

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 14, No. 1: March 2018 pp. 17-24

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2018.14.1.017>

Gerdien 이온측정기를 이용한 에어로졸의 하전 특성 분석에 관한 연구

조운행¹⁾ · 심준목¹⁾ · 신일경^{1),2)} · 육세진²⁾ · 박현설^{1),*}

¹⁾한국에너지기술연구원 기후변화연구본부, ²⁾한양대학교 기계공학과

(2018년 3월 28일 투고, 2018년 3월 30일 수정, 2018년 3월 30일 게재확정)

Study on electrical charge distribution of aerosol using a Gerdien ion counter

Yun-Haeng Joe¹⁾ · Joonmok Shim¹⁾ · Il-Kyoung Shin^{1),2)} · Se-Jin Yook²⁾ · Hyun-Seol Park^{1),*}

¹⁾*Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research*

²⁾*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University*

(Received 28 March 2018; Revised 30 March 2018; Accepted 30 March 2018)

Abstract

Since the motion of the charged particle strongly depends on its charge characteristics, information on charge distributions of target particles is one of the important variables in aerosol research. In this study, charged distribution of atomized NaCl particles were measured using a Gerdien type ion counter. Two kinds of particle charging conditions were used in this study. First, atomized NaCl particles were passed through an aerosol neutralizer to have a Boltzmann charge distribution, and then its charge distribution was measured. In this case, the portion of uncharged particles was compared with the portion obtained from the Boltzmann charge distribution for verifying the suggested experimental method. Second, same experiment was conducted without the aerosol neutralizer to measure the charge distribution of atomized and un-neutralized NaCl particles. In the conclusion, the portion of uncharged, negatively charged and positively charged particles were 19%, 62% and 20%, respectively, for neutralized particles. The atomized particles, which was generated without the aerosol neutralizer, also had almost a zero charge state, but the standard deviation in charge distribution was larger than that of neutralized particles. The test method proposed in this study is expected to be used in various aerosol research fields because it can obtain simple information on the particle charge characteristics more easily and quickly than the existing test methods.

Keywords: Aerosol particle, Charge distribution, Current measurement, Gerdien ion counter

* Corresponding author.

Tel : +82-42-860-3052

E-mail : phs@kier.re.kr

1. 서론

에어로졸 측정 및 관련 연구가 활발히 진행되며 에어로졸 입자의 하전 특성 이해에 대한 요구가 늘어나고 있다. 전기적으로 하전된 에어로졸 입자는 유선(streamline)을 타고 이동하며 정전기력(electrical force)에 의한 외력을 받게 된다. 따라서 에어로졸 입자 주변에 전기장이 존재하면 하전된 입자의 거동은 비하전 입자의 거동과 전혀 다른 양상을 보이게 되며, 이러한 이유로 에어로졸 입자의 하전 특성은 입자의 측정, 분석, 집진 및 합성 등에 지대한 영향을 미친다(Hinds, 1999).

에어로졸 입자의 하전 특성을 분석하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 미분형 이동도 분석기(DMA, Differential Mobility Analyzer)와 광학적 입자 계수기(optical aerosol spectrometer)를 이용하여 입경별 입자 하전량을 측정하는 연구가 1980년도에 수행되었다(Porstendörfer et al., 1984). 이 기술은 에어로졸 입자의 전기이동도(electrical mobility)를 이용하여 비교적 손쉬운 방법으로 입자의 하전량을 측정할 수 있는 방법이나, 광학장치의 측정 가능 입경 범위 한계로 인해 직경 500 nm 이하 나노 입자의 하전 특성을 분석하기는 어려움이 있다. 1990 년대에 액체 상 또는 고체 상 나노 입자의 하전량 분석이 가능한 이동도 적분법(Integral mobility technique)이 제시되었으나 제시된 방법으로는 하전된 입자의 극성(polarity)를 파악할 수 없다(Adachi et al., 1990; Wake et al., 1991; Forsyth et al., 1998). Ahn et al. (2001)과 Kim et al. (2005)은 두 대의 미분형 이동도 분석기(DMA, Differential Mobility Analyzer)를 직렬로 연결하여 입자의 입경별 하전량을 측정하는 TDMA (Tandem Differential Mobility Analyzer) 기술을 이용하였다. TDMA 기술은 현재 입자 하전 특성 분석 연구에서 가장 많이 사용되는 기술이나, 분석 과정이 복잡하고 단일 시편의 하전 특성 분석을 위해 장시간이 소요된다는 단점이 있다. Ahn and Chung (2010)은 미분형 이동도 분석기와 입자 응축기(particle condenser), CCD 카메라(charge-coupled device camera)를 이용하여 실시간으로 입자의 하전량을 측정하는 방법을 제시하였다. 이 기술은 높은 정확도로 입자의 입경별 하전 분포를 분석할 수 있다는 장점이 있으나 장치 구성이 복잡하고, 응축기

