

에어로졸 중화기의 나노 입자 하전 특성

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

Nano Particle Charging Characteristics of Aerosol Charge Neutralizers

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

Key Words: Aerosol Charge Neutralizer(에어로졸 중화기), Nano Particle(나노 입자), Corona Discharge(코로나 방전), Equilibrium Charge Distribution(평형 대전량 분포)

Abstract

Aerosol charge neutralizers with various radioactive sources have been used 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. Measurements of highly charged particles are needed in air cleaning devices, e.g. electrostatic precipitator, bag filter with a pre-charger, and electrical cyclone. In this study, the particle charging characteristics of two different aerosol charge neutralizers were experimentally investigated for singly charged monodisperse particles and highly charged polydisperse particles. One has radioactive source of ⁸⁵Kr (beta source, 2 mCi) and the other has ²¹⁰Po (alpha source, 0.5 mCi). The air flow rate passing through each aerosol charge neutralizer was changed from 0.2 to 2.5 L/min. The results show that the charge distribution of singly charged monodisperse particles passing through the ⁸⁵Kr aerosol charge neutralizer is well agreed with the Boltzmann equilibrium charge distribution at an air flow rate of 0.3 L/min. However, it deviates from the equilibrium charge distribution when the air flow rates are 0.6, 1.0, and 1.5 L/min. On the other hands, the effect of air flow rate is insignificant for the ²¹⁰Po aerosol charge neutralizer. The non-equilibrium character in charge distribution of highly charged polydisperse particles passing through the ⁸⁵Kr aerosol charge neutralizer greatly depends on the air flow rate, however it is insensitive to the air flow rate for the ²¹⁰Po aerosol charge neutralizer.

이해는 필수적이다.

에어로졸 중화기는 초기에 다양한 대전량 분포를 갖는 입자를 평균적으로 중성에 가까운 평형 대전량 분포로 만들어 주는 양극성 확산 하전기이다. 에어로졸 중화기는 ²¹⁰Po나 ²⁴⁵Am과 같은 알파 선원이나 ⁸⁵Kr의 베타 선원을 사용한다. 이들 방사능원은 주위 공기 분자들을 이온화시켜 통과하는 입자들이 평형 대전량 분포를 나타낼 수 있을 만큼 충분한 고농도의 이온을 발생시키도록 설계되어 있다. 초기에 다양하게 하전된 입자는 고농도의 양이온과 음이온이 존재하는 중화기 내부를 통과하는 과정에서 확률적으로 평형상태의 대전량 분포를 얻는다. 중화기의 입자 하전 효율은 보통 방사능원의 강도, 이온 발생을 및

1. 서론

하전 입자의 거동은 에어로졸 연구 분야에서 매우 중요하다. 에어로졸 계측 장비나 에어로졸을 이용한 물질 제조, 반도체 산업뿐만 아니라 대기오염제어 분야에서 하전 입자의 거동에 관한

* 회원, 연세대학교 나노과학기술연구원

** 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

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

방사능원을 포함한 용기의 구조에 따라 달라진다.⁽¹⁾

볼츠만 하전 분포는 이온과 입자의 충돌에 의한 입자 하전이 평형 상태에 도달하는 확산 하전의 과정으로 볼츠만 확률을 따른다고 가정한다.⁽²⁾ 볼츠만 하전 분포는 50 nm 보다 큰 입자의 경우 실제와 비슷하게 나타났고, 수학적으로 간단하다는 이점으로 널리 사용되었다. 그러나 Fuchs⁽³⁾는 이온과 입자의 충돌에 의한 확산 하전이 평형 상태에 이르는 과정(equilibrium process)이 아니라 정상 상태의 과정(steady-state process)이므로, 볼츠만 확률에 의한 가정은 타당하지 않다고 주장했고, Hoppel and Frick,⁽²⁾ Adachi 등⁽⁴⁾과 Wiedensohler⁽⁵⁾는 평형 대전량 분포에 대한 연구를 수행하여 약 50 nm 이하인 입자의 양극성 확산 하전 특성이 볼츠만 하전 분포를 따르지 않고, Fuchs⁽³⁾의 충돌 확률(combination probability)에 의해 계산된 입자의 하전 분포와 일치한다는 사실을 입증하였다.

양극성 하전기(bipolar charger)는 확산 하전 이론을 근거로 만들어졌다. Hoppel과 Frick,⁽⁶⁾ Kousaka 등⁽⁷⁾은 중화기를 통과하는 입자가 양과 음으로 하전되는 비율이 완전한 대칭이 아니고, 양보다는 음으로 하전되는 비율이 높음을 밝혀냈다. Covert 등⁽¹⁾은 ⁸⁵Kr을 사용하는 중화기의 경우 통과유량이 0.5 L/min일 때 입자 농도가 1000개/cm³ 이상이면 평형 대전량 분포에 도달하지 못하는 비평형 특성이 나타난다고 보고했다. Liu 등⁽⁸⁻¹⁰⁾은 ²¹⁰Po이나 ⁸⁵Kr를 사용하는 에어로졸 중화기에서 발생하는 이온 농도와 중화기내 체류시간을 변수로 하여 중화기의 성능 특성에 관한 연구를 수행하였다.

