

간접 광대전에 의한 서브 마이크론 입자의 단극하전 특성

최 영 주* · 김 상 수†

(2002년 2월 14일 접수, 2003년 4월 4일 심사완료)

The Unipolar Charging Characteristics of Submicron Particles by Using an Indirect Photoelectric Charging

Youngjoo Choi and Sangsoo Kim

Key Words : Indirect Charging(간접 대전), Photoelectric Charging(광대전), Unipolar Charger(단극 하전기), Submicron particle(서브 마이크론 입자)

Abstract

A new unipolar aerosol charger was developed by using an indirect photoelectric charging. The charger consists of two coaxial tubes, the inner UV lamp wrapped with stainless mesh and the outer Al cylinder. In this study, the effects of flow rate, particle size, and electric field were examined to search the optimal charging conditions with experimental and numerical methods. Monodisperse NaCl particles were fed into an annular space and the particles were charged by negative ions generated from Al plate exposed to the UV light. According to experimental results, the average number of elementary charge on particles increases from 2.5 to 5.5 as particle size increases from 50nm to 130nm at 2.5 L/min and 100V. The average number of elementary charge on particles was maximized at 25V as the electric potential between the stainless mesh and Al plate was varied from 0V to 400V.

기호설명

a_p : 입자의 반경, [m]
 C_c : 커닝햄 미끄럼 보정 계수
 C_{ion} : 이온의 열속도, [m/s]
 D : 브라운 확산계수, [m²/s]
 d : 입자의 지름, [m]
 E : 전기장, [V/m]
 e : 기본 전하량 (= 1.609×10⁻¹⁹ C)
 I : 전류, [A]
 k : 볼츠만 상수, [J/K]
 L : 축 방향 길이, [m]
 n : 농도, [개/m³]
 P : 압력, [torr]
 q_{avg} : 평균대전량
 Q : 유량, [m³/s]
 r : 반경방향 좌표, [m]
 r_1 : 램프의 반지름, [m]
 r_2 : 원통의 반지름, [m]

T : 절대온도, [K]
 u : 유속, [m/s]
 V : 전압, [V]
 Z : 전기적 유동도, [m²/V·s]
 z : 축 방향 좌표, [m]

그리스문자

β : 이온과 입자 사이의 조합확률, [m³/s]
 δ : 제한구(limiting sphere)의 반지름, [m]
 ϵ_0 : 진공 유전율(=8.855×10⁻¹² F/m)
 ϵ_l : 상대 유전율
 η : 투과율
 λ : 평균자유행로, [m]
 Φ : 정전압 포텐셜, [J]
 ξ : 제한구 내 이온의 입자 부착확률

아래첨자

i : 이온
 q : 입자의 대전량
 o : 대전되지 않은 입자

† 회원 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : sskim@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3021 FAX : (042)869-3210

1. 서론

근래에 반도체나 환경 분야에서 미세 입자의 중요성이 대두되기 시작하면서, 미세 입자를 제어하는 방법에 대한 활발한 연구가 계속되어 왔다. 미세 입자를 제어하는 방법으로는 입자의 관성력이나 열영동력, 전기적 특성을 이용한 방법 등이 있다. 이 중에서 전기적 특성을 이용한 방법의 경우, 입자의 대전량이 입자의 거동 및 특성에 미치는 영향이 크므로 효율적인 입자 대전 방법이 필요하다. 일반적인 대전 방법으로 코로나 방전을 이용하여 이온을 발생시켜 입자를 대전시키는 방법이 사용되어 왔는데,⁽¹⁾ 최근 UV 램프를 이용해 입자를 대전시키는 광대전 방법이 연구되고 있다. 이것은 입자의 일함수(work function)보다 큰 에너지를 가진 자외선을 이용하여 입자 표면으로부터 전자를 방출시켜 입자를 대전시키는 방법으로, 코로나 대전에 비해 대전량이 크지만 일함수 값이 자외선 빛 에너지보다 작은 순금속의 경우에만 가능한 방법이다.⁽²⁾

이렇게 자외선을 이용하여 입자를 대전시키는 방법으로는 입자표면에서 직접 전자를 방출시켜 양(+)으로 대전시키는 직접 광대전과 다른 금속 표면에서 전자를 방출시켜 이온을 생성시키고, 이 이온을 이용하여 입자를 음(-)으로 단극 확산 하전시키는 간접 광대전 방법이 있다. 입자표면이나 금속 표면으로부터 방출된 전자는 진공이 아닌 상

태에서는 표면으로의 재부착 가능성이 있으므로, 외부 전기장을 이용해 이온의 재부착을 억제시켜야 한다. 이때 필요한 전기장은 코로나 방전에 비해 적은 에너지로도 가능하기 때문에 대전장치로서의 장점이 있다.

