

분무 및 코로나 방전에 의해 대전된 서브마이크론 입자의 대전량 분포

이재복* · 배귀남** · 황정호*** · 이규원****
(2000년 9월 1일 접수)

Charge Distribution of Submicron Particles Charged by Spray Electrification or Corona Discharge

Jae-Bok Lee, Gwi-Nam Bae, Jung-Ho Hwang and Kyoo-Won Lee

Key Words: Charge Distribution(대전량 분포), Spray Electrification(분무 대전), Bipolar Ionization(양극성 이온화), Corona Discharge(코로나 방전)

Abstract

This paper reports on the charge distribution measurements of submicron particles for three different charging mechanisms, which are spray electrification, bipolar ionization and corona discharge process, respectively. The number of elementary charges per particle was investigated by classifying and counting of a discrete mobility class. Charge distribution measurements were performed with NaCl particles generated from a collision atomizer for 0.01, 0.1, 1% NaCl solutions. Experimental results show that charge level of atomized NaCl particles is high and decreases with increasing the dissolved ion concentration. The charge level of the atomized NaCl particles can be reduced to that of Boltzmann equilibrium conditions by the bipolar ionization(Po²¹⁰ bipolar ionizer). The charge level on NaCl particles passing through the corona discharge reactor is much higher than those of atomized or bipolar ionized NaCl particles. The evaluation of these measurements results in charge distribution of the submicron particles.

기호설명

C_c : 미끄럼 보정 상수
 D_p : 입자 크기 [μm]
 E : 전기장 세기 [V/cm]
 e : 기본 전하량(C)

N : 대전 입자의 농도 [개/cm^3]
 N_{Dp} : 크기 D_p 인 대전 입자의 농도
 $N_{Dp,n}$: 크기 D_p , 하전수 n 인 입자의 농도
 n : 하전수
 n_{ave} : 절대 평균 하전수
 n_{rms} : 제곱근 평균 하전수

$$\left[\sum_{n=0}^{\infty} 2(n \times N_{Dp,n})^2 \right]^{1/2} / N$$

* 연세대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터
*** 회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159
**** 회원, 광주과학기술원 환경공학과

Q_{clean} : 청정 공기 유량 [cm^3/sec]
 Q_{poly} : 다분산 입자의 공기 유량 [cm^3/sec]
 Q_{mono} : 단분산 입자의 공기 유량 [cm^3/sec]
 V : DMA 인가 전압[V]

Z_p : 전기 이동도[m²/V · sec]

그리스문자

μ : 공기의 점성 계수[g/cm · sec]

σ_g : 기하학적 표준편차

1. 서 론

에어로졸 입자의 거동을 지배하는 여러 메커니즘 중 대전 입자의 전기적 이동은 다른 메커니즘에 비해 입자의 거동에 미치는 영향이 크다. 입자의 전기적 이동은 전기장이나 입자의 대전량에 좌우된다. 입자의 대전은 공학적으로 긍정적인 면과 부정적인 면을 갖고 있다. 예를 들어 정전 필터나 전기 집진기 등의 경우, 입자의 대전량이 클수록 입자가 잘 포집된다. 반면에 대전된 입자를 샘플링할 경우 입자가 관 벽면에 부착하여 샘플링 오차를 유발한다. 대전량은 측정 방식에 따라 절대 전하(absolute charge)와 전기적 이동도(electrical mobility)로 표현된다. 전자는 입자의 중성 상태에서 전하가 과잉되거나 부족한 상태를 의미하며, 후자는 단위 전기장 강도에 대한 입자의 이동 속도(drift velocity)이다. 이 두 가지 물리량을 측정하기 위하여 여러 연구자들이 입자의 대전량 측정 방법들을 개발하였다.

입자의 절대 대전량을 측정하는 정적(static) 방법으로 Krupa and Jaworek⁽¹⁾가 대전된 액적이 감지부에 부착되면 전하를 잃는 원리를 이용하여 정밀도가 10⁻¹⁴(Coulomb)인 포집용 전극 와이어를 사용하는 방법을 고안하였다. 그러나 이러한 정적 방법은 몇 가지 문제점이 있다. 첫째, 대전된 입자 뿐만 아니라 이온의 부착에 의해서도 대전량의 증가가 감지되며, 포집 전극에 부착된 입자가 쌓이게 되면 이로부터 역대전하가 발생할 수 있다. 둘째, 포집 전극에 부착되고 있는 입자와 포집 전극에서 전하를 잃고 비산되는 입자의 신호가 중복되는 오차가 생길 수도 있다. 이러한 이유들로 대전 극성이 같은 단극성(unipolar) 입자의 평균 대전량에 대한 정보를 얻는데 주로 사용된다.

