

## 2 차원 4 극 전극 사이에서의 하전 입자의 동전기력학적 거동

박석주<sup>†</sup> · 임정환\* · 김상도\* · 최호경\* · 박현설\* · 박영옥\*

Peter H. McMurry<sup>\*\*</sup>

(2000년 12월 8일 접수, 2001년 3월 14일 심사완료)

### Electrodynamic Behavior of a Charged Particle among Two-Dimensional Quadrupole Electrodes

Seok Joo Park, Jeong Hwan Lim, Sang Do Kim, Ho Kyung Choi, Hyun Seol Park, Young Ok Park and Peter H. McMurry

**Key Words :** Electrodynamic Field (동전기장), Particle Focusing (입자 집중), Quadrupole Electrodes (4 극 전극), Quadrupole Cell (4 극셀), Nano-Sized Particle (나노입자)

#### Abstract

An inhomogeneous hyperbolic electric field is established among two-dimensional quadrupole electrodes to which an ac voltage is applied. Conditions under which charged particles are focused into a narrow axis region of the plug laminar flow are discussed. The aerodynamic drag and electrodynamic forces influence the behavior of the charged particles in the quadrupole electric field. We derived the dimensionless equations of motion of a charged particle in the alternating quadrupole electric field, and discussed particle trajectories and focusing performance in terms of two dimensionless parameters, which are functions of particle size, operating pressure, and the amplitude and frequency of applied AC voltage, with the results of numerical simulations and experiments.

#### 1. 서론

Electrodynamic Focusing 은 AC 전압이 인가된 전극들간에 형성되는 동전기력(electrodynamic force)을 이용하여 하전된 입자들을 전기장의 중앙으로 포커싱시키는 기술이다. 주로 이 기술은 현재 Electrodynamic Balance 와 Mass Spectrometer 에 적용되고 있다. Electrodynamic Balance 는 두 개의 상하 전극과 한 개의 링전극으로 구성된 전극셀에 AC 와 DC 전압을 인가함으로써 마이크론 크기의 하전입자를 셀 중앙 위치에 집중시키는 장치이다. 링전극에 인가되는 AC 전압은 하전입자를 셀 중앙으로 이동시키며, 두 상하전극에 인가되는 DC 전압은 입자의 중력에 대한 평형력으로 작용된다.

셀 중앙에 집중된 하전입자는 광산란, 입자의 질량 및 하전량, 액적 증발률 측정 및 가스와 입자간의 화학반응 등의 다양한 입자공학 연구에 사용되고 있다.<sup>(1)</sup> 그리고 Mass Spectrometer 는 이온분자의 동전기장(electrodynamic field) 내에서의 진동운동의 안정도 특성(stability characteristics)을 이용하여 진공 중에서의 가스상 이온분자의 물리적 물성 및 화학적 조성을 측정하는 장치이다.<sup>(2)</sup>

최근 여러 연구 조사에 따르면 나노입자(nano-sized particle)가 인체에 아주 해로운 영향을 미칠 수 있다고 발표되고 있다.<sup>(3-8)</sup> 그러나 대기 중에 속해있는 나노입자의 다량 포집에 어려움이 있기 때문에 현실적으로 나노입자의 성분 및 해악성 그리고 나노입자 생성 메카니즘 등의 정확한 규명이 불가능한 상황이다. 현재 Submicron 크기 입자의 포집률을 높이기 위해서 Aerodynamic Focusing 기술을 이용한 입자빔 질량분석기(PBMS, Particle Beam Mass Spectrometer)의 연구 개발이 수행되고 있다.<sup>(9,10)</sup> 그러나 나노입자의 포집률을 높이기 위한 방법으로 Aerodynamic Focusing 기술을 이용하는 데에는 물리적으로 한계가 있기 때문에 적용이 불가능한 것으로 밝혀진 상태이다.

\* 한국에너지기술연구소, 집진기술연구센터

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국에너지기술연구소, 집진기술연구센터

E-mail : sjpark@kier.re.kr

TEL : (042)860-3649 FAX : (042)860-3134

\*\* University of Minnesota, Department of Mechanical Engineering

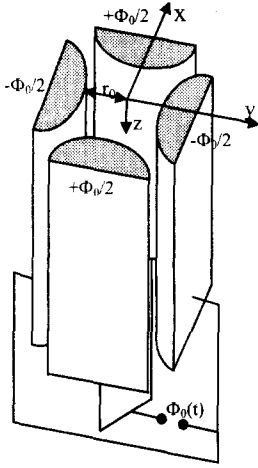


Fig. 1 Quadrupole electrode geometry

본 연구에서는 Fig. 1 에서와 같은 4 극 전극으로 구성된 구조물(본 논문에서는 4 극셀이라고 칭함) 내에서의 2 차원 교류전기장을 이용하여 미세입자를 4 극셀의 중앙으로 포커싱시키는 Electrodynamic Focusing 에 대한 수치해석과 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 미세입자의 포집(sampling) 효율을 향상시킬 수 있는 방법으로 본 기술의 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