간접 광대전을 이용한 최초의 실험은 Bucholski와 Niessner⁽³⁾에 의해서 이루어졌다. 이 연구에서는 여러 가지 금속봉과 기체에 대한 실험이 수행되었는데, 대체적으로 낮은 대전 결과를 보여줘, 새로운 대전장치로서의 가능성을 제시하는데 그쳤다. 이후 Fujii 등⁽⁴⁾은 간접 광대전을 이용해 입자 제거장치를 개발하였고, Chang⁽⁵⁾은 이러한 간접 광대전에 의해 대전되는 입자 하전 메커니즘의 지배방정식을 제시하였다. Shimada 등^(6,7)은 Fujii 등⁽⁴⁾의 장치를 개선하고 Chang⁽⁵⁾의 지배방정식을 이용하여 실험으로부터 얻은 입자 제거 효율을 수치해석과 비교한 결과, 수치결과가 실험결과와 잘 일치함을 보여주었다. 그러나 이들 실험에 사용된 장치는 램프 주위에 이온을 생성시키는 금속막을 코팅해야 하는데, 그 막의 두께를 수 nm로 얇게 해야 하는 어려움이 있다.

본 실험에서는 간접 광대전 방법을 이용하여 효율적인 서브 마이크론 입자 단극 하전장치를 개발하고자 하며, 유량, 전위차, 그리고 입자의 크기 등 여러 변수에 대한 대전특성을 알아보하고자 한다. 또한, 수치해석을 통해 Chang⁽⁵⁾의 지배방정식의 타당성과 대전장치로서의 성능을 수치적으로 예측할 수 있는지 알아보하고자 한다.

