

<논 문>

정전 섬유필터 주위의 입자포집 및 거동에 관한 수치해석적 연구

안 강 호*
(1997년 3월 13일 접수)

Numerical Analysis of Particle Behavior Around a Bipolar Charged Electret Fiber

Kang-Ho Ahn

Key Words : Electret Fiber(정전섬유), Electric Field(전기장), Charged Particle(하전입자), Single Fiber Collection Efficiency(단일섬유 포집효율), Coulomb Force(쿨롱력), Polarization Force(분극력), Numerical Analysis(수치해석)

Abstract

Charged and uncharged particle motions and collection characteristics around a bipolar charged rectangular shape electret fiber are studied numerically. Particle inertia, fluid drag, Coulomb force and polarization force are considered to predict the particle motion around the electret fiber. The effects of particle sizes, flow velocities, number of charges and polarities are also systematically investigated. For small size particles, the single fiber collection efficiency is greatly dependent on the charge polarity and the number of charges on a particle. However, particles larger than $5\mu m$ do not show charging effect on collection efficiencies in the flow velocity ranges from 1.5 cm/s to 150 cm/s when the maximum charges are within +5 to -10. The results show that a strong electric field gradient at the corner of the bipolar charged fiber plays a very important role on collecting particles regardless of its charge polarity because of the polarization force. It also shows that the most penetrating particle size for a single electret fiber decreases as the flow velocity increases and the number of charges of a particle decreases.

기 호 설 명	\vec{F}_p	: 분극력
C_c : 커닝햄 미끄럼 보정계수	L	: 특성 길이
C_a : 항력계수	m	: 입자의 질량
D_f : 섬유의 크기 ($=30\mu m$)	n_p	: 하전수
D_p : 입자의 직경	p	: 압력장
E : 전기장	$Q_p (= n_p e)$: 하전량
e : 전자의 하전량	Re_p	: 입자의 Reynolds 수
\vec{F}_c : 쿨롱력	Re_f	: 섬유의 Reynolds 수
\vec{F}_a : 유체 저항력	s	: 정전섬유의 주변길이

* 회원, 한양대학교 기계공학과

$Stk\left(=\frac{\rho_p D_p^2 U C_c}{18\mu L}\right)$: Stokes 수

t	: 시간
\vec{u}	: 유동장 속도
U	: 상류측 유속
$\vec{v}_p(v_{px}, v_{py})$: 입자의 속도
y^*	: 입자의 임계주입 위치
ϕ	: 전압
ϵ	: 물질의 유전상수
ϵ_0	: 공기의 유전상수
ϵ_p	: 입자의 유전상수
λ	: 기체 분자의 평균자유행로
μ	: 공기의 점성계수
ρ	: 공기의 밀도
ρ_p	: 입자의 밀도

1. 서 론

기체 중에 포함된 입자를 포집하는 방법으로 사 이클론, 전기집진기, 스크러버 등 여러 방법이 있지만 섬유필터를 이용한 집진 방법이 가장 오래 전 부터 사용되어 왔다, 또한, 섬유필터는 미세입자를 잘 포집할 수 있고 저렴한 가격으로 용이하게 사용할 수 있어 이용되고 있다. 이러한 섬유필터는 단 순히 입자의 관성력과 접촉(interception) 그리고 확산에 의해 섬유표면에 부착되는 정도로 그 포집 효과가 한정되었으나 정전기를 이용한 입자포집 방법이 Oliver Lodge에 의해 알려진 후, 덴마크의 Hansen이 매우 성긴 섬유에 음전하로 대전된 수지 가루를 묻힌 정전필터를 처음 개발하였다. 수지를 묻힌 정전필터는 입자포집 효율이 당시의 일반섬유 필터에 비해 매우 높아 군사 및 민수용 장비에 널리 사용되었다. 특히, 정전필터는 작은 압력 강하 에서도 매우 높은 입자 포집효율을 보여 이에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.^(1~11)

최근의 정전필터(electret filter) 섬유재질로 폴 리스타일렌, 폴리프로 필렌 슈트 등을 사용하며, 정전기량을 많이 갖게 하기 위하여 코로나 방전을 사용하기도 한다. 이렇게 제작된 슈트는 한 면에 양전하를 다른 면은 음전하로 대전되며 이를 가늘 게 자르면 직사각형 단면의 정전섬유가 된다.

