si	23.2	21.4
Pb-rich	6.1	6.3
Pb-Br	1.3	2.3
Pb-bearing	3	3.4

표 2. SEM으로 분석한 입자의 무게별 오차

(단위: %)

원소의 농도 (무게)	평균상대오차	95% 신뢰구간
< 1	35	0.65 ~ 1.35
2.5	32	1.94 ~ 3.06
5	16	4.36 ~ 5.64
10	8	8.8 ~ 11.2
>15	5	14.3 ~ 15.7

SEM을 이용한 입자의 분석에 있어 장·단점은 다음과 같다<sup>9)</sup>.

장점

- 0.2 ~ 300 $\mu$ m의 범위에 있는 모든 입자를 분석할 수 있다.
- 각 입자 개개의 화학적 정보를 얻을 수 있다.
- 입자를 구성하고 있는 구성원소와 입자의 형태를 이용해 입자군을 분리할 수 있다.
- 평균분석시간이 약 2초이다. (여러 분석을 통한 자료를 데이터 베이스화 했을 경우, 이렇게 데이터 베이스화 된 SEM을CCSEM (Computer Controled SEM)이라한다)
- 물리적 직경 및 공기역학적 직경을 구할 수 있다.
- 분석을 통해 얻은 자료는 영구히 보존될 수 있다.

- 재현성이 뛰어나며, 다른 분석장비로 분석한 자료와 비교할 때 커다란 차이가 없다.

단점

- 시료의 전처리과정 중 시료의 손실이나 이물질이 포함될 수 있다.
- 입자의 구성 성분 중 필터의 재질과 비슷한 성분이 존재 시에 분석이 난해하다.
- 입자의 부피는 입자의 투영면적을 이용하여 구하므로 오차가 있을 수 있다.
- 입자의 질량 또한 입자의 밀도를 통해 계산되므로 오차가 있을 수 있다.
- 입자내에 함유되어 있는 불균일한 화학성분을 알아낼 수 없다.
- X-ray를 방출하지 않거나 감지할 수 없는 물질은 모두 탄소로 가정한다.

4. 집진장치의 효율 및 문제점 파악

위에서의 방법으로 구한 여러 가지 입자의 특성을 이용하여 그림 4와 같은 그래프를 그린다. 즉 입자의 공기역학적 직경을 일정 범위로 구분하여 각 범위에 속하는 입자들의 무게를 구해, X축은 log를 취한 공기역학적 직경 향으로, Y축은  $\Delta(\text{무게 } \%) / \Delta \log(D_a)$ 향으로 나타내어 그래프를 그려준다. 그림 4의 (a)와 (b)를 보면 쌍극분포(bimodal distribution)와 단극분포(unimodal distribution)를 나타내는 것을 볼 수 있는데 30  $\mu$ m의 위치에서 Y축 향의 값이 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이를 볼 때 (a)와 (b) 각각에 대한 집진장치의 특성 및 문제점은 다음과 같음을 알 수 있다. (a)경우의 집진기는 20 $\mu$ m 주위의 입자를 약 80% 정도의 효율로 집진하는 능력을 지녔으며, 그 외의 입경에 대한 집진효율은 저조한 것으로 볼 수 있다. 또한 (b)의 경우는 20  $\mu$ m 주위의 입자를 약 90%의 효율로 집진하는 능력을 지녔으며 그 외의 입경에 대한 집진효율은 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을

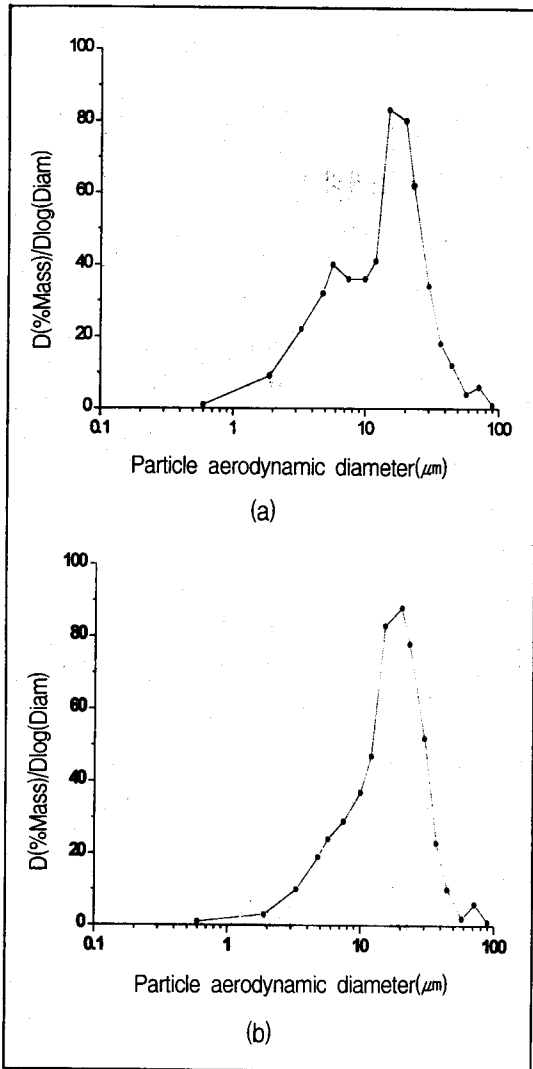


그림 4. 집진장치에서 채취한 입자의 공기역학적 직경 분포도.