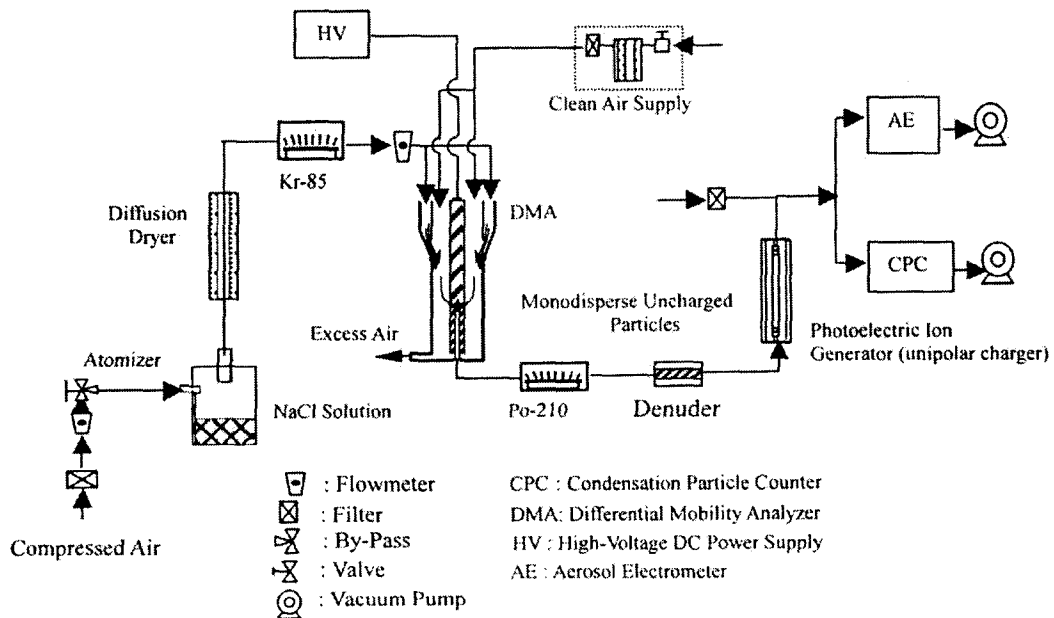


Fig. 1 Experiment setup

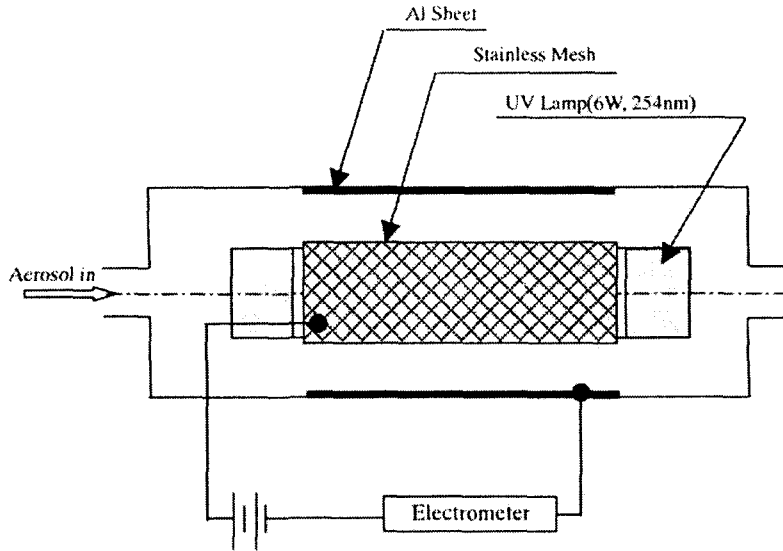


Fig. 2 Photoelectric ion generator

2. 실험

실험장치의 전반적인 구성은 Fig 1 과 같다. 압축 공기가 입자 발생기(Atomizer)로 들어가면 NaCl 액적들이 생성된다. 이 액적들을 확산 건조기(Diffusion Dryer)에 통과시키면 수분은 증발하고 다양한 크기분포를 갖는 고체 NaCl 입자들만 남게 된다. 이 입자들은 DMA(Differential Mobility Analyzer)를 거쳐 단분산 입자, 즉 일정한 크기의 입자로 나오게 된다. 이 때의 입자들은 (+)가 대전된 상태이므로 중화기(Neutralizer)를 거쳐 중성화시킨다. 중화기를 거친 입자들의 대전분포는 볼츠만 분포를 가지는데, 이 중 전하를 띤 입자들은 하전입자 제거기(Denuder)를 통해 제거되고 전하를 띠지 않은 중성 입자들만 대전장치로 보내게 된다. 하전 입자 제거기는 동심축의 두개의 스테인레스 원통으로 구성되어 있으며, 대전된 입자는 두 원통 사이의 전위차에 의해 제거된다. 안쪽 원통의 외경은 40 mm, 바깥쪽 원통의 내경은 50 mm. 하전입자 제거기의 길이는 190 mm 이다. 입자 크기와 유량별 대전된 입자 제거에 필요한 하전입자 제거기의 인가 전압은 약 3-5kV 으로 본 실험에서는 하전 입자 제거기에 5kV 를 인가해 입자 크기와 유량에 상관없이 대전된 입자를 제거 시켰다.

이렇게 생성된 전하를 띠지 않은 단분산 NaCl 입자들은 광대전 이온 발생기를 통해 대전된다. 광대전 장치는 Fig. 2 와 같이 원통 중심에는 UV 램프가 있고 램프 주위엔 스테인레스 망(길이:

175mm, mesh size: 1 mm × 1 mm)이 감싸고 있다. 바깥쪽 원통의 안쪽 면은 광전효과가 일어나도록 일함수가 UV 램프의 에너지보다 작은 알루미늄판(길이: 175 mm, 두께: 0.5 mm, 일함수: 4.3 eV)이 부착되어 있다. 램프 외경과 바깥 원통의 내경은 각각 16 mm와 50mm로 광대전 장치의 전체 길이는 250 mm 이며, 입구와 출구의 내경은 95 mm 이다. 램프는 주파장대가 254 nm ($E=4.88$ eV)인 6W 살균용 UV 램프를 사용하였다.

자외선에 의해 알루미늄 표면에서 나온 광전자는 보통 공기중의 물이나 산소 분자와 결합하여 이온을 형성한다. 발생한 이온의 농도는 스테인레스 망과 알루미늄 판 사이의 전위차에 따른 전류를 미세 전류계(System Electrometer, Keithley Model 6514)로 측정하여 계산하였다. 이렇게 생성된 이온은 램프 주위의 스테인레스 망(+)과 알루미늄판(-) 사이의 전위차에 의해 망쪽으로 이동하고, 그 도중에 입자에 부착해 입자를 음(-)으로 단극 하전시킨다. 대전된 입자들의 일부는 이 영역을 지나 는 동안 전기장에 의해 스테인레스 망에 부착되고 나머지는 출구로 배출된다.

실험에 사용된 NaCl 입자의 경우 순금속에 비해 일함수 값이 크기 때문에 직접 광대전은 일어나지 않는다. 실제로 스테인레스 망과 알루미늄판 사이의 극성을 바꿔 알루미늄판에서 발생한 광전자에 의한 간접 광대전 없이 실험한 결과 전위차의 변화에 상관없이 (+) 대전이 일어나지 않음을 확인하였다. 출구에서 대전된 입자들의 총 전하량과 농도는 입자전류 측정기(Aerosol Electrometer,

TSI 3068)와 응축핵 계수기(Condensation Particles Counter, TSI 3010)로 측정하였다.

초기 대전되지 않은 단분산 입자들은 일정한 농도로 대전장치 안으로 들어가게 된다. 먼저 광대전 장치에 의한 손실을 측정하기 위해 장치가 있을 경우와 없는 경우의 농도를 비교한 결과 최대 5%의 손실이 있었으며, 이 손실은 장치 내부를 흐르는 동안 확산에 의해 관 벽에 부착되면서 발생한 손실이다. 본 실험에서는 광대전 장치 출구에서의 농도를 기준으로 실험하였으며, 신뢰성 있는 입자전류 측정값을 얻기 위하여 입자 농도를 2000 개/cm³ 정도로 하였다.

실험에서는 입자의 크기, 유량 그리고 스테인레스 망과 알루미늄판 사이의 전위차를 변화시켜 평균 대전량과 투과율을 측정하였다. 입자의 크기는 DMA 를 통해 변화시켰으며, 유량은 입자 전류 측정기의 흡인 유량을 변화시켜 1.5~3 L/min 로 변화시켰으며 전위차는 0~400 V 로 변화시켜가며 실험하였다.

평균 대전량(q_{avg})은 출구에서 입자 전류 측정기의 측정 전류와 입자의 농도를 이용해 계산하였고 투과율(penetration rate, η)은 램프를 켜지 않았을 때 출구에서 농도와 램프를 켜고 전기장을 걸어 주었을 때 출구에서의 농도의 비로 나타내었다.