직사각형 단면을 갖는 정전섬유의 입자포집 특성에 관한 연구는 섬유자체가 갖는 기하학적 특성 때

문에 섬유 주위의 유동 및 전기장의 예측이 매우 어려워 대부분의 연구가 원통형 단면의 정전섬유에 집중되었다. 그러나 직사각형 단면 섬유의 경우 섬유의 모서리 부분에서 매우 강력한 전기장 구배가 발생하므로 균일한 곡률을 갖는 원통형 형상보다는 보다 강력한 포집 효과를 발휘하게 된다.⁽¹²⁾

이에 본 연구에서는 직사각형 단면을 갖는 정전 섬유의 입자포집 특성을 이해하기 위하여 직사각형 단면 섬유 주위의 유동을 수치 해석하였으며, 또한 섬유의 양면에 (+)극과 (-)극으로 대전된 것으로 가정하여 전기장을 해석하였다. 이 유동장 및 전기장을 기초로 입자의 크기, 입자의 전하량과 극성에 따른 거동 및 단일 섬유의 입자포집 특성을 해석하였다. 단, 입자의 확산이나 중력에 의한 영향은 고려하지 않았다.

2. 수치해석

유동장 및 전기장내의 입자 운동체적을 해석하기 위해 유동장 속도분포와 전기장은 입자의 존재 및 운동에 의해 전혀 영향을 받지 않으며, 공간좌표의 함수라 가정하였다. 이때 유동장의 속도분포 \vec{u} 는 다음 방정식의 해로서 주어진다.

연속방정식

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes 방정식

$$\rho(\vec{u} \cdot \nabla \vec{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

정전섬유 주위의 전기장 분포는 정전섬유 양면에 각각 (+)와 (-)극성을 유지하고 있는 것으로 가정하였으며, 지배방정식은 보존형으로 아래와 같다.

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = 0 \quad (3)$$

$$E = \nabla \phi \quad (3a)$$

ϵ 는 물질의 유전상수이며, ϕ 는 전압이다.

유동장 및 전기장내에서 움직이는 입자는 구의 형태를 가지고 있으며, 입자의 질량중심의 선 운동에 대하여 Lagrangian 시각으로 아래의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$m \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_a + \vec{F}_c + \vec{F}_p \quad (4)$$

여기서 m 은 입자의 질량, $\vec{v}_p(v_{px}, v_{py})$ 는 입자의 속도며, t 는 시간이다. 또한, 각각의 힘의 성분은 아래와 같으며, 중력에 의한 입자의 침강효과는 고려하지 않았다. 식 (4)에서 우변에 해당하는 유체 저항력, \vec{F}_d , 쿨롱력, \vec{F}_c , 분극력, \vec{F}_p 는 각각 다음과 같다.

Viscous drag force :

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} C_d \rho C_c^{-1} (\vec{u} - \vec{v}_p) |\vec{u} - \vec{v}_p| \frac{\pi}{4} D_p^2 \quad (5a)$$

Coulomb force :

$$\vec{F}_c = Q_p \vec{E} \quad (5b)$$

polarization force :

$$\vec{F}_p = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \epsilon_0 D_p^3 \nabla (\vec{E} \cdot \vec{E}) \quad (5c)$$

여기서 C_d 는 입자와 주위 기체간의 상대속도에 따라 발생하는 항력계수로서 입자의 상대 Reynolds 수 ($Re_p = |\vec{u} - \vec{v}_p| D_p / \nu$)가 1 보다 작은 경우 $C_d = 24/Re_p$ 를 사용하였으며, 이 범위를 벗어나는 경우

$$C_d = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.0916 Re_p), \quad Re_p < 5$$

$$= \frac{24}{Re_p} (1 + 0.0158 Re_p^{2/3}), \quad 5 < Re_p < 1000 \quad (6)$$

을 사용하였다.⁽¹³⁾ 또한 커닝햄의 미끄럼보정계수 C_c 는 다음 식을 사용하였다.⁽¹⁴⁾

$$C_c = 1 + 2 \frac{\lambda}{D_p} \left[1.252 + 0.399 \exp\left(-1.1 \frac{D_p}{2\lambda}\right) \right] \quad (7)$$

이는 기체분자의 평균자유행로와 입자 크기에 따른 기체의 연속성 가정에 대한 보정계수이며 Knudsen 수의 함수이다. $Q_p = n_p e$ 며 입자의 하전수와 전자의 전하량의 곱으로 표시하였다.

식 (4)는 입자의 운동제적을 Lagrangian 시각에서 표현한 것이며, 수치 해를 얻기 위하여 다음과 같이 4개의 상미분 방정식 계로 재정립할 수 있다.

$$\frac{dx_p}{dt} = v_{px} \quad (8a)$$

$$\frac{dy_p}{dt} = v_{py} \quad (8b)$$

$$\frac{dv_{px}}{dt} = \frac{1}{m} (F_{dx} + F_{cx} + F_{px}) \quad (8c)$$

$$\frac{dv_{py}}{dt} = \frac{1}{m} (F_{dy} + F_{cy} + F_{py}) \quad (8d)$$

여기서 x_p, y_p 는 입자의 위치를 나타낸다. 식 (5)와 (8)을 연결 한 해는 입자의 직경이 매우 작은 경우 쉽게 수렴하지 않는다. 따라서 일반적인 Runge-Kutta 방법보다는 수렴성이 좋은 Gear의 방법을 사용하였다.⁽¹⁵⁾