와 카메라를 사용한다는 점에서 외부환경 변화에 측정 결과가 민감하게 반응할 수 있다는 단점이 있다.

앞서 진행된 연구에서는 높은 정밀도로 에어로졸 입자의 입경별 하전량을 측정하기 위해 복잡한 장치 구성을 사용하거나, 장시간의 측정 시간이 요구되는 기술이 제안되어왔다. 하지만, 전기장을 이용한 입자 집진장치 설계 등의 연구에서는 간단한 방법으로 빠른 시간 내에 특정 오염원에서 배출되는 에어로졸 입자의 대략적인 하전 특성 정보가 요구되는 경우도 있다. 이러한 적용처에서는 앞서 제시된 연구 방법을 적용하기에는 시간상, 공간상 어려움이 있다.

본 연구에서는 Gerdien 방식의 이온측정기(ion counter)를 이용하여 비교적 간단한 방법으로 에어로졸 입자의 하전 분포를 분석하는 방법을 제안하였다. 이온측정기로 유입되는 에어로졸 입자의 수농도와 측정기 후단에서 측정되는 에어로졸 입자의 수농도 비를 이용하여 에어로졸 입자 중 비하전 입자의 비율을 산출하였으며, 이온측정기에서 측정되는 미세전류를 이용하여 양하전 및 음하전 된 입자의 비율을 산출하였다. 또한 실험 결과를 이론 수식과 비교하여 제안 방법의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 제안된 시험 방법은 기존 시험 방법에 비해 간단하고 빠르게 입자의 하전 특성 정보를 획득할 수 있어, 다양한 에어로졸 연구 분야에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험방법

2.1 에어로졸 입자의 수농도 및 하전량 측정방법

에어로졸 입자의 하전 분포 분석을 위해 수농도 및 하전량을 측정하였으며, 시험 방법을 그림 1a에 도시하였다. 분무입자발생장치(atomizer, 9302, TSI inc.)에 청정 압축공기 2.5 lpm을 주입하여 질량농도 1wt%의 NaCl 수용액을 미립화하였다. 미립화된 NaCl 액적은 분무입자발생장치 후단에 설치된 확산 건조장치(diffusion dryer)를 거치며 입자화되었다. 발생된 입자를 5.0 lpm의 청정공기에 희석하여 농도를 제어하였으며, 그 중 1.0 lpm의 유량만 시험에 사용하였다. 발생된 에어로졸 입자의 하전 상태는 에어

로졸 중화장치(aerosol neutralizer, Model 5522, Grimm)의 사용 유무를 통해 제어하였다. 에어로졸 중화장치를 사용할 경우 분무 발생된 에어로졸 입자는 전기적으로 중화되어 볼츠만 하전분포(Boltzmann charge distribution)를 띄게 되고, 에어로졸 중화장치를 사용하지 않을 경우에는 분무 발생 시 하전 상태를 유지하게 된다. 본 연구에서는 전기적으로 중화된 에어로졸 입자 실험 결과를 이론 값과 비교하여 제시된 실험 방법을 검증하였으며, 검증된 실험 방법을 바탕으로 분무 발생된 에어로졸 입자의 하전 분포를 계산하였다.