이에 반해 전기장 내에서 입자의 거동을 측정하는 동적(dynamic) 방법은 입자의 대전량을 직접 측정하지 않고, 입자의 전기 이동도(electrical mobility)를 측정하는 방법이므로 입자의 손실이 거의 없으며, 대전량 외에 다른 물리량에 대해 유동

중의 연속적인 측정이 가능하다는 장점이 있다. 최근 들어 DMA(differential mobility analyzer)를 사용하는 방법이 주로 많이 시도되었다. Biermann 등⁽²⁾과 Emets⁽³⁾는 전기 이동도와 광학적 입경의 2차원 측정을 통해 입경 및 대전량을 동시에 측정하는 방법을 고안한 바 있다. Patschull과 Roth⁽⁴⁾는 DMA를 이용해 전기 이동도의 크기가 같은 입자군 중 대전량에 따라 크기가 서로 다르다는 것에 착안해 크기가 0.03~0.2 μ m 범위인 디젤 엔진에서 배출되는 입자상 물질(PM, Particulate Matter)의 대전량을 측정했다. Forsyth 등⁽⁵⁾은 대전량 분석기 내에서 집진된 입자의 크기별 집진 효율 및 전압의 변화에 따른 적합(fitting) 함수를 통해 크기가 0.1 μ m 이상인 입자의 대전량을 측정하는 방법을 고안했다. 한편, DMA를 사용해 대전량을 측정하는 방법에도 단점이 있는데, 그 중 하나는 크기가 매우 작은 나노 입자들의 경우 확산에 의한 손실이 크다는 것이다. 그러나, 최근 개발된 나노 DMA의 사용으로 이러한 손실도 거의 무시될 수 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 TDMA(tandem differential mobility analyzer)와 CPC(condensation particle counter)만을 사용하여 1 μ m 이하 입자의 대전량에 대한 정보를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이를 위해 0.01, 0.1, 1% 농도의 NaCl 용액에 대하여 충돌 분무기를 통해 생성되는 NaCl 입자의 대전량, 이를 양극성(bipolar) 이온화기(방사선 중화기; Po²¹⁰ 혹은 Kr⁸⁵)를 통과시킨 후의 중화된 대전량, 그리고 다시 코로나 방전기를 통과한 후의 대전량을 측정하였다. 그리고, 기존의 이론 및 실험 결과와의 비교를 통해 TDMA를 이용한 대전량 측정이 서브 마이크론 입자에 대해 잘 적용할 수 있는지를 고찰했다.

2. 이 론

2.1 입자의 대전 과정

대부분의 입자는 생성 과정에 따라 다양한 메커니즘에 의해 대전된다. 그 예로 액적이 형성될 때 액체 표면층이 파괴되면서 대전되는 분무 대전(spray electrification), 기계적인 마찰이나 접촉에 의한 마찰 대전(tribo electrification)이 있으며, 이 외에 이온의 생성 과정으로서 단극성 이온을 생성하는 코로나 방전(corona discharge)과 연소 중에 화염 내에서 이온이 생성되는 과정인 화염 이온화(flame ionization)등이 있다.⁽⁷⁾

분무 대전의 경우 용해된 이온 농도가 분무된 액적의 쌍극층(dipole layer) 형성에 영향을 미치므로, 용액의 농도에 따라 분무 과정 후 생성된 입자의 대전량 분포가 달라진다. Forsyth 등⁽⁵⁾에 의하면, 다른 조건이 동일할 경우 NaCl 용액의 농도가 증가할수록 대전량이 감소한다.

코로나 방전에 의한 대전은 크게 확산(diffusion) 대전과 전기장(electric field) 대전으로 구분되지만, 일반적으로 두 대전 메커니즘이 복합적으로 작용한다. 이온의 불규칙한 충돌로 인해 대전되는 확산 대전은 외부의 전기장을 필요로 하지 않으며, 입자에 전하가 축적됨에 따라 주위 이온을 밀어내는 전기장이 생겨 이온이 입자에 도달하는 비율이 적어진다. 전기장 대전은 인가된 전기장에 의해 이동된 이온에 의한 대전이며, 입자에 축적된 이온에 따라 전기장이 변하기도 한다. 확산 및 전기장 대전에 관한 이론은 많이 알려져 있다.⁽⁸⁾

한편, 대전량이 큰 입자는 양극성 이온화기(방사선 중화기; Po²¹⁰ 혹은 Kr⁸⁵)를 통해 중화시킬 수 있다. 양극성 이온화기를 통과하는 입자들은 양극성 이온들과 임의적으로 충돌하여 양극성으로 평형 상태가 된다. 이러한 평형 상태에서 양/음으로 대전된 입자 분포는 볼츠만 식으로 표현된다.⁽⁷⁾

