

직접 광대전기의 대전특성에 관한 실험적 연구

이창선* · 김용진** · 김상수***

(1999년 1월 12일 접수)

An Experimental Study on the Characteristics of Direct Photoelectric Charging

Chang-Sun Lee, Yong-Jin Kim and Sang-Soo Kim

Key Words : Direct Photoelectric Charging (직접 광대전), Ultra-Fine Particle (미소입자), Charged Particle (대전입자), Average Charge (평균대전량), Charge Distribution (대전량 분포)

Abstract

Photoelectric charging is a very efficient way of charging small particles. This method can be applied to combustion measurement, electrostatic precipitator, metal separation and control of micro-contamination. To understand the photoelectric charging mechanism, particle charging of silver by exposure to ultraviolet is investigated in this study. Average charges and charge distributions are measured at various conditions, using two differential mobility analyzers, a condensation nucleus counter, and an aerosol electrometer. The silver particles are generated in a spark discharge aerosol generator. After that process, the generated particles are charged in the photoelectric charger using low-pressure mercury lamp that emits ultraviolet having wavelength 253.7 nm. The results show that ultra-fine particles are highly charged by the photoelectric charging. The average charges linearly increase with increasing particle size and the charge distribution change with particle size. These results are discussed by comparison with previous experiments and proposed equations. It is assumed that the coefficient of electron emission probability is affected by initial charge. The results also show that the charge distribution of a particle is dependent on initial charge. Single charged particle, uncharged particle and neutralized particle are compared. The differences of charge distribution in each case increase with increasing particle size.

1. 서론

미소입자는 전기장에 의해 크게 영향을 받으므로, 미소입자의 전기적 특성에 관한 연구가 중요하게 다루어지고 있다. 본 연구는 입자 직경이 1 μm 이하인 입자를 효율적으로 대전시킬 수 있는 광대전(Aerosol Photoelectric Charging)의 특성에 관하여 연구하였다.

광대전은 빛을 이용하여 입자로부터 전자를 방출시켜서 양전하로 대전되게 하는 원리를 이용한다. 빛을 금속판에 비추어 전자를 방출한 경우에는 공기분자와 충돌 후 다시 표면으로 전자가 되돌아가기 때문에 진공 속에서 전자방출을 시켜야

하지만, 작은 입자의 경우엔 충돌 후 전자의 재부착의 확률이 낮아져 공기 중에서도 대전될 수 있다.⁽¹⁾ 그러나 광대전은 많은 제약조건이 있어 모든 입자가 효율적으로 대전되는 것은 아니다. 물질의 전자방출 에너지(photoemission) 보다 빛의 에너지가 커야 한다는 것이다. 즉 빛의 진동수가 물질의 자르기진동수(cut-off frequency)보다 커야 한다. 그래서 입자의 대전을 위해서 파장이 짧은 자외선이 이용되나 파장이 너무 짧으면 광화학 반응(photochemical reaction)에 의한 빛의 흡수가 문제가 되므로 어느 이상의 파장보다 커야 한다. 그 범위는 자외선의 파장이 190~240 nm 로 알려져 있다. 또한, 광대전되는 입자는 전자방출 에너지가 낮은 순수금속의 경우로 제한되고 있다. 그래서 아직은 응용의 범위가 좁지만 첨가물의 영향, 온도의 영향, 간접적인 대전 등의 연구로 새로운 가능성이 대두되고 있다.⁽²⁾

자외선에 의한 전자방출은 금속표면 연구에 많이 이용된 잘 알려진 방법인데, 1980 년대에 미소

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과
 ** 회원, 한국기계연구원 열유체시스템연구부
 *** 회원, 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : sskim@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3021 FAX : (042)869-3210