에어로졸 입자의 하전량 측정을 위해 실험실에서 제작한 Gerdien 방식의 이온측정기(Gerdien type ion counter)를 사용하였으며 작동 원리를 그림 1b에 도시하였다. 본 연구에 사용된 이온측정기는 알루미늄 재질의 원형 관의 중심축에 동일 재질의 금속 막대가 삽입되어 있는 형상이다. 원형 관 내측에는 구리 관이 삽입되어있고, 구리 관과 알루미늄 관 사이는 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene)를 이용하여 절연하였다. 구리 관의 내경은 38.2 mm, 알루미늄 막대의 직경은 19 mm로 두 사이의 이격 거리는 9.6 mm 이었으며 구리 관의 길이는 150 mm 이었다. 고전압 발생장치(high voltage power supply)를 이용하여 알루미늄 막대에 고전압을 인가하였고 알루미늄 관은 접지하였다. 알루미늄 막대에 고전압을 인가하면 측정 장치 내부에는 전기장(electric field)이 형성되며, 이온측정기 내부로 유입되는 입자 중 하전된 입자

는 전기력선을 따라 이동하게 된다. 이 중 알루미늄 막대에 인가된 전압과 같은 극성을 갖는 입자는 구리 관 표면에 포집 된다. 본 연구에서는 구리 관과 알루미늄 관 사이에 미소전류측정장치(electrometer, Model 6514, Keithley)를 설치하여 하전된 입자가 구리 관 표면에 부착될 때 발생하는 미세전류를 측정하였으며, 알루미늄 막대에 인가되는 전압의 극성을 변화시켜 이온측정기로 유입되는 입자 중 양하전된 입자와 음하전된 입자에 의해 발생하는 미세전류를 각각 측정하였다.

이온측정기 후단에는 미분형 이동도 분석기(Model 55-900, Grimm)와 페러데이 컵 전위계(FCE, Faraday Cup Electrometer, Model 5.705, Grimm)로 구성된 주사형 이동도 분석장치(SMPS, Scanning Mobility Particle Sizer)를 설치하여 이온측정기 후단으로 배출되는 입자의 입경별 수농도를 측정하였다.

2.2 에어로졸 입자의 하전 분포 산출 방법

이온측정기의 알루미늄 막대에 고전압이 인가될 경우, 이온측정기 내부에는 전기력선이 형성되어 쿨롱력(Coulombic force)에 의해 하전된 입자만 선택적으로 이온측정기 내부에 포집될 수 있다. 알루미늄 막대에 인가되는 전압이 충분히 크고 확산에 의한 입자 침착을 무시할 수 있는 경우, 이온측정기 후단에서 측정되는 입자는 모두 비하전 상태(uncharged state)의 입자로 가정할 수 있다. 본 연구에서는 이온측정기에 인가하는 전압의 세기를 증가시키며 후단

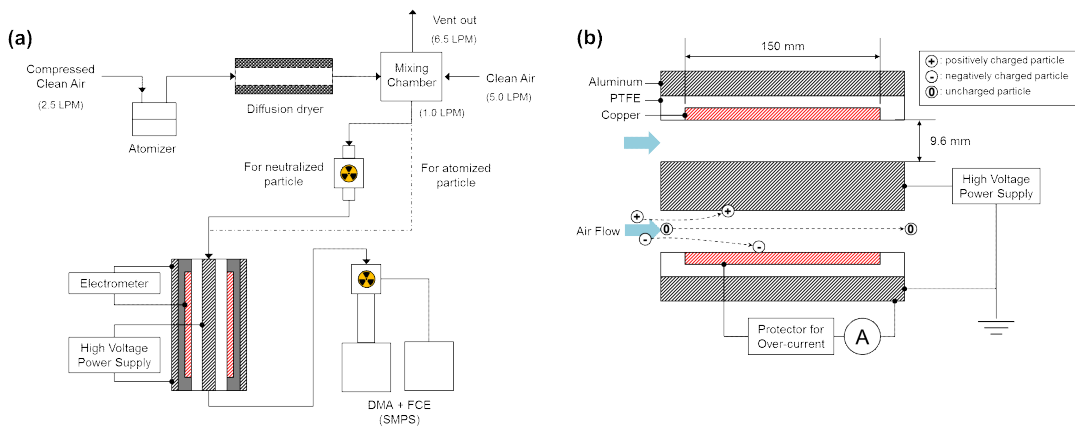


Fig. 1. Schematics of (a) Experimental setup, (b) Lab. made Gerdien type ion counter.

