

에어로졸 중화기의 성능이 고하전 입자의 크기분포 측정에 미치는 영향

지준호*·배귀남**·황정호†
(2003년 5월 21일 접수, 2003년 8월 6일 심사완료)

Effect of Performance of Aerosol Charge Neutralizers on the Measurement of Highly Charged Particles Using a SMPS

Jun-Ho Ji, Gwi-Nam Bae and Jungho Hwang

Key Words: Aerosol Charge Neutralizer(에어로졸 중화기), Charged Particle(하전 입자), Particle Size Distribution(입경분포), Corona Discharge(코로나 방전)

Abstract

A SMPS(scanning mobility particle sizer) system measures the number size distribution of particles using electrical mobility detection technique. An aerosol charge neutralizer, which is a component of the SMPS, is a bipolar charger using a radioactive source to apply an equilibrium charge distribution to aerosols of unknown charge distribution. However, the performance of aerosol charge neutralizers is not well known, especially for highly charged particles. In this study, the effect of the particle charging characteristics of two aerosol charge neutralizers on the measurement using a SMPS system was experimentally investigated for highly charged polydisperse particles. One has radioactive source of ^{85}Kr (beta source, 2 mCi) and the other has ^{210}Po (alpha source, 0.5 mCi). The air flow rate passing through each aerosol charge neutralizer was changed from 0.3 to 3.0 L/min. The results show that the non-equilibrium character in particle charge distribution appears as the air flow rate increases although the particle number concentration is relatively low in the range of $1.5\sim 2\times 10^6$ particles/cm³. The low neutralizing efficiency of the ^{85}Kr aerosol charge neutralizer for highly charged particles can cause to bring an artifact in the measurement using a SMPS system. However, the performance of the ^{210}Po aerosol charge neutralizer is insensitive to the air flow rate.

1. 서 론

에어로졸 연구에서 입자의 크기분포 측정은 매우 중요하다. 최근 많은 연구에서 서브마이크론 입자의 크기분포를 측정하기 위해 SMPS(scanning mobility particle sizer), ELPI(electrical low pressure

impactor) 등을 사용하고 있다. 입자는 발생 메커니즘에 따라 다양한 대전량 분포를 갖기 때문에 이들 측정 장비는 입자가 미리 양극성 확산 하전기나 단극성 코로나 하전기를 거치도록 하고, 입자를 크기에 따라 일정한 대전량을 갖도록 하전시킨다. 입자의 대전량에 대한 정보를 이용하면, 역으로 측정 입자의 크기분포를 계산할 수 있다.

에어로졸 중화기는 초기에 다양한 대전량 분포를 갖는 입자를 평균적으로 중성에 가까운 평형 대전량 분포로 만들어 주는 양극성 확산 하전기이다. 에어로졸 중화기는 보통 ^{210}Po 나 ^{245}Am 과 같은 알파 선원이나 ^{85}Kr 의 베타 선원을 사용한다. 이들 방사능원은 주위 공기 분자들을 이온화

* 회원, 연세대학교 나노과학기술연구원

** 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

시켜 통과하는 입자들이 평형 대전량 분포를 나타낼 수 있을 만큼 충분히 고농도의 이온을 발생시키도록 설계되어 있다.

전기적 이동도 분석기(differential mobility analyzer; DMA)는 1974년 에어로졸 중화기가 장착되면서 단분산 입자 발생기로 사용되었다. 입자는 발생원에 따라 다양한 하전 분포를 갖기 때문에 에어로졸 중화기가 채택되기 이전까지는 입자의 크기가 아닌 전기적 이동도만을 얻을 수 있었지만, 에어로졸 중화기와 DMA가 통합되면서 비로소 입경 분포를 측정할 수 있었다.⁽¹⁾

입자의 확산 하전에 대한 연구는 Fuchs⁽²⁾의 이론을 기반으로 다양하게 수행되었다.⁽³⁻⁸⁾ Fuchs 이전에는 확산 하전에 의해 하전된 입자는 평형상태에서 볼츠만 분포로 나타난다고 가정했지만, 50 nm 이하인 입자의 양극성 확산 하전 특성이 볼츠만 하전 분포를 따르지 않고, Fuchs⁽²⁾의 조합 확률(combination probability)에 의해 계산된 하전 분포와 일치한다는 사실이 여러 연구자들⁽³⁻⁵⁾에 의해서 입증되었다.

초기에 다양한 대전량 분포를 갖고 있는 입자가 에어로졸 중화기를 통과하면, 평균 대전량이 0에 가까운 평형 대전량 분포를 얻는다. Fig. 1은 Wiedensohler⁽³⁾의 경험식에 의해 계산한 평형 대전량 분포를 나타낸 것인데, 중성(0), 양(+), 및 음(-)으로 하전된 입자의 비율이 정규분포와 비슷하다. 그림에서 보는 바와 같이 직경 100 nm인 입자가 에어로졸 중화기를 통과하면, 중성이 42.3%, (+)1가가 20.9%, (+)2가가 3.3%, (-)1가가 27.3%, (-)2가가 5.6%인 일정한 대전량 분포를 갖는다. 그러나, 에어로졸 중화기 내의 이온의 농도가 충분하지 않거나 체류시간이 작으면, 입자는 하전 분포가 더 이상 변하지 않는 정상상태(steady state)인 평형 대전량 분포에 도달하지 못하고, 비평형상태로 에어로졸 중화기를 빠져나온다. 이 때, 에어로졸 중화기의 통과유량이나 입자의 초기 하전 분포 등에 따라 중화기를 빠져나오는 입자의 하전 분포가 달라지므로, 에어로졸 중화기의 성능이 낮으면 입경에 따라 항상 일정한 하전분포를 필요로 하는 DMA의 예비 하전기로 사용할 수 없다.