보인 원인은 다음과 같이 몇가지 이유로 볼 수 있다.

- 1) 배출원에서 배출되는 입자의 공기역학적 직경이 주로 그래프상에 peak를 보이는 입경범위에 존재한다.
- 2) peak를 보이는 입경범위 이상의 입자에 대해서는 배출원에서 배출되는 입자의 양이 작거나 집진장치의 포집효율이 저조하다.

3) peak를 보이는 입경범위 이하의 입자에 대해서는 작은 입경 때문에 그만큼 질량%가 작을 것이라는 이유 또는 집진장치의 포집효율이 저조하다는 원인으로 볼 수 있다.

이러한 원인을 밝히기 위해서는 배출원에서 발생하는 입자상 오염물질을 직접 채취하여 입자의 특성을 파악하고, 집진장치에 대한 입자의 특성 분석결과와 비교하면 집진장치의 특성 및 문제점에 대해서 파악할 수 있다. 그리고 (a) 집진장치와 (b) 집진장치를 비교하면 집진효율 40%를 기준으로 놓고 볼 때 (a)의 경우는 약 6~30 $\mu$ m의 입경범위에 존재하는 입자에 대해 40% 이상의 효율을 지니고 있으나, (b)의 경우는 8~30 $\mu$ m의 입경범위를 가지는 입자에 대해서 40% 이상의 효율을 지니는 것을 볼 수 있다. 즉 원하는 효율의 집진장치 선택에 있어 여러가지 집진장치를 놓고 그 효율에서 포집되는 입경의 범위를 구해보면 적합한 집진장치의 선택이 가능할 뿐만 아니라, 특정 집진 장치의 문제점 파악이 가능하고, 이러한 문제점 파악후 적절한 해결책을 마련할 수 있는 계기가 될 것이며, 발생원에서 발생하는 입자상 물질의 특성을 알면 적절한 집진장치의 선택 및 문제점을 미리 예견할 수 있다.

### 5. 결론

본 고에서 살펴본 바와같이 입자의 발생원에서 배출되는 입자의 특성을 파악하여 기존에 이미 설치되었던 산업체 집진장치의 성능검사나 효율 산정 그리고 문제점 파악 및 해결방안을 제시하였다. 계속해서 강화되고 있는 환경기준치를 준수하기 위해서 새로운 고효율 집진기술의 개발 또한 필요하지만 기존에 설치되어 있는 집진장치의 성능을 진단하여 문제점을 파악하고 해결방안을 제시하는 것 또한 경제적인 측면 이외에 여러면에서 산업체에 종사하는 분들에게는 도움이 되리라 생각되며, 집진장치의 설계시에

입자상 물질의 발생원에서 발생하는 입자들의 특성을 미리 파악하여 설계과정부터 고려를 한다면 경제적이고 효율이 우수한 집진설비의 설치가 가능하리라 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] Cooper, C. D. and Alley, F. C., Air pollution control, 2nd ed., (1994).
- [2] Whitby, K. T., Husar, R. B. and Liu, B. Y. H., The aerosol size distribution of Los Angeles smog, J. Col. & Inter. Sci., 39, p. 203, (1972).
- [3] 대기환경연구회, 대기오염개론, 2nd ed., (1995).
- [4] Reist, P. C., Aerosol Science & Technology, 2nd ed., (1993).
- [5] Simpson, R. W. A statistical analysis of particulate data sets in Brisban, Australia Atmospheric Environment, 26B(1), p. 99, (1992).
- [6] John, W., Wall, S. M., Ondo, J. L. and Winklmay, W., Modes in the size distribution of atmospheric inorganic aerosol, Atmospheric Environment, 24A (9), p. 2349, (1990).
- [7] Hindy, W. C. Aerosol Technology : Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, John Wiley & Sons, New York, (1982).
- [8] Hopke, P. K., Receptor Modeling in Environmental Chemistry, John Wiley & Sons, New York, (1985).
- [9] Casuccio, G. S., Janocko, P. B., Lee, R. J., Kelly, J. F., Dattner S. L. and Mgebroff, J. S., The use of Computer Controlled Scanning Electron Microscopy in environmental studies, J. of The Air Pollution Control Association, 33(10), p. 937, (1983).
- [10] Willeke, K. and Baron P. A., Aerosol Measurement, Van Nostrand Reinhold, New York, (1993).
- [11] Kim, D. S. and Hopke, P. K., Source composition profiles from CCSEM, For presentation at the 80th Annual Meeting of Air Pollution Control Association, (1987).