에서의 입자 수농도를 측정하였다. 인가 전압의 세기가 증가해도 입자의 수농도가 변화가 없는 경우, 측정된 입자는 모두 비하전 상태의 입자라고 가정하였으며 이때의 수농도를 이용하여 에어로졸 입자 중 비하전 입자의 비율(P_0)을 아래 수식을 통해 산출하였다.

$$P_0 = \left\{ \left(\frac{c_{on}}{c_{off}} \right)_+ + \left(\frac{c_{on}}{c_{off}} \right)_- \right\} / 2 \quad (1)$$

여기서 은 이온측정기에 전압이 인가된 경우 장치 후단에서의 입자 총 수농도이며, 는 전압이 인가되지 않은 경우 측정된 입자 총 수농도이다. 아래첨자 +, -는 각각 장치에 인가된 전압의 극성이 양극, 음극인 경우를 말한다. 에어로졸 중화장치를 사용하여 장치 내로 유입되는 입자를 전기적으로 중화시킨 시험 조건에서 측정된 입경별 비하전입자 비율을 볼츠만 하전분포 이론 수식을 통해 계산된 입경별 비하전 입자의 비율과 비교하여 시험 결과를 검증하였다. 특정 입경, d_p , 에서 비하전 입자의 비율은 이론적으로 아래 수식을 통해 계산될 수 있다 (Yeh and Cheng, 1983).

$$P_{0,d_p} = \left(\frac{K_E e^2}{\pi d_p k T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{-K_E n^2 e^2}{d_p k T} \right) \Bigg|_{n=0} = \left(\frac{K_E e^2}{\pi d_p k T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 K_E 는 입자의 정전 상수 (electrostatic constant, $9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$), e 는 단위 전하량 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$), k 는 볼츠만 상수(Boltzmann constant, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T 는 절대 온도, n 는 입자의 하전량을 의미한다.

에어로졸 입자 중 양하전된 입자의 비율(P_+)과 음하전된 입자의 비율(P_-)은 미소전류측정장치에 의해 측정된 전류를 기반으로 다음 수식을 통해 계산하였다.

$$P_+ = (1 - P_0) \times \frac{|I^+ - I_0^+|}{|I^+ - I_0^+| + |I^- - I_0^-|} \quad (3)$$

$$P_- = (1 - P_0) \times \frac{|I^- - I_0^-|}{|I^+ - I_0^+| + |I^- - I_0^-|} \quad (4)$$

여기서 I^+ 및 I^- 는 각각 이온측정기에 양극의 고전압, 음극의 고전압이 인가되었을 때 측정된 미소전류의 크기를 의미하며, 아래첨자 0은 이온측정기로 입자 투입이 중지되고 전압이 인가되지 않은 상황에서 미소전류측정장치에 관측된 초기 전류 값을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 중화된 에어로졸 입자의 하전 분포 분석

3.1.1 인가전압에 따른 입자 수농도

전기적으로 중화된 에어로졸 입자가 이온측정기로 유입한 경우, 인가 전압에 따른 입경별 수농도

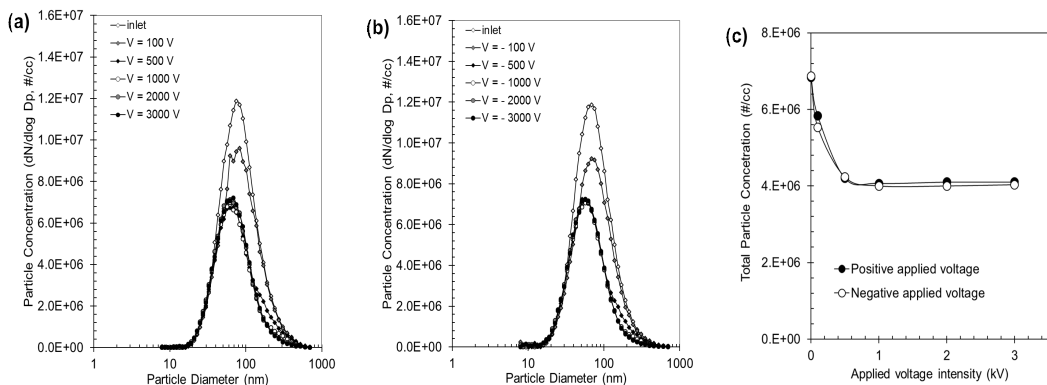


Fig. 2. Particle number concentrations of neutralized particles with (a) positive applied voltage and (b) negative applied voltage (c) total particle concentration with various applied voltage intensities.