$2n$  의 극 수로 구성된 전극 구조체 내에 구성된 전계분포는<sup>(11)</sup>

$$\Phi = \frac{1}{2} \Phi_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^n \cos n\theta \quad (1)$$

과 같고,  $r_0$  는 마주보는 극간 거리의 1/2 을 의미한다.  $\Phi_0$  는 반대 극 사이에 인가되는 전압차를 의미하며,  $\Phi_0 = U + V \cos \Omega(t + t_0)$  와 같이 표현된다. 여기서  $\Omega t_0$  는 하전입자가 셀 내로 유입되어 최초로 동전기력의 영향을 받을 때의 교류전기장의 위상차를 의미한다.  $U$  는 DC 전압크기이며,  $V$  는 각주파수(angular frequency)  $\Omega$  를 가지는 AC 전압크기이다.  $\Omega = 2\pi f$  로 표현이 되며,  $f$  는 교류주파수(alternating frequency)를 의미한다. DC 전압은 동전기장 내에서의 하전입자의 안정된(stable) 거동현상에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>(12-16)</sup> DC 전압이 인가되지 않을 때 입자거동이 안정되게 이루어지는 조건의 영역이 최대이기 때문에, 본 연구에서는 문제의 단순화를 위하여 DC 전압

의 영향을 고려하지 않기로 하였다.

2 차원 직각 좌표계로 표현되는 전기장세기는 다음과 같이 표현된다.<sup>(11)</sup>

$$E_x = -\frac{\Phi_0}{2r_0} n \left( \frac{r}{r_0} \right)^{n-1} \cos(n-1)\theta \quad (2)$$

$$E_y = \frac{\Phi_0}{2r_0} n \left( \frac{r}{r_0} \right)^{n-1} \sin(n-1)\theta \quad (3)$$

4 극셀인 경우  $2n = 4$  이므로 전기장세기는

$$E_x = -\frac{\Phi_0}{r_0^2} x, \quad E_y = \frac{\Phi_0}{r_0^2} y \quad (4)$$

와 같이 표현된다.

중력의 영향을 무시하면, 동전기장내에서의 하전입자의 운동방정식은 다음과 같다.<sup>(17)</sup>

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \frac{3\pi\mu d_p}{C_c} (u_f - u_p) + q_p E_x \quad (5)$$

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{3\pi\mu d_p}{C_c} (v_f - v_p) + q_p E_y \quad (6)$$

$$m_p \frac{dw_p}{dt} = \frac{3\pi\mu d_p}{C_c} (w_f - w_p) \quad (7)$$

위 식에서  $m_p$  는 입자질량이고,  $u_p, v_p, w_p$  는  $x, y, z$  성분의 입자속도이며,  $t$  는 시간을 나타낸다.  $\mu$  는 기체점성계수이고,  $u_f, v_f, w_f$  는  $x, y, z$  성분의 기체 속도이다.  $d_p$  는 입자직경이며,  $q_p$  는 입자하전량을 나타낸다. 미끄럼보정계수는 다음과 같다.

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[ 2.514 + 0.8 \exp \left( -0.55 \frac{d_p}{\lambda} \right) \right] \quad (8)$$

기체의 평균자유행로는

$$\lambda = \lambda_0 \left( \frac{T}{T_0} \right) \left( \frac{P_0}{P} \right) \quad (9)$$

이고,  $\lambda_0$  는 상온상압인 표준조건에서의 값을 의미하며,  $\lambda_0 = 0.066 \mu\text{m}$  이다. 식 (2)와 (3)을 식 (5)와 (6)에 대입하면

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \frac{3\pi\mu d_p}{C_C} (u_f - u_p) - q_p \frac{\Phi_0}{2r_0} n \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} \cos(n-1)\theta \quad (10)$$

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{3\pi\mu d_p}{C_C} (v_f - v_p) + q_p \frac{\Phi_0}{2r_0} n \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} \sin(n-1)\theta \quad (11)$$

과 같이 된다. 식 (10)과 (11)은 다음과 같은 무차원 변수들을 이용하여 무차원화될 수 있다.

$$u_p^* = \frac{2u_p}{\Omega r_0}, \quad v_p^* = \frac{2v_p}{\Omega r_0}, \quad t^* = \frac{\Omega t}{2}, \quad r^* = \frac{r}{r_0} \quad (12)$$

만약 기체유동을 z 방향으로의 2차원 층류 Plug 유동이라고 가정하면,  $u_f$  와  $v_f$  는 무시되고 z 방향으로의 입자운동은 동전기장 내에서의 비행시간으로 고려될 수 있으므로, 최종적으로 하전입자의 무차원 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{du_p^*}{dt^*} = -\alpha u_p^* - \beta n r^{*n-1} \left(\frac{U}{V} + \cos(2t^* + \phi_i)\right) \cos(n-1)\theta \quad (13)$$

$$\frac{dv_p^*}{dt^*} = -\alpha v_p^* + \beta n r^{*n-1} \left(\frac{U}{V} + \cos(2t^* + \phi_i)\right) \sin(n-1)\theta \quad (14)$$