3. 수치해석

3.1 지배 방정식

자외선에 의해 금속 표면에서 나온 광전자는 보통 공기중의 물이나 산소 분자와 결합하여 이온을 형성한다. 본 수치해석에서는 필요한 이온 상수를 산소이온의 값으로 계산하였다. 이 값들은 Table 1 과 같다.

광대전 이온 발생기에서 이온과 입자의 지배 방정식은 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$D_i \nabla^2 n_i - (u + Z_i E) \cdot \nabla n_i = \sum_{q=0}^{\infty} \beta_q n_q n_i \quad (1)$$

$$D_0 \nabla^2 n_0 - u \cdot \nabla n_0 = \beta_0 n_0 n_i \quad (2)$$

$$D_q \nabla^2 n_q - (u + Z_q E) \cdot \nabla n_q = \beta_q n_q n_i - \beta_{q-1} n_{q-1} n_i \quad (3)$$

각 식에서 첫번째 항은 확산에 의해 변하는 농

도, 두 번째 항은 대전된 입자가 유동과 전기장에 의해 이동하면서 변하는 농도이며, 마지막 항은 입자에 이온이 부착됨으로써 변하게 되는 농도의 변화를 나타낸다.

식 (1)-(3)에서 D, n, Z 는 각각 브라운 확산 계수, 농도, 이온이나 입자의 전기적 이동성(electrical mobility)을 나타낸다. 아래 첨자인 i 는 이온, o 은 대전되지 않은 입자, q 는 입자의 대전량을 나타내며 u 는 장치 내 유동 속도, E 는 전기장의 세기를 나타낸다. 조합 확률 β 는 단위 시간당 이온이 대전되거나 대전되지 않은 입자에 붙을 확률을 나타낸다.

각각의 상수들은 다음의 식으로 표현된다.⁽⁴⁾

$$D_i = kTZ_i / e \quad (4)$$

$$D_q = \frac{kTC_c}{3\pi\mu d_q} \quad (5)$$

$$Z_q = \frac{qeC_c}{3\pi\mu d_q} \quad (6)$$

$$C_c = 1 + \frac{20}{Pd_q} \{6.32 + 2.01 \exp(-0.01095Pd_q)\} \quad (7)$$

식 (7)에서 P 와 d_q 의 단위는 torr와 μm 이다. C_c 는 커닝햄 미끄럼 보정 계수이며, k 는 볼츠만 상수(1.38×10^{-23} J/K) 그리고 μ 는 공기의 점성계수를 나타낸다.

식 (1)-(3)에 사용된 조합확률은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\beta_q = \frac{\pi C_{ion} \xi \delta^2 \exp\{-\Phi(\delta)/kT\}}{1 + \exp\{-\Phi(\delta)/kT\} - \frac{C_{ion} \xi \delta^2}{4D_{ion} a} \int_0^{a/\delta} \exp\{\Phi(a/x)/kT\} dx} \quad \text{where } x=a/r \quad (8)$$

$$\Phi(r) = \int_r^{\infty} F(r) dr = \frac{qe^2}{4\pi\epsilon_0 r} \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + 18\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \frac{a^3}{(r^2 - a^2)} \quad (9)$$

$$\delta = \frac{a^3}{\lambda^2} \left\{ \frac{1}{5} \left(1 + \frac{\lambda}{a}\right)^5 - \frac{1}{3} \left(1 + \frac{\lambda^2}{a^2}\right) \left(1 + \frac{\lambda}{a}\right)^3 + \frac{2}{15} \left(1 + \frac{\lambda^2}{a^2}\right)^{3/2} \right\} \quad (10)$$

$\Phi(r)$ 는 입자와 이온 사이에 존재하는 정전기적 포텐셜이며, δ 는 제한구(limiting sphere)의 반지름으로, 이 제한구 이론은 구 안에서 이온은 진공에서의 자유분자처럼 움직이며, 밖에서는 연속체 영역에서처럼 확산에 의해 움직인다고 가정하는 가상의 구를 말한다. ξ 는 충돌 확률로서 제한구 안에

Table 1 Values of ion properties

Ion property	Electrical mobility, Z [$\text{m}^2/\text{V}/\text{s}$]	Molecular weight, M [kg/mol]	Diffusion coefficient, D [m^2/s]	Mean thermal velocity, [m/s]	Mean free path, λ [m]
O_2^-	1.8×10^{-4}	0.032	4.76×10^{-6}	440	1.58×10^{-8}

들어온 이온과 이 이온 중에서 입자에 달라붙는 이온 수의 비로써 보통은 입자의 크기가 작아질수록 작은 값을 갖게 되지만, 50 nm 이상의 입자에 대해서는 거의 1 이 된다.

이 조합 확률은 입자의 지름, 대전량, 온도에 따라 달라지며, 입자의 크기가 커질수록, 온도가 높을수록 크며, 입자와 이온의 극성이 같을 경우 대전량이 작을수록 크다. 이것은 입자의 크기가 커질수록 이온이 붙는 유효 표면적이 넓어지고, 대전량이 작을수록 입자와 이온 사이의 반발력이 적어지며, 온도가 증가할수록 이온의 열속도가 커져 이온 부착 확률이 증가하기 때문이다. 물론 대전량이 이온의 극성과 반대일 경우엔 인력이 작용하므로, 초기 입자의 대전량이 증가할수록 부착 확률은 증가한다.