2.2 DMA를 이용한 입자의 대전량 측정

DMA는 내부 원통과 외부 원통 사이에 작용하는 전기장에 의해 전하를 띤 입자가 전기력을 받으면 입자의 극성에 따라 원통의 내부 방향 혹은 외부 방향으로 움직이는 원리를 이용하여, 전기 이동도가 같은 입자들을 분리하는 기기이다.⁽⁹⁾ 입자의 전기 이동도(Z_p)는 입자의 횡방향 속도와 전기장의 비인 v_p/E 로 정의되고, 이는 전하수, 미끄럼 보정 상수(C_c) 및 입경의 함수로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Z_p = ne \frac{C_c}{3\pi\mu D_p} \sim n_i \frac{C_c^i}{D_p^i} \Big|_{i=1,2,3,\dots} \quad (1)$$

여기서 n 은 입자 하전수, D_p 는 입자 크기를 의미한다. 그리고 우변에서 i 가 다르더라도 Z_p 는 같을 수 있음을 의미한다. 한편, Fig. 1의 형상을 갖는 DMA의 설계 치수에 대한 입자의 전기 이동도는 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁰⁾

$$Z_p = \frac{\left[Q_{clean} + \frac{1}{2}(Q_{poly} - Q_{mono}) \right] \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi VL} \quad (2)$$

이때, Q_{clean} , Q_{poly} , Q_{mono} 는 각각 청정 공기, 다분산(polydisperse) 입자, 단분산(monodisperse) 입자가 유입되는 공기 유량을, V 는 DMA에 인가된 전압을 의미한다. DMA의 치수, 유량이 결정되면 인가 전압을 변화시켜 동일한 전기 이동도를 갖는 입자를 분류할 수 있다.

2.3 TDMA를 이용한 입경 및 대전량 측정

식 (1)에서 보는 바와 같이 전기 이동도는 입경과 대전량의 함수이므로, 이러한 분류를 통해서 입자의 입경을 정확히 알 수 없다. 즉, 분류된 입자 중에는 대전량에 따라 입경이 다른 입자들이 함께 존재한다. TDMA 방식을 통해, 첫 번째 DMA(1st DMA)는 전기 이동도 별로 입자들을 분리하며, 대전 입자를 중화시킨 후 사용되는 두 번째 DMA(2nd DMA)에서는 입경 분포를 측정한다. 즉,