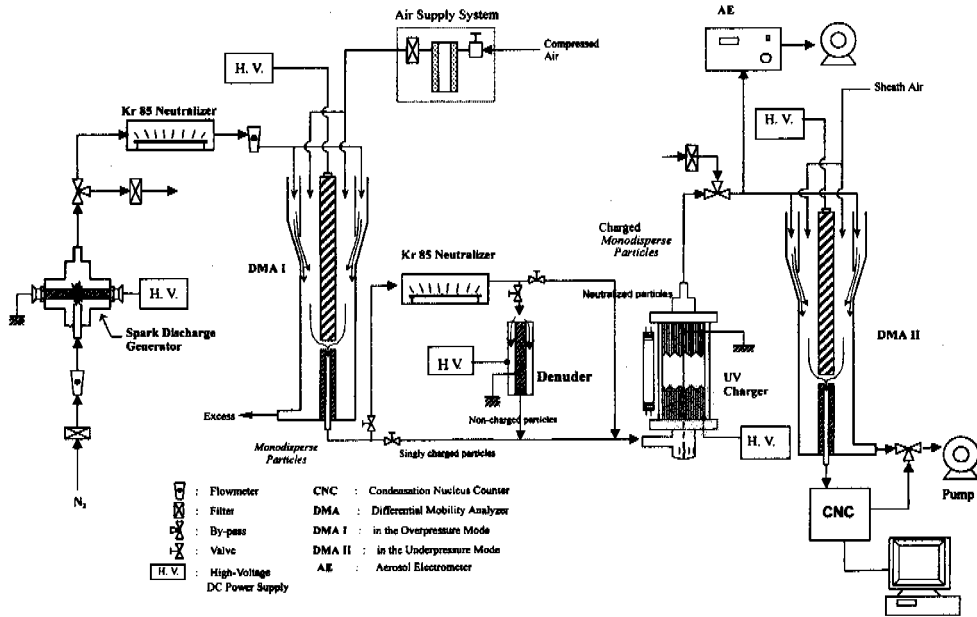


Fig. 1 Experimental setup

입자의 대전에 이용하려는 연구가 시작되어 입자의 측정과 제거를 위한 방법으로 제안되었다. 이러한 연구를 바탕으로 입자의 광대전 실험과 입자에서 광자에 의한 전자방출 4 단계 모델이 제안되었다.⁽³⁾ Jung 은 초 미립자의 광대전 실험을 하여 대전분포를 측정하고 자외선에 의한 대전이 미소입자에서 큰 전하로 대전되는 것을 보였다.⁽⁴⁾ 그리고 직접적인 자외선에 의해 입자의 대전이 아니라 자외선에 쪼인 금속 와이어에서 발생된 전자에 의해 입자의 확산대전되는 간접 광대전이 제안되었다.⁽⁵⁾ 직접 광대전은 연소시 발생하는 입자의 크기, 농도, 화학적 성분의 측정,⁽¹⁾ 전기집진기의 효율 향상,⁽⁶⁾ 미세입자 분리⁽⁷⁾ 등에 이용하려는 노력이 있었다.

이번 연구에서는 직접 광대전의 기본적 대전특성을 알아보기 위한 실험을 행한다. 소금 입자, 산화 금속, 물방울, 광 합성의 스모그 등은 이온화(대전)되기 위해 높은 광자 에너지를 요구한다. 그러나 Carbon, Ag 등은 산화가 잘 되지 않아서 광자 에너지가 낮은 편이다. 그래서, 본 실험에서는 은(Ag) 입자를 사용하여 입자의 크기에 따른 평균 대전량과 각각의 입자 크기에 대하여 대전분포 등을 측정한다. 또한, 입자가 가지는 초기 대전량에 따라 광대전량이 달라지므로, 초기 대전량에 대한 광 대전량을 측정하기 위한 실험을 하여 광대전의 기본적 대전 특성을 이해하고자 한다.

2. 이론적 배경

입자에서 p 개의 전자를 방출하기 위한 에너지 Φ 는 다음과 같다.⁽²⁾

$$\Phi(R_p, p) = \Phi_0 + \frac{e^2(p+1)}{4\pi\epsilon_0 R_p} - \frac{5}{8} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R_p} \quad (1)$$

여기서, Φ_0 는 평판의 전자 방출에너지, e 는 단위 전하량, ϵ_0 는 공기 중의 유전율, R_p 는 입자의 반경이다.

광대전이 되기 위한 최소의 광자 에너지는 금속에 따른 전자 방출에너지이며, 둘째 항에서 입자가 양전하로 대전되므로 점점 대전량이 커질수록 전자방출 에너지가 커지고, 반지름이 작을수록 그 영향이 커진다. 그리고 마지막 항은 평면에 대한 구가 가지는 전기력의 차이인 영상효과(image effect)를 나타낸다. 이 관계식을 바탕으로 주어진 광자 에너지로 최대 대전시킬 수 있는 대전량을 구할 수 있다.