입자의 크기가 50 nm 이하일 경우 충돌 확률이 1 보다 작으므로, 조합 확률을 계산할 때 충돌 확률을 고려해야 한다.⁽¹⁰⁾

1.2 유동과 전기장

유동은 대전 영역에서 완전 발달 층류 유동으로 가정하였고, 전기장은 영역내의 이온이나 대전된 입자의 영향을 받지 않는다고 가정하고 계산하였다.

유동과 전기장에 관한 식은 다음과 같다.

$$u_r = 0 \tag{11}$$

$$u_z = \frac{2Q}{\pi} \frac{r_2^2 - r^2 - (r_2^2 - r_1^2) \ln(r_2/r) / \ln(r_2/r_1)}{r_2^4 - r_1^4 - (r_2^2 - r_1^2)^2 / \ln(r_2/r)} \tag{12}$$

$$E_r = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \tag{13}$$

$$E_z = 0 \tag{14}$$

$(r_1 \leq r \leq r_2; 0 \leq z \leq L)$

1.3 계산영역과 경계조건

입자의 대전이 이루어지는 축 방향으로 $0 \leq z \leq L$ ($L=175$ mm). 반경 방향으로는 $r_1 \leq r \leq r_2$ ($r_1=8$ mm, $r_2=25$ mm) 영역에 대해서 수치해석을 하였다.

격자는 비균일 격자를 사용하였으며 반경 방향으로는 양쪽 경계면으로 갈수록 격자 간격이 좁아지는 형태로 50 개, 축 방향은 등간격으로 120 개의 격자를 설정하였다.

입구, 출구, 그리고 벽면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$n_0(r, z=0) = n_{in} \quad (r_1 < r < r_2) \tag{15}$$

$$n_q(r, z=0) = 0 \quad (q = 1, 2, 3, \dots, r_1 < r < r_2) \tag{16}$$

$$\frac{\partial n_0}{\partial z} = 0 \quad (r_1 < r < r_2) \tag{17}$$

$$\frac{\partial n_q}{\partial z} = 0 \quad (q = 1, 2, 3, \dots, r_1 < r < r_2) \tag{18}$$

$$n_0 = n_q = 0 \quad (q = 1, 2, 3, \dots, r = r_1, r_2, 0 < z < L) \tag{19}$$

$$n_i = 0 \quad (r = r_1, 0 < z < L) \tag{20}$$

$$n_i = \frac{I \ln(r_2/r_1)}{2\pi LeVZ} \tag{21}$$

여기서 I 는 램프 주위 스테인레스 철망(+)과 알루미늄 판(-) 사이에 흐르는 전류를 나타낸다.

1.4 대전량과 투과율

식 (1)-(3)과 경계조건을 이용해 수치계산을 수행하여, 출구에서 대전된 입자와 대전되지 않은 입자의 농도분포를 구하였다. 평균 대전량과 투과율은 다음 식을 사용하여 구하였다.

$$q_{avg} = \frac{\sum_{q=1}^{\infty} q \int_{r_1}^{r_2} u_z(r, L) n_q(r, L) r dr}{\sum_{q=0}^{\infty} \int_{r_1}^{r_2} u_z(r, L) n_q(r, L) r dr} \tag{22}$$

$$\eta = \frac{\sum_{q=0}^{\infty} \int_{r_1}^{r_2} u_z(r, L) n_q(r, L) r dr}{\int_{r_1}^{r_2} u_z(r, 0) n_0(r, 0) r dr} \tag{23}$$

4. 결 과

Fig 3은 철망과 알루미늄 판 사이의 전위차의 변화에 따른 전류를 미세 전류계 (System Electrometer, Keithley Model 6514)로 측정된 것으로 전위차가 증가할수록 전류가 증가하는 것을 보여준다. 이것은 전위차가 증가할수록 전기장에 의해 이온의 속도가 증가하기 때문이다. Fig 4는 전위차에 따라 측정된 전류를 식 (21)을 이용하여 이온 농도로 변환한 것을 나타내는데, 전위차가 증가할수록 이온 농도가 감소하는 것을 알 수 있다. 일정한 시간 간격으로 알루미늄판에서 이온이 발생한다고 가정하면, 전기장의 세기가 커질수록 이온이 전기장에서 받는 가속력이 커지므로 시간이 지날수록 이온들 사이의 간격이 증가하여 결과적으로 영역 내에서 농도가 감소하는 것으로 생각된다.

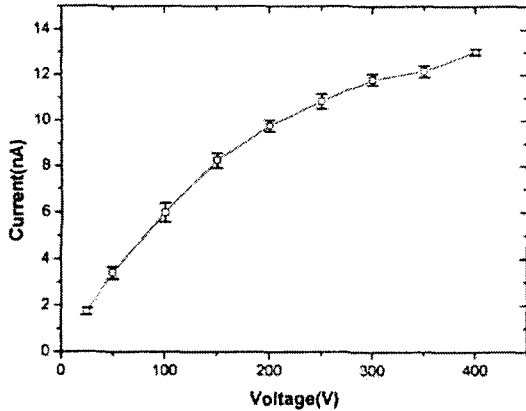


Fig. 3 Measured current between the electrode (stainless mesh) and ground (Al sheet)

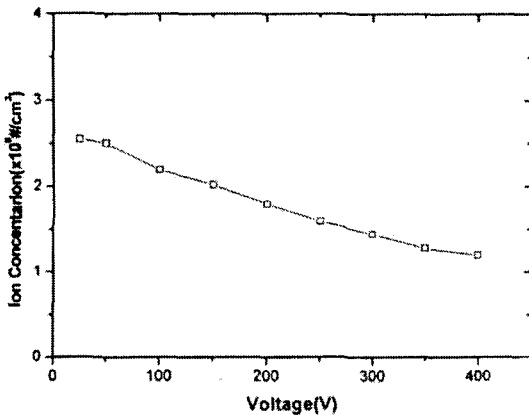


Fig. 4 Ion concentration Calculated by Eq. (21)

본 연구에서는 50~130 nm 입자에 대해서 유량과 스테인레스 망과 알루미늄판 사이의 전위차에 따른 평균 대전량과 투과율의 경향을 실험적으로 살펴 보았다.

Figs. 5 와 6 은 입자의 크기가 75 nm, 100 nm 일 때, 유량과 전기장의 변화에 따른 평균 대전량과 투과율을 나타낸다. 유량이 커질수록 평균 대전량은 작아지는데, 이것은 장치 내 입자의 체류시간이 짧아지기 때문이다. 전위차의 변화에 따른 평균 대전량은 전위차가 0~50V 로 변할 때 급격히 증가하다가 이후 서서히 감소한다. 장치 내 전위차를 인가했을 때, 평균 대전량이 급격히 증가하는 것은 알루미늄판에서 나온 광전자의 재부착이 줄어들면서 발생 이온의 농도가 급격히 증가하기 때문이며, 이후 평균 대전량이 작아지는 것은 Fig 4 에서 알 수 있듯이 전위차가 증가할수록 장치 내 이온의 농도가 감소하기 때문이다. 장치 내 전위차가 0V 인 경우에 평균대전량이 0 이 아닌 이유는 알루미늄 판 근처에서 일부 대전된 입자의

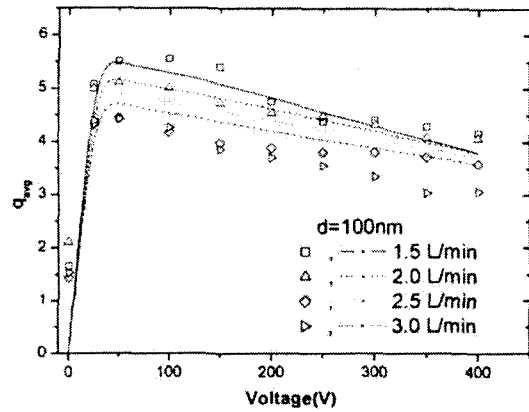
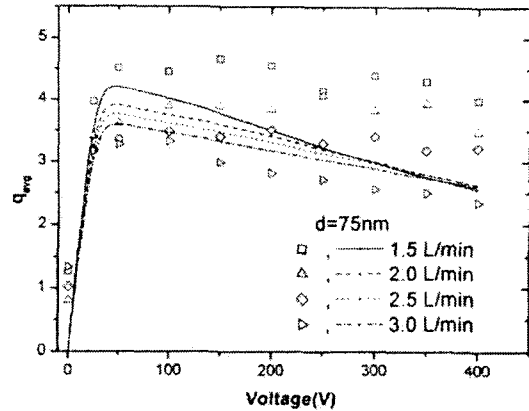


Fig. 5 Change in the number of charges with the voltage between the electrode and ground (Symbol: measured, Line: calculated)

영향으로 생각된다.

투과율의 경우 유량이 커질수록, 전위차가 작을수록 커진다. 이것은 유량이 클수록 체류 시간이 줄어들어 대전량이 적어지므로 전기장에 의해 스테인레스 망으로 제거되는 입자의 양이 적어지기 때문이다. 전위차가 커질수록 입자의 대전이 적게 되므로 전기장에 의해 손실되는 입자 농도가 줄어들 것으로 생각되지만, 입자의 평균 대전량의 감소량에 비해 전위차의 증가량이 크기 때문에 입자 대전이 적게 일어나더라도 전기장에 의한 장치 내 입자 손실은 커져 투과율이 감소한다.

수치해석 결과는 실험과 정성적으로 비슷한 결과를 보여준다. 평균 대전량의 경우 전위차가 큰 경우에 일부 역전되는 결과를 보여주는데 이것은 유량이 작을 때 전위차가 커지면 유량이 클 경우보다 스테인레스 망으로 대전량이 큰 입자가 많이 부착되어 결과적으로 평균 대전량이 감소하기 때문이다. 수치해석 결과와 실험결과값이 차이가 나는 것은 UV 램프의 온도에 의한 열영동 효과와 대전되지 않은 입자들의 영향으로 보인다. 실험에

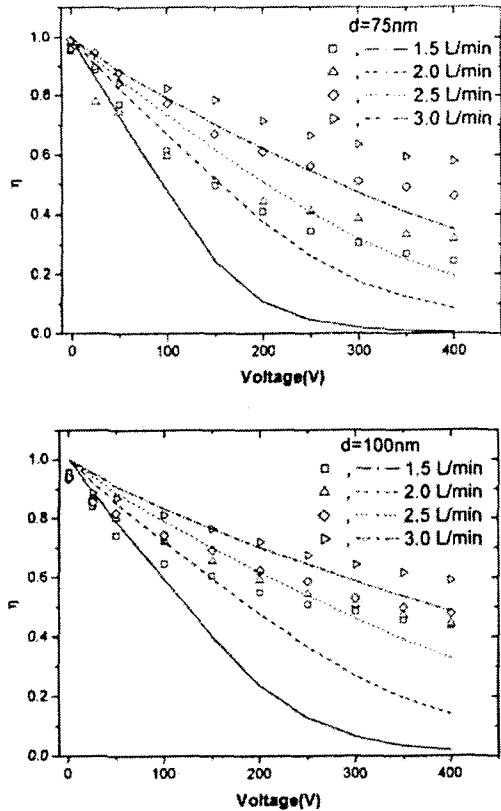


Fig. 6 Change in the penetration rate with the voltage between the electrode and ground (Symbol: measured, Line: calculated)

사용된 UV 램프의 표면 온도는 알루미늄 판보다 높기 때문에 램프와 알루미늄 판사이의 열영동 효과로 입자를 램프쪽에서 알루미늄 판쪽으로 밀어 내 대전 영역에서의 입자와 이온의 충돌 빈도를 증가시켜 평균대전량이 커지기 때문으로 생각된다. 이번 수치해석의 목적은 서브마이크론 입자의 단극 확산 하전 실험 결과를 기존의 Chang⁽⁵⁾의 지배 방정식을 이용한 수치해석 결과와 비교하는 것이기 때문에 열영동 효과는 고려하지 않았다.

투과율의 경우 실험값은 전위차가 증가할수록 투과율의 감소량이 감소하지만 수치해석 결과에서는 이런 경향이 보이지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 수치해석과는 달리 실제 실험에서는 대전되지 않은 입자가 존재하기 때문으로 생각된다.

입자의 크기에 따른 입자의 평균 대전량과 투과율은 Figs.7과 8에 나타나 있다. 입자의 평균 대전량의 경우, 입자의 크기가 커질수록 이온 부착 표면적이 넓어지기 때문에 증가하며, Fig.4에서 나타난 것처럼 전위차가 커질수록 장치 내 이온의 농도가 감소하기 때문에 감소한다. 투과율의 경우 입자의 크기가 커질수록 대전량이 많아져 투과율이 줄어들 것으로 생각되지만, 대전 입자가 전기

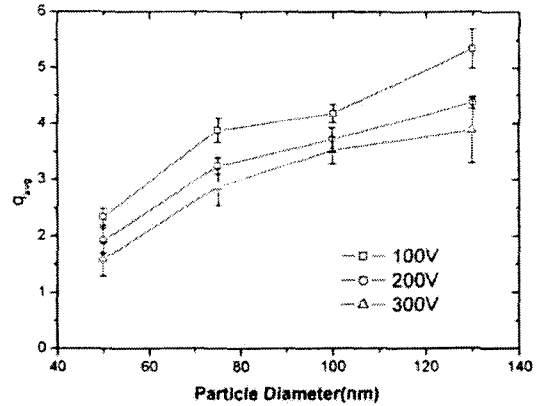


Fig. 7 Change in the number of charges with the particle diameter at 2.5 L/min

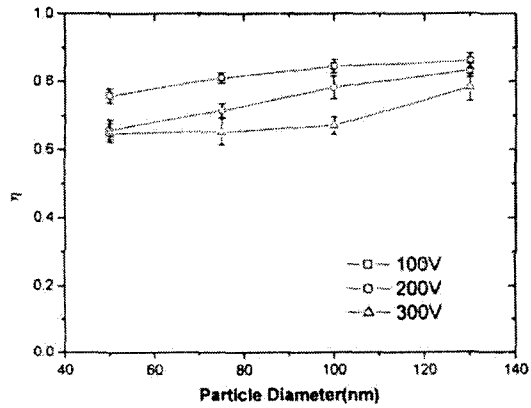


Fig. 8 Change in the penetration rate with the particle diameter at 2.5 L/min

장 내에서 갖는 이동 속도(migration velocity, $v=qEC/3\pi\mu d_q$)는 입자의 크기가 작을 때 더 큰 값을 가지므로 입자의 크기가 작을수록 투과율이 작다.

본 연구에서 대전장치의 성능은 평균 대전량과 투과율을 곱한 값으로 평가하였다.

Fig. 9에서 나타난 것처럼 입자의 지름이 75 nm, 100 nm인 경우 모두 스테인레스 망과 알루미늄 판사이의 전위차가 25 V인 경우에 최대값을 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 전위차가 작은 경우, 대전 영역내의 이온의 농도가 높아 대전량도 높고, 전기장이 세지 않기 때문에 대전된 입자의 손실 또한 적어 높은 투과율을 갖기 때문이다.

5. 결론

본 연구를 통해 간접 광전을 이용한 새로운 단극 확산 하전 장치를 개발하였다. 결과에서 알 수 있듯이 입자의 평균 대전량은 유량이 2.5 L/min, 전위차가 100 V인 경우 입자의 크기가 50 nm에서 130 nm로 커질 때 입자의 평균 대전량은 대략 2.5

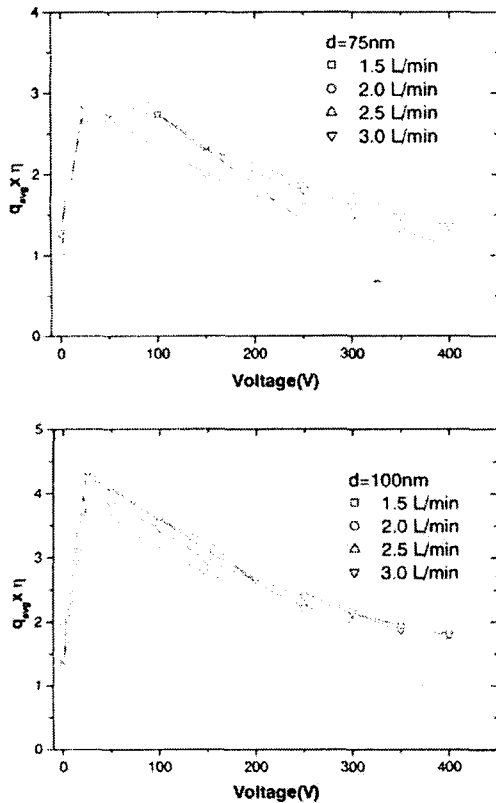


Fig. 9 Change in $q_{avg} \times \eta$ with the voltage between the electrode and ground

에서 55로 변하며, 입자의 크기가 커질수록, 유량이 작을수록 그리고 전위차가 작을수록 커지는 것을 알 수 있었다. 투과율은 입자의 크기가 커질수록, 유량이 클수록 그리고 전위차가 작을수록 커진다. 에너지 측면에서 볼 때 입자 대전이나 투과율은 전위차가 25 V일 때 최대값을 가지므로 대전 장치로서의 장점이 있음을 알 수 있었다.

수치해석 결과는 실험결과와 정성적으로 비슷한 경향을 보여준다. 하지만 실제 간접 광대전에서 발생한 이온에 대한 연구와 램프와 알루미늄 판 사이의 열영동 효과 등을 고려한 Chang⁽⁵⁾의 지배방정식의 수정이 필요할 것으로 생각된다.

본 장치의 단점은 알루미늄의 산화로 인해 장시간 사용이 어렵다는 것이다. 알루미늄은 순금속 중에서 낮은 일함수(4.3eV) 값을 갖지만 이온화 경

향이 크기 때문에 산화가 쉽게 일어난다. 특히 간접 광대전의 경우, 알루미늄 금속표면으로부터 전자를 방출시켜 산화를 촉진시키므로, 알루미늄 표면에 산화물이 생성되어 광전효과에 의한 전자 방출을 방해한다. 따라서 안정적인 대전장치로 사용하기 위해서는 비교적 산화가 잘 되지 않는 금속을 이용한 장치 개선이 필요하다.

참고문헌

- (1) Park, H. H, Kim, S. S., 1999, "Characteristics of the Pre-charged particle deposition for impactor subjected to an electric field," *Trans. KSME*, Vol.23 No.3, pp.299~310.
- (2) Lee, C. S., Kim, Y. J., and Kim, S. S., 2000, "An experimental study on the characteristics of direct photoelectric charging," *Trans. KSME*, Vol.24 No.6, pp.753~759.
- (3) Bucholski, A., and Niessner, R., 1991, "Indirect photoelectric diffusion charging of submicron aerosols," *J. Aerosol Sci.*, Vol.22, pp.111~115.
- (4) Fujii, T., Suzuki, H., and Sakamoto, K., 1993, "Super cleaning of space by photo electric charging and collection unit," *J. Aerosol Res. Jpn.*, Vol.8, pp.54~57.
- (5) Chang, J. S., 1994, "Generation of aerosol free space by the low energy electron particulate system clean box technology," *J. Aerosol Sci.*, Vol.25 (suppl.), S213-S214.
- (6) Shimada, M., Cho, S. J., Okuyama, K., Tamura, T., Adachi, M., and Fujii, T., 1997, "Removal of airborne particles by a tubular particle-removal device using UV/photo electron method," *J. Aerosol Sci.*, Vol.28, pp.649~661.
- (7) Shimada, M., Okuyama, K., Inoue, Y., Adachi, M., and Fujii, T., 1999, "Removal of airborne particles by a device using UV/photo electron method under reduced pressure condition," *J. Aerosol Sci.*, Vol.30, pp.341~353.
- (8) 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.
- (9) Hinds, W. C., 1982, *Aerosol Technology*, Wiley, New York.
- (10) Hoppel, W. A., and Frick, G. M., 1986, "Ion-aerosol attachment coefficients and the steady-state charges distribution on aerosols in a bipolar ion environment," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol.5, pp.1~5.