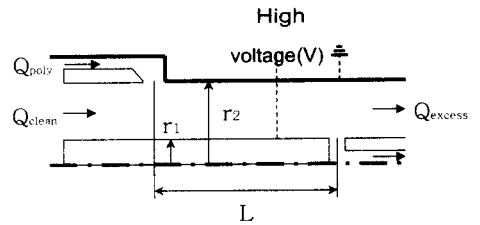


Fig. 1 Schematic diagram of DMA

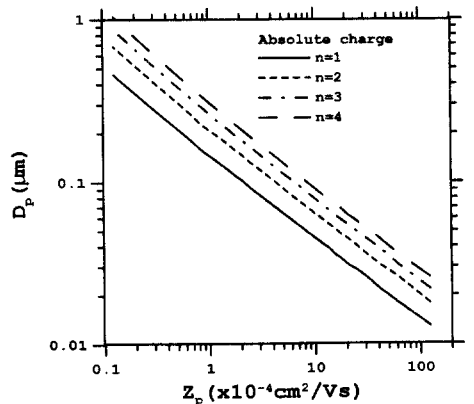


Fig. 2 Different particle diameters for the same mobility

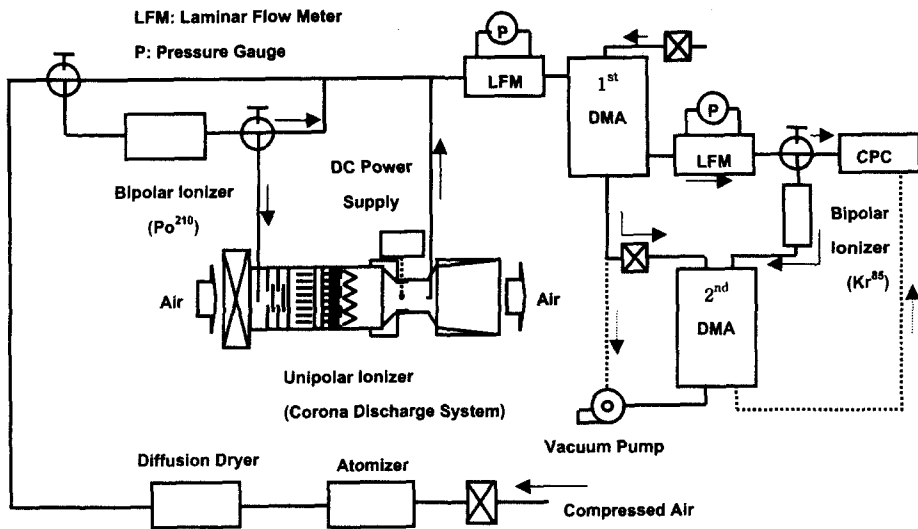


Fig. 3 Experimental set-up

첫 번째 DMA를 통과한 입자들은 같은 전기 이동도를 갖지만, 식 (1)에 나타낸 것처럼 입자의 크기에 따라 서로 대전량이 다르며, 두 번째 DMA에서 입자의 크기를 알 수 있으므로, 각 입경별 대전량을 구할 수 있다. Fig. 2는 첫 번째 DMA를 통과한 입자의 전기 이동도에 대해 하전수($i = 1, 2, 3, \dots$) 별로 입자의 이론적 크기를 나타낸 것이다.

3. 실험

본 연구에서는 대전 메커니즘에 따른 입자의 대전량을 측정하기 위해 Fig. 3의 실험 장치를 구성했다. 시험 입자로 충돌 분무기에 의해 생성되는 서브 마이크로 크기의 NaCl 입자를 선정했다.⁽¹⁰⁾ NaCl 입자는 충돌 분무 과정 중에 볼츠만 평형 대전량 분포보다 높게 대전된다고 알려졌다.⁽¹¹⁾ 충돌 분무에 의해 생성된 NaCl 입자는 방사능 물질 (Po^{210})이 들어있는 양극성 이온화기(bipolar ionizer)를 통과하면 이론적으로 볼츠만 평형 대전량 분포를 갖게 된다. 한편, 단극성 이온화기인 코로나 방전부를 통과하는 NaCl 입자는 단극성 이온에 의해 대전량이 증가한다. 이러한 3가지 대전 메커니즘에 따른 실험 장치의 구성은 다음과 같다.

(1) 분무 대전(spray electrification)

분무기(NaCl 입자 발생) - 1st DMA - bipolar ionizer(Kr^{85}) - 2nd DMA - CPC

(2) 양극성 대전(bipolar ionization)

분무기(NaCl 입자 발생) - bipolar ionizer(Po^{210}) - 1st DMA - bipolar ionizer(Kr^{85}) - 2nd DMA - CPC

(3) 단극성 대전(unipolar ionization)

분무기(NaCl 입자 발생) - bipolar ionizer(Po^{210}) - unipolar ionizer(corona discharge) - 1st DMA - bipolar ionizer(Kr^{85}) - 2nd DMA - CPC

이러한 세 가지 하전 메커니즘을 통해 대전된 NaCl 입자는 첫 번째 DMA에서 인가 전압에 따른 전기 이동도 분포와 두 번째 DMA에서의 입경 분포 측정을 통해 입경 별 대전량 분포를 알 수 있다. 입경 분포 측정은 DMA(2nd)와 CPC(TSI 3022A)로 구성되는 SMPS(scanning mobility particle sizer)를 사용했다.

NaCl 용액은 0.01, 0.1, 1%를 사용했으며, 코로나 방전은 한 개의 와이어와 두 개의 접지판으로 구성된 전형적인 선-판 형태로 접지판 간의 거리 및 접지판의 길이는 각각 5cm이다.⁽¹²⁾ 입자가 양극성으로 대전되는 경우 첫 번째 DMA의 인가 전압을 양/음으로 인가하여 대전량을 비교했다. 양의 코로나 방전기를 통과하는 경우 단극성(+)으로 대전되

므로, 첫 번째 DMA에 음(-)의 전압만 인가하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 NaCl 용액의 농도에 따른 대표 입경(GMD; geometric mean diameter), 기하학적 표준 편차(σ_g) 및 전기 이동도($n = 1$ 인 경우)를 나타낸 것이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 분무 대전

Fig. 4는 0.01%와 1% NaCl 용액에 대해 충돌 분무에 의해 대전된 NaCl 입자의 전기 이동도 분포를 나타낸 것이다. Table 1에 나타낸 바와 NaCl 용액의 농도가 증가하면 생성된 NaCl 입자의 크기(대표 입경, GMD)는 증가하고, 대표 입경의 입자가 단일 전하를 띄고 있다고 가정한 전기 이동도는 감소한다. Fig. 4를 보면, NaCl 용액의 농도가 동일한 경우 전기 이동도에 따른 농도 분포는 1st DMA 인가 전압의 극성에 무관하게 유사하다. 이로부터 분무 대전된 입자는 거의 대칭적인 양극성 대전량 분포를 나타낸다고 생각된다.