식 (1)에서 광 에너지가 $h\nu$ 인 빛에 의한 입자의 최대 대전가능량 P_{max} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{max} = \frac{h\nu - \Phi_0}{e^2} 4\pi\epsilon_0 R_p + \frac{5}{8} \quad (2)$$

위 식에서 반지름과 최대 대전량은 비례 관계에 있고, 빛의 파장이 짧을수록 즉 광자 에너지가 클수록 최대 대전량이 커진다.

3. 실험장치와 실험방법

3.1 실험장치

Fig. 1 은 광대전 장치에서 대전된 입자의 평

균대전량과 대전량 분포를 측정할 수 있는 실험 장치의 전체적 개략도이다. 입자 발생부, 입자 대전부, 대전량 측정부로 크게 나눌 수 있다.

입자 발생부는 Fig. 2의 Spark discharge aerosol generator로 은(Ag) 입자를 발생시키고, DMA I (Differential Mobility Analyzer, TSI 3071A)에서 단분산의 입자(monodisperse particle)를 발생시킨다. 발생된 입자는 Kr-85를 사용하여 입자를 중화시키는 중화기(Neutralizer, TSI 3012)와 중화된 입자 중에서 대전된 입자를 전기장에 의해 완전히 제거시키는 Denuder를 각각 통과시켜, 각각의 초기 대전량에 따라 완전히 대전되지 않은 입자 (uncharged particle), 중화된 입자(neutralized particle), 1개의 양 대전의 입자(one charged particle)를 만들게 된다.

입자 대전부는 각각의 초기 대전량을 가진 입자들을 광대전 장치를 사용하여 입자를 고대전시킨다.

대전량 측정부는 입자전하량측정기(Aerosol Electrometer, TSI 3068)를 사용하여 평균전하량을 측정하고 DMA II(TSI 3071A)와 응축핵계수기(Condensation Nucleus Counter, TSI 3010)를 사용하여 입자의 대전량 분포를 측정하는 장치로 구성되어 있다.

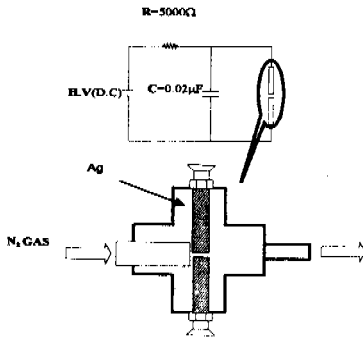


Fig. 2 Spark discharge aerosol generator

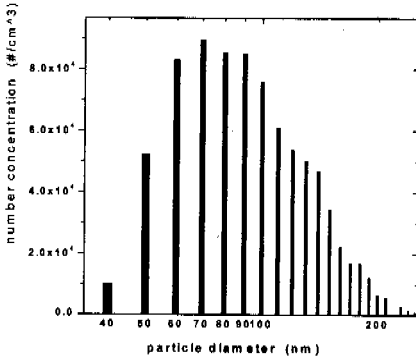


Fig. 3 Number concentration of particles generated by DMA and Spark discharge generator

3.1.1 입자발생 장치

Fig. 2는 급속 입자를 제조하기 위한 Spark discharge aerosol generator이다.^[8-10] 이 장치에서 다분산(polydisperse)의 은(Ag) 입자가 발생된다.

이 장치의 원리는 콘덴서에 전기적 에너지가 축적되면, 그림에서 은 전극에 강한 전장을 유발시켜 극간의 절연이 파괴되어 아아크방전된다. 이때의 방전 에너지를 이용하여 은 전극을 파쇄하여 입자를 발생하게 한다.

은 입자의 발생시에 화학적 반응을 피하기 위하여 질소가스 속에서 방전을 일으켰다. 전극은 3 mm의 은 봉이고 직경 3 mm의 흡입부로 질소가 1 lpm 유량으로 들어온다. 입자발생기의 외부 재질은 스테인레스로 하였다. 방전의 주기는 200 Hz 정도이고 전극간 간격은 1~2 mm 정도이며 8 kV 용 0.01 μF 용량의 콘덴서 두개를 직렬로 연결하여 내구전압을 낮추고 직렬로 연결한 두개를 병렬로 연결하여 콘덴서 용량을 크게 하였다. 그리고 고전압용 저항 5000 Ω을 사용하여 RC 방전회로를 구성하였다.

Fig. 3은 단분산의 입자를 발생시켰을 때의 수밀도분포를 입자전하량측정기(AE)로 측정한 결과이다. DMA I으로 발생시킨 단분산의 입자는 1개의 전하량을 가지므로 AE로 측정이 가능하다. 각각의 입자직경에 대한 생성된 단분산의 입자들의 수밀도는 대략 수 10⁴ #/cm³ 정도의 수밀도로 발생된다.