위 식에서  $\Phi_i = \Omega t_0$  이다. 식 (13)과 (14)에서의 무차원수는

$$\alpha = \frac{6\pi\mu d_p}{m_p C_C \Omega} = \frac{2}{\tau \Omega} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{2q_p V}{m_p \Omega^2 r_0^2} \quad (16)$$

과 같으며, 입자의 완화시간(relaxation time)은

$$\tau = \frac{m_p C_C}{3\pi\mu d_p} = \frac{\rho_p d_p^2 C_C}{18\mu} \quad (17)$$

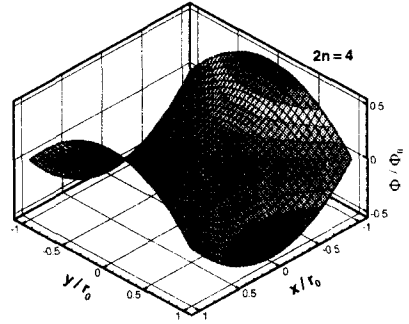


Fig. 2 Potential distribution on z-directional cross section of quadrupole cell at  $t = 0$  when phase difference is 0

과 같이 표현된다. 무차원수  $\alpha$ 는 점성력과 관성력의 비를 의미하며,  $\beta$ 는 전기장의 불균일로 인하여 야기되는 전기장 구배력(field gradient force)과 관성력의 비를 의미한다.<sup>(2)</sup> 동전기장 내에서의 입자거동 궤적을 구하기 위하여 식 (13)과 (14)를 다음의 위치방정식 (18)과 (19)와 함께 Runge-Kutta 적분법을 이용하여 계산하였다.

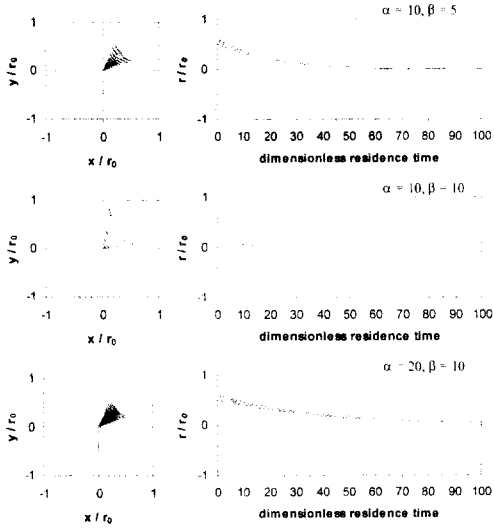
$$\frac{dx^*}{dt^*} = u_p^* \quad (18)$$

$$\frac{dy^*}{dt^*} = v_p^* \quad (19)$$

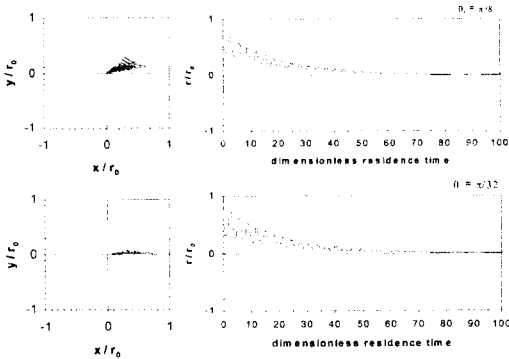
### 3. 수치해석 결과

4극셀의 단면은 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 쌍곡선면(hyperbolic surface)을 가진다. 인접한 양극에 인가되는 전압차가  $\Phi_0$  일 때 4극셀 단면에 형성되는 전계분포는 Fig. 2와 같다. 전기장 세기의 절대값은 4극셀의 중앙에서 최소임을 알 수 있다. 그러므로 하전입자는 전기장의 불균일에 의하여 야기되는 힘에 의하여 셀 중앙으로 이동하여 모이게 된다.<sup>(2)</sup>

Fig. 3에서는 무차원수  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 따른 입자의 거동 특성을 보여준다.  $\alpha$ 가 10이고,  $\beta$ 가 5에서 10으로 증가할 경우, 전기장 구배력이 증가하기 때문에 입자가 셀 중앙으로 이동하는데 걸리는 무차원 시간이 감소한다. 그러나  $\beta$ 가 10이고  $\alpha$ 가 10에서 20으로 증가할 경우, 포커싱에 소요되는 무차원 시간이 더 증가한다. 그 이유는 점성력이 큰 입자일수록 짧은 시간 내에 주위 유체 유동에 의하여 그 운동이 지배되기 때문에, 점성력이 작은 입자에 비하여 교류전기장의 변화로 인한 입자의 운동 변화에 의하여 야기되는 가속운동이 유체의 저항력에 의하여 줄어들기 때문에 입자가 포커싱되는데 소요되는 시간이 더 길어진다.



