

단일 전하로 하전된 단일 섬유에서의 미세입자의 초기 집진효율에 관한 이론적 연구

A Theoretical Study on the Initial Collection Efficiency of Submicron Particles by a Unipolar Charged Fiber

오 용 화 · 전 기 준 · 정 용 원*

인하대학교 환경공학과

(2001년 2월 8일 접수, 2001년 5월 21일 채택)

Yong-Wha Oh, Ki-Joon Jeon and Yong-Won Jung

Department of Environmental Engineering, Inha University

(Received 8 February 2001; accepted 21 May 2001)

Abstract

In this study, we have developed a simulation method to predict the initial collection efficiency of a unipolar charged fiber in the electret filters. The particle sizes considered were in the submicron range and thus Brownian motion of particles was also taken into consideration along with electrostatic forces acting on the particles. The simulation results were compared with other investigator's experimental data on single fiber efficiency as well as with the calculated results using the existing correlations on single fiber efficiency. It has been shown that simulation results are in good agreement both with the experimental data and with those predicted by the correlations.

Key words : submicron particle, electret filter, collection efficiency, unipolar charged fiber

1. 서 론

섬유층 필터(fibrous filter)는 실내 공기 정화용 공기 필터, 방진 마스크, 반도체 제조공정의 청정실(clean room), 원자력 시설에 쓰이는 고성능 공기 필터에 이르기까지 다양한 용도로 사용되며, 최근 그 수요가 증가하고 있는 추세이다. 섬유층 필터는 수 μm 에서 수십 μm 직경의 섬유 소재(fiber mater-

ial)를 mat형으로 만든 것으로 섬유의 직경, 필터의 두께 및 공극률(또는 충전률), 섬유 하전 여부에 따라 성능 및 용도가 달라지게 된다. 섬유층 필터에서 집진메커니즘은 먼지가 다공성의 여재(filter media) 내부를 통과하면서 먼지 입자에 작용하는 여러 가지 형태의 힘에 의해 필터 내부의 섬유에 부착되어 집진이 되는 소위 'deep bed type'의 집진메커니즘에 의해 이루어진다. 따라서 필터 전면에 dust cake을 형성하여 집진이 이루어지는 fabric filter의 경우와는 근본적으로 다른 집진메커니즘으로 섬유층필터에서 집진이 이루어진다. 용도 면에서도 이상과 같

* Corresponding author

Tel : +82-(0)32-860-7508, E-mail : jungyw@inha.ac.kr

이 집진메카니즘이 서로 상이하므로, 분진농도가 매우 높은 배기가스의 집진에는 fabric filter가 사용되고, 실내공간과 같이 비교적 분진농도가 낮은 공간의 집진에는 섬유층필터가 사용된다.

섬유층 필터에서 집진효율은 시간이 경과함에 따라 증가하는데, 그 이유는 포집된 입자들이 필터 내부에 퇴적되어 제2의 집진기의 역할을 하기 때문이다. 필터 내부에 입자포집량이 많아지면, 동일유량의 공기유량을 유지하기 위해서는 필터의 압력 강하도 증가하게 된다. 한편, 필터의 성능은 집진효율과 압력강하로 판정하는데, 이를 quality factor라 부른다 (Brown, 1993). Quality factor는 집진효율이 높을수록, 압력강하가 작을수록 높다. 섬유층여과기의 quality factor는 필터 섬유를 하전시키면 향상될 수 있는데, 이와 같이 정전기를 가진 섬유, 즉, 정전섬유(electret fiber)로 만들어진 필터를 정전필터(electret filter)라 부른다. 정전필터의 특징은 일반 섬유층필터보다 집진효율도 높고 동일한 입자포집량을 기준으로 압력강하도 작아 고효율로 장시간 사용이 가능하다는 점이다 (Brown, 1993). 하전된 섬유에서의 집진효율은 입자와 섬유간에 정전기력이 추가로 작용하여 전하가 없는 경우보다 증가하게 되며, 입자포집형태(particle deposition morphology)도 일반 섬유필터와는 달라지게 되는데, 입자포집형태는 집진효율과 압력강하에 매우 큰 영향을 미친다 (Walsh and Stenhouse, 1997, 1998; Tien, 1989).

정전섬유는 크게 단일전하로 하전된 섬유(unipolar charged fiber)와 양전하와 음전하가 공존하는 형태로 하전된(bipolar charged fiber)로 대별되는데, 본 연구에서는 단일전하로 하전된 정전섬유를 연구 대상으로 선정하였다.