3.1.2 광대전 장치

Fig. 4는 자외선을 사용하여 입자로부터 전자를 방출시켜서 양 대전시키는 광대전 장치이다. 방출된 전자는 후부에 인가된 전기장에 의해서 제거가 된다.

253.7 nm 파장의 자외선을 발생시키기 위하여 5W급의 pencil type의 수은등을 사용하였다. 입자가 흘러 지나가는 부분은 석영관(내경 35 mm, 두께 1mm)으로 만들어 자외선이 투과되도록 하였고, 자외선이 투과되는 길이는 80 mm이다. 자외선에 의해 석영관과 입자에서 방출되는 전자를 제거하

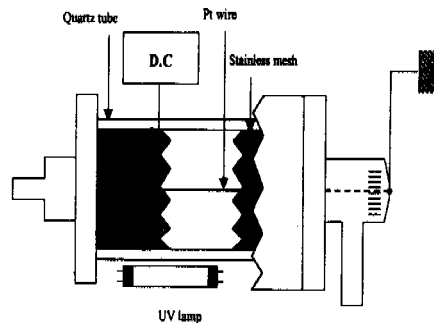


Fig. 4 U.V. Charger

기 위하여 석영관 내부에 전기장을 접지극으로는 와이어를, 양극으로는 스테인레스 철망을 사용하여 만들었다. 석영관 후부의 200 mm 에 전기장을 인가한다. 자외선에 의하여 전자가 방출되지 않도록 와이어는 에너지 준위가 높은백금선을 사용하였다. 전기장은 60 V 를 인가하였다. 자외선을 반사시켜서 대전효율을 높이기 위하여 알루미늄 포일로 케이스의 내벽에 붙였다. 자외선 램프를 켜고 2 분이 지난 후에 안정화가 되므로 실험을 할 때 어느 정도 안정을 가질 시간을 요한다. 유속을 다르게 하는 경우 반응시간이 달라지는데, 이 실험에서는 대전되는 부분을 흘려가는 유량은 0.6 lpm 으로 고정하였다.

3.2 실험 방법

3.2.1 평균대전량 측정

DMA I 를 사용하여 40 nm 에서 200 nm 까지의 단분산의 은 입자를 생성시킨 후에 이것을 광대전시켜서 입자전하량측정기로 측정하여 평균 대전량을 구한다. 측정은 입자전하량측정기로 입자의 수밀도를 측정하고 다시 대전시켜 대전량을 측정한다. 대전량을 측정한 전압값을 수밀도를 측정한 전압값으로 나누어서 평균대전량을 구한다.

입자전하량측정기가 갖는 오차가 3 mV 정도이므로 측정기의 오차를 측정 수밀도의 전압값으로 나눈 것에 평균 대전량을 곱해서 오차를 산정하였다.

$$\text{평균대전량 오차} = \frac{0.003}{\text{수밀도 측정 전압값}} \times \text{평균대전량} \quad (3)$$

3.2.2 대전량 분포 측정

자외선에 의하여 대전된 입자의 대전분포를 알기 위하여 대전된 입자의 전기이동도 분포를 측정한다. 측정된 입자의 전기이동도 분포로부터 입자의 대전량을 계산하여 각 입자 크기에 따른 입자 대전량 분포를 알 수 있다.

Fig. 1 에서 대전량분포 실험의 개략도를 보였다. DMA I 를 사용하여 크기가 일정한 단분산의 입자를 생성시키고, 중화기, Denuder 등을 이용해서 입자의 초기 대전상태(1 개의 입자, 중화된 입자, 완전히 대전 되지 않은 입자)를 실험조건에 맞추어서 생성시킨다. 이러한 각각의 입자들을 광대전장치를 통과시켜서 대전을 시킨 후 DMA II 를 이용하여 입자의 전기이동도 분포를 측정한다. 이때 DMA II 는 underpressure mode 로 측정한다.

실험인자는 초기의 대전상태와 입자의 크기이다. 초기의 대전상태는 완전히 대전되지 않은 입자(uncharged particle), 중화된 입자(neutralized particle), 1 개의 전하량을 가진 입자(one charged particle)이다. DMA I 에서 발생한 단분포의 입자는 1 개의 양 대전된 입자이고, 이들 1 가 대전된 입자를 Kr 85 를 사용하여 중화시켜 불쓰만분포의 대전상태를 가진 입자를 만든다. 중화된 입자에서 대전된 입자를 완전히 제거하기 위해서 일종의 전기집진기인 Denuder 를 통과시켜 대전되지 않은 입자를 만든다.