에어로졸 중화기를 통과한 입자의 하전 분포가 더 이상 변하지 않는 정상상태에 이르지 못하는 입자 대전량 분포의 비평형성을 논의한 여러 연

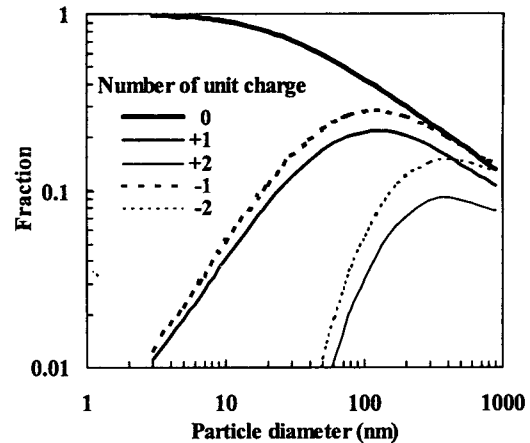


Fig. 1 Equilibrium charge distribution obtained using an empirical equation of Wiedensohler⁽³⁾

구가 있었지만, 대부분의 실험적 연구는 50 nm 이하의 확률적으로 중성이나 1가로 하전되는 나노미터 크기의 입자를 대상으로 수행되었다.^(3,5,9-16) 중화기를 통과하더라도 2가 이상으로 하전될 수 있는 확률이 높은 50 nm 이상인 입자에 대한 에어로졸 중화기의 비평형 입자 하전 특성에 관한 연구는 많지 않다.

이전 연구⁽¹⁷⁾에서 ⁸⁵Kr과 ²¹⁰Po를 방사능원으로 사용하는 에어로졸 중화기를 대상으로 단분산 나노 입자와 코로나 하전 입자의 중화 성능을 연구하였다. 즉, 에어로졸 중화기의 통과유량이 증가하더라도 중화기를 통과한 입자의 하전 분포가 평형 대전량 분포를 만족하는지 확인하는 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 SMPS 시스템의 예비 하전기로 사용되는 ⁸⁵Kr과 ²¹⁰Po 에어로졸 중화기를 대상으로, 코로나 방전에 의해 양(+) 또는 음(-)으로 높게 하전된 다분산 입자의 크기분포를 측정할 때 나타날 수 있는 측정 왜곡의 문제를 고찰하였다. 특히, SMPS의 작동조건인 중화기의 통과유량이 고하전 입자의 입경분포 측정에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 에어로졸 중화기의 성능과 SMPS의 입경분포 측정

SMPS 시스템은 보통 1 μm 이하인 입자의 크기분포를 측정하는 장비로, Fig. 2에 나타낸 바와

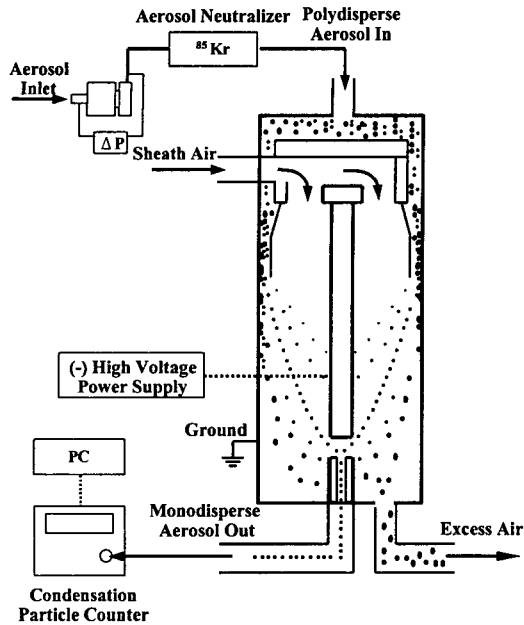


Fig. 2 Schematic diagram of a SMPS system

같이 에어로졸 중화기와 전기적 이동도 분석기, 응축핵 계수기(condensation particle counter; CPC), 측정된 입자의 실제 크기분포를 계산하는 소프트웨어 및 컴퓨터로 구성된다.⁽¹⁸⁾

Fig. 2는 SMPS 시스템의 구성과 입자 분류 메커니즘을 나타낸 것이다. SMPS 시스템의 입경분포 측정과정을 살펴보면 다음과 같다. 입자의 대전량 분포를 갖는 다분산 입자가 유입되면 큰 입자는 미리 입구에 위치한 임팩터에서 제거된다. 임팩터를 통과한 입자는 양극성 확산 하전기인 에어로졸 중화기를 통과하면서 입경에 따라 평형 대전량 분포를 갖는다. 전압이 인가되는 DMA의 내부 실린더와 접지된 외부 실린더 사이에는 전기장이 형성되고, 보호(sheath) 공기와 에어로졸 유동으로 인해 수직으로 층류 유동이 형성된다. 하전된 입자가 외부 실린더 벽면을 따라 유입되면 전기장의 영향으로 유선에서 벗어나 내부 실린더를 향하여 이동한다. 일정한 전압을 인가하면 특정한 전기적 이동도를 갖는 입자는 DMA 하류의 내부 실린더의 홈으로 빠져나와 CPC에 의해 측정된다. DMA의 내부 실린더 전극의 전압을 단계별로 바꾸어 앞의 과정을 반복하면 입자의 크기분포가 완성된다. DMA 내의 입자 분류 메커니즘과 DMA에 의한 입자 발생 및 측정에 관해서는 여러 논문에 자세히 설명되어 있

Table 1 Specifications of two aerosol charge neutralizers

Radioactive source	⁸⁵ Kr	²¹⁰ Po
Half life	10.8 years	138 days
Intensity (mCi)	2.0	0.5
Maximum energy (MeV)	0.695	5.3

다.⁽¹⁸⁻²¹⁾ SMPS 소프트웨어는 CPC로 측정된 단분산 입자의 농도와 에어로졸 중화기를 통과한 입자의 평형 대전량 분포식을 이용하여 SMPS로 유입된 입자의 입경별 수농도를 계산한다.