지금까지 평형 대전량 분포가 볼츠만 분포와 차이를 보이는 약 50 nm 이하인 입자를 대상으로 많은 연구가 수행되었는데,^(4,7,11-14) 이처럼 매우 작은 입자는 중화기를 통과하더라도 확률적으로 중성이나 1가로 하전된다. 반면에 2가 이상으로 하전되는 다중 하전 확률이 높은 상대적으로 큰 입자에 대한 연구결과는 많지 않다. Adachi 등⁽¹⁵⁾은 양극성 확산 하전에서 이온 농도에 비해 입자 농도가 높은 경우 입자가 작을수록 평형 대전량 분포를 얻기 쉽다는 결론을 얻었다. 또한, 이온의 발생 농도(N)와 중화기 내 체류시간(t)의 곱인 $N \cdot t$ 가 4.8×10^7 개/cm³ 이상이면 평형 대전량 분포를 얻을 수 있다고 주장했다.

농도가 높은 입자상 물질을 측정하는 경우 보통 희석시켜 농도를 낮추지만, 약 10^8 개/cm³ 이상인 고농도 시스템의 경우 희석시켜 1/100로 농도를 낮추더라도 약 10^6 개/cm³으로 상당히 높은 농도의 입자를 측정해야 한다. 이 때 입자가 높게 하전되어 있는 경우 희석에 의해 농도가 낮아지면 중화기를 통과한 입자의 대전량이 평형 대전량 분포와 일치하는지 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 ⁸⁵Kr과 ²¹⁰Po을 방사능원으로 사용하는 에어로졸 중화기를 대상으로 통과유량에 따른 입자 하전 성능을 조사하였다. 즉, 1가로 하전된 50 nm 이하인 단분산 입자가 에어로졸 중화기를 통과한 후 평형 대전량 분포를 만족하는지 조사하였고, 코로나 방전에 의해 양과 음으로 높게 하전된 다분산 입자의 중화 특성을 검토하였다. 또한, 에어로졸 중화기의 통과유량에 따라 중화기를 거친 입자가 평형 대전량 분포에 이르지 못하는 비평형성도 고찰하였다.

2. 에어로졸 중화기의 입자 하전

대기 중 에어로졸은 이온들과 불규칙적으로 충돌하는 확산 하전에 의해 전하를 띠게 된다. 대기 중에는 약 10^3 개/cm³의 이온이 존재하고 양과 음의 이온 수는 거의 같다.⁽¹⁶⁾ 대기 중에서 중성인 에어로졸 입자는 불규칙하게 움직이는 이온과 충돌하여 전하를 띠고, 중성이 아닌 하전된 입자는 반대 부호의 이온을 끌어당기므로 하전량을 잃을 확률이 높아진다. 결국, 입자의 하전 상태는 평형 대전량 분포에 이른다.

마찬가지로 에어로졸 중화기의 입자 하전은 확산 하전의 과정이다. 일반적으로 임의로 하전된 에어로졸이 중화기를 통과하면 단시간에 평형 대전량 분포를 갖는 입자가 된다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 두께가 얇은 스테인레스 튜브의 내부에 방사능원을 설치하면 용기내 공기 분자를 이온화시켜서 고농도의 (+)와 (-) 이온이 만들어진다. 이 때 중화기로 유입된 에어로졸은 중화기내 양극성 이온들과 충돌하여 평형 대전량 분포에 이른다. 고농도 이온이 존재하는 에어로졸 중화기의 경우 2초의 체류시간이면 하전된 입자가 평형 대전량 분포를 얻을 수 있지만, 이온 농도가 10^3 개/cm³인 대기에서 같은 효과를 얻기 위해서는 100분 정도 걸린다.⁽¹⁶⁾

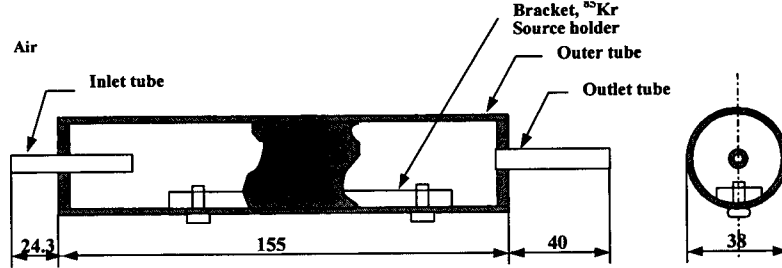


Fig. 1 Structure of an aerosol charge neutralizer (TSI model 3077)