수치계산영역은 $0.101\text{cm} \times 0.0315\text{cm}$ 으로 64×30 개의 격자를 사용하였으며, 사각단면을 갖는 섬유 주위에서의 유동장 및 전기장의 미세한 변화를 관찰하기 위하여 섬유 주위에 격자를 집중시킨 비균일 분포를 Fig. 1과 같이 설정하였으며 정전섬유의 단면도를 Fig. 1의 우측에 확대하여 표시하였다. 계산영역내 섬유 크기는 $10 \times 15 \mu\text{m}$ 로 하였으며, x-축을 대칭면으로 설정하였다. 나머지 경계면에 대해서는 실제의 상황과 일치시키기 위하여 Neumann 조건을 적용하였으며, 본 수치해석에는 SIMPLER code를 사용하였다.⁽¹⁶⁾ 섬유는 상류측에 +5 volts, 하류측에 -5 volts의 정전기를 갖고 있는 것으로 가정하여 계산하였다. 이 정전섬유 주위의 전기장 분포는 참고문헌 (12)에서 볼 수 있다.

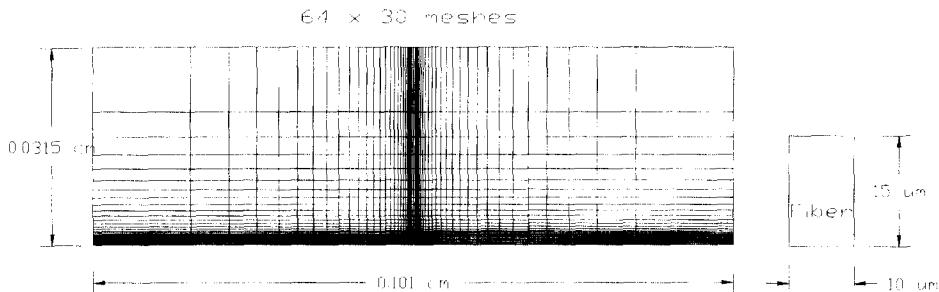


Fig. 1 Calculation domain and grids

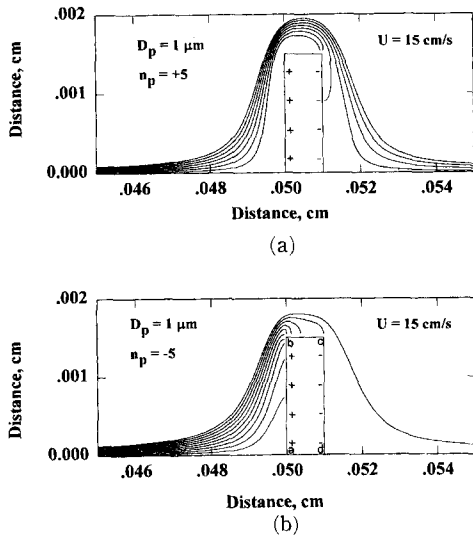


Fig. 2 $1\mu\text{m}$ particle path lines of (a) positively charged particle and (b) negatively charged particle in the free stream velocity of 15 cm/s .

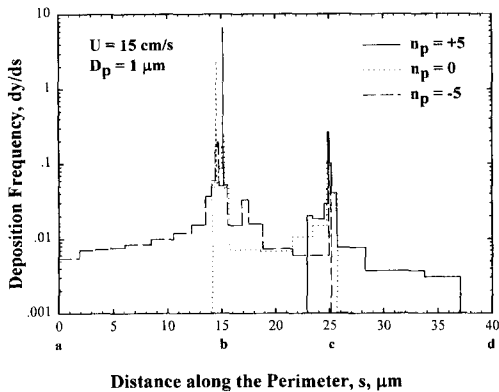


Fig. 3 Particle deposition frequency along the perimeter of a electret fiber

3. 결과 및 분석

Fig. 2(a)와 (b)는 직경 $1\mu\text{m}$ 의 입자가 $+5$ 전하와 -5 전하를 각각 갖고 15 cm/s 인 유동장에서 정전섬유 주위를 흐를 때 입자의 궤적을 나타낸 것이다. 각각의 궤적은 상류측에서의 입자의 초기 유입 위치에 따라 섬유에 포집되거나 흘러 나가는 것을 보여 준다. Fig. 2(a)의 $+5$ 로 하전된 입자는 섬유의 하류측면, 즉 $(-)$ 로 대전된 면의 모서리 부분에서 많이 포집되고 일부는 섬유의 하류측면에