평형 대전량 분포에 의해 중성, 양(+) 및 음(-)으로 하전된 입자는 DMA의 내부 실린더의 인가 전압이 음(-)이면 DMA 하류의 내부 실린더의 홈을 통하여 양(+)으로 하전된 단분산 입자가 분류된다. 이 때 CPC로 수농도를 측정하면, 평형 대전량 분포식을 이용하여 DMA 입구에서 실제 입자의 수농도를 역으로 계산할 수 있다. 예를 들면, 2가 이상으로 하전된 입자를 고려하지 않을 경우 DMA로 유입되는 입자가 평형 대전량 분포를 만족하면 100 nm의 입자 중 (+)1개로 하전된 입자의 비율은 항상 약 21%이다. DMA에서 100 nm 입자가 단분산 입자로 추출될 수 있는 전압을 인가하고, CPC로 측정된 농도가 21개/cm³이면 실제 샘플링한 100 nm 입자의 농도는 100개/cm³이다. 만약 입자가 양으로 높게 하전되어 있어서 에어로졸 중화기를 통과한 입자 중 (+)1개의 입자가 42%이면, SMPS는 실제 입자 수농도를 200개/cm³으로 계산하게 된다. 마찬가지로 음으로 높게 하전된 입자를 측정하는 경우 에어로졸 중화기를 통과한 후 (+)1개의 비율이 21%가 아닌 10.5%이면 수농도를 실제의 50%로 추정한다. 이와 같이 중화기가 초기에 높게 하전된 입자들을 평형 대전량 분포로 바꾸어주지 못하면, SMPS는 실제 입경 분포와 다른 측정결과를 나타낼 수 있다.

3. 실험

본 연구에서는 제조된 후 24개월이 경과한 ⁸⁵Kr(TSI model 3077)과 4개월이 지난 ²¹⁰Po을 방사능원으로 사용하는 에어로졸 중화기를 실험대

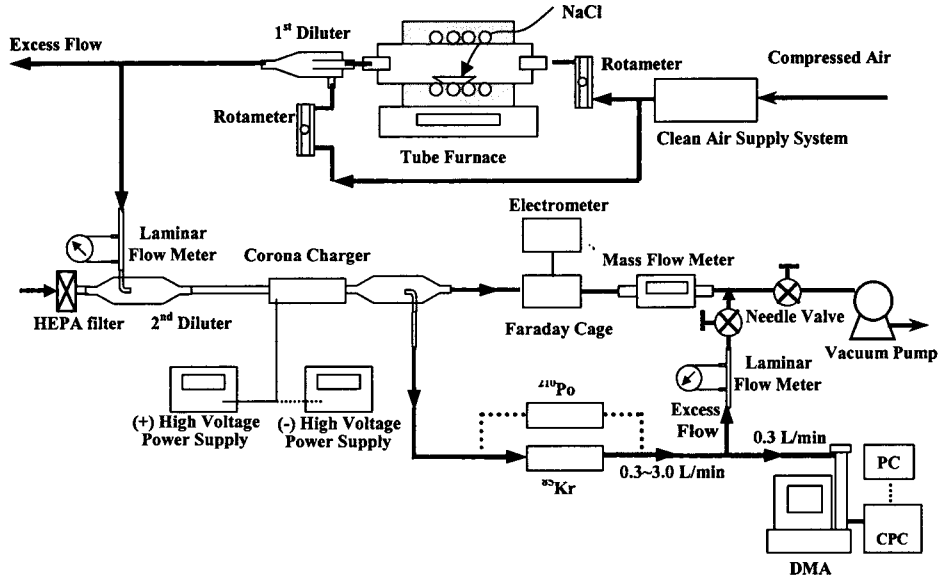


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

상으로 선택하였다. 이들 방사능원에 대한 설명은 Ji 등⁽¹⁷⁾에 자세히 기술되어 있고, 대표적인 사양을 Table 1에 정리하여 나타냈다.

코로나 방전에 의해 양(+)과 음(-)으로 하전된 다분산 입자의 크기분포를 SMPS를 사용하여 측정하는 경우 나타날 수 있는 측정 왜곡의 문제를 고찰하기 위해 Fig. 3과 같은 실험장치를 구성하였다.

최대 온도 1200℃, 최대 전력 3 kW인 전기가 열 튜브로(tube furnace, Lenton Furnaces model GTF12/25/364)를 사용하여 시험용 소금 입자를 발생시켰다.⁽²²⁾ 튜브의 재질은 알루미늄(Al_2O_3)과 실리카(SiO_2)가 주성분인 세라믹(mullite)이고, 내경과 가열 부분의 길이는 각각 25.4, 364 mm이고, 튜브로 내 온도는 비례미적분(PID) 제어에 의해 일정하게 유지된다. 튜브로와 같은 재질의 세라믹 용기에 소금을 채워 튜브로의 중앙에 위치시킨 후, 튜브로의 온도를 올리면 소금이 기화된다. 소금 증기는 튜브로를 통과하면서 주변 공기의 온도가 떨어지면 핵화와 응축 과정을 거쳐 소금 입자로 변환된다. 모든 실험에서 튜브로의 온도는 800℃, 튜브로에 유입되는 공기와 튜브로 출구의 회석공기는 각각 2, 15 L/min으로 일정하게 설정하였다.

중화기에 유입되는 입자를 하전시키기 위해 다

이오드 방식의 코로나 하전기를 사용하였다. 하전기는 핀 대 원통형이고, 듀랄미늄 재질의 내부 원통의 중심에 직경 0.25 mm인 와이어 형태의 핀에 고전압을 인가하고 외부 원통을 접지하였다. 핀과 접지된 원통 내벽의 거리는 20 mm이다.⁽¹⁷⁾

하전기에 (+)4 kV 또는 (-)4 kV의 전압을 인가하여 입자를 양(+) 혹은 음(-)으로 하전시켰고, 하전기의 통과유량을 약 20 L/min으로 조절하여 시험 입자의 농도를 일정하게 유지하였다.

하전 입자의 농도와 중화기를 통과하는 입자의 체류시간에 따른 성능을 평가하기 위해 2개의 회석장치를 사용했다. 튜브로에서 발생하는 입자는 10^7 개/cm³ 이상의 고농도이므로,⁽²²⁾ 1차 회석관에서 회석시키더라도 농도가 매우 높다. 1차 회석된 에어로졸은 층류 유량계(laminar flow meter)를 거쳐 2차 회석관에 유입되고, HEPA(high efficiency particulate air) 필터를 통과한 깨끗한 공기와 섞인다. 2차 회석관에 유입된 시험 입자의 수농도는 약 3×10^6 개/cm³이었고, 코로나 하전기를 통과하면 손실에 의해 수농도는 $1 \sim 2 \times 10^6$ 개/cm³로 낮아졌다. 이것은 제조사가 SMPS의 최대 측정 농도로 제시하는 10^8 개/cm³(10 nm 입자의 경우)의 1/100~1/50 정도이기 때문에 일반적으로 측정하는 농도 범위이다. 시험 입자의 기하 평균

입경은 약 100 nm이고, 기하 표준편차는 약 1.4였다. 샘플링 프로브에서 중화기까지 튜브의 거리를 최소화하였고, 중화기를 통과한 입자가 바로 DMA에 유입되도록 하였다.