Fig. 4에서 보인 전기 이동도 분포 중 임의의 Z_p 에 해당하는 입자는 입경에 따라 n 개의 전하를 가질 수 있다. 즉, 첫 번째 DMA의 특정 인가전압에 대해 두 번째 DMA에서 입경 분포를 측정하면, 식 (1) 및 Fig. 2의 관계에 의해 입자의 대전량을 알 수 있다. Fig. 5는 1% NaCl 용액으로부터 충돌 분무에 의해 생성된 NaCl 입자를 대상으로 측정된 하전수($n = 1, 2, \dots$)에 따른 입경 별 대전량 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5를 보면, 하전수가 한 개인 경우($n = 1$)의 입자 농도가 가장 높고 $n = 2, 3, 4$ 의 순서로 농도가 낮아진다. 이것은 입경이 클수록 하전수가 한 개 이상일 확률이 증가함을 의미한다. 본 실험에서 사용한 0.01% 및 0.1% NaCl 용액의 경우에도 Fig. 5와 유사한 경향을 나타냈다.

Table 1 Characteristics of NaCl particles generated by an atomizer

Concentration of NaCl solution(%)	0.01	0.1	1
GMD(nm)	33	49	68
σ_g	1.38	1.46	1.53
$Z_p(m^2/V \cdot s)$	2.2×10^{-3}	9.7×10^{-4}	5.3×10^{-4}

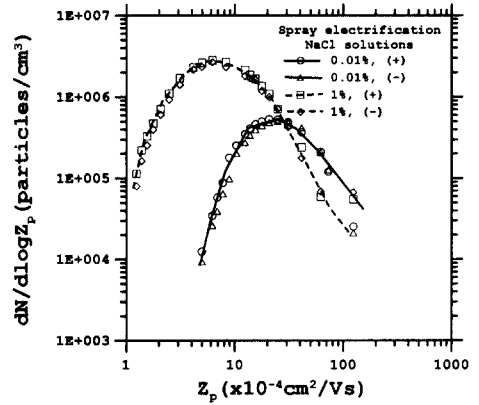


Fig. 4 Mobility distribution on NaCl particles after spray electrification

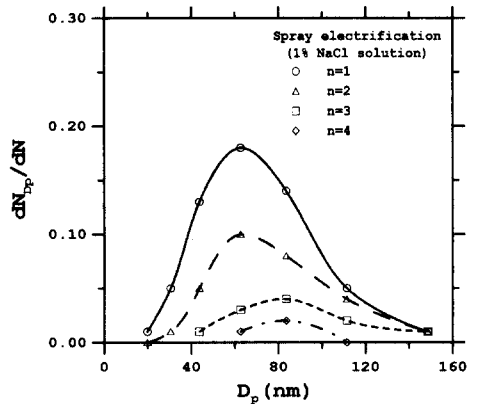


Fig. 5 Charge number distributions on NaCl particles after spray electrification

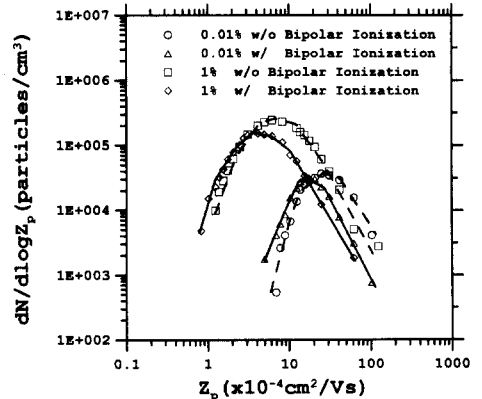


Fig. 6 Mobility distribution on NaCl particles after bipolar ionization

4.2 양극성 대전

Fig. 6은 0.01, 1% NaCl 용액에 대해 충돌 분무에 의해 대전된 NaCl 입자와 이에 추가로 양극성 이온화기를 통과시켜 중화된 NaCl 입자의 전기 이동도 분포를 비교하여 나타낸 것이다. 양극성 이온화기를 통과하면 NaCl 입자의 전기 이동도는 약간씩 감소한다. 이는 충돌 분무에 의해 대전된 입자가 양극성 중화기를 통과하면서 양/음이온에 의해 중화되어 입자의 분무 대전에 비해 전체적인 대전량이 감소했기 때문이다.

Fig. 7은 1% NaCl 용액으로부터 생성된 NaCl 입자가 추가적으로 양극성 이온화기를 통과한 후 입경 별 대전량 분포를 나타낸 것이다. 분무 대전(Fig. 5)에 비해 전체 농도 중 하전수가 한 개($n =$

1)인 입자의 농도가 증가했으며, $n = 2, 3$ 의 농도는 감소하고, $n = 4$ 에 해당하는 입자는 거의 없다. 한편 Fig. 8은 Fig. 5와 7의 결과를 정리하여 충돌 분무 대전 및 양극성 이온화기를 통과한 후의 NaCl 입자에 대해 입경 별 대전량 분율을 비교한 것이다. 두 경우 모두, 입경이 증가할수록 하전수가 $n = 1$ 인 분율이 감소하고, $n = 2$ 의 분율이 증가한다. 또한 양극성 이온화기를 통과하지 않은 NaCl 입자의 대전 분율이 양극성 이온화기를 통과한 경우보다 $n = 1$ 에 대해서는 더 낮은 반면에, $n = 2, 3$ 에 대해서는 더 높다. 이로부터 충돌 분무에 의해 대전된 NaCl 입자가 양극성 이온에 의해 중화되면서 전체적인 대전량이 낮아진다는 것을 알 수 있다.