서브 마이크론 영역에서 입자의 평형 대전량 분포는 Fuchs⁽³⁾와 Wiedensohler⁽⁵⁾의 확산 이론을 이용하여 구할 수 있다. 입자가 중화기를 통과한 후 평형 대전량 분포에 이르면, 입자가 0, 1, 2개의 전하를 얻을 확률(f)은 Wiedensohler⁽⁶⁾가 제시한 식 (1)을 사용하여 구할 수 있다.

$$f(n) = \frac{\text{From}}{10} \left[\sum_{i=0}^{\infty} a_i(n) (\log d)^i \right] \quad (1)$$

여기서, a_i 는 실험적으로 얻은 입자당 전하수에 따른 계수⁽⁵⁾이고, d 는 입경이다. 이 식은 입자당 전하수(n)가 -1, 0, 1개인 경우 1~1000 nm, $n=2, +2$ 인 경우 20~1000 nm 영역에서 적용할 수 있다.

입자의 대전량 분포를 평형 대전량 분포로 만들 수 있는 중화기의 성능은 중화기를 통과하는 입자의 체류시간에 영향을 받는다. 체류시간은 유입되는 유량뿐만 아니라 중화기 내부의 유동 형태에 영향을 받는데, 방사능원을 포함한 용기의 구조는 중화 성능에 영향을 미칠 수 있다. 중화기에 유입된 공기는 제트 유동 패턴을 갖게 되는데, 입자들이 중화기를 통과하는 과정에서 체류시간이 달라지는 원인이 된다.

3. 실험

3.1 시험용 에어로졸 중화기의 특성

본 연구에서는 제조된 후 24개월이 경과한 ⁸⁵Kr (TSI model 3077)과 4개월이 지난 ²¹⁰Po를 방사능원으로 사용하는 2개의 에어로졸 중화기를 실험대상으로 선택하였다. Table 1은 ⁸⁵Kr과 ²¹⁰Po의 사양을 비교하여 나타낸 것이다. ⁸⁵Kr는 베타 입자 소스로 반감기는 10.8년이고 방사능 강도는

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

2 mCi이다. ⁸⁵Kr 에어로졸 중화기의 경우 튜브 내경은 2 cm, 내부 체적은 100 cm³, 유입구로 연결되는 튜브의 내경은 0.4 cm이다.⁽¹⁾ ²¹⁰Po는 알파 입자 소스로 반감기는 약 138일이고, 방사능 강도는 0.5 mCi이다. ²¹⁰Po 에어로졸 중화기의 경우 튜브 내경은 3 cm, 유입구로 연결되는 튜브의 내경은 0.4 cm이고, Fig. 1에 나타난 ⁸⁵Kr 에어로졸 중화기와 비슷한 구조를 갖고 있다. ⁸⁵Kr의 방사능 강도는 ²¹⁰Po보다 약 4배 높지만, 최대 에너지는 0.695 MeV로 5.3 MeV인 ²¹⁰Po에 비해 약 1/7로 매우 낮다. Liu 등⁽⁹⁾에 따르면 ²¹⁰Po는 ⁸⁵Kr의 8배의 포화 전류에 해당하는 이온을 발생시킨다.

3.2 (+)I가로 하전된 단분산 나노 입자의 시험

Fig. 2는 에어로졸 중화기의 입자 하전 성능을 평가하기 위하여 구성된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 입자발생장치, 1차 회석 및 냉각장치, 2차 회석장치 및 측정장비로 구성되었다. 본 실험에서는 최대 온도 1200℃, 최대 전력 3 kW인 튜브로(tube furnace, Lenton Furnaces model GTF12/25/364)를 사용하여 시험용 소금 입자를 발생시켰다.⁽¹⁷⁾ 튜브의 재질은 알루미늄이나(Al₂O₃)와 실리카(SiO₂)가 주성분인 세라믹(mullite)이고, 내경과 가열 부분의 길이는 각각 25.4, 364 mm이고, 튜브로내 온도는 비례미적분