에어로졸 중화기의 통과유량이 달라지면 하전된 입자의 중화 특성이 달라질 수 있다. 예를 들면, 초기에 양(+)으로 높게 하전된 입자들은 중화기를 통과한 후에도 양(+)으로 하전되어 있을 확률이 높을 수 있고, 반대로 음(-)으로 높게 하전된 입자들은 DMA가 측정하는 양(+)으로 하전된 입자의 확률이 낮아질 수 있다.

본 연구에서는 에어로졸 중화기의 통과유량의 영향을 살펴보기 위하여 중화기의 하류에 설치된 층류 유량계와 SMPS로 흡인되는 유량을 조절하였다. 즉, 중화기의 통과유량을 0.3~3 L/min으로 변화시켰으며, 이 때 CPC의 흡인유량인 0.3 L/min이 항상 DMA로 유입되었고, 나머지 유량은 층류 유량계를 거쳐 진공펌프로 흡인되어 빠져나갔다.

DMA(TSI model 3081)와 CPC(TSI model 3022A)로 ^{85}Kr 또는 ^{210}Po 중화기를 통과한 입자의 전기적 이동도 분포를 측정하였다. 이 때 입경은 (+)1가로 하전된 입자의 직경으로 환산된 이동도 직경(mobility diameter)이고, 다중 대전량 보정(multicharge correction)을 수행하지 않았다.

2차 회석관에서 코로나 방전에 의해 하전된 입자는 패러데이 케이지를 통과시켰다. 패러데이 케이지로 하전 입자의 총 전류를 모니터링하여 실험 중 입자의 대전량이 안정적으로 유지되는지 확인하였다. 하전 입자가 패러데이 케이지 내부의 전도성 유리섬유로 만들어진 HEPA 필터에 포집되는 순간 전달된 전류를 전위계(electrometer; Keithley model 6517A)의 극미량 전류계 기능을 이용하여 측정하였다. 이 때 패러데이 케이지로 측정된 전류는 입자를 양(+) 또는 음(-)으로 하전시킨 경우 각각 약 1 nA, 1.2 nA였다.

4. 실험결과 및 토의

에어로졸 중화기 내 체류시간이 충분하지 않으면 통과하는 입자의 하전 분포가 평형 대전량 분포를 만족하지 않을 수 있다. 하전기에 (+)4 kV 또는 (-)4 kV의 전압을 인가하여 시험 입자를 하

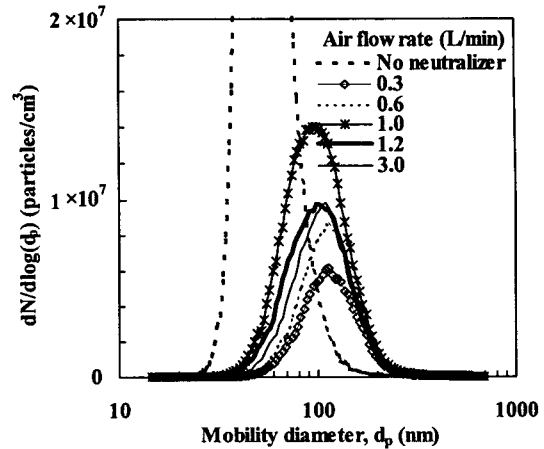


Fig. 4 Mobility distributions of particles charged by positive corona discharge for the ^{85}Kr neutralizer

전시키고, 체류시간의 영향을 살펴보기 위하여 에어로졸 중화기의 통과유량을 0.3~3.0 L/min으로 변화시켰다. 중화기의 통과유량이 0.3 L/min인 경우 코로나 방전에 의해 하전된 시험 입자의 기하 평균 입경은 약 100 nm이고, 입자의 총 수농도는 $1.5\sim 2 \times 10^6$ 개/cm³였다.

4.1 코로나 방전에 의해 입자가 양(+)으로 하전된 경우

만약 에어로졸 중화기의 통과유량이 증가하더라도 중화기를 통과한 입자가 평형 대전량 분포를 갖는다면, SMPS 시스템이 측정하는 입자의 크기분포는 일정할 것이다. 그러나, 중화기의 통과유량에 따라 측정결과가 달라지면 중화기 내 방사능원이 공기 분자를 이온화시키는 성능이 떨어지거나 중화기 내 하전된 입자의 체류시간이 짧아 입자의 대전량 분포가 평형에 이르지 못한 비평형 상태라고 추정할 수 있다. 중화기를 통과한 입자의 대전량 분포의 비평형 특성은 SMPS를 사용한 입경분포의 측정에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

Fig. 4는 시험 입자가 코로나 방전에 의해 양으로 높게 하전된 경우의 전기적 이동도 분포를 나타낸 것이다. 하전기의 통과유량이 20 L/min이고, 인가전압이 (+)4 kV인 경우 0.09 μm 입자가 하전기를 통과한 후 얻은 입자당 평균 전하수는 약 2.9개이고, 0.25 μm 인 경우 9개 정도였다.⁽¹⁷⁾ 이것은 동일한 입경에서 평형 대전량 분포를 갖는 입

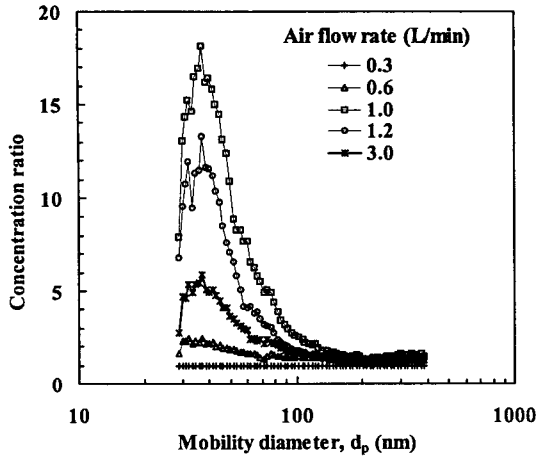


Fig. 5 Concentration ratios of positively charged particles with the mobility diameter for the ⁸⁵Kr neutralizer