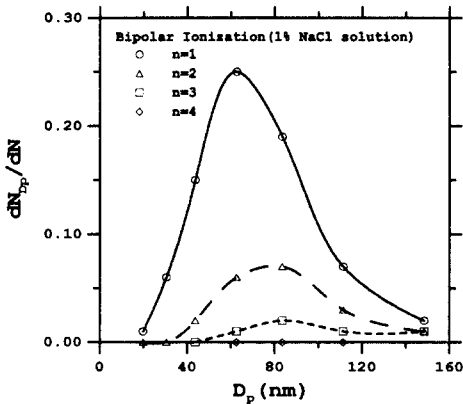


Fig. 7 Charge number distributions on NaCl particles after bipolar ionization

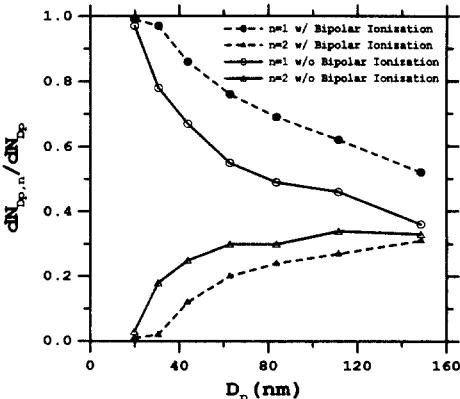


Fig. 8 Comparisons of charged fractions between w/ and w/o bipolar ionization(1% NaCl solution)

4.3 단극성 대전(코로나 방전)

Fig. 9는 1% NaCl 용액으로 충돌 분무에 의해 생성된 NaCl 입자가 양극성 중화기를 통과하여 중화된 후, 다시 코로나 방전부를 통과하는 경우로 코로나 방전부 내에서 방전 전압에 따른 전기 이동도 분포의 변화를 나타낸 것이다. 충돌 분무에 의해 생성된 NaCl 입자는 양극성 이온화기를 통과하면서 양/음이온에 의해 중화되어 대전량이 약간 감소하지만(Fig. 6), 코로나 방전부를 통과하면서 방전된 많은 단극성 이온에 의해 대전량이 증가되는 것을 알 수 있다(Fig. 9). 특히 코로나 방전이 없는 경우(0 kV) 넓게 분포하였던 NaCl 입자의 전기 이동도는 코로나 방전이 생기면 좁게 분포하고, 중성이었던 입자가 대전되므로 대전된 입자의 농도도 증가한다. 방전 전압(코로나 개시 전압은 약 8kV)이 증가하면 최대 농도는 비슷하고 평균 전기 이동도가 증가하는데, 방전 전압이 11kV 이상이 되면 입자의 전기 이동도 분포는 거의 비슷해진다.

Fig. 10은 하전수에 따른 입경별 대전량 분포를 나타낸 것으로 충돌 분무 및 양극성 이온화기의 경우(Fig. 5, 7)와 크게 다르다. 입경이 작은 경우 대전량이 적은 입자($n = 1, 2$)가 대부분이지만, 입경이 증가함에 따라 대전량이 많은 입자의 농도가 증가함을 알 수 있다. 즉, 충돌 분무 대전과 양극성 대전의 경우 하전수가 한 개($n = 1$)인 입자의 농도가 가장 높았던 반면에, 단극성 이온만 다량 생성되는 코로나 방전의 경우 입경이 커질수록 대전량이 크게 증가한다. 이것은 대전량이 입경에 비례한다는 전기 집진기 내에서의 대전 이론과도 잘 일치한다.⁽⁸⁾