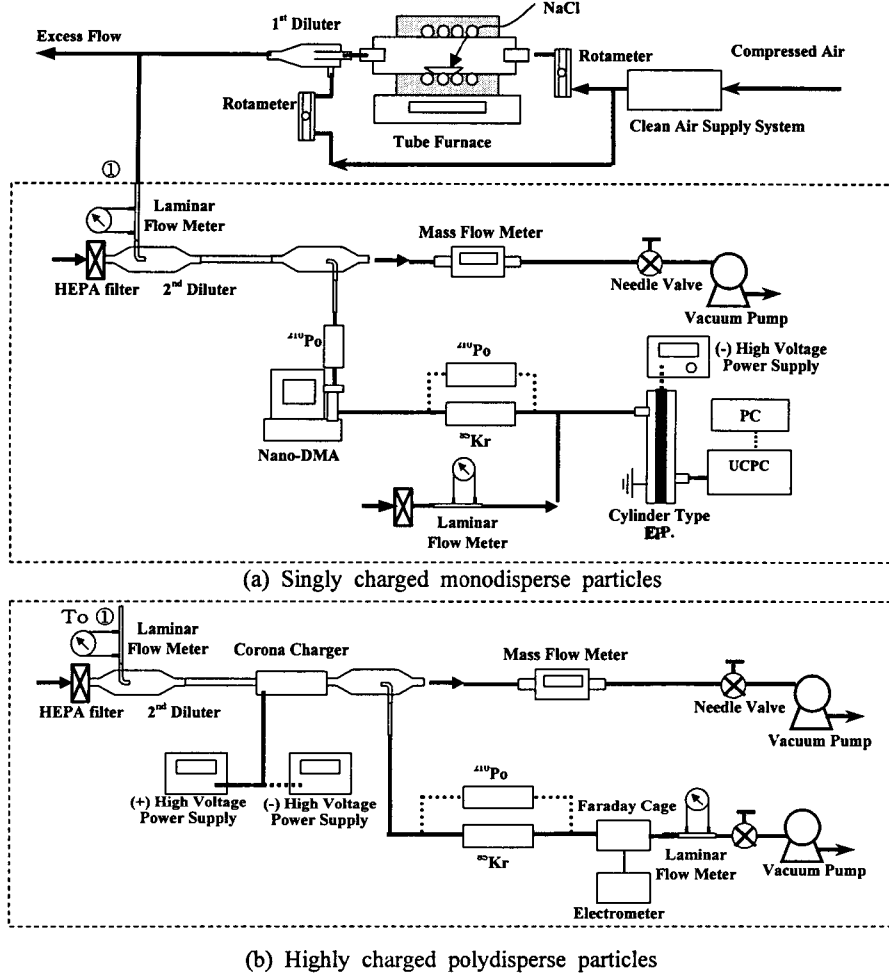


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system for performance test of aerosol charge neutralizers

(PID) 제어를 통해 일정하게 유지된다. 튜브로와 동일한 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 희석공기는 각각 2, 15 L/min으로 일정하게 설정하였다.

중화기내 체류시간에 따른 나노 입자에 대한 중화 효율을 평가하기 위해 Fig. 2(a)와 같은 실험장치를 구성하였다. 입자의 농도를 조절하기 위해 2개의 희석장치를 사용하였다. 튜브로에서

발생되는 입자는 10⁷개/cm³ 이상의 고농도이므로,⁽¹⁷⁾ 첫 번째 희석관에서 약 2/15로 희석시키더라도 농도가 매우 높다. 시험 조건인 약 10⁶개/cm³의 농도를 얻기 위해서 Fig. 2의 ① 위치에 두 번째 희석관을 설치했다. 고농도 에어로졸은 층류 유량계(laminar flow meter)를 거쳐 희석관에 유입되고, HEPA(high efficiency particulate air) 필터를 통과한 깨끗한 공기와 섞인다. 두 번째 희석관으로 희석된 시험 입자의 수농도는 약 3×10⁶개/cm³, 기하 평균 입경은 약 100 nm, 기하표준편차는 약 1.5이었다. 튜브로에서 발생된 소금 입자를 ²¹⁰Po 에어로졸 중화기와 나노 DMA(nano-DMA, nano-differential mobility analyzer, TSI

model 3085)로 3.5~50 nm의 단분산 입자를 분류하였다. 이때 나노 DMA로 분류된 입자는 모두 (+)1가로 하전된다.

중화기 통과유량의 영향을 살펴보기 위하여 단분산 에어로졸의 유량을 0.3~1.5 L/min으로 변화시켜 ^{85}Kr 또는 ^{210}Po 에어로졸 중화기를 통과시켰다. 원통형 집진기에 전압을 인가하지 않은 경우 모든 입자의 수농도와 (-)2 kV를 인가시켜 하전된 입자를 제거시키고 남은 중성 입자의 수농도를 응축핵 계수기(UCPC, ultrafine condensation particle counter, TSI model 3025)로 측정하였다. (-)2 kV를 인가한 경우 DMA에서 발생된 (+)1가로 하전된 50 nm 이하인 입자는 모두 제거되는 것을 확인하였다.

원통형 집진기의 통과유량과 UCPC의 흡인유량은 1.5 L/min으로 고정시켰고, 나노 DMA와 에어로졸 중화기의 통과유량과 원통형 집진기와 UCPC의 통과유량의 균형을 맞추기 위해 층류 유량계를 사용하였다.