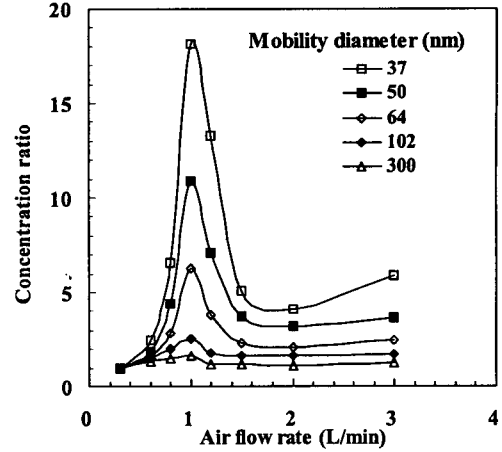


Fig. 6 Concentration ratios of positively charged particles with the air flow rate for the ⁸⁵Kr neutralizer

자의 절대 평균 전하수인 0.2개, 0.6개보다는 10 배 이상 크고, 평형 대전량 분포의 양극성 입자와는 달리 같은 극성을 갖는 단극성 입자이다. 양으로 높게 하전된 입자가 중화기를 거치지 않으면(no neutralizer) 대부분의 입자가 (+)1가 이상으로 하전되므로 SMPS 시스템은 실제보다 작은 입자들이 고농도로 존재하는 것처럼 측정한다. 입자가 에어로졸 중화기를 통과하면 중화기 내에 존재하는 고농도의 양이온 및 음이온과 충돌하여 대전량 분포가 달라진다. Fig. 4를 보면, 중화기의 통과유량이 0.3 L/min보다 많은 경우 전기적 이동도 분포는 기하 평균 입경이 작은 쪽으로 약간 이동하고, 수농도가 높아진다.

본 연구에서는 ⁸⁵Kr 에어로졸 중화기의 통과유량에 따른 입경별 농도비를 계산하여 측정오차를 살펴보았다. 이 때 중화기의 통과유량이 0.3 L/min인 경우 입자가 평형 대전량 분포를 만족한다고 가정하여 기준농도로 사용하였다.⁽¹⁷⁾ 입경별 농도비는 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$\text{Concentration ratio} = \frac{N_Q}{N_{0.3}} \quad (1)$$

여기서, $N_{0.3}$ 과 N_Q 는 에어로졸 중화기의 통과유량이 각각 0.3, Q L/min일 때 입자의 수농도이다. 즉, 에어로졸 중화기의 통과유량이 0.3 L/min인 경우를 기준으로 중화기의 통과유량에 따른

농도비를 입경별로 나타낸 것이다.

Fig. 5는 코로나 방전에 의해 입자가 양(+)으로 높게 하전된 경우 Fig. 4에 나타낸 측정결과를 입경별 농도비로 바꾸어 나타낸 것이다. 중화기의 통과유량이 0.6 L/min일 때 입자의 수농도가 평균 2배 정도 높게 나타나고, 차이가 가장 큰 1.0 L/min이나 1.2 L/min인 경우 전기적 이동도 직경이 30~50 nm일 때 수농도를 10배 이상 높게 측정한다. 기하 평균 입경인 100 nm보다 작은 입자의 농도는 실제보다 과장되어 높게 나타나는데, 이것은 본 실험에서 사용한 DMA가 (+)로 하전된 입자만을 분류하여 측정하기 때문이다. 즉, 초기에 코로나 방전에 의해 높게 하전된 입자들은 중화기를 거친 이후에도 평형 대전량 분포에 이르지 못하고 (+)로 하전된 입자의 비율이 높다. 특히, 각 입경에서 (+)1가로 하전된 입자의 비율이 중성이나 (-)로 하전된 입자보다 높기 때문에 전체적으로 농도가 높게 측정되고, 같은 이동도이지만 크기가 큰 (+)2가 이상으로 하전된 입자의 영향으로 작은 이동도 직경을 갖는 입자의 농도가 실제보다 높게 나타난다.

Fig. 6은 Fig. 4의 전기적 이동도 분포를 중화기의 통과유량별 농도비로 나타낸 것이다. 에어로졸 중화기의 통과유량이 1.0 L/min인 경우 모든 입경에서 0.3 L/min과의 오차가 가장 크게 나타나는데, 입경이 37 nm인 경우 수농도를 실제보다 18배 이상 높게 측정한다.

중화기의 통과유량이 1.0 L/min보다 커지면 상

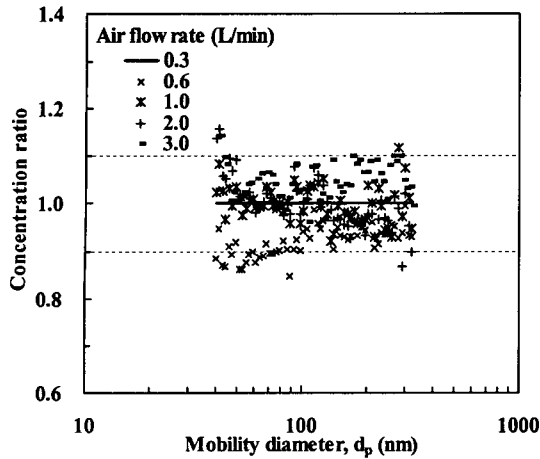


Fig. 7 Concentration ratios of positively charged particles for the ²¹⁰Po neutralizer

대적으로 농도의 측정오차가 작아지는데, 이것은 두 가지 영향인 것으로 생각된다. 첫째, 중화기 용기의 내부 기하학적 형상에 따른 유동 형태의 변화이다. 입구에서 용기 내로 유입된 공기의 유동은 중심부의 속도가 빠른 제트 형태를 이루는데, 이 때 대부분의 유동이 출구 튜브로 바로 빠져나가면 실제 체류시간은 용기의 부피와는 관계 없이 감소한다. 둘째, ⁸⁵Kr이 공기 분자를 이온화시키는 성능이 떨어지기 때문이다. Liu 등⁽⁷⁾의 연구에 따르면, ⁸⁵Kr이 제공하는 이온량은 ²¹⁰Po의 약 1/8로 낮다. 이것은 높게 하전된 입자가 중화기 내의 이온에 의해 평형 상태에 이르기 어려운 원인이다. 만약 이온이 방사능원의 근처를 통과하는 입자만 중화시키고, 멀리 지나가는 입자에 도달하지 못하면 양(+)으로 하전된 입자의 비율은 평형상태보다 높고 (+)가 이상으로 하전된 입자의 비율도 높으므로, Fig. 6에 나타난 바와 같이 작은 입자가 많은 것처럼 측정될 수 있다. 중화기의 통과유량이 1.0 L/min보다 큰 경우 중화기를 통과하는 공기의 속도가 증가하여 유동 형태가 바뀌고, 유동의 혼합효과에 의해 (-) 이온과의 충돌 확률이 증가하면 양(+)으로 하전된 입자의 중화효율이 높아진다. 특히, 중화기의 내부 구조, 즉 방사능 물질이 설치되는 공간의 복잡성이 유동 패턴에 영향을 미칠 수 있다.⁽¹¹⁾