섬유층필터에서의 입자포집에 관한 연구는 비교적 필터가 깨끗한 상태인 사용 초기의 집진효율에 대해서는 비교적 많은 실험적·이론적 연구가 이루어져 왔다 (Liu and Rubow, 1986). 이러한 많은 연구에도 불구하고, 최근까지도 섬유층 필터에 관한 이론연구에서 브라운운동을 무시할 수 없는 미세 입자의 초기 집진 효율을 산정하는 방법으로는 브라운 확산, 직접 차단, 관성 충돌 등 개개의 집진 메카니즘이 서로 독립적으로 일어난다는 가정 하에 각각의 기여를 합산하는 방법을 이용하여 왔다. 이러한 단점을 극복하기 위하여, Ramarao *et al.* (1994)은

“Brownian dynamics simulation” 방법을 이용하여 초기 집진 효율을 구하는 방법을 발표한 바 있다. Ramarao *et al.* (1994)의 연구결과에 의하면 일반 섬유층 필터에서의 초기집진효율은 특정 입자크기영역에서 브라운확산(Brownian diffusion), 관성충돌(inertial impaction), 직접차단(interception) 등의 각각의 집진메카니즘들에 의한 기여를 합한 것 보다 더 크게 되는 소위 synergy 효과가 존재함을 보여주었다. 본 연구에서는 이에 대한 연장으로 Ramarao *et al.* (1994)이 고려하지 않은 입자와 섬유간의 정전기력을 고려하여 단일 전하로 하전된 정전 필터에서 이들 미세 입자의 초기 집진 효율에 관한 이론적인 예측 방법을 개발하였고, 이를 다른 연구자들의 실험 결과와 기존의 경험식들을 사용한 예측값들과 비교하여 정전 필터에서의 미세 입자 초기 집진 효율에 관한 전산모사 예측법의 타당성을 검증하고자 하였다. 본 연구의 결과는 전산모사의 타당성이 입증되면 이를 토대로 정전필터에서의 입자포집형태 연구를 가능하게 할 수 있다는 점에서도 매우 중요한 의미가 있다.

2. 전산모사

2.1 전산모사 개요

에어로졸 입자에 작용하는 힘은 정전기력, 관성력, 점성 저항력, 브라운 운동을 유발하는 무작위력(random force), 중력 등이 있을 수 있으며 이들은 입자의 운동에 영향을 미친다. 위에 제시된 힘들 중에서 브라운 운동을 유발하는 무작위력은 입자의 궤적(trajecory)을 확률적인(stochastic) 과정의 결과로 나타나게 하며, 나머지 힘들은 소위 결정론적인(deterministic) 힘으로서 초기 조건만 동일하면 그 궤적이 동일하게 나타나게 된다. 이 같은 두 가지 상반된 힘들을 동시에 고려한 입자 운동 방정식이 Langevin equation이라 부르는 식(1)이다.

본 연구에서 입자의 궤적을 구하는데 사용한 방법은 다음과 같다. 먼저 필터 내부의 섬유 주위의 유체 흐름을 모사하기 위해 porous media model로 Kuwabara model을 사용하고 (Kuwabara, 1959), 그림 1의 Kuwabara cell의 유체 흐름의 상류 측에 입자의 초기 유속 및 위치를 설정한 후 다음의 운동 방정식을 적분하여 특정입자의 궤적을 계산하였다.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_E + \vec{F}_R \quad (1)$$

\vec{F}_D : drag force
 \vec{F}_E : external force
 \vec{F}_R : random force

여기서 \vec{u} 는 입자의 속도이며 m 과 t 는 각각 입자 질량과 시간을 나타낸다. \vec{F}_R 은 입자에 대한 수많은 유체 분자의 충돌에 의해 입자가 받는 힘을 나타내며, 이는 브라운 운동의 원인이 된다. \vec{F}_R 은 입자의 질량, 속도(\vec{u})와 무관한 브라운 가속도 $\langle \vec{A}(t) \rangle$ 의 곱으로 나타내며, $\vec{A}(t)$ 는 입자의 속도(\vec{u})의 변화에 비해 빠르게 변화한다. 무작위 가속도는 평균이 0이며 상관관계 (autocorrelation)는 impulse function이다.

$$\vec{F}_R = m \vec{A}(t) \quad (2)$$

$$\langle \vec{A}(t) \rangle = 0 \quad (3)$$

$$\langle \vec{A}(t) \vec{A}(t+\tau) \rangle = K \delta(t-\tau) \quad (4)$$

δ : delta function

작은 구형 입자에 영향을 미치는 유체의 항력은 다음과 같이 나타낸다.

$$\vec{F}_D = m\beta(\vec{u} - \vec{v}) \quad (5)$$

여기서 β 는 입자 단위질량 당 마찰계수 (friction coefficient)이며 \vec{u} 와 \vec{v} 는 각각 유체와 입자의 속도 벡터이다. β 는 Stokes법칙을 사용함으로써 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{3\pi\mu d_p}{c_s m} \quad (6)$$

여기서 d_p 는 입자의 직경이며, μ 는 유체의 점도, c_s 는 Cunningham 보정 인자이다. 식(1)은 식(5)와 식(6)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \beta(\vec{u} - \vec{v}) + \frac{\vec{F}_E}{m} + \vec{A}(t) \quad (7)$$

