

## 외부 전기장내의 단일 섬유에 대한 먼지층 형상 수치 모사

### Numerical Simulation of Particle Deposition Pattern on Cylindrical Fiber under External Electrical Field

박현설 · 정용원<sup>1)</sup> · 박영옥<sup>2)</sup> · 이규원  
광주과학기술원 환경공학과  
<sup>1)</sup>인하대학교 환경공학과  
<sup>2)</sup>한국에너지기술연구소 에너지환경연구부  
(1998년 10월 23일 접수, 1999년 1월 9일 채택)

Hyun-Seol Park, Yong-Won Jung<sup>1)</sup>, Young-Ok Park<sup>2)</sup> and Kyu-Won Lee  
*Department of Environmental Science and Engineering,  
Kwangju Institute of Science and Technology*  
<sup>1)</sup>*Department of Environmental Engineering, Inha University*  
<sup>2)</sup>*Energy and Environment Research Department, Korea Institute of Energy Research*  
(Received 23 October 1998; accepted 9 January 1999)

#### Abstract

In this study, the two dimensional morphology of particle accumulates on a cylindrical fiber was numerically simulated when a uniform external electric field was present across a cylindrical fiber. In order to investigate the mechanism of linear dendrite formation which is observed under the above electrostatic condition, the electrostatic forces between a newly introduced particle and each deposited particle were calculated and compared with those between the particle and fiber. As a result of this study it was found that dielectrophoretic forces between the oncoming particle and fiber play principal roles in linear dendrite formation.

**Key words :** cylindrical fiber, electrostatic forces, polarization force, deposition pattern, dendrite

#### 1. 서 론

미세 입자에 대한 엄격한 제어가 필수적인 반도체 제조 공정이나 기타 청정실의 경우, 미세 입자의 제거는 주로 섬유 필터를 이용해 이루어진다. 기본적으로 섬유 필터를 이용한 미세 먼지 입자의 포집 효율은 매우 높지만 더욱 향상된 성능을 목적으로 섬유 필터에 정전기적 성질을 더하거나 섬유 필터

주위에 강한 외부 전기장을 작용시키는 방법이 이용되어 왔다. 제조 과정 중에 섬유를 대전시키는 방법 등을 이용한 정전 섬유 필터는 현재 널리 실용화되어 있고, 섬유 필터 주위에 강한 전기장을 작용시켜 포집 효율을 높이는 여과 장치도 많은 곳에 적용되고 있다.

섬유 필터는 입자가 연속적으로 침착될 경우, 포집 효율이나 압력 손실 등이 변하는 특징을 갖고 있다. 일반적으로 섬유 필터에 먼지층이 형성되기

시작하면 입자의 포집 효율은 증가하고 압력 손실도 여과포 내부의 공극이 입자의 침착으로 인해 막혀감에 따라 증가하게 된다. 여기에 정전기력을 이용하였을 경우, 포집 효율은 더욱 증가하고, 필터 표면에서 훨씬 큰 다공성을 갖는 먼지층이 형성됨으로써 압력 손실은 감소하게 된다(Ohtsuka *et al.*, 1986; Chudleigh, 1983; Iinoya and Mori, 1982; Chudleigh and Bainbridge, 1980). 이러한 이유로 실제 섬유 여과 집진 장치의 성능을 예측하기 위해서는 각기 다른 여과 조건에 대해 필터 표면에서 형성되는 먼지층의 구조와 특성을 알아야 한다.

그러나, 지금까지 필터 표면에서의 먼지층 형상에 대해 만족할만한 연구는 이루어지지 않고 있다. 특히, 정전기력이 작용하였을 경우, 먼지층 형상에 대한 연구는 매우 저조하게 이루어져 왔다. 이에 대한 원인으로 필터 자체가 지니고 있는 구조적 복잡성을 들 수 있는데, 필터 내부에서의 섬유들의 배치를 정확히 이론에 적용하는 것이 매우 어려울 뿐만 아니라, 이로 인해 실제 필터와 먼지 입자사이의 정전기적 영향을 수식으로 구체화하는 것이 불가능하기 때문이다. 따라서, 많은 연구자들이 단일 섬유 모델을 사용하여 먼지층 형성에 대한 해석을 실시하였는데, 주로 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션이나 아주 간단한 실험을 통해 이루어졌다.

Zebel (1965)은 유동의 횡방향으로 놓인 단일 섬유에 균일한 전기장이 유동의 방향으로 작용했을 경우, 입자와 단일 섬유사이에 작용하는 정전기력과 입자의 포집 효율사이의 관계를 구명하였다. Löeffler (1978)는 Lamb의 유동장을 사용하여 입자의 크기와 정전기력에 따른 입자의 포집 효율을 입자의 궤적을 이용해 구하였고, Banks 등(1983)은 입자와 섬유사이에 작용하는 대표적인 정전기력을 고려하여 수치 해석적인 방법으로 단일 섬유에서의 포집 효율을 구하였다.

정전기력이 작용하지 않을 경우, Kanaoka 등(1994)은 단일 섬유에서의 먼지층 형상을 여과 기작에 따라 3차원으로 시뮬레이션 하였다. 이들은 입자의 관성 충돌에 의한 침착이 지배적인 경우와 섬유에 의한 입자의 직접 차단 효과만을 고려한 경우, 그리고 입자의 확산에 의한 침착이 우세한 경우에 대해 각각 시뮬레이션을 수행하였다.

정전기력에 의해 입자가 침착될 경우의 먼지층

형상에 대한 이론적 연구는 주로 정전 필터를 중심으로 이루어져 왔다. 대표적인 연구로는 Nielsen과 Hill(1980)에 의해 수행된 포텐셜 유동장하에서의 2차원 시뮬레이션과 Baumgartner와 Löffler(1987)가 보여준 3차원 시뮬레이션이 있다. Wang 등(1980)은 단일 섬유 주위에 강한 외부 전기장이 작용할 때, 입자의 침착 형태와 포집 효율에 대한 외부 전기장의 영향을 실험을 통해 분석하였으며, Oak와 Saville(1980)도 단일 섬유 주위에 강한 외부 전기장을 작용시킨 후, 입자의 여과 실험을 수행하였다. 이들은 전자현미경 사진을 통해 단일 섬유에 형성된 먼지층의 모양을 보여 주었는데, 먼지층이 선형적으로 길다란 모양의 덴드라이트(dendrite) 구조로 형성된다는 것이 확인되었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 단일 섬유 주위에 강한 외부 전기장이 존재할 경우, 먼지층 형상에 대한 현재까지의 연구는 단지 몇몇 실험을 통해 그 구조가 파악되었을 뿐, 그 생성 기작은 정확하게 밝혀지지 않고 있다. 위와 같이 정전기력하에서의 먼지층 형상에 대한 수치적, 또는 해석적 연구가 저조한 이유는 앞에서 언급하였듯이 먼지층의 복잡한 구조로 인해 먼지층과 입자사이의 정전기력을 정확히 적용할 수 없고, 또한 입자들이 지속적으로 섬유에 침착됨에 따라 수시로 바뀌는 정전기적 조건의 변화를 이론적으로 구체화하기가 힘들기 때문이다. 따라서, 먼지층의 이론적 해석을 위한 선결 과제는 위에서 언급한 정전기적 조건의 변화를 정확히 나타낼 수 있는 이론식을 유도해 내는 것이다.

본 연구에서는 이러한 정전기적 조건의 변화를 반영하기 위해서 단일 섬유와 입자사이에 존재하는 정전기력 뿐만 아니라 입자가 섬유에 침착되었을 경우에 각각의 침착된 입자들과 새로 유입되는 입자사이의 정전기력까지도 고려한 이론식을 기존의 수식을 이용해 간단한 방법으로 유도하고 이를 통해 단일 섬유 주위에 강한 외부 전기장이 존재할 때, 단일 섬유의 전면에서 볼 수 있는 먼지층의 선형 구조에 대한 생성 기작을 수치 시뮬레이션을 통해 구체적으로 밝혀내고자 한다. 또한 위의 정전기적 조건하에서, 입자에 작용하는 각각의 정전기력이 먼지층 형상에 어떻게 기여하는지를 명확히 해석하여 실제 필터에 형성되는 먼지층에 대한 이론적 해석의 틀을 마련하고자 한다.

## 2. 외부 전기장의 존재시 작용하는 정전기력

강한 외부 전기장이 단일 섬유에 대해 작용할 경우, 단일 섬유 주위에서의 전기장은 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$E_r = E_0 \left( \frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \frac{r_f^2}{r^2} + 1 \right) \cos\theta \quad (1)$$

$$E_\theta = E_0 \left( \frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \frac{r_f^2}{r^2} - 1 \right) \sin\theta \quad (2)$$

여기서  $E_0$ 는 외부 전기장의 세기이며,  $E_r, E_\theta$ 는 각각  $r$ 방향과  $\theta$ 방향의 전기장을 나타낸다.  $r$ 과  $\theta$ 는 그림 1에 나타난 바와 같이 정의한다. 또한  $\epsilon_f$ 는 섬유의 유전 상수이며,  $r_f$ 는 섬유의 반경을 나타낸다. 위 식에서 우변의 첫 번째 항은 외부 전기장으로 인한 분극화된 섬유 주위에 생성된 전기장, 두 번째 항은 균일한 외부 전기장을 각각 나타낸다.

입자가 섬유에 침착되면 단일 섬유 주위의 전기장은 변하게 되는데, 이러한 전기장의 변화를 고려하기 위해서 우선 균일한 외부 전기장 안에 놓인 구형 입자 주위에 형성되는 전기장을 아래의 식(3)과 (4)로 나타내었다.

$$E_{r_k}' = E_0 \left[ \left( 2 \frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \left( \frac{r_p}{r_k} \right)^3 + 1 \right] \cos\theta_k \quad (3)$$

$$E_{\theta_k}' = E_0 \left[ \left( \frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \left( \frac{r_p}{r_k} \right)^3 - 1 \right] \sin\theta_k \quad (4)$$

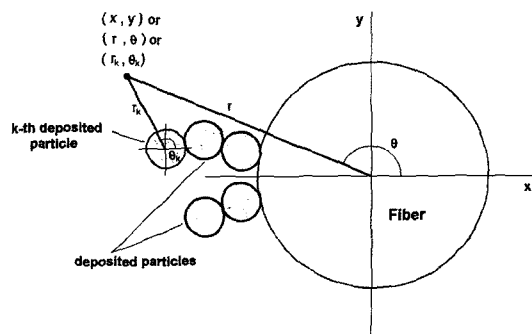


Fig. 1. Coordinate System used in the present study.

여기서  $\epsilon_p$ 는 입자의 유전 상수,  $r_p$ 는 입자의 반경을 나타낸다. 위 식의  $r_k$ 와  $\theta_k$ 는 그림 1에 정의되었듯이  $k$ 번째 침착된 입자의 중심에 원점을 둔 극좌표계에서 위치 좌표의 동경과 방위각을 각각 나타낸다. 또한 위 식에서  $E_0$ 는 외부 전기장의 세기,  $E_{r_k}'$ 와  $E_{\theta_k}'$ 는 각각  $r_k$ 방향과  $\theta_k$ 방향의 전기장을 나타낸다.

식(3)과 (4)에서 우변의 첫 번째 항은 외부 전기장이 작용하는 조건에서 이미 섬유에 침착된 입자의 분극에 의한 전기장을, 두 번째 항은 외부 전기장을 나타낸다. 입자가 침착된 단일 섬유 주위의 전기장을 계산하기 위해서 식(1)과 (2)에 식(3)과 (4)를 직접 더하면 외부 전기장을 나타내는 항이 중첩되어 계산된다. 이러한 오류를 피하기 위해서는 식(3)과 (4)에서 두 번째 항이 생략되어야 한다. 식(3)과 (4)의 수정된 형태를 식(5)와 (6)에 나타내었다.

$$E_{r_k} = E_0 \left( 2 \frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \left( \frac{r_p}{r_k} \right)^3 \cos\theta_k \quad (5)$$

$$E_{\theta_k} = E_0 \left( \frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \left( \frac{r_p}{r_k} \right)^3 \sin\theta_k \quad (6)$$

여기서  $E_{r_k}$ 과  $E_{\theta_k}$ 는 각각  $r_k$ 과  $\theta_k$ 방향의, 입자의 분극에 의한 전기장을 나타낸다. 따라서  $n$ 개의 입자가 침착된 단일 섬유 주위의 전기장은 식(1), (2), (5), (6)을 사용하여 직교 좌표계에서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{E}_{total} = E_{x_{total}} \vec{i} + E_{y_{total}} \vec{j} \quad (7)$$

$$E_{x_{total}} = (E_r \cos\theta - E_\theta \sin\theta) + \sum_{k=1}^n (E_{r_k} \cos\theta_k - E_{\theta_k} \sin\theta_k) \quad (8)$$

$$E_{y_{total}} = (E_r \sin\theta + E_\theta \cos\theta) + \sum_{k=1}^n (E_{r_k} \sin\theta_k + E_{\theta_k} \cos\theta_k) \quad (9)$$

여기서  $E_{x_{total}}, E_{y_{total}}$ 은 균일한 외부 전기장 하에 있는,  $n$ 개의 입자가 침착된 단일 섬유 주위 전기장의  $x$ 방향과  $y$ 방향 성분을 각각 나타내고,  $\vec{E}_{total}$ 은 이 두 성분의 벡터 합이다.

식(7)~(9)로 표현되는 전기장을 통과하는 입자에 작용하는 정전기력은 크게 두 가지로 나타낼 수 있다. 유입되는 입자가  $q_p$ 만큼의 하전량을 갖고 있을 경우, 입자는 전기장의 방향을 따라서 쿨롱력,  $\vec{F}_{co,r}$ 을 받게 되고 단일 섬유나 침착된 입자 주위에 나타나는 전기장의 불균일성으로 인한 분극력,  $\vec{F}_p$ 을 추가로 받게 되는데 아래의 식(10)과 (11)로 각

각 나타낼 수 있다. 참고로, 본 연구에서 사용된 모든 물리량은 C.G.S.단위계를 사용하여 표현하였다.

$$\vec{F}_{co.I} = q_p \vec{E}_{total} \quad (10)$$

$$\vec{F}_P = \frac{r_p^3}{2} \left( \frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \nabla (\vec{E}_{total} \cdot \vec{E}_{total}) \quad (11)$$

또한 침착된 입자가 전하를 전혀 잃지 않는다고 가정하였을 경우, 새로 유입되는 입자와 이미 침착되어 있는 입자사이에는 아래와 같은 쿨롱력,  $\vec{F}_{co.II}$ 이 작용한다.

$$\begin{aligned} \vec{F}_{co.II} &= \sum_{k=1}^n \frac{q_p q_{p_k}}{r_k^2} (\cos\theta_k \vec{i} + \sin\theta_k \vec{j}) \\ &= F_{co.II_x} \vec{i} + F_{co.II_y} \vec{j} \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)에서  $q_{p_k}$ 는  $k$ 번째로 침착된 입자의 하전량이다. 이 외에도 입자의 하전으로 인한 가상력(image force)나 공간 전하 쿨롱력 등이 작용할 수 있으나, 본 연구에서는 입자가 약하게 대전된 경우만을 다루므로 그러한 정전기력은 작용하지 않는다고 가정하였다.

### 3. 입자의 운동 방정식

확산에 의한 입자의 브라운(Brown) 운동이 없다고 가정하고, 입자에 정전기력이 작용할 경우, 입자의 운동 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_E + \vec{F}_G \quad (13)$$

위 식에서  $m$ 은 입자의 질량,  $\vec{v}$ 는 입자의 운동 속도이고,  $\vec{F}_D$ 는 입자와 유동의 속도 차에 의해 입자가 받는 항력,  $\vec{F}_E$ 는 입자에 작용하는 정전기력, 그리고  $\vec{F}_G$ 는 입자가 받는 중력을 각각 나타낸다. 입자가 받는 항력,  $\vec{F}_D$ 를 나타내는 식은 레이놀즈수(Re)의 크기에 따라 다양하게 존재한다. 본 연구에서의 레이놀즈수는 스토크스(Stokes)유동의 기준이 되는 1보다 매우 작은 값을 갖기 때문에 항력,  $\vec{F}_D$ 는 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_D = \frac{3\pi\mu(\vec{u} - \vec{v})d_p}{C_c} \quad (14)$$

식(14)에서  $\mu$ 는 공기의 점성 계수이고,  $d_p$ 는 입자의 직경,  $C_c$ 는 입자와 기체사이의 상대 속도가 0이 아닌 경우, 즉, 입자의 크기가 공기 분자의 평균 자유 행정에 가까운 매우 작은 입자의 경우, 입자 표면에서의 미끄럼 영향으로 인한 입자 속도의 증가를 보정한 계수로서, Jennings (1988)의 값이 사용되었다.  $\vec{u}$ 는 유동 속도를 나타내고, 본 연구에서는 Kuwabara (1959) 유동장의 수정된 형태로서, 섬유 크기 매우 작은 경우에 섬유 표면에서 발생할 수 있는 미끄러짐 효과를 고려한, Henry와 Ariman (1981)에 의해 구하여진 유동장을 사용하였다. 또한 중력,  $\vec{F}_G$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$\vec{F}_G = \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_{air}) \vec{g} \quad (15)$$

위 식에서  $\rho_p$ 와  $\rho_{air}$ 는 각각 입자와 공기의 밀도를 나타내며,  $\vec{g}$ 는 중력 가속도이다.

식(13)의 정전기력,  $\vec{F}_E$ 는 식(10)~(12)의 합으로 나타낼 수 있고, 따라서 입자의 운동방정식은 직교 좌표계에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} m \frac{dv_x}{dt} &= \frac{3\pi\mu(u_x - v_x)d_p}{C_c} + q_p E_{x_{total}} + \frac{r_p^3}{2} \left( \frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \nabla \\ & \quad (\vec{E}_{total} \cdot \vec{E}_{total})_x + \sum_{k=1}^n \frac{q_p q_{p_k}}{r_k^2} \cos\theta_k \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} m \frac{dv_y}{dt} &= \frac{3\pi\mu(u_x - v_x)d_p}{C_c} + q_p E_{y_{total}} + \frac{r_p^3}{2} \left( \frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \nabla \\ & \quad (\vec{E}_{total} \cdot \vec{E}_{total})_y + \sum_{k=1}^n \frac{q_p q_{p_k}}{r_k^2} \sin\theta_k \\ & \quad - \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_{air}) g \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 하첨자  $x, y$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 방향 성분을 표시한다. 위 식에서 우변의 두 번째와 세 번째 항은 하전 입자에 전기장을 따라 작용하는 쿨롱력과 전기장의 변형으로 인해 입자에 작용하는 분극력을 각각 나타냄을 앞서 밝힌 바 있다. 그리고  $\vec{E}_{total}$ 에는 침착된 입자 주위의 전기장 변형이 모두 반영되었고, 하전된 입자가 받는 쿨롱력은  $q_p \vec{E}_{total}$ 에 의해서 침착된 입자의 개수에 상관없이 계산될 수 있다. 하지만  $\nabla(\vec{E}_{total} \cdot \vec{E}_{total})$ 에 비례해서 작용하는 분극력은  $\vec{E}_{total}$ 의 복잡성 때문에 정확한 수식으로 표현하는데

많은 어려움이 따르게 된다. 즉, 입자가 섬유에 연속적으로 침착됨에 따라  $\vec{E}_{total}$ 이 더욱 복잡한 식으로 표현되고, 이들의 내적에 대한 구배를 구하는 것은 사실상 불가능하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 몇 가지 가정에 따른 근사식이 사용되었다. 즉, 새로 유입되는 입자에 작용하는 분극력은 단일 섬유 주위의 전기장 변형으로 인한 것과 가장 끝부분에 침착된 입자 주위의 전기장 변형에 의한 것이라는 가정하에 매 시간 간격마다 각각의 분극력을 계산하고, 그 크기를 비교해 더 큰 영향을 주는 값을 선택해서 사용하는 방법으로 침착된 입자들로 인한 분극력의 계산을 단순화시켰다.

#### 4. 수치 해석

본 연구에서는 식(16)과 (17)를 수치적으로 계산하여 입자의 궤적을 구하고 적당한 침착 조건을 주어서 입자의 침착 위치를 얻은 후, 그래픽 소프트웨어를 이용하여 단일 섬유에서의 먼지층의 형상을 시뮬레이션 하였는데, 이 때 사용된 모사 조건을 표 1에 나타내었다.

표 1에서 입자의 하전량에 표시된  $e$ 는 한 개의 전자가 갖는 하전량을 나타내며,  $4.8 \times 10^{-10}$  stat-coulomb이다. 표 1에 나타나 있듯이 입자의 직경은  $2 \mu\text{m}$ 을 사용하였는데, 그 이유는  $2 \mu\text{m}$  정도 크기의 입자에서 브라운 운동에 의한 힘은 다른 힘들에 비해 상대적으로 무시될 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 입자 궤적 계산의 편의성을 위하여 몇 가지 가정을 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 우선, 먼지층 형성으로 인한 유동장의 변형은 고려하지 않았다. 즉, 입자의 침착이 충분히 이루어지지 않은 단일 섬유의 경우, 입자가 침착된 형태의 단일 섬유에 대한 3차원적인 공간 구성을 고려했을

때, 침착된 입자들로 인한 유동장의 변형은 아주 작을 것이라고 가정하였다. 또한 하전된 입자가 침착되었을 경우, 침착된 입자는 처음의 하전량을 계속해서 유지한다고 가정하였다. 이는 본 연구에서 고려한 입자나 섬유의 전기적 절연성이 매우 크기 때문에 적어도 시뮬레이션 도중에는 입자의 하전량이 변하지 않음을 의미한다. 마지막으로 입자의 튕겨나감(bounce-off)은 없고, 일단 침착된 입자는 재비산이나 재유입되지 않는다고 가정하였다.

단일 섬유에 대한 입자의 운동을 그림 2와 같이 단순한 형태로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 입자의 초기 발생 위치는 Unix용 IMSL의 난수 발생(Random Number Generator) 프로그램을 이용하여 구하였는데, 0과 1사이에서 균등한 확률을 갖는 uniform random deviate를 사용하였다. 이때 y축 방향의 범위는 섬유의 직경과 같은 크기로 취하였으며, 입자의 초기 속도는 셀 경계면에서의 유체의 속도와 동일하게 설정하였다. 또한 발생 입자들의 하전량이 Boltzmann 평형 분포를 이룰 때, 각 입자의 하전량도 마찬가지로 IMSL의 난수 발생 프로그램을 이용하여 구하였다. 이를 각 절차 별로 자세히 설명하면, 우선 식(18)을 이용해 Boltzmann 평형 하전 분포에서 입경이  $d_p$ 인 입자중 하전수  $n_e$ 을 갖는 입자의 비율  $f_n$ 을 구하고, 이산 확률 분포일 경우의 IMSL 난수 발생 프로그램인 RNGDA를 이용하여 입자의 하전량을 결정하였다.

$$f_n = \frac{\exp(-n_e^2 e^2 / d_p k T)}{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(-n_e^2 e^2 / d_p k T)} \quad (18)$$

식(18)에서  $e$ 는 한 개의 전자가 갖는 하전량이고  $k$ 는 Boltzmann 상수값인  $1.38 \times 10^{-16}$  dyn · cm/K이고,  $T$ 는 절대온도를 나타낸다. 본 연구에서는 상온 조건인  $T=298\text{K}$ 를 사용하였다.

Table 1. Simulation conditions used in the present study.

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| Particle Diameter, $d_p$                      | 2 $\mu\text{m}$                   |
| Fiber Diameter, $d_f$                         | 30 $\mu\text{m}$                  |
| Filtration Velocity, $U_0$                    | 10, 30 cm/sec                     |
| Packing Density of Filter                     | 0.05                              |
| Particle Density, $\rho_p$                    | 1 g/cm <sup>3</sup>               |
| Strength of External Electric Field, $E_0$    | 5 kV/cm                           |
| Particle Charge, $q_p$                        | 0, 5e, 50e, Boltzmann Equilibrium |
| Dielectric Constant of Particle, $\epsilon_p$ | 4                                 |
| Dielectric Constant of Fiber, $\epsilon_f$    | 4                                 |

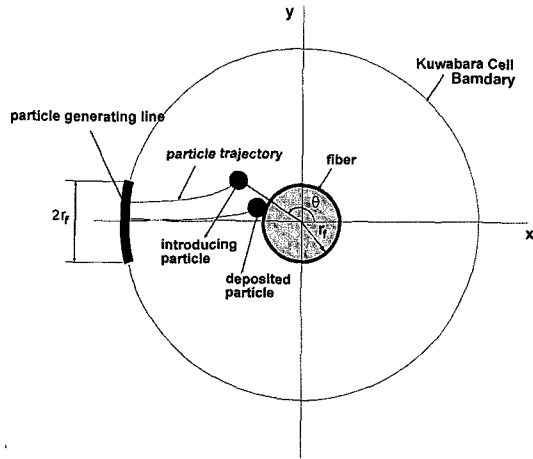


Fig. 2. Schematic diagram for numerical simulation of the present study.

일단 발생된 입자는 Runge-Kutta법에 의해서 그 궤적을 구하고, 입자가 Kuwabara 셀 (cell)의 경계를 벗어나거나 섬유에 침착되었을 경우에 다음 입자를 발생시키는 방법으로 입자 각각에 대한 궤적을 구하였다. 또한, 입자의 침착은 섬유나 이미 침착된 다른 입자에 의해서만 이루어지도록 하였고, 각 시간 간격마다 입자와 섬유사이의 중심 거리, 그리고 새로 유입되는 입자와 이미 섬유에 침착되어 있는 입자들간의 중심 거리를 계산하여 그 값이 각각 입자 반경과 섬유 반경의 합, 그리고 입자의 직경보다 작아지면 입자는 침착되는 것으로 간주하고 그때의 좌표를 출력하도록 하였다.

### 5. 결과 및 고찰

정전기력이 작용하지 않았을 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 3에 나타내었다. 각각의 여과 조건은 그림 상단에 표시되어 있는데, N과 N<sub>0</sub>는 각각 침착된 입자의 개수와 발생시킨 전체 입자의 개수를 나타낸다. 그림에서 유동의 방향은 x축의 양의 방향이며, 각 좌표축은 섬유의 중심을 원점으로 하였을 경우 무차원화된 위치 좌표를 나타낸다. 그림에서 보듯이 정전기력이 작용하지 않았을 경우는 입자의 포집 효율이 매우 낮고, 섬유의 전면에서만 침착이 이루어짐을 알 수 있다.

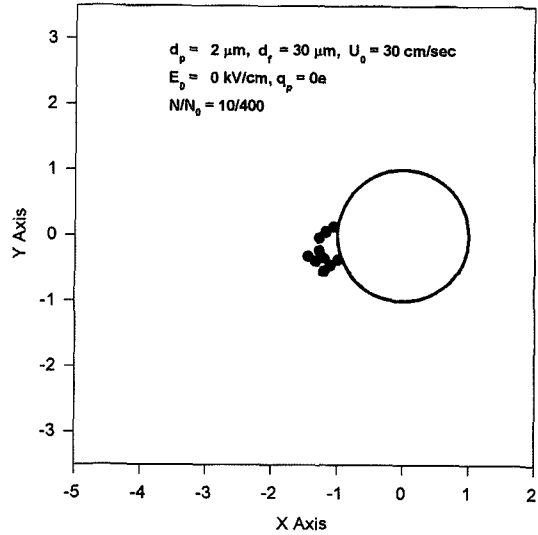


Fig. 3. Simulated deposition pattern of the monodisperse particles on a cylindrical fiber in the case of no electrostatic forces.

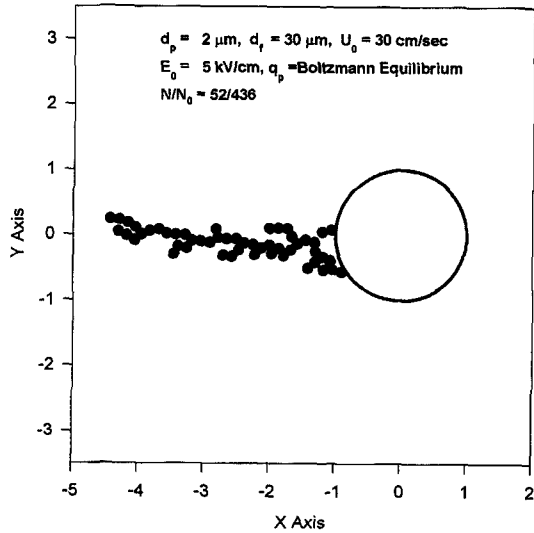


Fig. 4. Simulated deposition pattern of the monodisperse particles on a cylindrical fiber under the electrostatic conditions which  $E_0=5$  kV/cm,  $q_p$ =Boltzmann Equilibrium,  $U_0=30$  cm/sec, and  $E_0$  is parallel to  $U_0$ .

그림 4는 외부 전기장이 유동의 방향에 평행하게 작용하고 발생 입자들의 하전량이 Boltzmann 평형

상태로 분포할 때 입자의 침착 형태를 시뮬레이션한 결과이다. 입자의 침착이 섬유의 전면에 길다란 모양으로 이루어지고 포집 효율도 증가함을 알 수 있다. 이 경우에 있어서 입자에 작용하는 정전기력은 입자와 섬유사이, 입자와 이미 침착된 입자사이에 작용하는 분극력 뿐이므로, 이러한 포집 효율 증가는 단일 섬유 주위의 불균일한 전기장으로 인해 입자에 작용하는 분극력 때문임을 알 수 있었다.

본 시뮬레이션이 수행된 여과 조건하에서, Boltzmann 평형 전하 분포를 갖는 입자의 하전량이 입자의 침착 형태에 어떠한 영향을 주는지를 알아보기 위해서 모든 발생 입자의 하전량을 0으로 주고 시뮬레이션한 결과, 그림 4와 동일한 침착 형태를 얻을 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 고려한 여과 조건하에서는, Boltzmann 평형 전하 분포를 갖는 입자의 하전량은 매우 작기 때문에, 이로 인한 쿨롱력은 입자의 침착에 거의 영향을 주지 못한다는 사실을 알 수 있었다.

또한, 이미 침착된 입자들로 인해 유입 입자가 받는 정전기력이 위의 선형적인 텐드라이트 구조에 어떠한 영향을 주는지를 알아보기 위해 유입 입자와 침착 입자사이의 정전기력을 고려하지 않고 시뮬레이션을 수행하였다. 기타 다른 여과 조건이 같았을 때, 먼지층의 형상은 그림 4와 똑같은 결과를 보였다. 따라서 그림 4에서 볼 수 있는 선형적인 텐드라이트 구조는, 적어도 위의 여과 조건하에서는, 유입 입자와 이미 침착된 입자사이의 정전기력으로 인한 것이라기 보다는 섬유의 분극으로 인해 입자에 작용하는 정전기력의 결과임을 알 수 있었다. 즉, 단일 섬유 주위의 전기장 변형으로 인해 입자에 작용하는 분극력은 섬유 전면과 후면의 정체점을 향해 수렴하기 때문에 유입 입자들은 단일 섬유의 전면에 선형적으로 침착된다.

그림 5는 입자가 5e의 하전량을 갖고 기타 여과 조건은 그림 4에 표시된 것과 같다고 했을 때, 입자에 작용하는 각각의 정전기력을 무차원화한 다음, 입자가 갖는 관성력의 크기를 나타내는 Stk수와의 비(ratio)를 입자와 섬유사이의 중심 거리, 또는 입자와 이미 침착된 입자사이의 중심 거리에 대해 나타낸 것이다. 여기서 Stk수는 식(19)으로 정의된다.

$$Stk = \frac{C_c \rho_p d_p^2 U_0}{9\mu d_f} \tag{19}$$

그림 5의 가로축은 입자와 섬유 또는 입자와 침착 입자사이의 중심 거리를 섬유의 반경인  $r_f$ 로 나눈 무차원화된 값을 나타낸다. 중심 거리의 범위는 Kuwabara 셀의 반경과 비슷한 값인 5를 최대값으로 하였으며, 최소값은 입자와 섬유사이는 1.0667로, 입자와 침착 입자사이는 0.1333을 취했는데 이때의 값은 입자가 침착되기 직전의 중심 거리의 미한다. 그림 5에 나타난 각각의 정전기력을 계산함에 있어서 입자와 단일 섬유, 그리고 입자와 침착 입자가 이루는 각의 크기는  $180^\circ$ 로 고정시켰다.

속도가  $U_0$ 인 유체안에 정지해 있는 입자에 작용하는 항력의 크기를  $F_{Drag}$ 로 나타냈을 때, 외부 전기장하에 있는 단일 섬유와 입자사이에 작용하는 쿨롱력,  $F_{co}$ , 섬유와 입자사이에 작용하는 분극력,  $F_{Pol,I}$ , 입자와 침착 입자사이에 작용하는 분극력,  $F_{Pol,II}$ , 입자와 침착 입자사이의 반발력,  $F_{rep}$ 를 각각  $F_{Drag}$ 로 무차원화하면 아래와 같이 표현된다.

$$F_{Drag} = \frac{3\pi\mu U_0 d_p}{C_c} \tag{20}$$

$$N_{co} = \frac{F_{co}}{F_{Drag}}, \quad N_{Pol,I} = \frac{F_{Pol,I}}{F_{Drag}} \tag{21}$$

$$N_{Pol,II} = \frac{F_{Pol,II}}{F_{Drag}}, \quad N_{rep} = \frac{F_{rep}}{F_{Drag}} \tag{22}$$

위 식(21)~(22)의  $N_{co}$ ,  $N_{Pol,I}$ ,  $N_{Pol,II}$ ,  $N_{rep}$ 는 각각의 정전기력을 나타내는 무차원수이다.

그림 5에서 보듯이 기본적으로 관성력이 다른 정전기력에 비해 매우 크게 나타남을 확인할 수 있고, 입자의 하전량이 작더라도 이 때 작용하는 쿨롱력은 다른 정전기력에 비해 비교적 큰 값을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.  $F_{Pol,II}$ 와  $F_{rep}$ 는 두 입자사이의 거리가 아주 작은 경우를 제외하고는 다른 힘들에 비해 무시할 수 있을 정도로 작음을 알 수 있다. 따라서  $F_{Pol,II}$ 로 인해 입자의 경로가 변하기는 매우 힘들고, 이것은  $F_{Pol,II}$ 가 입자의 운동에 거의 영향을 주지 못함을 의미한다.

입자의 하전량에 의한 침착 형태의 특성을 알아보기 위해 입자의 하전량을 50e로 주어서 시뮬레이

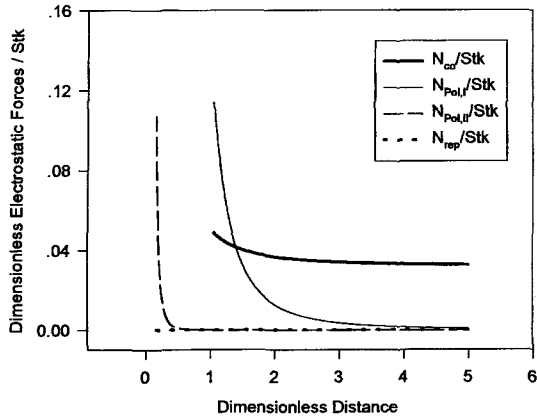


Fig. 5. Comparison of the magnitude ratios of dimensionless electrostatic forces to Stk which represents the inertia force of a moving particle as a function of the distance between the particle & the fiber and between the particle & the deposited particle where  $q_p=5e$ ,  $E_0=5$  kV/cm,  $U_0=30$  cm/sec.

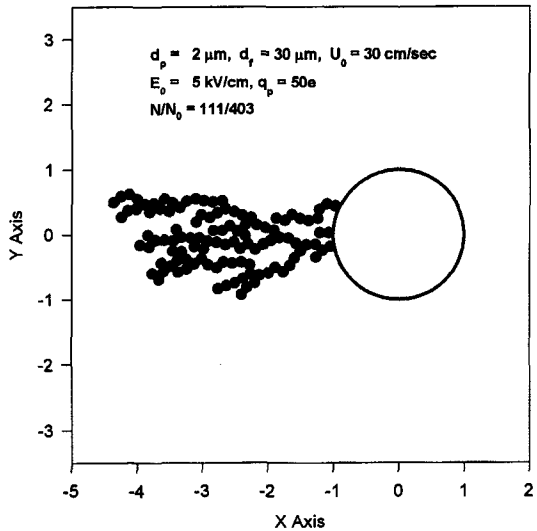


Fig. 6. Simulated deposition pattern of the mono-disperse particles on a cylindrical fiber under the electrostatic conditions which  $E_0=5$  kV/cm,  $q_p=50e$ ,  $U_0=30$  cm/sec, and  $E_0$  is parallel to  $U_0$ .

선을 수행하였다. 그림 6은 그 결과를 나타낸 것이다. 입자의 대전으로 인한 쿨롱력이 커지기 때문에

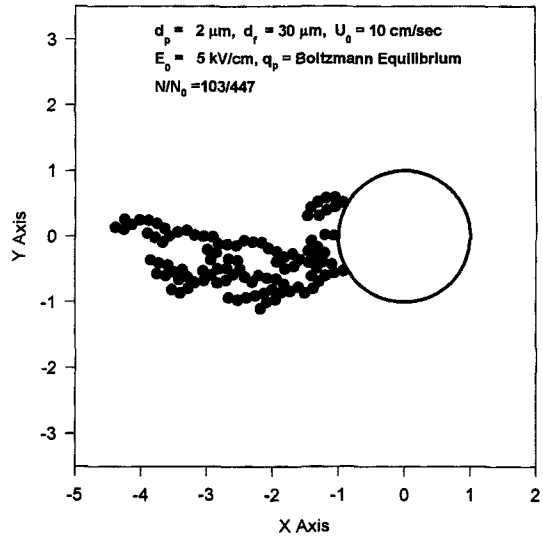


Fig. 7. Simulated deposition pattern of the mono-disperse particles on a cylindrical fiber under the electrostatic conditions which  $E_0=5$  kV/cm,  $q_p=Boltzmann$  Equilibrium,  $U_0=10$  cm/sec, and  $E_0$  is parallel to  $U_0$ .

그림 4의 경우보다 훨씬 많은 입자가 침착됨을 알 수 있다.

그림 7은 여과 속도가 10 cm/sec일 때의 먼지층 형상을 나타낸다. 다른 여과 조건은 그림 4의 경우와 같고, 입자의 포집 효율은 그림에 표시된 바와 같다. 여과 속도가 감소했을 때, 입자가 갖는 관성력이 감소하고, 정전기력이 상대적으로 커지므로 입자의 포집 효율이 증가함을 알 수 있다.

입자의 포집 효율을  $N/N_0$ 으로 정의하고, 여과 조건이 기본적으로 위에서 고려한 것과 같고 전기장의 세기를 5 kV/cm으로 가정했을 때, 여과 속도와 입자의 하전량에 단일 섬유에 대한 입자의 포집 효율을 그림 8에 나타내었다. 그림에서 입자의 하전량을 표시한 B.E.는 발생 입자들이 Boltzmann 평형 하전 분포를 이루고 있음을 나타낸다. 모든 경우에 있어서 입자가 섬유에 침착됨에 따라 단일 섬유의 포집 효율은 계속해서 증가함을 알 수 있다. 즉, 입자가 단일 섬유에 침착되기 시작하면 그 후에 발생된 입자는 단일 섬유 뿐만 아니라 이미 침착된 입자에도 침착될 수 있기 때문에 그 포집 효율은 계속해서 증가하게 된다. 또한 각각의 경우에 해당되



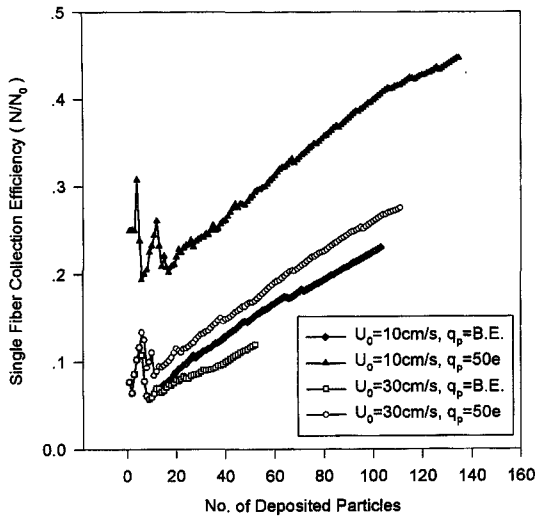
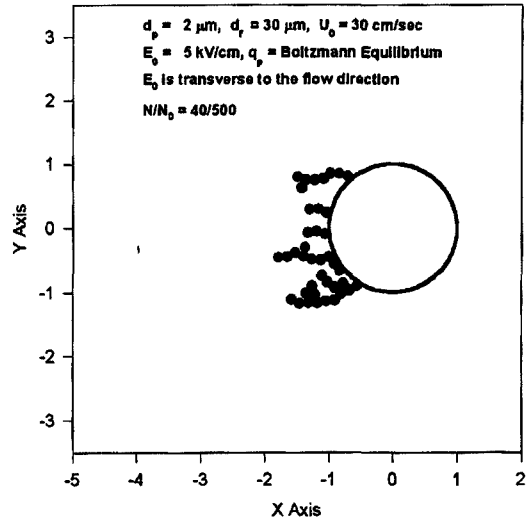


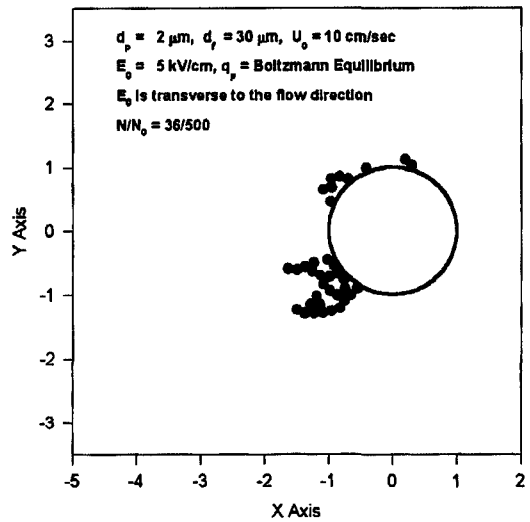
Fig. 8. Single fiber collection efficiency with the number of deposited particles.

는 그래프의 기울기를 살펴보면 여과 속도가 작을수록, 입자의 하전량이 많을수록 포집 효율의 증가가 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 이는 앞서 언급했듯이 정전기력의 크기가 관성력에 비해서 상대적으로 증가하기 때문이다. 그림 8에서 침착된 입자의 수가 적은 경우에 나타나는 포집 효율의 일시적인 증가는 난수 발생의 확률론적 속성에 기인한 현상이다.

지금까지는 외부 전기장의 방향이 유동의 방향과 평행한 경우에 대한 것이었다. 외부 전기장이 유동의 방향에 수직하게 작용하였을 경우, 단일 섬유에 대한 입자의 침착 형태를 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 외부 전기장의 방향은 (-)y축 방향이고, 따라서 단일 섬유와 유입 입자사이에 작용하는 분극력은 그림의 좌표점 (1, 1), (-1, -1)을 향해 수렴하게 된다. 그림 9의 (a)는 여과 속도가 30cm/sec이고, (b)는 10cm/sec인 경우이다. 포집 효율은 비슷하게 나타났으나 침착 형태는 매우 다른 양상을 나타내었다. 보다 큰 여과 속도를 갖는 (a)의 경우는 입자의 관성력이 다른 정전기력에 비해 매우 크기 때문에 섬유의 전면에서 침착이 이루어진 반면에, (b)에서는 상대적으로 관성력의 크기가 작기 때문에 분극력의 영향을 많이 받아, 분극력이 크게 작용하는



(a)  $U_0 = 30\ \text{cm/sec}$



(b)  $U_0 = 10\ \text{cm/sec}$

Fig. 9. Simulated deposition pattern of the monodisperse particles on a cylindrical fiber under the electrostatic conditions which  $E_0=5\ \text{kV/cm}$ ,  $q_p=\text{Boltzmann Equilibrium}$ , and  $E_0$  is transverse to  $U_0$ .

부분에서 입자의 침착이 이루어짐을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 강한 외부 전기장이 단일 섬유 주위에 존재할 경우, 단일 섬유에 대한 입자의 침착 형태를 살펴보고, 그에 대한 각 정전기력의 영향과 그 형성 기작을 수치 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

입자의 침착으로 인한 정전기력의 변화를 고려하기 위해, 각각의 침착 입자 주위에 형성된 전기장의 분포를 시뮬레이션에 반영하였다. 이에 따라, 새로 유입되는 입자는 단일 섬유 주위의 전기장 영향 뿐만 아니라, 이미 섬유에 침착된 입자 주위의 전기장에 의한 영향도 받게 된다.

유동의 방향과 평행하게 외부 전기장이 작용하였을 경우, 입자의 침착 형태는 선형적인 덴드라이트 구조를 보였는데, 이러한 구조의 먼지층이 생성되는 주요 원인으로, 기본적으로 관성력이 다른 정전기력에 비해 크게 작용하기 때문에, 섬유에 침착되는 입자가 그리는 궤적이 매우 좁은 범위 내에 존재하고, 또한 단일 섬유 주위의 전기장 변형으로 인해 유입 입자에 작용하는 분극력이 단일 섬유의 전면과 후면의 정체점에 수렴하기 때문인 것으로 파악되었다.

여과 속도가 감소할수록 입자가 갖는 관성력이 감소해 상대적으로 정전기력의 크기가 커지고 따라서 좀 더 많은 수의 입자가 침착되었다. 또한 유입 입자의 하전량이 증가할수록 입자의 포집 효율은 증가하였다.

외부 전기장이 유동의 방향에 수직하게 작용하였을 경우, 입자의 침착 형태는 여과 속도에 따라 매우 다르게 나타났다. 여과 속도가 작았을 때, 입자의 침착은 단일 섬유와 입자사이의 분극력에 의해 주로 이루어져 분극력이 수렴하는 지점에서 침착되는 형태를 나타냈고, 속도가 큰 경우엔 대부분의 입자들이 관성력의 영향으로 인해 단일 섬유의 전면에서 침착이 이루어지는 형태를 보였다.

이상과 같이 본 연구를 통하여 단일 섬유에서의 단분산 구형 입자의 침착과 그 침착 형태에 대해 외부 전기장이 주는 영향을 해석하였고, 이에 대한 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 앞으로, 본 연구를 토대로 다른 여러 정전기적 조건에서의 입자 침

착 형태에 관한 연구가 요망되어지며, 또한 3차원 시뮬레이션을 통한 입자 침착 형태의 공간적 구조와 이에 따른 포집 효율과 압력 손실의 변화에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 에너지 자원 기술개발 지원센터가 시행한 청정 에너지 기술개발 사업(1997C-CC02-P-02)의 일환으로 수행되었으며, 이에 도움을 주신 모든 분들께 감사의 뜻을 전합니다.

## 참 고 문 헌

- Banks, D.O., M.S. Hall, and G.J. Kurowski (1983) Numerical Determination of Electrically Enhanced Fiber Collection Efficiency, *J. Aerosol Sci.*, 14(2), 87-97.
- Baumgartner, H. and F. Löffler (1987) Three-Dimensional Numerical Simulation of the Deposition of Poly-disperse Aerosol Particles on Filter Fibres - Extended Concept and Preliminary Results, *J. Aerosol Sci.*, 18(6), 885-888.
- Chudleigh, P.W. and N.W. Bainbridge (1980) Electrostatic Effects in Fabric Filters During Build-up of the Dust Cake, *Filtration and Separation*, 17, 309-311.
- Chudleigh, P.W. (1983) Reduction of Pressure Drop across a Fabric Filter by High Voltage Electrification, *Filtration and Separation*, 20(3), 213-216.
- Henry, F. and T. Ariman (1981) Cell Model of Aerosol Collection by Fibrous Filters in an Electrostatic Field, *J. Aerosol Sci.*, 12(2), 91-103.
- Iinoya, K. and Y. Mori (1982) Fundamental Study of a Fabric Filter with a Corona Precharger, *The 3rd Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology*, 3, 181-192.
- Jennings, S.G. (1988) The Mean Free Path in Air, *J. of Aerosol Science*, 19(2), 159-166.
- Kanaoka, C. and S. Hiragi (1994) Structure of Particle Accumulates on a Cylindrical Fiber in a Fibrous Air Filter, *Proc. 12 Int. Symp. on Contamination Control*, 59-62.
- Kuwabara, S. (1959) The Forces Experienced by Randomly Distributed Parallel Circular Cylinders or Spheres in a Viscous Flow at Small Reynolds Numbers, *J. of the Physical Society of Japan*, 14(4), 527-532.

- Loeffler, F. (1978) The Influence of Electrostatic Forces and of the Probability of Adhesion of Particle, Novel Concepts, Methods and Advanced Technology in Particulate Gas Separation, University of Notre Dame, Notre Da, 206-236.
- Nielsen, K.A. and J.C. Hill (1980) Particle Chain Formation in Aerosol Filtration with Electrical Forces, AIChE Journal, 26(4), 678-680.
- Oak, M.J. and D.A. Saville (1980) The Buildup of Dendrite Structures on Fibers in the Presence of Strong Electrostatic Fields, J. Colloid and Interface Sci., 76(1), 259-262.
- Ohtsuka, K., M. Shimoda, and H. Asano (1986) Mechanism of Fabric Filtration by Electrostatic Augmentation, J. Electrostatics, 18, 93-102.
- Wang, C.S., C.P. Ho, H. Makino, and K. Iinoya (1980) Effect of Electrostatic Fields on Accumulation of Solid Particles on Single Cylinders, AIChE Journal, 26(4), 680-683.
- Zebel, G. (1965) Deposition of Aerosol Flowing Past a Cylindrical Fiber in a Uniform Electric Field, J. Colloid Sci., 20(6), 522-543.