양으로 코로나 하전된 입자가 ²¹⁰Po 에어로졸 중화기를 통과한 경우 Fig. 7에 나타난 바와 같이 중화기의 통과유량이 변하여도 수농도는 대부분

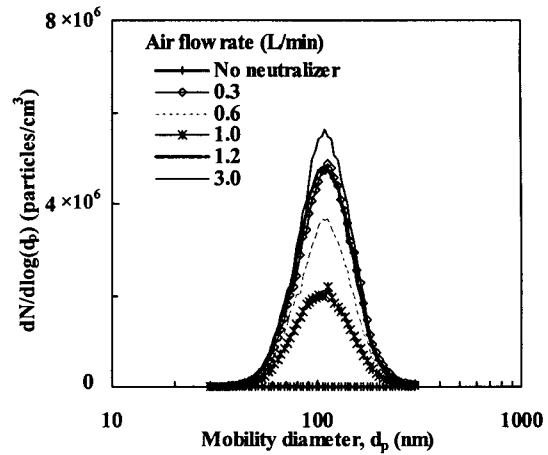


Fig. 8 Mobility distributions of particles charged by negative corona discharge for the ⁸⁵Kr neutralizer

의 입경에서 $\pm 10\%$ 이내로 비슷하게 나타났다. 이것은 ⁸⁵Kr 에어로졸 중화기는 평형 대전량 상태에 이르지 못하는 반면, ²¹⁰Po 에어로졸 중화기는 평형 대전량 분포를 만족한다는 Covert 등⁽¹¹⁾의 실험결과와 일치한다.

4.2 코로나 방전에 의해 입자가 음(-)으로 하전된 경우

Fig. 8은 입자가 코로나 방전에 의해 음으로 높게 하전된 경우의 전기적 이동도 분포를 나타낸 것이다. 중화기의 통과유량이 0.3 L/min인 경우 시험 입자의 기하 평균 입경은 약 100 nm이고, 총 수농도는 약 1.5×10^6 개/cm³였다. 입자들은 대부분 (-)이 이상인 음으로 하전되어 있기 때문에 중화기를 통과하지 않으면(no neutralizer), 입자가 DMA에서 제거되어 거의 측정되지 않는다. 중화기의 통과유량이 증가하면, 전체적인 입경분포에서 입자의 기하 평균 입경은 거의 변하지 않지만 입경별 수농도는 크게 달라진다. 특히, 통과유량이 1.0 L/min인 경우 입자의 수농도가 매우 낮게 측정된다.

Fig. 9는 입자가 코로나 방전에 의해 음으로 하전된 경우 중화기의 통과유량별 입자의 농도비를 나타낸 것이다. ⁸⁵Kr 에어로졸 중화기의 통과유량이 0.6, 1.0 L/min인 경우 수농도가 실제보다 낮게 측정되었지만, 유량이 1.2~3.0 L/min 범위인 경우 대부분의 입경에서 수농도는 0.3 L/min인 경우와 비슷하게 측정되었다. 이러한 경향은 양

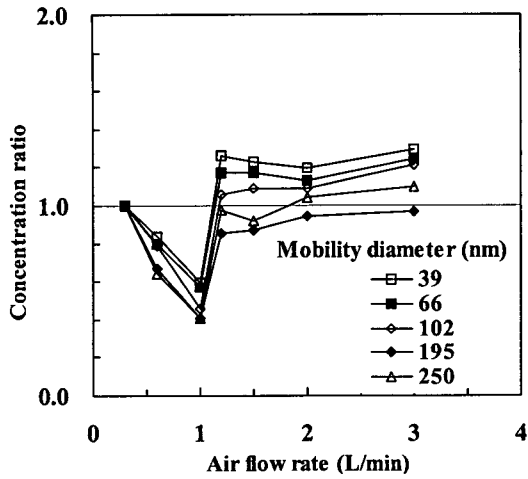


Fig. 9 Concentration ratios of negatively charged particles for the ⁸⁵Kr neutralizer

으로 하전된 입자의 경우와 매우 다르다. 중화기의 통과유량이 1.2 L/min 이상인 경우 DMA로 측정된 입자의 농도가 체류시간이 가장 긴 0.3 L/min의 경우보다 높게 나타났다. 이것은 평형 대전량 분포의 경우와 비교할 때 양으로 하전된 입자의 비율이 비슷하거나 더 크다는 것을 의미한다. 유량이 0.6, 1.0 L/min인 경우 입자가 양으로 하전된 경우와 마찬가지로 에어로졸 중화기의 중화효율이 떨어진다.

Fig. 9의 결과는 DMA가 양으로 하전된 입자만을 분류하므로, 양으로 하전된 입자의 비율이 평형 대전량 분포에 가깝다는 것을 의미한다. 그러나, 코로나 방전으로 하전된 입자가 중화기를 통과한 후 입자의 대전량을 측정했던 Ji 등⁽¹⁷⁾의 연구결과에 의하면, 음으로 코로나 하전된 입자의 경우 중화기 통과유량이 1.0 L/min을 초과하는 경우에도 중화되어 전류가 0에 가까워지지 않고 음으로 상당히 크게 나타났다. 이것은 양으로 하전된 입자의 비율이 평형 대전량 분포에 가깝지만, 음으로 하전된 입자의 비율이 높고 중성 입자의 비율이 낮은 비평형 하전 분포에서 나타난 현상이다.