입자의 초기상태들의 실험의 의미는, 초기상태가 완전히 대전되지 않은 입자를 광대전하는 것은 광대전에 의한 순수 대전량의 의미가 있고, 중화된 입자를 광대전하는 것은 실제 공기 중에 부유

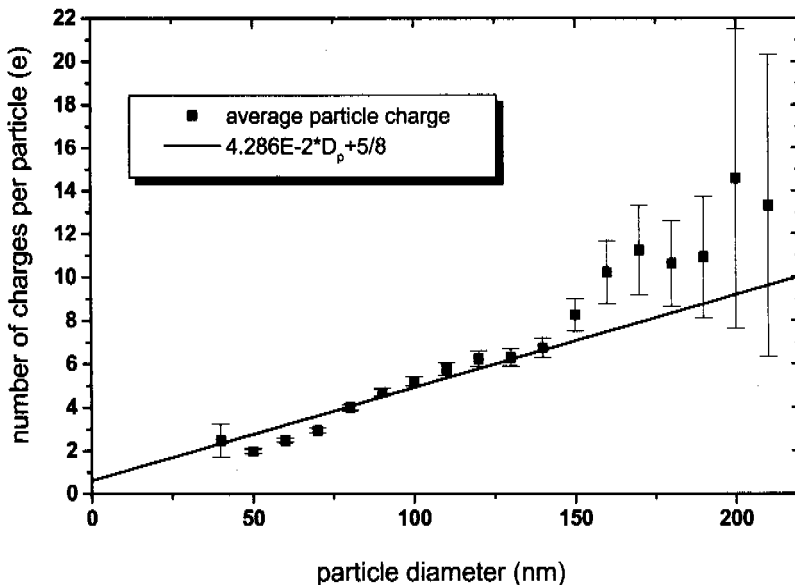


Fig. 5 Average particle charges for Ag aerosol after U.V irradiation

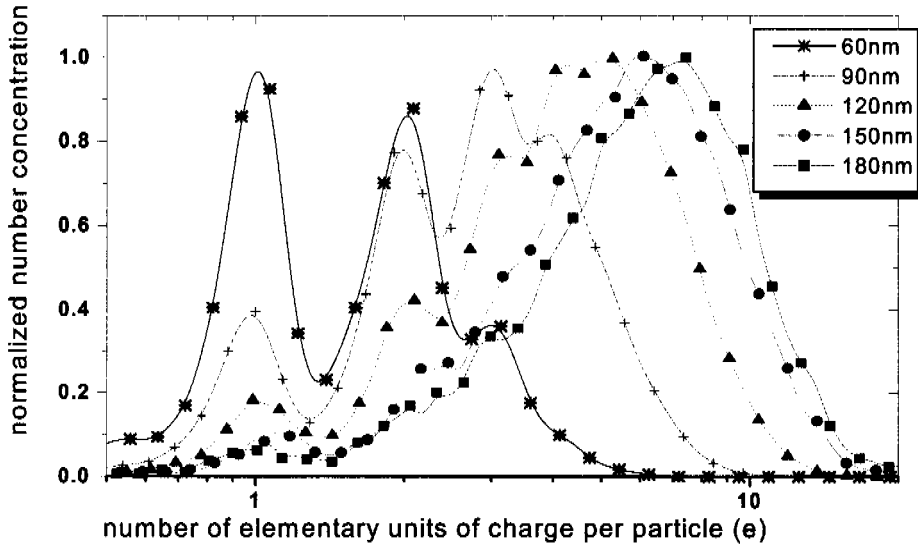


Fig. 6 Charge distributions of an Ag aerosol for various particle diameters charged by U.V irradiation

한 입자의 대전상태이므로 실제 주위의 입자의 광대전에 의한 대전량을 알 수 있다. 1 가의 양대전된 입자를 광대전하는 것은 입자의 초기대전량의 광대전에 대한 영향을 평가하고, 또한 수밀도가 높거나 반응시간이 짧은 광대전장치에서도 쉽게 높은 대전을 시킬 수 있어 균일하게 생성된 입자를 대전시켜서 입자의 대전에 의한 영향을 연구하기 위한 실험에 유용하게 사용될 수 있다.⁽¹¹⁾