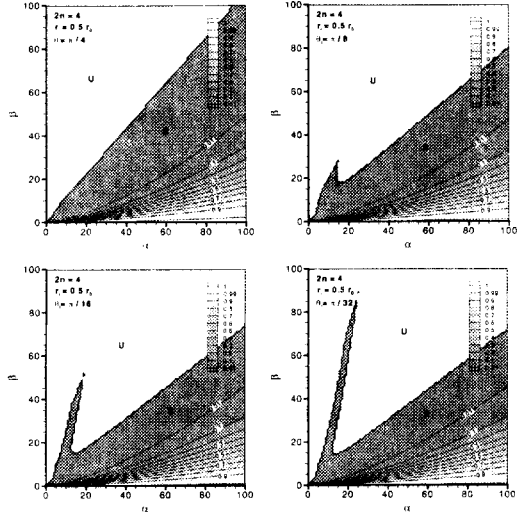
**Fig. 3** The variation of a particle trajectory along the change of  $\alpha$  and  $\beta$  (initial starting point:  $r_i = 0.5r_0$ ,  $\theta_i = \pi/4$ , initial phase  $\phi_i = 0$ ; dimensionless residence time  $t^*_{res} = 1000$ )



**Fig. 4** The difference of a particle trajectory with a different tangential starting point ( $\alpha = 10$ ,  $\beta = 5$ ;  $r_i = 0.5r_0$ ,  $\phi_i = 0$ ;  $t^*_{res} = 1000$ )

Fig. 4 는 반경거리가  $0.5r_0$ 로 일정하고 각도가  $\pi/8$  과  $\pi/36$  인 위치에서 4 극셀 내로 하전입자가 유입될 경우 입자거동의 차이를 보여준다. 출발점에서의 교류전기장의 위상차가 0 이고  $\alpha = 10$ ,  $\beta = 5$  일 때 출발점의 각도 위치가 포커싱에 소요되는 무차원시간에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

그러나 출발점의 각방향 위치가 Fig. 5 에 나타난 바와 같이 하전입자가 포커싱이 되는 영역(S 로 표시된 영역)과 포커싱이 되지 않는 영역(U 로 표시된 영역)을 나누고 있는  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 경계값에 영



**Fig. 5** Contours of relative focusing point with different tangential starting point ( $r_i = 0.5r_0$ ,  $\phi_i = 0$ ;  $t^*_{res} = 1000$ ); relative focusing point =  $r_e / r_i$  ( $r_e$  and  $r_i$  are the radial distances of a particle from the z-axis at the exit and at the inlet)

향을 미치는 것을 알 수 있다. 그 이유는 하전입자가 진동운동으로 인하여 전극 표면에 충돌 부착되기 때문이다. Fig. 5 는 반경방향 위치가  $0.5r_0$  인 경우 각방향 위치 변화에 따른 하전입자의 상대포커싱점(relative focusing point)을 보여준다. 상대포커싱점은 하전입자의 셀 입구( $t^* = 0$ )에서의 z 축으로부터의 수직 반경거리에 대한 출구(주어진 무차원 비행시간이 경과한 지점)에서의 반경거리의 상대적인 비를 의미한다. Fig. 5 에서 S (stably focused)는 Fig. 3 과 4 에서와 같이 하전입자가 안정하게 진동하면서 셀 중앙으로 포커싱 되는 경우를 의미하며, U(unfocused)는 큰 폭의 진동운동이나 불안정한 발산진동(unstable divergent oscillation)에 의하여 전극 표면에 충돌 부착되는 경우를 의미한다.<sup>(14-16)</sup> 출발점의 각도가  $\pi/4$  에서 0 으로 감소함에 따라 포커싱 되는 조건의 영역이 줄어들게 되는데, 그 이유는 Fig. 4 에서 나타난 바와 같이 진동하는 입자가 전극표면에 더 근접해서 운동하기 때문이다.

Fig. 6 에서는  $\alpha$ 값이 아주 큰 경우 포커싱 양상의 변화를 살펴보기 위하여,  $\beta/\alpha = 0.5$  인 경우  $\alpha$ 값이 증가함에 따른 입자거동의 차이를 살펴보았다.  $\beta/\alpha$ 가 일정하고  $\alpha$ 가 증가할 경우 포커싱에 필요한 무차원시간이 길어짐을 알 수 있다. 예를 들면,  $\alpha = 10000$  이고  $\beta = 5000$  일 때 무차원시간  $t^* = 1000$  이 경과하여도 입자의 포커싱은 이루어지지 않았다. 이것은 입자의 점성력이 큰 경우 하전입자가 전기장의 변화에 의한 곡선운동 궤적을 벗어나려는 가속력이 감소하기 때문이다.