음으로 코로나 하전된 입자가 ²¹⁰Po 에어로졸 중화기를 통과한 경우 양으로 하전된 입자와 마찬가지로 중화기의 통과유량에 따른 수농도는 대부분의 측정 입경 범위에서 ±20% 이내로 비슷하게 나타났다.

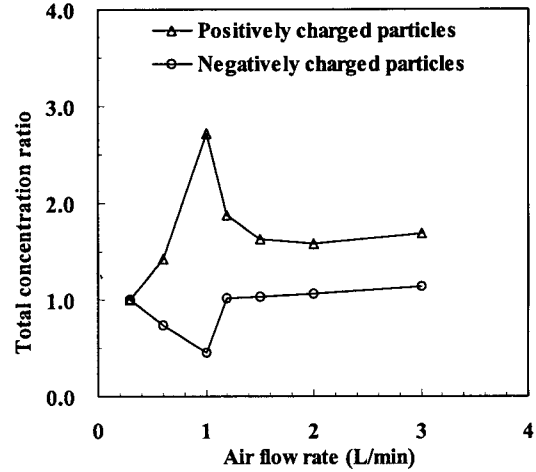


Fig. 10 Change of particle number concentration estimated by the SMPS using the ⁸⁵Kr aerosol neutralizer

4.3 ⁸⁵Kr 에어로졸 중화기를 장착한 SMPS 시스템의 입경분포 측정 특성

상용화된 SMPS 시스템(TSI model 3936)의 경우 반감기가 긴 ⁸⁵Kr 에어로졸 중화기를 장착하고 있다. 이 때 에어로졸 중화기의 중화 성능이 만족스럽지 못하면, SMPS가 측정된 입자의 크기분포는 상당히 왜곡될 수 있다. SMPS는 Figs. 4와 8에 나타난 바와 같이 전기적 이동도 분포를 측정 후, 소프트웨어로 다중 하전 보정을 수행하여 실제 크기분포를 추정한다.

Fig. 10은 중화기의 통과유량에 따른 SMPS에 의해 추정된 입자의 총 수농도의 변화를 나타낸 것이다. 총 수농도는 SMPS의 다중 하전 보정을 수행하여 얻었다. 양(+) 또는 음(-)으로 하전된 입자의 경우 모두 기준값인 0.3 L/min의 경우에 비해 1.0 L/min일 때 측정오차가 가장 크게 나타났다. 양으로 하전된 입자의 경우 통과유량이 0.3 L/min보다 크면 총 수농도를 높게 추정한다.

음으로 하전된 입자의 경우 반대의 경향이 나타난다. 만약 방사능원에 의해 생성된 이온이 음으로 높게 하전된 입자를 충분히 중화시키지 못하면 양으로 하전된 입자의 확률이 감소하므로, 중화기의 통과유량이 1.0 L/min인 경우 입경별 실제 농도의 50% 이하까지 총 수농도를 낮게 추정한다. 중화기의 통과유량이 1.2 L/min 이상이면 측정된 총 수농도는 0.3 L/min인 경우와 비슷하게 나타난다.

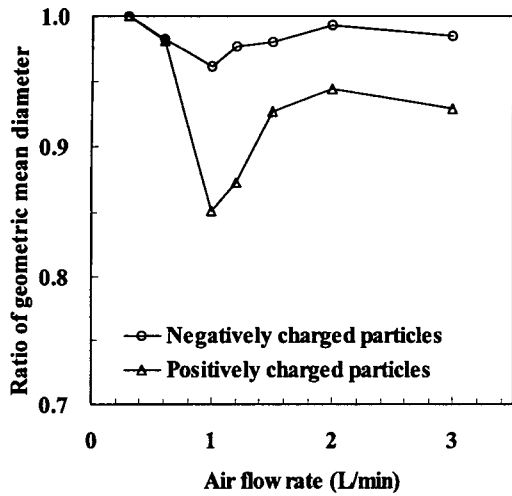


Fig. 11 Change of geometric mean diameter estimated by the SMPS using the ^{85}Kr aerosol neutralizer

또한, SMPS의 다중 하전 보정을 수행하여 얻은 측정결과로부터 기하 평균 입경을 구하여 중화기의 통과유량이 0.3 L/min인 경우와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 양으로 높게 대전된 입자의 경우 중화기의 통과유량이 0.3 L/min보다 많으면 기하 평균 입경은 작아지고, 통과유량이 1.0 L/min일 때 100 nm에서 85 nm로 15%나 작아졌다. 반면, 음으로 대전된 입자의 경우 기하 평균 입경은 모든 통과유량에서 4% 이내로 거의 변화가 없었다.

단극성으로 높게 하전된 입자를 측정하는 경우 ^{85}Kr 에어로졸 중화기를 사용한다면 에어로졸 중화기 내 체류시간을 증가시키기 위해 통과유량을 줄이거나 여러 개의 중화기를 병렬로 연결하여 사용해야 한다. 또한, 방사능원이 다른 ^{210}Po 에어로졸 중화기를 사용할 수도 있다. 정전기력을 이용한 전기집진기나 정전식 공기 청정기를 평가하는 경우 SMPS를 사용하여 입자의 크기분포를 측정하면 샘플 유량에 따라 입경분포 및 수농도가 실제와 다르게 왜곡될 수 있고, 효율이 (-)인 경우도 나타날 수 있으므로 각별한 주의가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 양극성 하전기인 에어로졸 중화

기의 성능이 SMPS 시스템의 입경분포 측정결과에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보았다. 코로나 방전에 의해 양 혹은 음으로 높게 하전된 입자를 대상으로 중화기의 통과유량이 0.3~3.0 L/min인 경우 ^{85}Kr 과 ^{210}Po 에어로졸 중화기의 중화효율을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 입자가 코로나 방전에 의해 양(+)으로 높게 하전된 경우 ^{85}Kr 에어로졸 중화기의 통과유량이 0.6 L/min 이상이면 중화기를 통과한 이후에도 양으로 하전된 입자의 비율이 높다. SMPS로 크기분포를 측정하는 경우 기하 평균 입경은 실제보다 작고, 입자의 총 수농도는 높게 측정된다. 특히, 중화기의 통과유량이 1.0 L/min인 경우 크기분포의 왜곡이 가장 심하고, 유량이 1.2~3 L/min으로 증가하면 왜곡의 정도가 감소한다.