식(7)에서 초기조건은 $t=0$ 에서 $\vec{u} = \vec{u}_0$ 로 설정하고, 시간 간격 (time interval), $t = \Delta t$ 동안 외부력과 유체의 속도는 거의 일정하다고 가정하고 위의 식을 적분하면, 시간 t 에서의 입자속도에 관한 다음과 같은 근사식을 얻게 된다. 따라서 본 연구에서 시간 간격

t 는 이상과 같은 가정을 만족시키는 최적 조건을 수치실험을 통해 찾았고, 이를 사용하여 입자궤적을 구하였다.

$$\vec{v} = \vec{v}_0 e^{-\beta t} + \vec{u}(1 - e^{-\beta t}) + \frac{\vec{F}_E}{m \cdot \beta} (1 - e^{-\beta t}) + \vec{R}_v(t) \quad (8)$$

여기서

$$\vec{R}_v(t) = \int_0^t e^{\beta(\xi-t)} \vec{A}(\xi) d\xi \quad (9)$$

식(8)에서 \vec{v} 를 $\frac{d\vec{r}}{dt}$ 로 대체하면 $t=0$ 에서 ($\vec{r} = \vec{r}_0$)의 초기 조건을 가지고 다음과 같이 시간 t 에서의 입자의 위치에 관한 식을 구할 수 있다.

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \frac{\vec{v}_0}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) + \vec{u} \left[t - \frac{1}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \right] + \frac{\vec{F}_E}{m \cdot \beta} \left[t - \frac{1}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \right] + \vec{R}_r(t) \quad (10)$$

여기서

$$\vec{R}_r(t) = \int_0^t \left[\int_0^n e^{\beta\xi} \vec{A}(\xi) d\xi \right] e^{-\beta n} dn \quad (11)$$

$\vec{R}_v(t)$ 와 $\vec{R}_r(t)$ 은 bivariate Gaussian distribution에 의해 생성된 난수로서 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{vmatrix} \vec{R}_{vi} \\ \vec{R}_{ri} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{vi} & 0 \\ \sigma_{vri}/\sigma_{vi} (\sigma_{ri}^2 - \sigma_{vri}^2/\sigma_{vi}^2)^{1/2} & \left| \frac{n_i}{m_i} \right| \end{vmatrix} \quad (12)$$

$$\sigma_{vi}^2 = \frac{q}{\beta} (1 - e^{-2\beta t})$$

$$\sigma_{ri}^2 = \frac{q}{\beta^3} (2\beta t - 3 + 4e^{-\beta t} - e^{-2\beta t})$$

$$\sigma_{vri} = \frac{q}{\beta^2} (1 - e^{-\beta t})^2$$

$$q = \frac{\beta k t}{m}$$

여기서 k 는 Boltzmann 상수이며, n_i 와 m_i 는 normally distributed number이다. 여기서 N_i 와 M_i 를 0과 1사이의 uniform random deviate라 하면, n_i 와 m_i 는 다음과 같은 관계식으로부터 얻어진다.

$$N_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{n_i} e^{-\xi^2/2} d\xi \quad (13)$$

$$M_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{m_i} e^{-\zeta^2/2} d\zeta \quad (14)$$

여기에서 uniform random deviate는 표준 컴퓨터 소프트웨어를 이용하여 발생시킬 수 있다 (IMSL, 1985).

요약하면, 위의 식(8)과 식(9)와 같이 매시간간격에서 유체의 속도와 외부 힘이 일정하다는 가정 하에 입자의 위치와 속도를 결정할 수 있다. 따라서 이와 같은 방법을 다음 시간간격에 계속적으로 수행하여 입자의 궤적을 계산할 수 있으며, 또한 계산된 입자의 궤적을 추적하여 입자의 집진 여부를 결정할 수 있게 된다.

식(8)에서 입자에 작용하는 외부력, \vec{F}_E 는 정전기력만을 고려하였으며, 본 연구에서 중력은 $1\mu\text{m}$ 이하의 미세입자에 작용하는 정전기력에 비해 매우 작으므로 무시하였다. 또한 virtual mass force, Basset force, pressure force도 통상 에어로졸 연구에서는 무시할 만 하므로 본 연구에서도 생략하였다(Tien, 1989).