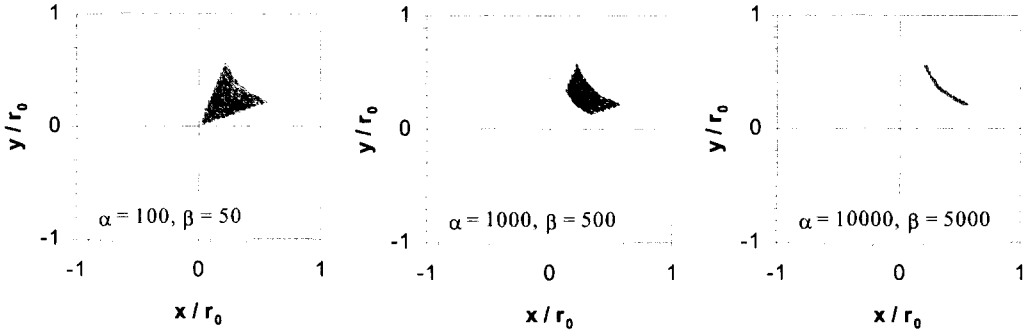


Fig. 6 Variation of particle trajectory with increasing  $\alpha$  for  $\beta/\alpha = 0.5$  ( $r_i = 0.5r_0, \theta_i = \pi/4, \phi_i = 0; t_{res}^* = 1000$ )

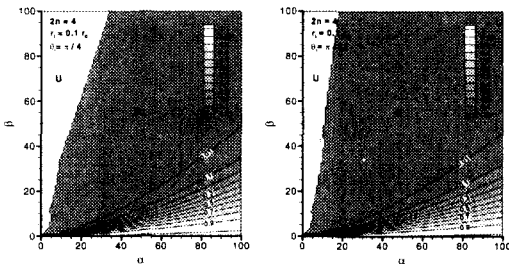


Fig. 7 Contours of relative focusing point with different radial starting point ( $r_i = 0.1r_0, \phi_i = 0; t_{res}^* = 1000$ )

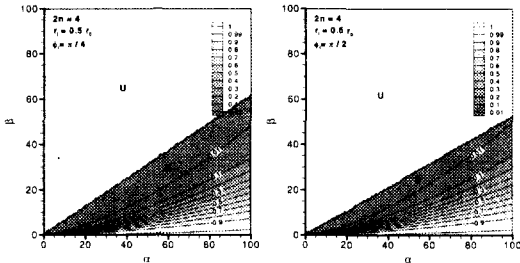


Fig. 8 Contours of relative focusing point with different initial phase at  $t = 0$  ( $r_i = 0.5r_0, \theta_i = \pi/4; t_{res}^* = 1000$ )

Fig. 7 은 하전입자의  $t^* = 0$  일 때의 반경방향 위치가  $0.1r_0$  로 감소할 경우의 상대포커싱점을 보여 준다. Fig. 5 와 비교해 보면, 출발점의 위치가 전극 표면에서 멀리 떨어져 있기 때문에 안정되게 포커싱되는 영역이 더 넓음을 알 수 있다. 그러나 상대포커싱점이 0.1 이상인 영역에는 큰 차이가 없는데, 이것은 4 극셀인 경우 식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이 반경방향으로의 전기장세기의 절대값의 변화가 선형적 특성을 가지므로 전기장 구배력이 일정한 값을 가지기 때문이다.

Fig. 8 은 초기 출발 위치에서의 인가전기장의 위상차의 영향을 나타낸 결과이다. 초기 위상차가  $\pi/4$  와  $\pi/2$  로 증가함에 따라 안정된 포커싱 영역이 좁아진다. 이것은 입자의 진동운동의 좌우대칭

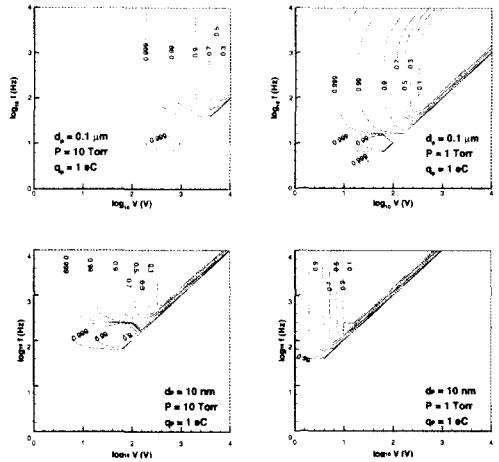


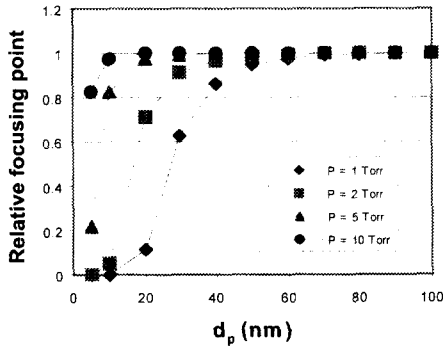
Fig. 9 Contours of relative focusing point along the amplitude and frequency of ac voltage at different particle sizes and pressures ( $\rho_p = 1000 \text{ kg/m}^3, q_p = 1 \text{ eC}$ , residence time  $t_{res} = 1 \text{ sec}, r_0 = 0.5588 \text{ cm}$ ; starting point:  $r_i = 0.5r_0, \theta_i = \pi/4, \phi_i = 0$ )

을 이루는 중심선의 위치가 전극 쪽에 가까워져, 그 결과 전극표면에 충돌 부착되기 때문이다.