측정 입자의 크기는 60, 90, 120, 150, 180 nm 이다. 각각의 초기 대전상태와 입자크기에 따른 광대전에 의한 대전량 분포를 측정한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 평균대전량 측정

Fig. 5 는 입자크기에 따른 평균대전량 측정결과이다. 일반적인 코로나대전에서 입경이 0.5 μ m 이하인 입자는 대략의 실질 대전량은 1~2 가 정도이다. 광대전의 평균대전량은 코로나대전보다 2~5 배의 더 큰 대전량을 보이고 있다. 평균대전량은 입자의 크기에 따라 선형적인 결과를 얻었다. 그러나 150 nm 이상에서는 입자의 발생이 적어 오차가 커지면서 대전량이 과대 측정되었다. 평균대전량의 실험결과는 근사적으로 다음과 같은 함수가 된다.

$$\text{평균대전량 } (e) = 4.286 \times 10^{-2} D_p + \frac{5}{8} \quad (4)$$

이 실험결과에서 입자의 광전자 방출에너지 (photoemission)을 추정할 수 있다. 만일 포화 대전이 되어있다고 가정하면, 수은램프에서 나오는 파장이 253.7 nm 인 자외선의 에너지는 4.88 eV 이므로 광전자 방출에너지 ϕ_0 는 4.754 eV 로 유도된다.

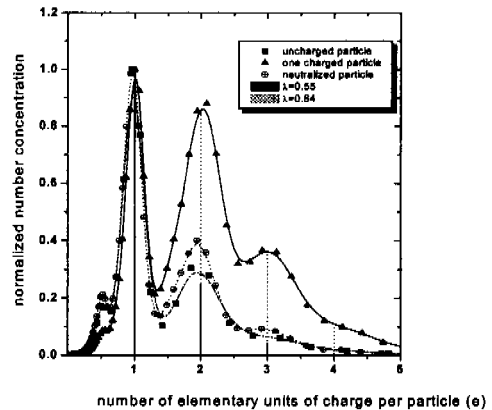


Fig. 7 Charge distribution of size 60nm for three cases comparison to theory

일반적인 순수 은(Ag)의 광전자 방출에너지는 4.3 eV 로 알려져 있으나, 표면에 불순물이 반응해 붙어있고 완전한 구형의 입자가 아니므로 광전자 방출에너지가 높게 나타난다. 이는 기존의 광대전 연구성과와 정성적인 일치를 이루고 있다.⁽²⁾

4.2 대전량 분포 측정

Fig. 6 은 광대전에서 입자크기에 대한 대전량 분포를 측정된 결과이다. 각각의 입자크기에 대하여, 대전량 분포에서 최대의 수밀도로 각각의 대전량 수밀도를 나누어 normalize 시켰다. 실험에 쓰인 입자는 광대전을 시키기 전에 1 가의 양 대전이 되어있는 상태.