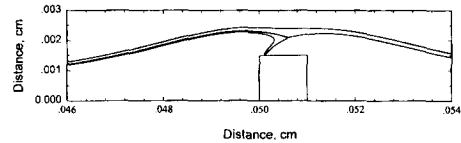
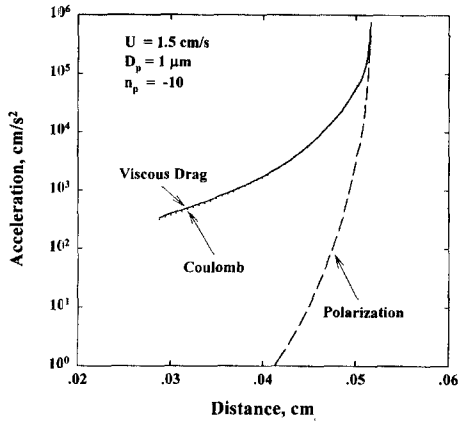


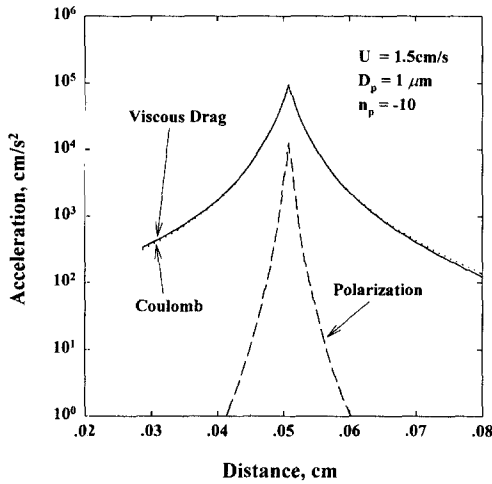
Fig. 4 $1\mu\text{m}$, -10 charged particle trajectories around a fiber with a singularity. The free stream flow velocity is 1.5 cm/s

포집되는 것을 볼 수 있으며, $(+)$ 로 대전된 상류측면에는 전혀 포집되지 않는 것을 볼 수 있다. 반면 Fig. 2(b)에서 보듯이 -5 로 하전된 입자는 상류측면과 상류측면 모서리 부분에서 대부분 포집되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 조건에서 $1\mu\text{m}$ 입자의 주입 위치에 따른 입자의 포집위치를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 횡축은 정전섬유의 주변 길이로 표시하였으며 횡축의 a는 정전섬유의 상류측면과 대칭축이 만나는 점, 즉 stagnation point이며, b와 c는 섬유의 상부 상류측 모서리와 하류측 모서리 위치에 각각 해당되고 d는 섬유의 하류측면과 대칭축이 만나는 점이다. 한편 종축은 하전된 입자의 투입위치 변화량에 대한 정전섬유의 포집위치 변화량의 비를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보듯이 -5 로 대전된 입자는 주로 정전섬유의 상류측 모서리 부분에서 주로 포집되며 하류측 모서리 부분에서도 많이 포집되는 것을 볼 수 있다. 한편 반대극성을 가진 $+5$ 로 대전된 입자는 상류측면, 즉 $(+)$ 로 대전된 면에서는 포집이 안되고 섬유의 하류측 모서리 부분과 뒷면에서 주로 포집되는 것을 볼 수 있다. 그러나 대전되지 않은 입자는 정전섬유의 모서리 부분과 섬유의 윗면에서 포집되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 섬유의 모서리 부분에서 매우 강한 전기장의 구배가 형성됨으로 분극력에 의해 입자에 포집력이 강하게 작용하기 때문이다.

Fig. 4는 정전 섬유 주위를 유속이 1.5 cm/s 이며 -10 으로 하전된 $1\mu\text{m}$ 입자의 궤적을 보여주고 있다. 이 그림에서 입자의 초기 유입 위치에 따라 음 $(-)$ 의 전하를 가진 입자가 정전섬유의 윗면 부분에서 유체에 의한 저항력과 정전기력이 같아지는 singularity가 존재하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 원형단면의 섬유가 전기장 사이에 존재할 때 입자의 거동에 관한 Henry와 Ariman⁽⁹⁾의 연구에서 나타난 것과 유사하다. Fig. 4의 조건에서 포집 및 비포집을 결정하는 임계주입위치



(a)



(b)

Fig. 5 Acceleration components while a particle is in motion as Fig. 4 moving near the singular point (a) capture, (b) passing

(critical injection position), y^* , 는 $3.96 \mu\text{m}$ 이며, 임계주입위치 보다 높으면 정전섬유에 포집되지 않고 하류측으로 흘러나가고, 임계주입위치보다 낮으면 정전섬유에 포집되는 것을 Fig. 4에서 볼 수 있다.