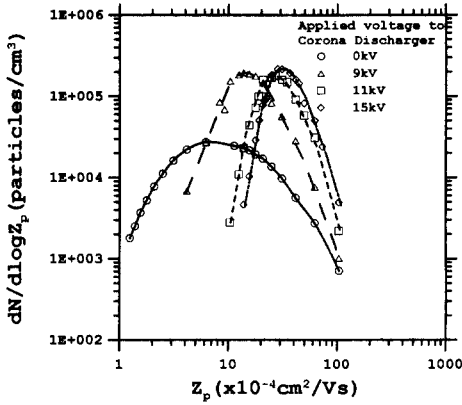


Fig. 9 Mobility distribution on NaCl particles after corona discharge

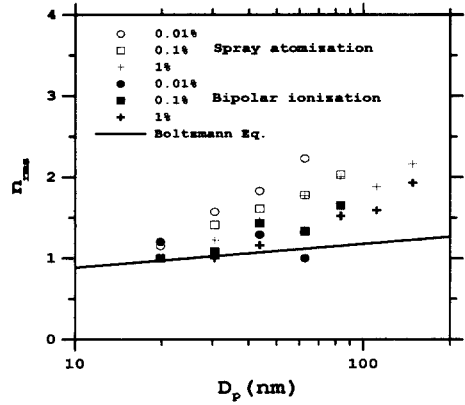


Fig. 11 Charge level on NaCl particles after spray electrification or bipolar ionization

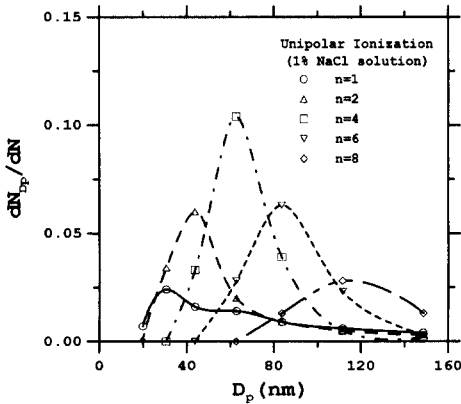


Fig. 10 Charge number distributions on NaCl particles after unipolar ionization

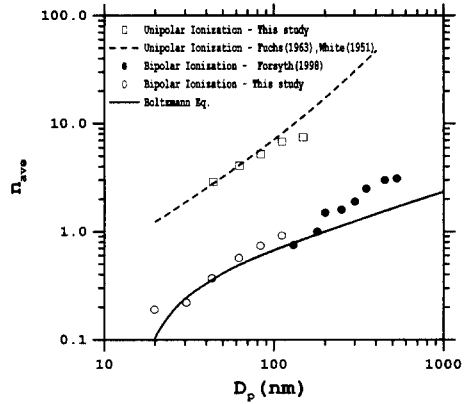


Fig. 12 Charge level on NaCl particles after bipolar or unipolar ionization

4.4 타 연구 결과와의 비교

Fig. 11은 충돌 분무 대전량과 양극성 이온화기를 통과한 후의 대전량의 rms(root mean square)값을 볼츠만 이론식과 비교하여 나타낸 것이다. 입경이 클수록 분무에 의한 입자의 대전량은 증가하고, 충돌 분무에 의해 대전된 입자가 양극성 이온화기를 통과하면 대전량이 약간 감소함을 알 수 있다. NaCl 용액의 농도가 감소할수록 입자의 대전량이 증가하는데, 이것은 용해된 이온 농도가 감소할수록 분무된 액적의 유전 상수가 커지기 때문이다. 이러한 경향은 Forsyth 등⁽⁵⁾의 실험 결과와도 잘 일치한다. 이러한 NaCl 농도에 따른 대전량 차이는 입자가 양극성 이온화기를 통과하면서 양극성 이온에 의한 중화 작용으로 거의 없어지게 된다. Fig. 12는 1% NaCl 용액을 사용해 양극성 이온화기 및

코로나 방전기를 통과한 후의 NaCl 입자의 대전량을 비교하여 나타낸 것이다. 이때 대전되지 않은 중성 입자와 대전된 입자의 비는 Liu와 Pui⁽¹³⁾의 연구 결과를 사용하여 보정하였다. 양극성 이온화기를 통과한 입자의 대전량 분포는 거의 볼츠만 분포와 유사하고, 동일 조건에서 0.1μm 이상인 입자의 대전량에 대한 Forsyth 등⁽⁵⁾의 실험 결과의 유사한 경향을 보였다. 코로나 방전기를 통과한 NaCl 입자는 상대적으로 높게 대전된다. 즉, 0.1μm 입자의 대전량은 볼츠만 분포에서 약 1개인 반면에, 코로나 방전기를 통과한 후에는 약 7개로 크게 증가한다. 코로나 방전에 의한 입자의 대전량은 Fuchs⁽¹⁴⁾와 White⁽¹⁵⁾의 혼합 모델의 이론적 입경 별 대전량 분포와도 잘 일치한다.

5. 결론

본 연구에서는 0.01, 0.1, 1% 농도의 NaCl 용액을 사용하여 충돌 분무기를 통해 생성되는 NaCl 입자의 대전, 이를 양극성 이온화기(Po^{210})를 통과시킨 후의 중화된 대전량, 그리고 다시 코로나 방전기를 통과한 후의 대전량을 측정하여 TDMA 방법이 타당함을 확인했고, 현상적으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) NaCl 용액의 농도가 감소함에 따라 대표 입경은 작아지고, 전기 이동도는 증가하게 된다. 분무 대전된 입자는 양극성 분포를 띄고 있음이 확인하였다. 하전수가 한 개인 경우($n = 1$)가 가장 농도가 높았으며, $n = 2, 3, 4$ 의 순서로 농도가 낮아졌다. 그리고, 입경이 커질수록 하전수가 한 개 이상을 갖게 될 확률이 증가하게됨을 확인했다.