3.3 코로나 방전에 의해 하전된 입자의 시험

코로나 방전에 의해 높게 하전된 다분산 입자에 대한 에어로졸 중화기의 중화효율을 평가하기 위해 Fig. 2(b)와 같이 실험장치를 구성하였다. 튜브로에서 기화-응축 과정을 거쳐 발생하는 소금 입자는 전하량이 거의 0에 가까운데, 이것은 발생된 입자의 대부분이 중성이기 때문이다.⁽¹⁸⁾ 거의 중성인 입자는 두 번째 회석관의 하류에 설치된 다이오드 방식의 코로나 하전기에 의해 양 또는 음으로 높게 하전된다. 하전기는 원통의 중심에 편이 설치된 구조이고, 직경 0.25 mm인 와이어 형태의 편에 고전압이 인가되고 외부 원통은 접지되었다. 편과 접지된 원통 내벽 사이의 거리는 20 mm이다. DC 전원 공급기는 정전압과 정전류 제어가 가능하고, 각각 -10 kV와 +10 kV까지 변화시킬 수 있는 두 개의 고전압 공급기를 사용했다. 모든 실험에서 하전기의 통과유량을 약 20 L/min으로 설정하였다.

코로나 하전기의 전압-전류 특성을 살펴보기 위해 전위계(electrometer, Keithley model 6517A)의 극미량 전류계 기능을 사용하여 코로나 전류를 측정하였다. Fig. 3은 하전기의 전류-전압 특성 곡선을 나타낸 것으로, 하전기의 코로나 개시전압이 약 (+)3 kV와 (-)3 kV임을 알 수 있다. 동일한

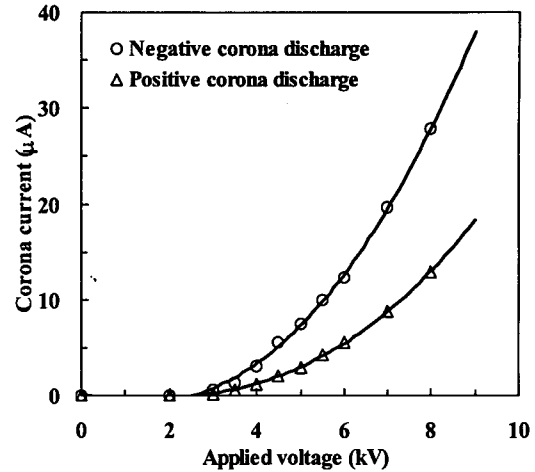


Fig. 3 I-V characteristic curves of a corona charger

인가전압에서 음의 코로나 방전의 경우 양의 코로나 방전에 비해 코로나 전류가 높다. 본 실험에서는 개시전압보다 높은 (+)4 kV와 (-)4 kV의 전압을 인가하여 입자를 양(+) 혹은 음(-)으로 하전시켰다.

두 번째 회석관의 코로나 하전기에 의해 하전된 입자를 포함한 공기의 일부는 에어로졸 중화기로 흡인했는데, 중화기의 통과유량을 0.2~2.5 L/min으로 변경시키면서 실험을 수행하였다. 입자가 ^{85}Kr 또는 ^{210}Po 에어로졸 중화기를 통과한 후, 하전된 입자의 전하량(전류)을 패러데이 케이지로 측정하여 평균 절대 전하량을 계산하였다. 전류는 하전된 입자가 전도성 유리섬유 재질의 HEPA 필터에 포집되는 순간 전위계로 측정된다.

코로나 하전기의 성능은 입자의 하전 정도를 파악할 수 있기 때문에 매우 중요하다. 코로나 하전기에서 하전 입자의 평균 전하수를 측정하기 위해 단분산 DOS(dioctyl sebacate) 입자를 사용한 추가적인 실험을 수행하였다. 액체인 DOS 용액을 기화-응축 방법으로 발생시킨 후,⁽¹⁹⁾ DMA(TSI model 3081)를 사용하여 단분산 입자를 크기별로 발생시켰다. 하전기를 통과하면서 코로나 방전에 의해 하전된 입자는 CPC(TSI model 3022A)와 자체 제작한 패러데이 케이지(Faraday cage)로 동시에 수농도와 대전량을 측정한 후, 입자당 전하수를 계산하였다.

4. 실험결과 및 토의

4.1 (+)1가인 단분산 나노 입자의 중화 특성

확산 하전이나 에어로졸 중화기의 성능을 평가하는 여러 연구에서 단분산 입자가 양극성 이온과 충돌하여 중화된 이후의 대전량 분포를 측정하였다. 특히, 평형 대전량 분포가 볼츠만 분포와 차이를 보이는 50 nm 이하인 입자에 대해 많은 연구가 수행되었다.^(3,9-13)

본 연구에서는 단분산 나노 입자에 대한 에어로졸 중화기의 중화 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 2(a)의 실험장치를 사용하여 단분산 입자를 발생시켰다. Nano-DMA를 통과하여 중화기의 입구에서 초기에 (+)1가로 하전된 단분산 입자는 중화기를 통과하면서 양극성 이온과 충돌하여 대전량 분포가 바뀐다. 입경별 대전량 분포를 살펴보기 위하여 중화기의 통과유량이 0.3~1.5 L/min 일 때 중화기를 통과한 전체 입자 중에서 중성 입자의 비율을 Fig. 4에 나타냈다. 입경에 따른 평형 대전량 분포를 나타내는 Wiedensohler⁽⁴⁾의 경험식을 Fig. 4에 함께 나타냈다.