및 총 수농도 변화를 그림 2에 나타냈다. 발생된 NaCl 입자의 수농도는 약 6.8×10^6 개/cm³였으며, 최빈 입경(Mode diameter)은 약 69 nm 이었다. 이온측정기에 전압이 인가되자 NaCl 입자의 수농도는 크게 감소하다 인가 전압의 세기가 500 V 이상이 되는 시점부터 일정한 값을 유지하였다. 또한 인가 전압이 +500 V 인 경우의 입자의 수농도 및 최빈 입경 (4.2×10^6 개/cm³, 62 nm)과 인가 전압이 -500 V 인 경우의 입자의 수농도 및 최빈 입경(4.23×10^6 개/cm³, 52 nm) 사이에는 유의미한 차이가 없었다.

인가 전압의 세기가 500 V와 1000 V인 경우, 수식 (1)을 통해 계산된 비하전 입자의 비율을 이론 수식 (2)의 결과와 비교하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타냈다. 이론적으로 볼츠만 하전 분포를 갖는 입자는 비하전 입자의 비율이 입자의 크기와 반비례 관계를 갖는다. 실험 결과도 이러한 반비례 경향을 보였으며, 이론값과 매우 유사한 결과를 보였다. 따라서 이어지는 실험에서는, 인가 전압의 세기가 500 V 이상일 경우 이온측정기 내로 유입되는 입자 중 하전을 갖는 입자는 모두 이온측정기 내에 포집되고, 후단에서 관측되는 입자는 모두 비하전 입자로 가정하였다.

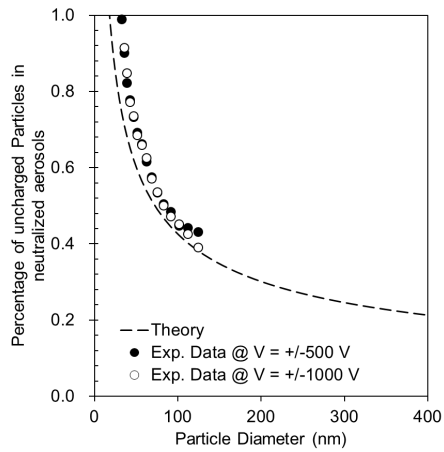


Fig. 3. Experimental and theoretical percentages of uncharged particles in neutralized aerosols.

3.1.2 하전 분포 계산

인가전압의 극성 및 세기에 따른 미소전류측정장치에서 측정된 전류를 그림 4에 나타냈다. 그림의 ‘ON’, ‘OFF’는 입자 투입 여부를 의미하며, 그림에 표시되어있는 전압은 시험 간 지속적으로 인가되어 있는 상태였다. 이온측정기 내로 입자가 투입되면 미소전류측정장치에서 측정되는 전류의 값이 증가하였으며, 입자 투입을 중지하면 전류가 큰 폭으로 감소하였다. 500 V 이상의 양극 고전압을 인가하였을 경우, 인가 전압 세기 증가에 따른 전류 상승은

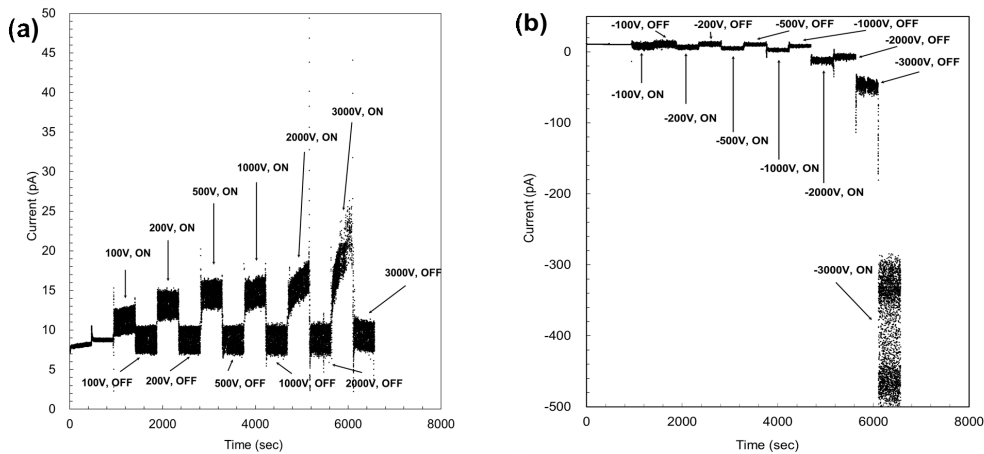


Fig. 4. Currents when (a) positive voltage was applied and (b) negative voltage was applied.