이 실험에서 입자의 크기가 클수록 광대전에 의한 입자의 대전분포는 큰 대전량으로 이동하여

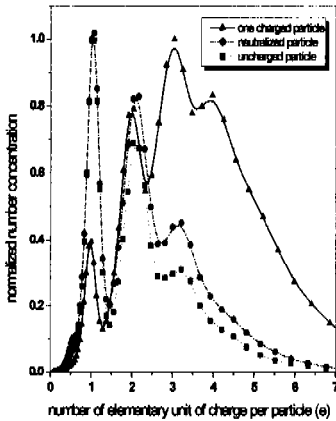


Fig. 8 Charge distribution of 90nm size for three cases

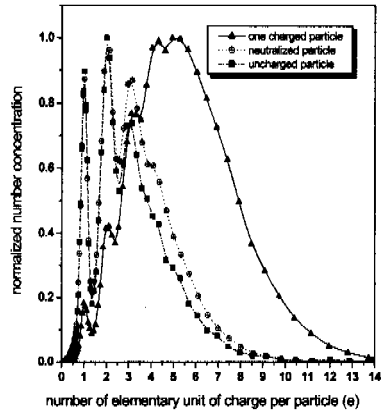


Fig. 9 Charge distribution of 120nm size for three cases

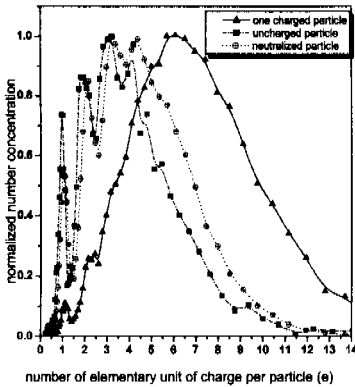


Fig. 10 Charge distribution of 150nm size for three cases

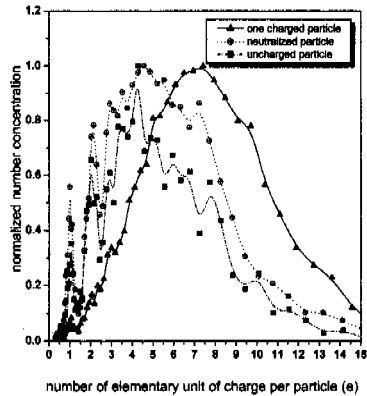


Fig. 11 Charge distribution of 180nm size for three cases

분포를 나타낸다. 이는 입자의 크기가 클수록 광자를 받는 면적이 넓어지므로 가능한 결과이다.

Fig. 7은 60 nm 입자의 각 초기 대전상태에 따른 입자의 대전량 분포이다. 약하게 대전된 입자의 대전량 분포는 푸아송 확률분포를 가진다고 알려져 있다. 광자 하나가 입자에서 전자를 방출할 확률이 매우 낮고 입자에 쪼여지는 광자수는 무수히 많으므로 이산 확률분포에서 푸아송 확률분포로 근사된다. 이것은 주기적인 전자의 방출을 뜻한다. 입자가 p 의 대전량을 가질 확률 P_p 는 다음과 같다.

입자가 초기 대전이 없는 경우,

$$P_p = \frac{\lambda^p}{p!} e^{-\lambda} \quad (5)$$

입자가 초기에 1가 양대전의 경우,

$$P_p = \frac{\lambda^{(p-1)}}{(p-1)!} e^{-\lambda} \quad (6)$$

푸아송 확률분포의 변수 λ 는 여기시간에 비례한다고 알려져 있다.⁽²⁾

위 실험결과에서 대전되지 않은 입자와 1가의 양대전 입자에 대해서 식 (5), 식 (6)을 적용하여 λ 를 구해보면 60 nm 입자는 λ 의 값이 각각 0.55, 0.84로, 90 nm 입자는 λ 의 값이 각각 1.4, 2.5로 나타났다. λ 는 전자방출 확률인 Y 와 광자의 수 N 의 곱으로 나타난다. 전자방출 확률인 Y 는 빛의 세기, 빛의 파장, 대전량에 따라 달라지는데, 다음과 같이 표현 된다.⁽¹⁾

$$Y = c(h\nu - \Phi(R_p, p))^x \quad (7)$$

$(h\nu > \Phi)$

여기서, 금속의 경우는 $x=2$ 로 알려져 있다. 그리고 c 는 빛의 세기, 흡수, 입자의 형상, 반응시

간에 관계하는 상수이다.

이 실험에서 여기시간, 광자에너지, 대전 물질 및 램프가 동일 함으로 c 값에 의해서 λ 값이 변할 수 있다. 기존의 연구에서 광대전을 시키면 식 (5), 식 (6) 에 의해서 같은 λ 를 가져야 하나, 이번 실험에서는 다른 값이 구해졌다. 그러므로 c 값은 초기 대전량에도 영향을 받는 것으로 사료된다. 이러한 기존의 이론적인 값과의 차이에 대한 규명을 위한 연구가 요구된다.

Fig. 7~11 은 각각의 입자크기에 대하여 초기 대전상태가 완전히 대전되지 않은 입자 (uncharged particle), 중화된 입자(neutralized particle), 1 개의 양 대전의 입자(one charged particle)에 대하여 대전량 분포를 측정한 결과다.

작은 입자의 경우는 중화된 입자와 완전히 대전되지 않은 입자는 거의 같은 정도의 대전량을 보이고 있으나, 비교적 큰 입자경우는 대전량의 차이가 나타난다. 이것은 중화된 입자가 불꽃만 대전분포에 의해 큰 입자는 상당한 초기 대전량을 가지기 때문이다. 입자가 클수록 대전되지 않은 입자와 1 개의 양대전 입자와의 광대전량의 차이가 뚜렷하게 나타나고 있다. 초기 대전량의 영향은 입자의 크기가 클수록 더욱 크게 나타난다.

Fig. 8, Fig. 9 에서 60 nm 입자와 90 nm 입자의 대전량이 0.5 e 의 대전량이 보이는데, 이는 DMA 1 에서 단분포 입자 생성 시에 입자가 크고 대전량이 1 가 이상을 가진 입자가 전기이동도가 같아 동시에 생성된 결과이다. 90 nm 보다 큰 입자는 그러한 입자 발생의 가능성이 작아서 정상적인 대전을 보이고 있다.

실험결과로부터 미소입자를 다른 기존의 대전 장치에 의하여 초기 대전량을 높인 후 광대전을 시켜 더 효율적으로 입자를 대전시킬 수 있는지를 알아보기 위한 실험의 필요성을 느낀다.

5. 결론

자외선에 의해 은(Ag) 입자를 광대전시켜 대전량을 측정하는 실험을 통하여 입자의 광대전의 기본 특성을 이해하고자 하였다. 그래서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 광대전은 200 nm 이하의 입자를 코로나대전에 비해 2 ~ 5 배가량 높게 대전시킬 수 있다. 평균 대전량은 입자의 크기에 따라 선형적으로 증가한다.

(2) 초기 대전량에 따라서 광대전에 의한 입자의 대전 분포가 달라지며 이들의 차이는 입자의 크기가 클수록 더욱 큰 차이를 보인다. 그리고, 전

자방출확률의 계수는 입자의 초기 대전량에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

이번 실험은 확산영역에 있는 미소입자를 광대전시켜 필터에서 대전된 입자의 필터효율에 대한 영향을 연구하기 위한 선행적 단계로서, 광대전에 대한 기본적 특성을 알아보기 위해서 행하였다.⁽¹¹⁾

참고문헌

- (1) Burtcher, H., 1992, "Measurement and Characteristics of Combustion Aerosols with Special Consideration of Photoelectric Charging and Charging by Flame Ions," *J. Aerosol Science*, Vol. 23, pp. 549~595.
- (2) Matter, D., Mohr, M., Fendel, W., Schmit-Ott, A., and Burtcher, H., 1995, "Multiple Wavelength Aerosol Photoemission by Eximer Lamps," *J. Aerosol Science*, Vol. 26, No. 7, pp. 1101~1115.
- (3) Burtcher, H., Scherrer, L., Siegmann, H. C., Schmit-Ott, A. and Federer, B., 1982, "Probing Aerosols by Photoelectric Charging," *J. Appl. Phys.*, 53(5), May.
- (4) Jung, Th., Burtcher, H. and Schmit-Ott, A., 1988, "Multiple Charging of Ultrafine Aerosol Particles by Aerosol Photoemission (APE)," *J. Aerosol Science*, Vol. 19, No. 4, pp. 485~490.
- (5) Bucholski, A. and Niessner, R., 1991, "Indirect Photoelectric Diffusion Charging of Submicron Aerosols," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 22, No. 1, pp. 111~115.
- (6) Mohr, M., Kwetkus, B. A. and Burtcher, H., 1993, "Improvement of Electrostatic Precipitation by UV-Charging of Submicron Particles," *J. Aerosol Science*, Vol. 24, Suppl. 1, pp. S247~S248.
- (7) Fendel, W. and Schmit-Ott, A., 1994, "Chemical Characterization of Nano Particles via Multiple Photoelectric Charging," *J. Aerosol Science*, Vol. 25, Suppl. 1, pp. S531~S532.
- (8) Schwyn, S., Garwin, E. and Schmidt-ott, A., 1988, "Aerosol Generation by Spark Discharge," *J. Aerosol Science*, Vol. 19, No. 5, pp. 639~642.
- (9) Mäkelä, J. M., Aalto, P., Gorbunov, B. Z. and Korhonen, P., 1992, "Size Distributions from Aerosol Spark Generator," *J. Aerosol Science*, Vol. 23, Suppl. 1, pp. S233~S236.
- (10) Helsper, C., Mölter, W., Löffler, F., Wadenpohl, C. and Kaufmann, S., 1993, "Investigations of a New Aerosol Generator for the Production of Carbon Aggregate Particles," *Atmospheric Environment*, Vol. 27A, No. 8, pp. 1271~1275.
- (11) 안강호, 1997, "정전 섬유필터 주위의 입자포집 및 거동에 관한 수치해석적 연구," 대기환경학회논문집(B). 제 21 권, 제 11 호, pp. 1509~1517.