Fig. 9 는 셀 내의 체류시간이 1 초이고 1eC 의 전하량을 가지는 입자들에 대한 교류전압과 주파수 크기에 따른 상대포커싱점의 분포를 보여준다. 4 극셀의 대칭극 사이의 거리는  $r_0 = 0.5588 \text{ cm}$  이고, 하전입자의 출발점은  $r_i = 0.5r_0, \theta_i = \pi/4$  이고, 초기 위상차는 0 이다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이, 10 Torr 작동압력에서 1eC 을 가지는  $0.1 \mu\text{m}$  의 직경 크기의 하전입자를 포커싱 시키는 것은 파괴전압 (breakdown voltage, sparking voltage) 때문에 물리적으로 어렵다. 그러나 작동압력이 1 Torr 로 감소할 경우, 가스의 평균자유행로가 증가하여 입자의 관성력이 증가하므로 파괴전압 이하의 조건에서 입자의 포커싱이 가능한 것을 알 수 있다. 예를 들면 AC 전압의 크기가 400 V 이고, 주파수가 63 Hz 일 때 셀 내의 체류비행시간이 1 초인 경우 1eC

의 하전량을 가지는 직경 0.1  $\mu\text{m}$ 의 입자가 0.1 이하의 상대포커싱 점으로 포커싱 될 수 있다. 그리고 작동압력이 10 Torr 일 때 입자직경이 10 nm로 작아질 경우, 관성력의 감소에 비하여 전기이동도 (electrical mobility)의 증가로 인한 전기장 구배력의 증가에 의하여 하전입자의 포커싱이 가능해짐을 알 수 있다. 예를 들면 AC 전압의 크기가 400 V 이고, 주파수가 631 Hz 일 때 셀 내의 체류비행시간이 1 초인 경우 1eC 의 하전량을 가지는 직경 10nm 의 입자가 0.1 이하의 상대 포커싱점으로 포커싱될 수 있다.

Fig. 10 은 일정한 압력 조건에서의 입자크기에 따른 상대포커싱점의 변화를 보여준다. AC 전압크기는 100 V, 주파수는 10 kHz, 입자의 비중이 1, 하전량은 1 eC, 체류시간은 0.1 sec,  $r_0$  가 0.5588 cm,

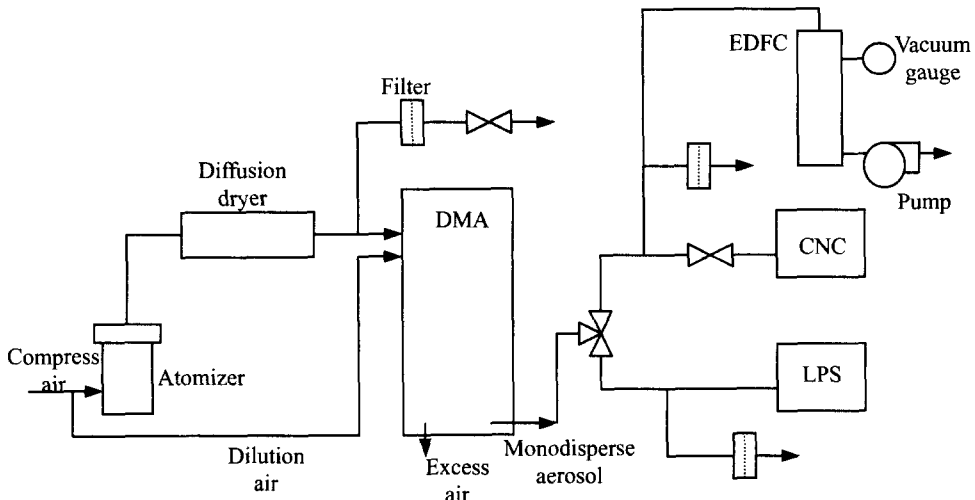


**Fig. 10** Relative focusing point versus particle diameter at different pressure ( $V = 100$  V,  $f = 10$  kHz;  $\rho_p = 1000$  kg/m<sup>3</sup>,  $q_p = 1$  eC,  $t_{res} = 0.1$  sec,  $r_0 = 0.5588$  cm;  $r_i = 0.5r_0$ ,  $\theta_i = \pi/4$ ,  $\phi_i = 0$ )

출발점의 위치가  $r_i = 0.5r_0$ ,  $\theta_i = \pi/4$ , 초기 위상차가 0 이다. 상대포커싱점은 입자크기와 작동압력이 작을수록 전극셀의 중앙에 가까워지는 것을 알 수 있다. 작동압력이 10 Torr 일 때 20 nm 이상의 직경을 가지는 입자는 포커싱이 되지 않는다. 입자빔을 만드는 또 다른 기술로 알려진 공기역학적 포커싱 렌즈(aerodynamic focusing lens)를 이용한 입자 포커싱 기술의 경우는 입자크기가 작을수록 입자를 포커싱시키는 것이 어렵다고 알려져 있다. 그러므로 동전기력을 이용한 포커싱 기술은 입자크기가 작을수록 포커싱 성능이 우수하므로 공기역학적 포커싱 렌즈를 이용한 기술을 대신하여 나노 입자를 포커싱 하는데 사용될 수 있을 것이다.