Table 1. Calculation results: charge states of neutralized and atomized particles.

Condition	Charge state of the particles		
	Negatively charged	Uncharged	Positively charged
Neutralized particle	19	62	20
Atomized particle	32	33	36

크지 않았지만, 2000 V의 이상의 인가 전압에서는 일정 인가 전압에서 시간이 지날수록 측정되는 전류량이 증가하는 현상을 보였다. 음극 고전압을 인가하였을 경우, 2000 V 이상의 전압 세기에서 측정되는 전류량이 비정상적으로 증가하였으며, 입자 투입을 중지한 경우에도 전류가 관측되는 현상을 보였다. 이는 앞서 수행된 비하전 입자 측정 실험 결과에 상충되는 현상이다. 비하전 입자 측정 실험에서는 ± 500 V 이상의 전압이 입자 하전량 측정 장치로 인가되면, 장치의 후단에서 측정되는 입자의 양에 큰 변화가 없었다. 이러한 결과는 ± 500 V 이상의 인가 전압에서는 하전된 입자의 대부분은 장치 내에 포집된다는 것을 의미하며, 따라서 인가 전압의 세기가 500 V 이상인 경우에 측정되는 전류값은 큰 변화가 없어야 한다. 2000 V 이상의 전압 세기에서 측정된 비정상적인 전류량 증가의 원인은 다양할 수 있으나, 고전압 발생장치와 미세전류측정장치의 접지 공유에 의한 것으로 예상된다(그림 1b 참조).

본 연구에서는 하전된 입자와 비하전된 입자들

효과적으로 분리 가능하며, 비교적 안정적으로 전류 측정이 가능한 인가 전압 세기인 500 V를 본 연구에서 사용된 이온측정기의 가동 전압(Operating voltage)으로 선정하였으며, 이때의 실험 결과와 수식 (1), (3), (4)를 이용하여 전기적으로 중화된 에어로졸 입자의 하전 분포를 계산하였다. 계산 결과 전기적으로 중화된 에어로졸 입자의 비하전, 음하전, 양하전 입자 비율은 각각 62%, 19%, 20% 이었으며, 이는 이론적인 볼츠만 하전 분포에 상응하는 결과이다.

3.2 분무 발생된 에어로졸 입자의 하전 분포 분석

분무입자발생장치에서 생성된 에어로졸 입자의 하전 분포를 측정하기 위해 그림 1의 실험에서 에어로졸 중화장치를 제거한 후 실험을 진행하였으며, 인가 전압에 따른 입경별 수농도 및 총 수농도를 그림 5에 나타냈다. 실험 결과는 전기적으로 중화된 에어로졸 입자 시험 결과와 매우 유사하였다. 이온측정기에 전압이 인가되자 NaCl 입자의 수농도는

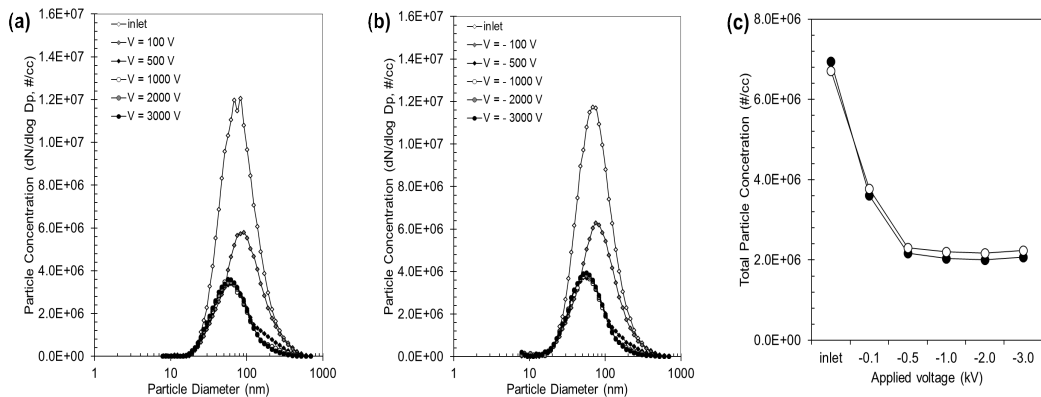


Fig. 5. Particle number concentrations of atomized particles with (a) positive applied voltage and (b) negative applied voltage. (c) total particle concentration with various applied voltage intensities.

크게 감소하였으며, 인가 전압의 세기가 500 V 이상 이 되는 시점부터 일정한 값을 유지하였다. 인가전압의 세기가 500 V인 경우, 미소전류측정장치에서 측정된 전류의 값은 양극 인가 전압 사용 시 약 13.9 pA, 음극 인가 전압 사용 시 약 -12.4 pA이었다. 위 결과를 바탕으로 분무입자발생 장치에서 생성된 에어로졸 입자의 하전 분포를 계산하였으며, 비하전, 음하전, 양하전 입자의 비율은 각각 33%, 32%, 36% 이었다.

중화된 에어로졸 입자와 분무 발생된 에어로졸 입자의 하전 분포를 표 1에 정리하였다. 두 경우 모두 음하전 입자의 비율과 양하전 입자의 비율이 큰 차이 없어 평균적으로 비하전된 입자인 것으로 계산되었다. 다만 분무 발생된 에어로졸 입자보다 중화된 에어로졸 입자의 비하전 입자 비율이 더 높았으며, 이는 분무 발생된 에어로졸 입자가 에어로졸 중화장치를 통과하면 하전 분포의 표준 편차가 감소한다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 Gerdien 방식의 이온측정기를 사용하여 입자의 하전 분포 특성을 분석하는 연구를 수행하였다. 전기적으로 중화된 에어로졸 입자의 실험 결과와 볼츠만 하전 분포 이론식과의 비교를 통해 시험 결과를 검증하였으며, 이를 바탕으로 분무 발생된 에어로졸 입자의 하전 분포를 계산하였다. 분무입자발생장치에서 발생된 NaCl 에어로졸 입자는 에어로졸 중화장치 사용 유무와 상관없이 평균적으로 비하전된 상태였으며, 다만 에어로졸 중화장치를 사용할 경우 에어로졸 입자 하전 분포의 표준편차가 감소하는 경향을 보였다. 추후의 연구에서 이온측정기에 고전압 인가 시 발생하는 미소전류측정장치에서의 비정상적 전류값 계측 문제 해결과 에어로졸의 입경별 하전 분포량 산출 관련 연구를 수행할 계획이며, 이를 통해 본 연구가 에어로졸 합성, 전기집진 장치의 설계, 대기 에어로졸 입자 특성 등 다양한 에어로졸 연구에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(B8-2435-01)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

참고문헌

- Adachi, M., Liu, B.Y.H., and Pui, D.Y.H. (1990). Development of an automatic system for measuring particle charge and size distributions in a clean room. *Particle and particle systems characterization*, 8, 200-208.
- Ahn, K.-H., and Chung, H. (2010). Aerosol electrical mobility spectrum analyzer, *Journal of Aerosol Science*, 41, 344-351.
- Ahn, K.H., Sohn, S.H., Jung, C.H., and Choi, M. (2001). In situ measurement of nano particle size distribution and charge characteristics in H₂/O₂/TEOS diffusion flame, *Scripta Mater*, 44, 1889-1892.
- Forsyth, B., Liu, B.Y.H., and Romay, F.J. (1998). Particle charge distribution measurement for commonly generated laboratory aerosols, *Aerosol Science and Technology*, 28, 489-501.
- Hinds, W.C. (1999). *Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles*, 2nd Ed., New Work, John Wiley & Sons, Inc.
- Kim, S.H., Woo, K.S., Liu, B.Y.H., and Zachariah, M.R. (2005). Method of measuring charge distribution of nanosized aerosols, *Journal of Colloid and Interface Science*, 282, 46-57.
- Porstendörfer, J., Hussin, A., Scheibel, H.G., and Becker, K.H. (1984). Bipolar diffusion charging of aerosols-II. Influence of the concentration ratio of positive and negative ions on the charge distribution, *Journal of Aerosol Science*, 15, 47-56.

Wake, D., Thorpe, A., Bostock, G.J., Davies, J.K.W., and Brown, R.C. (1991). Apparatus for measurement of the electrical mobility of aerosol particles: computer control and data analysis, *Journal of Aerosol Science*, 22, 901-916.

Yeh, H.-C., and Cheng, Y.-S. (1983). Theoretical study of Equilibrium bipolar charge distribution on non-uniform primary straight chain aggregate aerosols, *Aerosol Science and Technology*, 2, 383-388.