Fig. 4의 경우 singularity 부분에서 입자에 미치는 가속도를 유체, Coulomb 및 분극에 의한 구성요소별로 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 5(a)는 임계주입위치에서 입자가 포집되었을 경우의 가속도를 나타내었으며, Fig. 5(b)는 입자가 포집되지 않고 임계주입위치 바로 위로 유입되었을 경우의 가속도 변화과정을 나타낸다. Fig. 5에서 보면 입자에 미치는 유체 저항력과 Coulomb력은

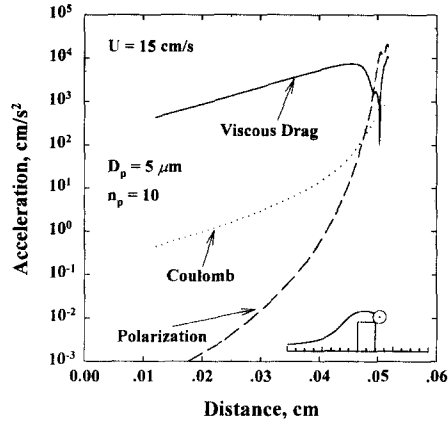


Fig. 6 Acceleration components acting on the particle

거의 같으나 분극력은 포집되기 직전을 제외하고 매우 작은 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 5 경우의 $1 \mu\text{m}$ 입자보다 큰 $5 \mu\text{m}$, $+10$ 으로 하전된 입자가 15 cm/s 의 유속 내에서 Fig. 6의 우측 하단에 삽입된 그림의 경로를 따라 움직일 때 작용하는 가속도 변화과정을 Fig. 6에 나타내었다. 이 경우 정전섬유 근처에서 유체에 의한 저항력이나 Coulomb력보다 분극력이 크게 작용하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7(a), (b)와 (c)는 $0.5 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ 입자의 유속변화에 따른 임계주입위치를 입자의 하전극성 및 하전량에 따라 표시하였다. Fig. 7(a)에서 보듯이 $0.5 \mu\text{m}$ 입자의 임계주입위치는 입자의 하전극성, 하전량과 유속에 따라 매우 심한 차이를 보이고 있으며, 특히 음전하를 가졌을 경우 유속이 빨라지면 임계주입위치가 양전하로 하전된 경우보다 많이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 유속이 빠를 경우 음으로 하전된 입자가 정전섬유의 상류측면 - 측, 양으로 하전된 면 -에 머무는 시간이 짧아 정전기력이 작용하는 시간이 짧기 때문이며, 반면에 양전하를 가진 입자는 대부분 정전섬유의 하류측면 - 측, 음으로 하전된 면 -에 포집되므로 음전하를 가진 입자에 비해 상대적으로 유속의 변화에 덜 민감한 것으로 판단된다. 한편, 입자의 직경이 $1 \mu\text{m}$ 인 경우 Fig. 7(b)에서 보듯이 $0.5 \mu\text{m}$ 의 경우에 비해 상대적으로 하전량 및 극성에 따른 임계주입위치 변화가 크지 않은 것을 볼 수 있으며, 유속이 증가함에 따라 임계주입위치가 감소한다. 그러나 Fig. 7(c)의 $5 \mu\text{m}$ 입자는 앞의 작은 입자들과는 달리 입자의 하전량과 하전극성에

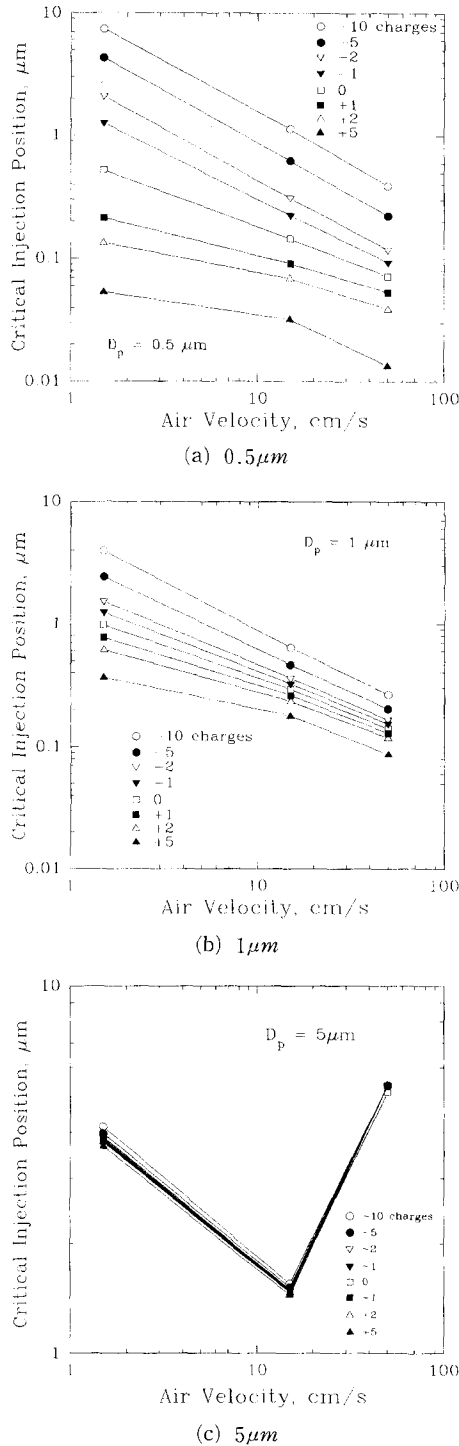
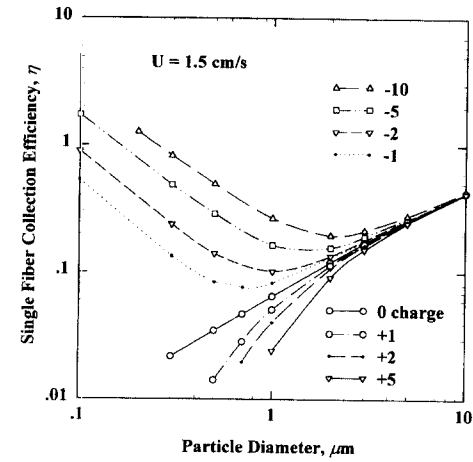