⁸⁵Kr 중화기의 경우 통과유량이 0.3 L/min일 때 중화기를 거친 후 중성 입자의 비율은 Wiedensohler의 예측값과 거의 일치한다. 그러나, 유량이 0.6 L/min 이상으로 증가하면 중성 입자의 비율이 Wiedensohler의 예측값보다 낮다. 이것은 초기에 (+)1가로 하전된 단분산 입자가 충분히 중화되지 못하여 평형 대전량 분포에 이르지 못하는 것을 의미한다. 또한, ⁸⁵Kr 중화기의 통과유량이 0.5, 1.0, 2.0 L/min일 때 평형 대전량 분포를 만족하지 않는다는 Covert 등⁽¹⁾의 연구결과와 일치한다. 중화기의 통과유량이 1.0 L/min일 때 평형 대전량 분포와 가장 차이가 많이 나타났는데, 이것으로부터 중화기의 성능이 통과유량 이외에 내부 유동 형태 등에 의해 영향을 받는 것으로 추정된다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 ²¹⁰Po 중화기의 경우 통과유량이 1.5 L/min인 중화기 내 체류시간이 가장 짧은 경우에도 중성 입자의 비율이 Wiedensohler의 예측값과 일치하였고, 통과유량에 따른 차이는 나타나지 않았다. 이것으로부터 초기에 (+)1가로 하전된 단분산 입자가 ²¹⁰Po 중화기를 통과하면 충분히 중화되어 평형 대전량 분

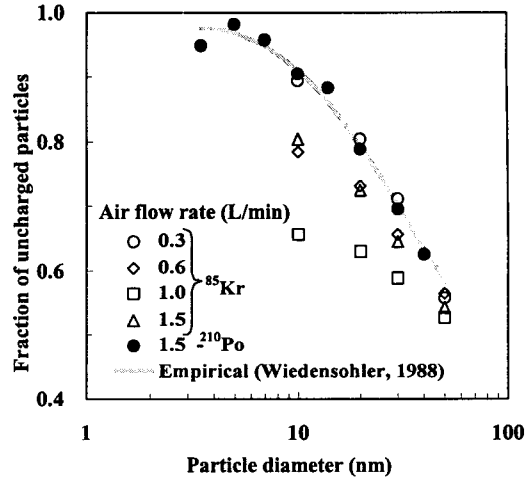


Fig. 4 Fraction of uncharged particles for monodisperse particles passing through an aerosol charge neutralizer

포를 만족한다고 판단된다. 0.3 L/min으로 낮은 통과유량에서 ⁸⁵Kr 중화기와 ²¹⁰Po 중화기의 에어로졸 중화성능은 우수하다. 그런데, 통과유량이 증가하면 ²¹⁰Po 중화기의 중화성능은 거의 변하지 않지만, ⁸⁵Kr 중화기의 중화성능이 나빠짐을 알 수 있다.

4.2 코로나 방전으로 하전된 입자의 중화 특성

DMA에서 분리되는 단분산 입자의 경우 입경이 커지면 이온들과의 충돌확률은 증가하지만, 분류된 입자가 대부분 (+)1가로 하전되어 있기 때문에 초기 하전량이 미치는 영향은 줄어든다. 그러므로, Fig. 4에서 보는 바와 같이 중화기의 통과유량이 증가하더라도 입경이 크면 중성 입자의 비율이 Wiedensohler의 결과와 비슷하게 나타난다. 그런데, 입자가 코로나 방전에 의해 단극성으로 높게 하전되면, 입자가 평형 대전량 분포에 도달하기 위해서 이온 농도가 높아야 하고, 중화기내 체류 시간도 길어야 한다. 그렇지 않으면, 단극성으로 높게 하전된 입자는 중화기를 통과한 후 평형 대전량 분포에 이르기 어렵다.

Fig. 5는 하전기의 통과유량이 20, 30 L/min인 경우 인가전압이 (+)4, (+)5, (+)6 kV일 때 입자당 평균 절대 전하수를 나타낸 것이다. 인가전압이 증가하면 하전기를 통과한 입자의 전하수는 증가하고, 하전기의 통과유량이 증가하면 입자당 전하수는 약간 감소한다. 하전기의 통과유량이 20

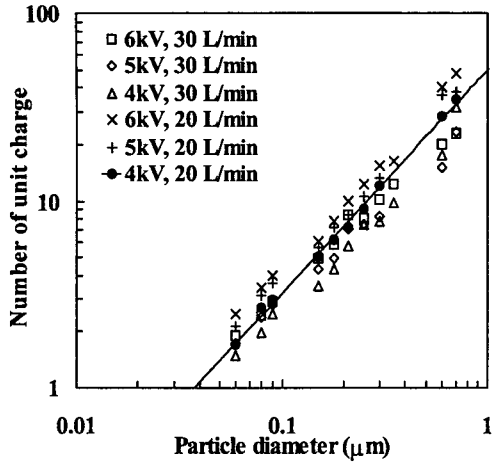


Fig. 5 Number of unit charges per particle for positive corona discharge

L/min이고, 인가전압이 (+)4 kV인 경우 0.09 μm 입자가 하전기를 통과한 후 얻은 입자당 평균 전하수는 약 2.9개이고, 0.25 μm인 경우 9개 정도였다. 이것은 동일한 입경에서 볼츠만 평형 대전량 분포를 갖는 입자의 절대 평균 전하수인 0.2개, 0.6개보다는 10배 이상 크고, 평형 대전량 분포의 양극성 입자와는 달리 같은 극성을 갖는 단극성 입자이다. 다분산 시험입자의 기하 평균 입경에 가까운 0.09 μm인 입자가 평형 대전량 분포를 만족하려면, 평균 전하수가 2.9인 10개의 입자가 에어로졸 중화기를 통과한 후 8개는 중성으로 나머지 2개는 각각 (+)1가와 (-)1가로 바뀌어야 한다.

Fig. 6은 통과유량에 따른 중화기를 통과한 전체 다분산 입자의 단위 체적당 전하량을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 단위 체적당 전하량은 중화기를 통과한 공기 1 cm³에 포함된 입자가 운반하는 총전하량을 의미한다. 즉, 패러데이 케이지를 통과한 하전 입자의 전류를 통과유량으로 나눈 값으로 식 (3)과 같다.

$$\text{charge amount per volume} = \frac{q}{V} = \frac{I}{Q} \quad (3)$$

여기서, q 는 입자가 운반하는 절대 전하량, V 는 패러데이 케이지를 통과하는 공기의 체적, I 는 패러데이 케이지를 통과하는 하전 입자에 의한 전류, Q 는 패러데이 케이지의 통과유량이다.

⁸⁵Kr 중화기의 경우 양(+)으로 하전된 입자가

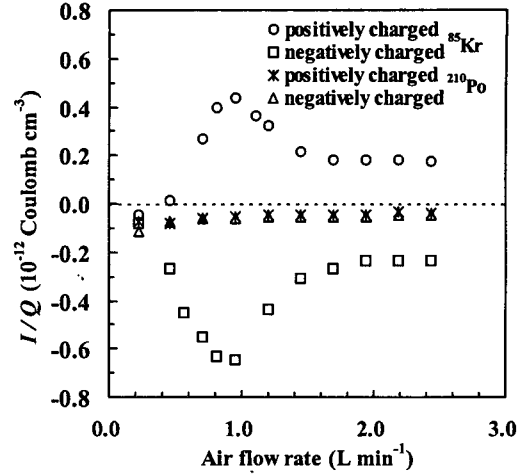


Fig. 6 Absolute charge amounts of charged particles per unit air volume passing through an aerosol neutralizer

중화기를 통과한 후에도 평균 절대 전하량이 양으로 치우쳐 있고, 음(-)으로 하전된 입자는 중화기를 통과한 후에도 음으로 치우쳐 있다. 이것은 중화기를 통과한 입자의 대전량 분포가 정규분포에 가까운 평형 대전량 분포에 이르지 못하고, 평균 절대 전하량이 (+)나 (-)로 치우쳐 나타나는 비평형 상태이기 때문이다. ⁸⁵Kr 중화기의 경우 통과유량이 약 0.2 L/min인 경우를 제외하면 입자의 상당량이 중화기를 통과한 이후에도 초기 전하량이 상쇄되지 않은 상태로 남아있다. 특히, 입자가 코로나 방전에 의해 양(+) 또는 음(-)으로 높게 하전된 경우 중화기의 통과유량이 약 1.0 L/min일 때 평형 대전량 분포의 절대 전하량과 차이가 가장 크게 나타났다.

반면 ²¹⁰Po 중화기의 경우 전하량이 모든 유량 조건에서 약간 음으로 치우쳐 나타나는데, 이것은 평형 대전량 분포에서 입자가 음으로 하전될 확률이 양으로 하전될 확률보다 약간 높기 때문이다.⁽²⁻⁴⁾ 통과유량이 0.2~2.5 L/min 범위일 때 입자가 ²¹⁰Po 중화기를 통과하는 경우 입자의 대전량 분포는 평형 대전량 분포를 만족할 것으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 양극성 하전기인 에어로졸 중화기의 입자 하전 특성을 실험적으로 살펴보았다.

즉, (+1)가로 하전된 나노미터 크기의 단분산 입자와 코로나 방전에 의해 높게 하전된 다분산 입자를 대상으로 중화기를 통과한 후 입자의 대전량 분포가 평형 대전량 분포에 도달하는지 조사하였다. 이러한 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 중화기의 통과유량이 0.3~1.5 L/min 범위일 때 3.5~50 nm인 (+1)가로 하전된 단분산 입자가 ^{210}Po 에어로졸 중화기를 통과하는 경우 전체 입자에서 중성 입자가 차지하는 비율은 평형 대전량 분포와 비슷하다. 그러나, ^{85}Kr 에어로졸 중화기의 경우 통과유량이 0.6 L/min 이상으로 높으면 중성 입자의 비율이 감소하는 비평형 특성이 나타난다. 이때 단분산 입자의 크기가 작을수록 비평형 특성이 크게 나타나고, 중화기의 통과유량이 1.0 L/min일 때 입자의 중화효율이 가장 낮다.

(2) 중화기의 통과유량이 0.2~2.5 L/min 범위일 때 코로나 방전에 의해 양(+) 또는 음(-)으로 높게 하전된 입자가 ^{85}Kr 에어로졸 중화기를 통과하면 0.2 L/min으로 유량이 낮은 경우를 제외하고 입자가 완전히 중화되지 못하여 평형 대전량 분포를 나타내지 않으며, 양 또는 음으로 하전된 입자의 비율이 매우 높다. 특히, 중화기의 통과유량이 약 1.0 L/min일 때 비평형성 특성이 가장 크게 나타나는데, 이것은 중화기 내부에서 이온과 입자간의 충돌 확률이 중화기의 통과유량뿐만 아니라 용기의 내부 유동형태 등에 의해 영향을 받기 때문인 것으로 추정된다. 그러나, ^{210}Po 에어로졸 중화기의 경우 통과유량에 무관하게 코로나 방전에 의해 높게 하전된 입자를 거의 평형 대전량 분포와 비슷한 상태로 중화시킨다.

결론적으로 말하면, ^{85}Kr 에어로졸 중화기(TSI model 3077)의 경우 통과유량, 입자의 대전량에 따라 중화성능이 달라지지만, 비슷한 구조의 ^{210}Po 에어로졸 중화기의 경우 이들 변수에 거의 무관하게 좋은 중화성능을 나타낸다고 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Covert, D., Wiedensohler, A., and Russell, L., 1997, "Particle Charging and Transmission Efficiencies of Aerosol Charge Neutralizers," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 27, pp. 206-214.
- (2) Hoppel, A. and Frick, G. M., 1986, "Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-Stage Charge Distributions on Aerosols in a Bipolar Ion Environment," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 5, pp. 1-21.
- (3) Fuchs, N. A., 1964, *The Mechanics of Aerosols*, Pergamon Press, Oxford.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Hoppel, A. and Frick, G. M., 1990, "The Nonequilibrium Character of the Aerosol Charge Distributions Produced by Neutralizers," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 12, pp. 471-496.
- (7) Kousaka, Y., Adachi, M., Okuyama, K., Kitada, N., and Motochi, T., 1983, "Bipolar Charging of Ultrafine Aerosol Particles," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 2, pp. 421-427.
- (8) Liu, B. Y. H. and Pui, D. Y. H., 1977, "On Unipolar Diffusion Charging of Aerosols in the Continuum Regime," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 58, pp. 142-149.
- (9) 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.
- (10) Liu, B. Y. H. and Pui, D. Y. H., 1986, "Aerosol Charging and Neutralization and Electrostatic Discharge in Clean Rooms," *The J. Environmental Sci.*, Vol. 33, pp. 42-46.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 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. Tech.*, Vol. 11, pp. 144~156.
- (16) Hinds, W. C., 1999, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons, Inc.
- (17) Ji, J. H., Pae, Y. I., Hwang, J., and Bae, G. N., 2002, "Size Distributions of Micro/Nano Meter Sized NaCl Particles Generated from an Electrically Heated Tube Furnace," *Proceedings of the KSME 2002 Spring Annual Meeting B*, pp. 1232~1237.
- (18) Baumgartner, H. and Loeffler, F., 1986, "Particle Collection in Electret Fibers Filters: A Basic Theoretical and Experimental Study," *Filtration and Separation*, Sep./Oct., pp. 346~351.
- (19) Ji, J. H., Bae, G. N., and Hwang, J., 2003, "Effect of Particle Clogging in Orifices on the Particle Collection Efficiency of a Micro-Orifice Impactor," *KSME Journal B*, Vol. 27, pp. 197~205.