고려할 수 있는 정전기력은 쿨롱력(Coulomb force), 분극력(polarization force), 가상력(image force)의 세 가지 종류이며 각각의 경우 입자에 작용하는 힘은 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

$$\vec{F}_C = \frac{Q_p Q_f}{2\pi\epsilon} \frac{1}{r} \vec{e}_r \quad (15)$$

$$\vec{F}_P = -\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \frac{d_p^3 Q_f^2}{8\pi\epsilon} \frac{1}{r^3} \vec{e}_r \quad (16)$$

$$\vec{F}_I = -\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \frac{Q_p^2}{16\pi\epsilon} \frac{1}{(r - d_f/2)^2} \vec{e}_r \quad (17)$$

\vec{F}_C : Coulomb force

\vec{F}_P : polarization force

\vec{F}_I : image force

\vec{e}_r : unit vector in radial direction

Q_p : electrical charge of particle

Q_f : electrical charge density of fiber

ϵ : permittivity of free space

ϵ_p : relative dielectric constant of particle

ϵ_f : relative dielectric constant of fiber

d_f : fiber diameter

d_p : particle diameter

\vec{r} : radial position of the center of the particle

위 세 가지 정전기력은 각각 입자와 섬유와의 정전기적 상태에 따라 그 작용하는 힘이 달라지는데, 입자는 중성 입자이지만 섬유가 하전된 경우에는 정전기력으로서 분극력만이 작용하게 되며, 반대로 입자가 하전되고 섬유가 하전 되지 않을 시에는 가상력만이 작용하게 된다. 마지막으로 입자와 섬유가 모두 하전된 경우에는 위의 세 가지 종류의 정전기력들이 동시에 작용하게 되며, 입자에 작용하는 정전기력은 이들의 합력으로 표시된다(박현설 등, 1999; Brown, 1993). 본 연구에서는 이 중에서 분극력만 작용하는 경우에 대하여 전산모사를 수행하였으며, 이를 다른 연구자의 실험결과와 비교하여 전산모사법의 타당성을 검증하고자 하였다.

2.2 입자의 초기 위치 및 속도

입자의 궤적을 구하기 위해서는 입자의 초기 위치 및 초기 속도에 관한 정보가 필요하다. 입자의 초기 위치는 Kuwabara cell의 상류 측면에 particle generating line을 설정하고 무작위수(random number)를 발생시켜 임의의 한 지점에 설정하게 된다. 다시 말해, Kuwabara cell에 유입되는 유체 중에 에어로졸입자들은 균일한 농도를 가지고 각각의 입자의 위치는 무질서하게 정해진다는 가정에 의해, 입자의 초기 위치는 다음과 같은 식과 난수 프로그램(IMSL)에 의해 생성되는 난수(n_i)를 이용하여 정해진다. 여기에서 원칙적으로는 particle generating line 전체에 걸쳐 입자를 발생시켜야 하지만 계산시간을 줄이기 위해 입자는 Kuwabara cell의 +y에 해당되는 윗면에만 발생시켰다.

$$y = n_i \times b \quad (18)$$

$$x = -(b^2 - y^2)^{1/2} \quad (19)$$

여기에서 b는 Kuwabara cell의 반경이다.

또한, 엄밀히 말해 Kuwabara cell에 유입되는 입자의 초기 속도는 유체의 속도와 입자의 브라운 운동에 의한 무질서한 속도 성분의 벡터 합으로 생각할 수 있으나, 본 연구에서는 계산의 복잡성을 줄이기 위해 최초의 입자의 속도는 유체의 속도와 같다고 가정하였다. 한편 이전의 연구결과에 의하면 엄

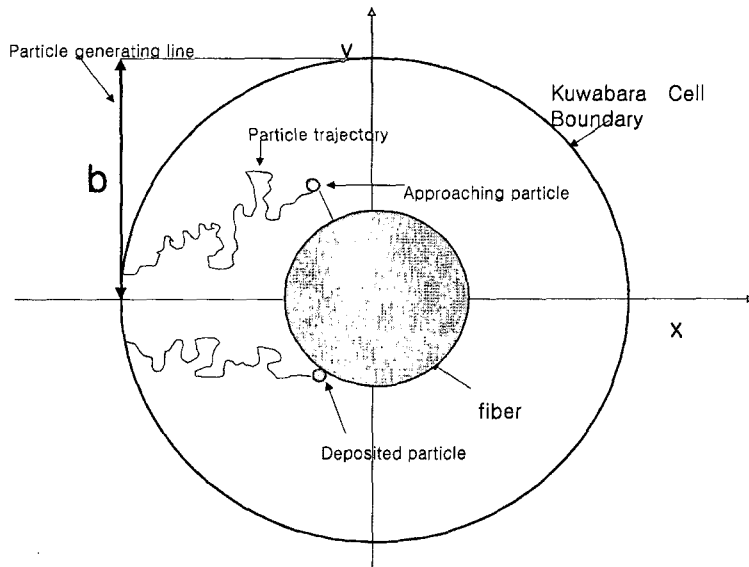


Fig. 1. Schematic diagram depicting simulation method.

밀한 조건을 사용한 경우와 본 연구와 같이 가정을 한 경우가 거의 같은 결과가 나오는 것으로 판명되었다(정안익, 1997).

$$\vec{v}_0 = \vec{u}_0 \quad (20)$$

2.3 전산모사 알고리즘

본 연구에서 집진효율 계산은 입자의 궤적을 추적하여 입자의 집진 여부를 판단하는 방법으로 행하여지며, 이를 위해서는 다음과 같은 가정과 논리가 필요하다.

a) 에어로졸 입자의 운동은 응집과정을 제외하고는 다른 입자의 운동에 의해 방해받지 않는 것으로 일반적으로 에어로졸 연구에서 인정된다(Friedlander, 1977). 따라서 본 모사에서도 이와 같은 논리로 한 입자의 궤적을 추적하여 포집 여부를 판단한 후에 다음 입자를 생성시켜 이와 같은 과정을 순차적으로 반복하는 알고리즘을 사용하였다.

b) 본 연구에서는 비교적 관성력의 영향이 작은 1 μm 미만의 미세 입자를 고려하기 때문에 입자가 섬유 표면과 충돌할 경우의 튕김 현상(bounce off)은 무시한다. 즉, 입자가 섬유 표면에 접촉하면 접촉 지점에 입자가 포집된다.

c) 입자가 섬유 주위를 지나가면 포집되지 않는 것으로 간주한다.

d) 고려된 입자의 수와 이 중에서 포집된 입자수를 비교하면 집진효율을 계산할 수 있는데, 고려된 입자수가 많을수록 집진효율 계산치의 정확도가 높아진다.

e) 다른 세트의 무작위수를 생성시켜 위의 계산을 반복하고, 이들의 값을 평균하여 이른바 “ensemble average”를 구하면 이것이 의미 있는 집진효율 값이 된다.

필터 연구에서 집진효율은 통상 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 본 연구에서 구한 집진효율은 소위 “unit collector efficiency”이고 다른 연구자들이 구한 집진효율은 “single fiber efficiency” 또는 “single collector efficiency”이다(Ramarao et al., 1994). 둘 사이의 차이점은 전자는 입자를 Kuwabara cell 전면에 생성시켜 집진효율을 구하는 것이고, 후자는 섬유의 투영면(projected area)에 해당되는 부분에 입자를 생성시켜 이 중에서 집진효율을 계산하는 것인데, 양자간의 관계식은 Ramarao et al.(1994)에 잘 정리되어 있다. 따라서 한 정의에 의해 구하면 쉽게 다른 정의에서 구한 값으로 전환시킬 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간간격 (Δt) 결정을 위한 수치 실험

브라운 운동을 하는 입자의 궤적을 구하기 위해 사용되는 식 (8)의 중요한 가정은 고려되는 시간 간격에서, 즉 그 시간 간격에서의 입자의 운동과정에서 유체의 속도와 외부력은 거의 일정해야 한다는 것이다. 이는 매우 작은 시간간격을 사용하면 이론적으로 거의 만족될 수 있으나, 이 경우에 계산시간이 비현실적으로 길어진다는 문제가 발생된다. 반면에 너무 큰 시간 간격을 사용하면 위의 가정이 깨어지게 되어 식 자체가 성립하지 않게 된다. 따라서 본 연구에서는 적절한 시간간격을 구하기 위해 Ramarao *et al.* (1994)가 행한 것과 같은 수치실험을 우선 수행하였다.

그림 2는 두 가지 크기의 입자들에 대해 같은 모사 조건에서 시간간격 (Δt)에 따른 single fiber efficiency의 변화를 살펴본 결과이다. 만약 유속을 1 m/s이고 fiber의 크기가 10 μm , 충전 밀도 (packing density)가 0.05일 경우 Kuwabara cell의 크기가 결정되며, 따라서 이를 유속으로 나누면 Kuwabara cell 내에서의 최대 time interval이 결정된다. 위 조건으로 나타낸 결과는 약 10^{-4} s의 값이 나오며, 따

라서 고려되는 time interval은 최대한 10^{-4} s 이하의 값으로서 위의 조건들을 만족하는 time interval으로 전산 모사를 수행하여야 한다.

그림 2는 시간 간격에 따른 집진효율 계산치의 변화를 도시한 그림인데, 시간간격이 줄어들며 따라 집진효율이 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서의 시간간격은 그림과 같이 집진 효율이 일정한 값을 보이는 영역의 시간 간격으로 계산시간을 줄이기 위해 비교적 큰 시간 간격 값인 5.0×10^{-8} s로 전산 모사를 수행하였다. 참고로 20°C 1기압에서 밀도가 1 g/cm³인 0.05 μm 입자와 0.1 μm 입자의 relaxation time은 각각 3.8×10^{-8} s, 8.85×10^{-8} s이다. 따라서 0.05 μm 입자의 경우의 relaxation time과 본 연구의 시간간격을 비교해 볼 때 relaxation time의 세 배 정도 되는 것으로 보아, 본 연구에서 사용한 시간간격은 입자의 궤적 계산 시에 입자 관성으로 인한 효과를 비교적 작은 입자의 경우에도 어느 정도 고려하고 있음을 알 수 있다.

3.2 집진효율의 예측

본 연구의 목적은 하전된 정전섬유의 1 μm 이하의 미세 입자에 대한 집진효율을 입자들의 궤적을 계산하고 추적하는 방법을 통해 예측하고자 하는

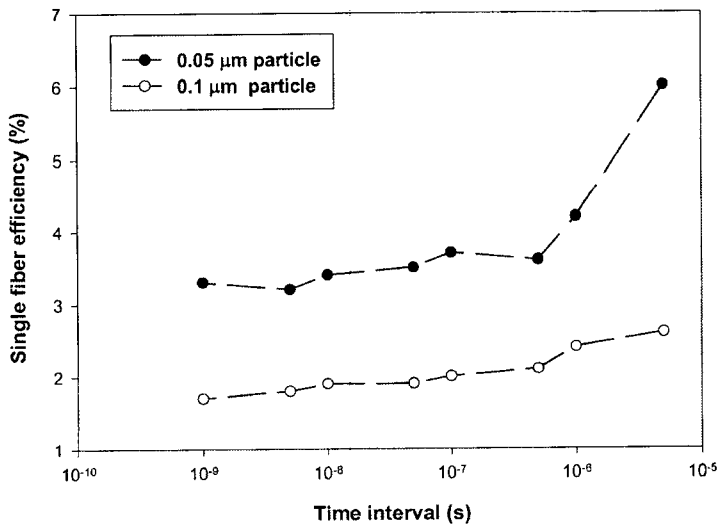


Fig. 2. The calculated single fiber efficiency vs. time interval (Δt).

것이다. 한편, 전산모사를 통해 계산된 집진효율 계산치는 한 경우의 random number set에 의한 예측 결과이기 때문에 통계적 의미를 가지기 위해서는 한 모사 조건에 대해 다른 set의 random number를 사용하여 수 회 전산모사를 수행하여 이를 평균한 값을 사용하여야 의미가 있다. 전산모사 수가 증가하면 이들 계산치들의 표준 편차는 당연히 통계 이론에 의해 줄어들게 되는데, 본 연구의 수치실험 결과 전산모사 수행횟수의 증가에 따른 평균값의 변화는 비교적 작았으며, 이를 근거로 전산모사 시간을 줄이기 위해 한 조건 당 10회 정도로 전산모사를 반복 수행하였다. 또한, 전산모사 조건은 다른 연구자의 실험결과와의 비교를 위해 실험조건과 동일하게 하였는데, 전산모사 조건으로 정전섬유의 전하 밀도는 1.44 nAs/m, 직경은 9 μm , 정전필터의 충전 밀도는 0.04, face velocity는 10 cm/s, 에어로졸 입자는 전하를 띄지 않는 NaCl 입자로 선정했다. 이 경우에 에어로졸 입자에 작용하는 정전기력은 중성 입자와 하전된 섬유로 인한 분극력만이 작용한다. 또한 에어로졸 입자 크기는 0.01~0.2 μm 정도의 비교적 브라운 운동이 활발한 입자이다(Baumgartner and Loeffler, 1987). 여기에서 NaCl 입자의 유전상수(dielectric constant) 값은 5.9를 사용하였다.

그림 3은 전산모사로 예측한 초기 집진 효율과

타 연구자의 실험 결과를(Baumgartner and Loeffler, 1987) 도시한 그림으로 집진 효율은 single fiber efficiency로 나타내었다. 또한 본 연구에서는 직접 비교 가능한 실험결과와는 별도로 타 연구자의 실험적 또는 이론적 연구를 통해 수립된 각각의 집진 메카니즘에 대한 집진효율 예측 경험 상관식들을(Brown, 1993)을 이용하여 계산된 결과를 전부 합산하는 방법으로 본 연구와 동일한 조건에서의 집진 효율값들을 예측하였는데, 각각의 집진 메카니즘에 의한 집진효율 기여치와 전체 집진효율 계산치가 표 1에 조건별로 제시되어 있다. 또한, 그림 3에 이 결과들을 함께 제시하여 본 연구의 전산모사치의 정확도를 검증하고자 하였다. 그 이유는 본 연구의 비교 대상이 된 실험치가 비교적 적은 횟수의 실험결과이기 때문에, 보다 많은 수의 실험치를 이용하여 만든 경험 상관식을 통해 본 연구의 전산모사 예측치의 정확도를 확인하면 더욱 의미가 큰 연구결과가 될 수 있다고 판단하였기 때문이다. 각각의 집진 메카니즘에 의한 집진효율 예측식은 부록에 수록하였다.

그림 3에 나타나듯이 예측치 및 실험치의 정성적인 경향은 입자 크기가 커짐에 따라 집진 효율이 감소하는 경향을 나타내다가 어느 정도 크기 이상의 입자에서는 집진 효율이 다시 증가되는 경향을

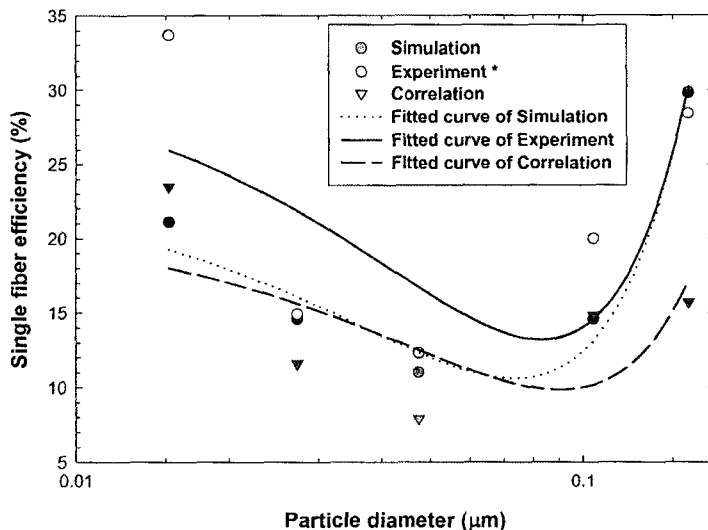


Fig. 3. Prediction by simulation vs. experiment and correlation.

Table 1. Comparison of the collection efficiency determined by simulation, experiment and correlation.

d_p (μm)	C_s	N_{pe}	η_i	η_I	η_D	η_E	Correlation (%)	Experiment* (%)	Simulation (%)
0.015	14.98	3.85×10^1	3.05×10^{-6}	5.20×10^{-10}	2.31×10^{-1}	2.70×10^{-3}	23.5	33.7	21.1
0.027	8.65	1.19×10^2	9.72×10^{-6}	3.30×10^{-9}	1.09×10^{-1}	8.65×10^{-3}	11.6	14.9	14.6
0.047	5.25	3.43×10^2	2.95×10^{-5}	2.10×10^{-8}	5.40×10^{-2}	2.60×10^{-2}	7.9	12.3	11.0
0.105	2.79	1.43×10^3	1.44×10^{-4}	3.50×10^{-7}	2.8×10^{-2}	1.29×10^{-1}	14.8	20.0	14.6
0.161	2.12	2.89×10^3	3.36×10^{-4}	1.80×10^{-6}	1.30×10^{-2}	1.45×10^{-1}	15.7	28.4	29.8

* : Baumgartner and Loeffler, 1987

나타내고 있다. 이는 본 연구에서 고려되는 정전기력인 분극력이 식 (17)에서 확인할 수 있는 바와 같이 입자 직경의 3승과 섬유 전하 밀도의 2승에 비례하므로 입자 직경이 작은 경우에는 분극력에 의한 영향보다 브라운 운동에 의한 영향이 상대적으로 큰 반면에, 입자 직경이 커지면 브라운 운동에 의한 영향이 줄어드는 대신 분극력이 크게 작용하여 집진 효율이 증가되기 때문이다. 따라서 이러한 효과에 의해 최소 집진 효율을 나타내는 입자 크기가 존재하는 것으로 풀이되는데, 이는 섬유층필터에서 전형적으로 나타나는 현상이며, 필터의 설계에 매우 중요한 인자가 된다.

전산모사 예측결과의 정확도를 살펴보면, 그림 3에 도시된 바와 같이 본 연구에서 고려한 입자크기 영역에서 전산모사 결과가 실험치와 상관관계식에 의한 집진효율 계산치를 잘 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 다만, 브라운 운동의 영향을 많이 받는 입자 크기의 영역일수록 전산 모사 결과와 실험 결과 사이에 다소 차이를 나타내는데, 다음과 같은 원인들이 있을 수 있는 것으로 사료된다. 그 첫 번째 이유는 실험 결과가 브라운 확산력의 영향이 매우 큰 미세입자인 경우(예컨대, 0.015 μm 입자의 경우) sampling probe내의 내부 벽에 확산에 의해 침착되어 집진효율 측정오차가 발생할 확률이 높아지는 등 실제보다 집진 효율이 높게 나타날 가능성이 존재하기 때문이다. 또한 두 번째 이유는 본 연구의 전산모사 모델의 한계에 관한 논리로 입자 직경이 매우 작으면 브라운 운동이 매우 활발하여, 전산 모사 실행시에 본 연구에서 사용한 그림 1의 Kuwabara cell 밖으로 입자가 유출되어 계산에서 제외되는 경우가 발생되는 확률이 높아지기 때문에 single fiber efficiency가 작게 예측되는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 cell boundary effect

를 최소화하기 위해 초기 3번째 time interval까지는 의도적으로 cell 바깥쪽으로 향하는 브라운 운동을 안쪽으로만 가도록 조절하였고, 그 이후에는 정상적인 Brownian dynamics simulation이 되도록 전산 모사법을 수정하였다. 이에 대한 논리적 배경은 브라운 운동에 의해 가상의 boundary인 Kuwabara cell 바깥으로 나간 입자도 실제로는 다시 cell 안으로 브라운 운동을 하여 유입될 수 있는데, 입자 궤적 계산 시에는 Kuwabara cell 바깥 영역은 수학적으로 정의가 되지 않은 영역이므로 의미 있는 계산을 할 수 없기 때문이다. 그러나, 이러한 조치를 취하더라도 매우 작은 입자인 0.015 μm 정도의 입자는 활발한 브라운 운동으로 cell 밖으로 빠져나가는 경향을 보여, 결과적으로 브라운 운동의 영향이 활발한 입자 크기 영역에서는 single fiber efficiency가 실제보다 작은 값으로 예측하는 경향을 보여주는 것으로 생각된다.

결론적으로 그림 3에 나타난 바와 같이 전산 모사에 의한 예측 결과는 실험 결과와 상관관계식에 의한 예측결과를 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다. 또한, 엄밀히 말하자면, 상관관계식에 의한 예측 결과보다 본 연구의 전산모사 결과가 본 연구의 비교 대상이 된 실험결과를 잘 예측하고 있다고 판단할 수 있지만 이 부분은 향후 더 많은 실험결과와의 비교를 통해 결론을 내려야 할 것으로 사료된다. 또한 이를 바탕으로 브라운운동이 활발한 입자들이 정전필터에 포집될 경우, 전산모사를 통한 입자의 포집형태 연구에 관한 초석을 마련하였다는 점도 본 연구의 중요한 연구결과로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 정전섬유의 미세입자 집진효율을

예측할 수 있는 전산모사법을 개발하였으며, 향후 본 연구의 전산모사법을 응용하여 정전필터 내의 입자포집형태 연구를 체계적으로 수행할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서 개발한 전산모사 기법 자체는 Langevin equation을 이용하여 관련된 모든 입자 집진 메커니즘을 동시에 고려할 수 있기 때문에, 많은 변수들을 고려해야만 하는 정전필터 설계의 도구로도 실험과 더불어 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학 재단(KOSEF No. 981-1112-068-1)의 지원으로 수행되어졌으며 이에 도움을 주신 모든 분들께 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

박현설, 정용원, 박영욱, 이규원 (1999) 외부 전기장내의 단일 섬유에 대한 먼지층 형상 수치 모사, 한국대기환경학회지, 15(1), 41-51.
 정안익 (1997) 섬유층 여과기의 미세입자 집진효율에 관한 이론적 연구, 인하대학교 환경공학과 석사학위논문.
 Baumgartner, H. and F. Loeffler (1987) Particle Collection in Electret Fibrous Filters : A Basic Theoretical and

Experimental Study, Filtration & Separation, 346-351.
 Brown, R.C. (1993) *Air Filtration - An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters*, Pergamon Press, New York, U.S.A.
 Friedlander, S.K. (1977) *Smoke, Dust and Haze*, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.
 IMSL Libraries (1985) IMSL, Inc., Houston, Texas.
 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.
 Liu, B.Y.H. and K.K. Rubow (1986) *Air Filtration by Fibrous Media*, ASTM.
 Ramarao, B.V., C. Tien, and S. Mohan (1994) Calculation of Single Fiber Efficiencies for Interception and Impaction with Superposed Brownian Motion, J. Aerosol Science, 2, 295-313.
 Tien, C. (1989) *Granular Filtration of Aerosols and Hydro-sols*, Butterworths.
 Walsh, D.C. and J.I.T. Stenhouse (1997) Clogging of an Electrically Active Fibrous Filter Material : Experimental Results and Two-Dimensional Simulation, Powder Technology, 63-75.
 Walsh, D.C. and J.I.T. Stenhouse (1998) Parameters Affecting the Loading Behavior and Degradation of Electrically Active Filter Materials, Aerosol Science and Technology, 29, 419-432.

※ APPENDIX

직접 차단 (interception)에 의한 이론적 집진 효율

$$N_R = \frac{d_p}{d_f}$$

$$\eta_i = \frac{1-c}{Ku} \frac{N_R^2}{1+N_R}$$

$$Ku = -\frac{\ln c}{2} - \frac{3}{4} + c - \frac{c^2}{4}$$

관성 충돌 (inertial impaction)에 의한 이론적 집진 효율

$$N_{st} = \frac{C_s \rho_p d_p^2 U_\infty}{18 \mu d_f}$$

$$\eta_I = \frac{(N_{st})((29.6 - 28c^{0.62})N_R - 27.5N_R^{2.8})}{2Ku^2}$$

브라운 확산 (Brownian diffusion)에 의한 이론적 집진 효율

$$N_{Pe} = \frac{d_f U_\infty}{D_{BM}}$$

$$\eta_D = 2.58 \left(\frac{1-c}{Ku} \right)^{1/3} N_{Pe}^{-2/3}$$

정전기력에 의한 이론적 집진 효율

분극력 (polarization force)에 의한 집진 효율

$$N_{Q0} = \frac{Q_f^2 d_p^2}{3\pi^2 \epsilon \mu d_f^3 U_0} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right)$$

$$\eta_p = \pi N_{Q0}$$