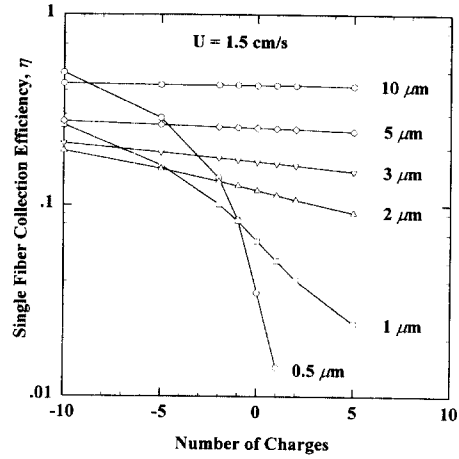
Fig. 7 Critical particle injection positions as a function of air velocity

다른 입계주입위치의 변화는 유속이 같을 경우 거의 동일하며, 유속이 증가함에 따라 입계주입위치가 매우 특이하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 유속이 1.5 cm/s에서 15 cm/s로 증가하면 입계주입위치가 작아지나 유속이 50 cm/s로 더 빨라지면 다시 입계주입위치가 커지는 것을 볼 수 있다. 여기서 보면 $5 \mu\text{m}$ 입자가 -10 에서 $+5$ 으로 하전된 범위 내에서 유속이 매우 작을 경우 정전기력이 입자 포집에 중요한 힘으로 작용하나 유속이 빨라지면 관성력이 정전기력 보다 입자의 포집에 더 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다.

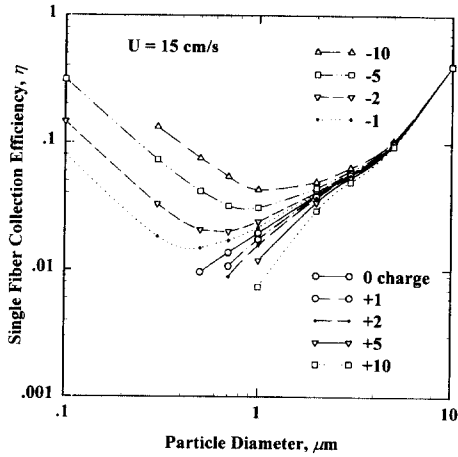
Fig. 8(a), (b), (c)는 정전필터의 단일섬유포집 효율을 입자의 크기와 유속 그리고 하전량에 따른 수치해석 결과를 나타낸다. Fig. 8(a)는 유속이 1.5 cm/s인 경우의 단일섬유 포집효율을 보여주고 있으며, 입자가 음전하로 하전되었을 때 작은 입자 크기에서 하전량의 변화에 따른 포집효율의 현저한 변화를 볼 수 있다. 그러나 입자가 $3 \mu\text{m}$ 이상 되면 그 차이는 매우 작아지는 것을 볼 수 있다. 한편 양전하로 하전된 경우 $1 \mu\text{m}$ 이하의 작은 입자는 포집효율이 매우 낮으나 $3 \mu\text{m}$ 이상의 경우 해석범위내 하전량 내에서 하전량에 따른 큰 변화를 볼 수 없었으며, 음전하로 하전된 경우의 포집효율과 비슷한 결과를 나타내었다. 유속이 15 cm/s로 증가한 경우 Fig. 8(b)에서 보듯이 Fig. 8(a)와 거의 유사한 경향을 보이고 있으나 전반적으로 포집효율이 감소한 것을 알 수 있다. 그러나 유속이 더욱 빨라져 50 cm/s로 증가하면 Fig. 8(c)에서 보듯이 $3 \mu\text{m}$ 이하의 작은 입자의 포집효율은 역시 감소하나 $5 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자는 포집효율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 수치해석 조건 내에서 $5 \mu\text{m}$ 보다 큰 입자는 정전기력 보다 관성력에 의해 포집된다는 것을 의미하며, 보다 정확한 결과는 다음의 Fig. 9(a), (b)에서 볼 수 있다. Fig. 9(a)는 유속이 1.5 cm/s인 경우 입자의 크기와 하전 조건에 따른 단일정전섬유의 포집효율을 나타낸 것이다. 여기서 $0.5 \mu\text{m}$ 과 $1 \mu\text{m}$ 의 경우 입자의 하전 조건에 따라 단일정전섬유의 포집효율이 매우 크게 차이나는 것을 볼 수 있다. 그러나 $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ 입자의 경우 하전량과 하전극성에 따른 포집효율의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 유속이 증가되어 50 cm/s인 경우, Fig. 9(b)에서 보는 것과 같이 $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ 입자는 포집효율이 증가된 것을 볼 수 있다. 반면 이들 보다 작은 입자의 경우