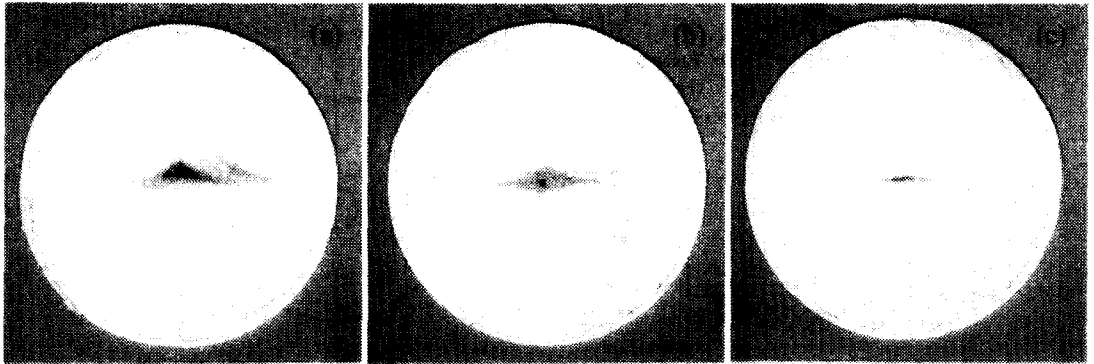
#### 4. 실험 및 결과

Fig. 11 은 실험장치의 계통도를 보여준다. 0.5%의 메틸렌블루(methylene blue) 수용액으로 채워진 Atomizer 로부터 다분산 액적입자가 발생된다. 발생된 액적들은 확산증발기(diffusion dryer)를 통과 하면서 액적 내의 액체성분이 증발한 후 다분산 고체입자들이 된다. 다분산 고체입자들은 DMA(Differential Mobility Analyzer, TSI)에 의하여 요구되는 단분산 고체입자들로 분류된다. 단분산 입자들의 입자크기 분포와 수농도는 LPS(Laser Particle Spectrometer, Particle measuring inc. model MICRO LPS-32 / HS-LAS 0.065 Sensor-1)와 CNC(Condensation Nucleus Counter, TSI model 3020)을 이용하여 측정하였다. 그리고 단분산 고체입자들은 Fig. 12 에서와 같은 EDFC(Electrodynamic Focusing Chamber) 내로 유입되며, 챔버의 내부 압



**Fig. 11** Schematic diagram of experimental apparatus





**Fig. 14** Particle deposition patterns on filter media; (a) 0 V, 0 Hz, (b) 350 V, 100 Hz, and (c) 350 V, 2 kHz ( $d_p = 0.3 \mu\text{m}$ ,  $P = 0.5 \text{ Torr}$ ,  $Q = 9.6 \text{ sccm}$ , residence time = 1.2 sec, sampling time = 9 hrs)

는 더 큰 입계오리피스를 가지고 실험한 결과로부터 확인되었다. 전압크기가 350 V 이고 교류주파수가 100 Hz 인 경우, Fig. 14(b)에서와 같이 필터표면의 중앙에 직경 1mm 크기의 작은 점이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 이 점의 존재는 Fig. 13의 계산 결과로부터 상대포커싱점의 값이 0.5 이하인 것으로부터 설명될 수 있다. 중앙의 포커싱점 주위를 둘러싸는 포커싱되지 않은 입자들이 존재하는 이유는, 수치해석용 상용소프트웨어 Fluent5.0을 이용한 계산을 통하여 살펴본 결과, 전극의 외곽을 지나 흐르는 입자들로 인한 것임을 알 수 있었다. 교류주파수가 2 kHz 로 증가하였을 때 미량의 입자들이 필터여지에 부착된 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 13의 계산 결과로부터 상대포커싱점의 값이 0.9 이상이므로 입자들이 포커싱되지 않고, 전극의 외곽 영역과 표면 근처를 지나가는 다량의 입자들이 전기력에 의하여 전극 표면에 부착되어 제거되기 때문에 필터여지 표면에 부착되는 입자량이 적은 것으로 사료된다.

## 5. 결론

동전기력학적 포커싱 기술은 여러 공정 내에 존재하는 불균일하고 아주 낮은 농도분포를 가지는 입자들이 흐르는 관유동 내에서 정확한 입자크기 분포와 농도를 측정하기 위하여 입자들을 포커싱 시키는데 사용될 수 있다. 본 연구에서는, 4 극 전극에 일정 주파수의 AC 전압을 인가하여 형성된 동전기장 내에서의 하전입자의 거동 특성을 수치해석과 실험을 통하여 살펴보았다.

대기압 조건에서 나노입자의 포커싱은 실질적으로 불가능하였으며, 작동압력과 입자크기가 감

소함에 따라 포커싱 성능이 향상되는 것을 알 수 있었다. 최종적으로 저압 조건에서 나노입자 빔을 만들기 위한 동전기력학적 포커싱 기술의 적용 가능성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 1999 년도 전반기 해외 Post-Doc. 연수사업과 University of Minnesota, Environmental Sciences Division 의 지원에 의하여 수행되었다.

## 참고문헌

- (1) Davis, E. J., 1997, "Electrodynamic Balance Stability Characteristics and Applications to the Study of Aerocolloidal Particles," *Langmuir*, Vol. 1, pp. 379~387.
- (2) Gerlich, D., 1992, *In State-Selected and State-to-State Ion Molecule Reaction Dynamics. Part 1, Experiment*, Vol. LXXXII, C. Y. Ng and M. Baer, Eds., Wiley, New York, pp. 1~176.
- (3) Bagley, S. T., Baumgard, L. D., Gratz, L. D., Johnson, J. H., and Leddy, D. G., 1996, *Characterization of Fuel and Aftertreatment Device Effects on Diesel Emissions*, Health Effect Institute, Research Report Number 76, September.
- (4) Oberdörster, G., Ferin, J., Gelein, R., Sonderholm, S. C., and Finkelstein, J., 1992, "Role of the Alveolar Macrophage during Lung Injury: Studies with Ultra-Fine Particles," *Environ. Health Perspect.*, Vol. 97, pp. 193~199.
- (5) Oberdörster, G., Ferin, J., and Lehnert, B. E., 1994, "Correlation between Particle-Size, In-Vivo Particle Persistence, and Lung Injury," *Environ. Health*



- Perspect.*, Vol. 102, pp. 173~179.
- (6) Oberdörster, G., Gelein, R. M., Ferin, J., and Weiss, B., 1995, "Association of Particulate Air Pollution and Acute Mortality, Involvement of Ultrafine Particles," *Inhalation Toxicol.*, Vol. 7, pp. 111~124.
- (7) Oberdörster, G., Gelein, R., Johnston, C. J., Mercer, P., Corson, N., and Finkelstein, J. N., 1998, *Ambient Ultrafine Particles: Inducers of Acute Lung Injury, In: Relationships between Respiratory Disease and Exposure to Air Pollution, Dungworth, D.L., et al., eds.*, ILSI Press, Washington, DC, pp. 216~229.
- (8) Peter, A., Wichmann, E. H., Tuch, T., Heinrich, J., and Heyder, J., 1997, "Respiratory Effects are Associated with the Number of Ultrafine Particles," *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, Vol. 155, pp. 1376~1383.
- (9) Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B., and McMurry P. H., 1995, "Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 22, pp. 293~313.
- (10) Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B., and McMurry P. H., 1995, "Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: II. Experimental Evaluation of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 22, pp. 314~324.
- (11) Szabo, I., 1986, "New Ion-Optical Device Utilizing Oscillatory Electric Fields. I. Principle of Operation and Analytical Theory of Multipole Devices with Two-Dimensional Electric Fields," *Int. J. Mass Spectrometry Ion Processes*, Vol. 73, pp. 197~235.
- (12) Masuda, S. and Fujibayashi, K., 1970, *The Electrodynamic Behaviour of Charged Dust Particles in Alternating Quadrupole Electric Fields*, 1st International Conference of Static Electricity, Vienna/Austria, pp. 384~397.
- (13) Masuda, S. and Fujibayashi, K., 1970, "Electrodynamics of Charged Dust Particles Within an AC Quadrupole Electric Field. Theoretical Treatment," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 90, pp. 861~869.
- (14) Aoyama, M. and Masuda, S., 1970, "Classification of Fine Particles by Means of Two-Dimensional Alternating Quadrupole Field," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 90, pp. 870~879.
- (15) Davis, E. J., 1985, "A History of Single Aerosol Particle Levitation," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 26, pp. 212~254.
- (16) Iwamoto, T., Itoh, M., and Takahashi, K., 1991, "Theoretical Study on the Stability Characteristics of a Quadrupole Cell," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 15, pp. 127~134.
- (17) Friedlander, S. K., 1977, *Smoke, Dust and Haze*, John Wiley & Sons, New York.
- (18) Bae, G., Kinney, P. D., Liu, B. Y. H., and Pui, D. Y. H., 1998, "Investigation of Aerosol Spatial Distributions Downstream of a Critical Orifice at Low Pressure," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 28, pp. 479~488.