(2) 입자가 코로나 방전에 의해 음(-)으로 높게 하전된 경우 ^{85}Kr 에어로졸 중화기의 통과유량이 0.6, 1.0 L/min일 때 입경별 농도를 낮게 측정한다. 이 때 기하 평균 입경은 거의 변하지 않는다. 양으로 하전된 입자의 경우와 마찬가지로 에어로졸 중화기의 통과유량이 1.0 L/min일 때 크기분포의 왜곡이 가장 심하다. 중화기의 통과유량이 1.2 L/min 이상인 경우 측정결과가 0.3 L/min일 때와 비슷하다. 이것은 입자가 중화되어 평형 대전량 분포에 이른 것이 아니고, (+)로 하전된 입자의 비율은 평형 대전량 분포에 가깝지만 음으로 하전된 입자의 비율이 높고 중성 입자의 비율이 낮은 비평형 대전량 분포에서 나타난 현상이다.

(3) 양으로 코로나 하전된 입자가 ^{210}Po 에어로졸 중화기를 통과한 경우 중화기의 통과유량에 따른 농도는 대부분의 입경에서 $\pm 10\%$ 이내로 비슷하고, 음으로 코로나 하전된 입자의 경우에는 $\pm 20\%$ 이내였다.

정전기력을 이용한 전기집진기나 정전식 공기 청정기를 평가할 때 ^{85}Kr 에어로졸 중화기를 장착한 SMPS를 사용하여 입자의 크기분포를 측정할 경우 샘플 유량에 따라 입경분포 및 수농도가 실제와 다르게 왜곡될 수 있으므로, 에어로졸 중화기 내 체류시간을 증가시키기 위해 통과유량을 줄이거나 여러 개의 중화기를 병렬로 연결하여 사용해야 한다. 또는, ^{210}Po 에어로졸 중화기로 교체하여 사용할 수도 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기연구센터(과제번호: 2001G0201)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Flagan, R. C., 1998, "History of Electrical Aerosol Measurements," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 28, pp. 301~380.
- (2) Fuchs, N. A., 1964, *The Mechanics of Aerosols*, Pergamon Press, Oxford.
- (3) Wiedensohler, A., 1988, "An Approximation of the Bipolar Charge Distribution for Particles in the Submicron Size Range," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 19, pp. 387~389.
- (4) Hoppel, A. and Frick, G. M., 1986, "Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distributions on Aerosols in a Bipolar Ion Environment," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 5, pp. 1~21.
- (5) Adachi, M., Kousaka, Y., and Okuyama, K., 1985, "Unipolar and Bipolar Diffusion Charging of Ultrafine Aerosol Particles," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 16, pp. 109~123.
- (6) Liu, B. Y. H. and Pui, D. Y. H., 1977, "On Unipolar Diffusion Charging of Aerosols in the Continuum Regime," *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 58, pp. 142~149.
- (7) Liu, B. Y. H., Pui, D. Y. H., and Lin, B. Y., 1986, "Aerosol Charge Neutralization by a Radioactive Alpha Source," *Part. Charact.*, Vol. 3, pp. 111~116.
- (8) Liu, B. Y. H. and Pui, D. Y. H., 1986, "Aerosol Charging and Neutralization and Electrostatic Discharge in Clean Rooms," *The J. Environmental Sciences*, Vol. 33, pp. 42~46.
- (9) Hoppel, A. and Frick, G. M., 1990, "The Nonequilibrium Character of the Aerosol Charge Distributions Produced by Neutralizers," *Aerosol Sci. and Tech.*, Vol. 12, pp. 471~496.
- (10) Kousaka, Y., Adachi, M., Okuyama, K., Kitada, N., and Motochi, T., 1983, "Bipolar Charging of Ultrafine Aerosol Particles," *Aerosol Sci. and Tech.*, Vol. 2, pp. 421~427.
- (11) Covert, D., Wiedensohler, A., and Russell, L., 1997, "Particle Charging and Transmission Efficiencies of Aerosol Charge Neutralizers," *Aerosol Sci. and Tech.*, Vol. 27, pp. 206~214.
- (12) Adachi, M., Okuyama, K., Kousaka, Y., Kozuru, H., and Pui, D. Y. H., 1989, "Bipolar Diffusion Charging of Aerosol Particles Under High Particle/Ion Concentration Ratios," *Aerosol Sci. and Tech.*, Vol. 11, pp. 144~156.
- (13) Alonso, M., Kousaka, Y., Nomura, T., Hashimoto, N., and Hashimoto, T., 1997, "Bipolar Charging and Neutralization of Nanometer-Sized Aerosol Particles," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28, pp. 1479~1490.
- (14) Alonso, M., Alguacil, F. J., Nomura, T., and Kousaka, Y., 2001, "Examination of After-charging Effects Downstream of an Aerosol Neutralizer," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, pp. 289~294.
- (15) Reischl, G. P., Makela, J. M., Karch, R., and Neced, J., 1996, "Bipolar Charging of Ultrafine Particles in the Size Range below 10 nm," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 27, pp. 931~949.
- (16) Mayya, Y. H. and Sapra, B. K., 1996, "Variation of the Aerosol Charge Neutralization Coefficient in the Entire Particle Size Range," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 27, pp. 1169~1178.
- (17) Ji, J. H., Bae, G. N., and Hwang, J., 2003, "Nano Particle Charging Characteristics of Aerosol Charge Neutralizers," *KSME Journal B*, accepted for publication.
- (18) TSI Corporation, 1999, *Model 3936 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) Instruction Manual*.
- (19) Ahn, K. H., Kim, N. H., Lee, J. H., and Bae, G. N., 1996, "Particle Path and Performance Evaluation of Differential Mobility Analyzer," *KSME Journal B*, Vol. 20, pp. 2005~2013.
- (20) Knutson, E. O. and Whitby, K. T., 1975, "Aerosol Classification by Electrical Mobility: Apparatus, Theory and Applications," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 6, pp. 443~451.
- (21) Hoppel, W. A., 1978, "Determination of the Aerosol Size Distribution from the Mobility Distribution of the Charged Fraction of Aerosols," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 9, pp. 41~54.
- (22) Ji, J. H., Pae, Y. I., Hwang, J., and Bae, G. N., 2003, "Generation of Nano Particles Using an Electrically Heated Tube Furnace," *KSME Journal B*, submitted.