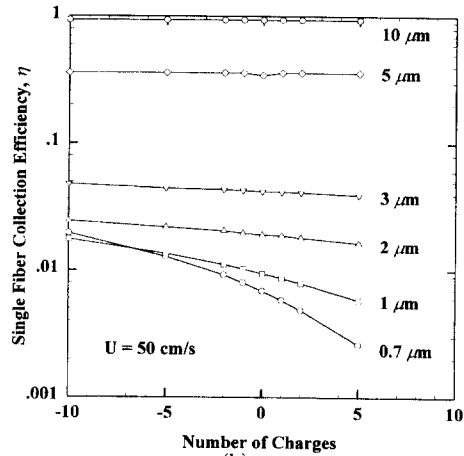
(a)



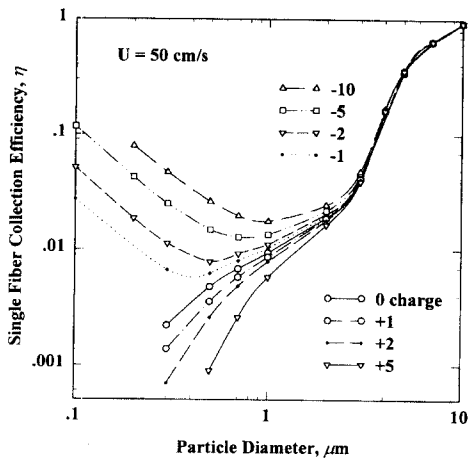
(a)



(b)



(b)



(c)

Fig. 8 Single fiber collection efficiencies with free stream velocities of (a) 1.5 cm/s, (b) 15 cm/s, (c) 50 cm/s

Fig. 9 Single fiber collection efficiencies as a function of charging characteristics and free stream velocities of (a) 1.5 cm/s, (b) 50 cm/s.

는 포집효율이 감소하였으며, 유속이 빠를 경우 하전량 및 하전극성에 따른 포집효율의 변화도 작아지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 Stokes 수, $Stk = \frac{\rho_p D_p^2 U C_c}{18 \mu L}$, 와 섬유 Reynolds 수, $Re_f = \frac{\rho U D_f}{\mu}$, 변화에 따른 단일 정전섬유의 포집효율을 보여주고 있다. 여기서 ρ_p 는 입자의 밀도, D_p 는 입자의 직경, U 는 유체의 속도, C_c 는 Cunningham의 미끄럼 보정계수, μ 는 유체의 점성계수이며 L 은 특성길이를 나타낸다. Fig. 10은 입자가 전하를 갖지 않고 정전섬유주위

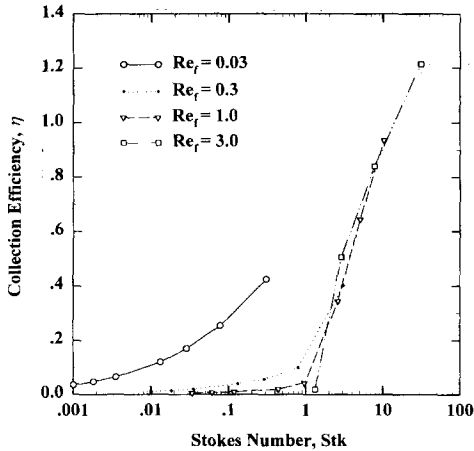


Fig. 10 Single fiber collection efficiency for an uncharged particle as a function of Stokes number. Interception and polarization effects are considered.

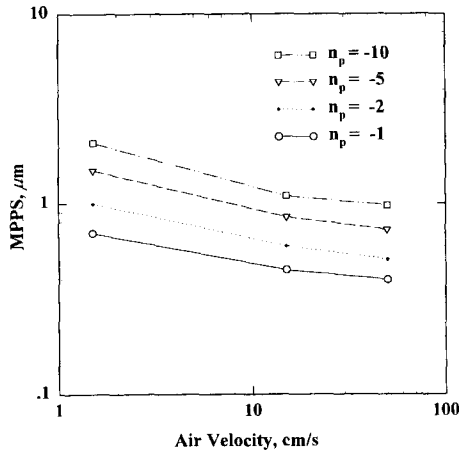


Fig. 11 Most penetrating particle size for negatively charged particles as a function of free stream velocity.