(2) 양극성 이온화기를 통과시키면 그렇지 않은 경우보다 대체로 NaCl 입자의 전기 이동도가 낮아지는 경향을 보였다. 이는 충돌 분무에 의해 대전된 입자가 양극성 중화기를 통과하면서 양극성 이온에 의해 중화되어 전체적인 대전량이 감소하기 때문이다.

(3) 코로나 방전부를 통과하기 전에는 넓은 범위에 분포되어있던 NaCl 입자의 전기 이동도의 범위가 좁아지고 농도가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 중성이었던 입자가 대전되기 때문이다. 이로 인해 분무 대전이나 양극성 이온화의 경우, 하전수가 한 개($n = 1$)인 입자의 농도가 가장 높았던 반면에, 코로나 방전에 의해서는 한 개 보다 큰 하전수($n = 4$)에서 농도가 가장 높았다.

(4) NaCl 용액의 농도가 감소할수록 입자의 대전량이 증가하는데, 이것은 용해된 이온 농도가 감소할수록 분무된 액적의 유전 상수가 커지기 때문이고, 이러한 NaCl 농도에 따른 대전량 차이는 입자가 양극성 이온화기를 통과하면서 양극성 이온에 의한 중화 작용으로 거의 없어지고 NaCl 농도에 관계없이 볼츠만 이론식과 유사해진다. 반면에 코로나 방전기를 통과한 NaCl 입자는 상대적으로 매우 높게 대전된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기 연구

센터(과제번호: 2000G0201)와 과기부 정책연구사업(관리번호: 기계 99-03)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Krupa, A. and Jaworek, A., 1989, "A Method for Aerosol Particle Charge Measurements," *J. Electrostatics*, Vol. 23, pp. 289~292.
- (2) Biermann, A and Bergman, W., 1984, "Measurement of Aerosol Concentration as a Function of Size and Charge," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 3, pp. 293~304.
- (3) Emets, E. P., Kascheev, V. A., and Poluektov, P. P., 1991, "Simultaneous Measurement of Aerosol Particle Charge and Size Distributions," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 22, pp. 389~394.
- (4) Patschull, J and Roth, P., 1992, "Charge and Size Distribution of Particles Emitted from a DI-Diesel Engine," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 23, pp. s229~s232.
- (5) Forsyth, B, Liu, B. Y. H. and Romay, F. J., 1998, "Particle Charge Distribution Measurement for Commonly Generated Laboratory Aerosols," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 28, pp. 489~501.
- (6) Chen, D. R., Pui, D. Y. H., Hummes, D., Fissan, H., Quant, F. R. and Sem, G. J., 1998, "Design and Evaluation of a Nanometer Aerosol Differential Mobility Analyzer(Nano-DMA)," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 29, pp. 497~509.
- (7) Reist, P. C., 1992, *Aerosol Science and Technology*, McGraw-Hill.
- (8) Oglesby, S and Nichols, G. B., 1978, *Electrostatic Precipitation*, Marcel Dekker.
- (9) 안강호, 김남효, 이종호, 배귀남, 1996, "Differential Mobility Analyzer(DMA) 내의 입자운동 및 특성 분석," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제6호, pp. 2005~2313.
- (10) 안강호, 배귀남, 1994, "새로 개발한 분무 입자 발생기의 성능 평가," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(II), pp. 381~384.
- (11) Kousaka, Y, Okuyama, K, Adachi, M and Ebie, K, 1980, "Measurement of Electric Charge of Aerosol Particles Generated by Various Methods," *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 14, pp. 54~58.

- (12) 이재복, 배귀남, 황정호 2000, "1단 전기집진기에서 2차 유동이 집진 효율에 미치는 영향," 대한기계학회논문집(B), 제24권, 제2호, pp. 251~259.
- (13) Liu, B. Y. H. and Pui, D. Y. H., 1974, "Equilibrium Bipolar Charge Distribution of Aerosols," *J. Colloid Interface Sci.* Vol. 49, pp. 305~312.
- (14) Fuchs, N. A., 1963, "The Charge on the Particles of Aerocolloids," *Izv. Akad. Nauk. SSSR, Ser. Geogr. Geofiz.*, Vol. 11, pp. 341~348.
- (15) White, H. J., 1951, "Particle Charging in Electrostatic Precipitation," *AIEE Trans.*, Vol. 70, pp. 1186~1191.