를 지날 때 관성력과 분극력에 의해 포집되는 단일 섬유포집효율을 보여주고 있다. 이때 효율이 1.0을 넘는 것은 접촉포집(interception) 효과를 고려하였기 때문이다. Re_f 가 0.03인 경우 Stokes 수가 1보다 작은 곳에서 40% 이상의 포집효율을 보이는 것 또한 접촉포집 효과 때문이며, 이로 인하여 유속이 작은 경우 Stokes 수가 작아도 분극력과 접촉포집에 의하여 포집효율이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11은 유속과 입자의 하전량에 따른 최대통과 입자크기(most penetrating particle size,

MPPS)를 나타내고 있다. 유속이 증가할수록 하전량에 무관하게 MPPS는 감소하며, 하전량이 작을수록 또한 MPPS가 감소하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

사각단면을 갖는 단일 정전 섬유의 포집효율을 유속의 변화와 입자의 하전량 및 극성변화에 따라 수치해석적으로 분석하였다. 입자의 포집은 주로 전기장의 구배가 심하게 나타나는 정전섬유의 모서리 부분에서 일어나며 $1 \mu\text{m}$ 이하의 작은 입자의 경우는 하전량 및 극성에 따라 단일섬유 포집효율이 매우 크게 차이나는 것을 볼 수 있었다. 그러나 $5 \mu\text{m}$ 이나 $10 \mu\text{m}$ 과 같이 큰 입자의 경우 하전량의 변화에 따른 포집효율의 변화를 -10 에서 $+5$ 하전 범위 내에서 볼 수 없었다. 또한 최대통과 입자크기(most penetrating particle size, MPPS)는 유속이 증가할수록 그리고 하전량이 작을수록 감소하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Kraemer, H. F. and Johnstone, H. F., 1955, "Collection of Aerosol Particles in Presence of Electrostatic Fields," *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 47, No. 12, pp. 2426~2434.
- (2) Zebel, G., 1965, "Deposition of Aerosol Flowing Past a Cylindrical Fiber in a Uniform Electric Field," *J. of Colloid Science*, Vol. 20, pp. 522~543.
- (3) Hochrainer, D., Hidy, G. M. and Zebel, G., 1969, "Creeping motion of Charged Particles around a Cylinder in an Electric Field," *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 30, No. 4, pp. 553~567.
- (4) Henry, F. and Ariman, T., 1981, "The Effect of Neighboring Fibers on the Electric Field in a Fibrous Filter," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 12, No. 2, pp. 137~149.
- (5) Henry, F. and Ariman, T., 1981, "Cell Model of Aerosol Collection by Fibrous Filter in an Electrostatic Field," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 12, No. 2, pp. 91~103.
- (6) Brown, R. C., 1981, "Capture of Dust Particles

- in Filters by Line-Dipole Charged Fibres," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 12, No. 4, pp. 349~356.
- (7) Banks, D. O., Hall, M. S. and Kurowski, G. K., 1983, "Numerical Determination of Electrically Enhanced Fiber Collection Efficiency," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 14, No. 2, pp. 87~97.
- (8) Pich, J., Emi, H. and Kanaoka, C., 1987, "Coulombic Deposition Mechanism in Electret Filters," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 18, No. 1, pp. 29~35.
- (9) Otani, Y., Emi, H. and Mori, J., 1992, "Initial Collection Efficiency of Electret Filter and Its Durability for Solid and Liquid Particles," 일본 화학공학논문집, 제18권 제2호, pp. 240~247.
- (10) Baumgartner, H., Piesch, C. and Umhauer, H., 1993, "High-Speed Cinematographic recording and Numerical Simulation of Particles Depositing on Electret Fibers," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 24, No. 7, pp. 945~962.
- (11) Wu, Z., Colbeck, I. and Zhang, G., 1993, "Deposition of Particles on a Single Cylinder by a Coulombic Force and Direct Interception," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 19, pp. 40~50.
- (12) 안강호, 김남효 1994, "전기장내 입자의 운동," 대한기계학회 '94년도 추계학술대회논문집 (II), pp. 243~246.
- (13) Rader, D. J. and Marple, V. A., 1985, "Effect of Ultra-Stokesian Drag and Particle Interception on Impaction Characteristics," *Aerosol Sci. Technology*, Vol. 4, pp. 141~156.
- (14) Reist, Parker C., 1993, *Aerosol Science and Technology*, McGraw-Hill, New York.
- (15) Gear, C. W., 1971, *Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations*, Prentices-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- (16) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill.