

정전효과가 있는 가열 회전원판으로의 입자침착 해석

유 경 훈[†]

한국생산기술연구원 에어로졸·필터연구실

Analysis on Particle Deposition onto a Heated Rotating Disk with Electrostatic Effect

Kyung-Hoon Yoo[†]

Aerosol and Filtration Technology Laboratory, Korea Institute of Industrial Technology 35-3, Hongcheon-Ri, Ibjang-Myun, Cheonan-Si 330-825, Korea

(Received June 27, 2001; revision received April 18, 2002)

ABSTRACT: Numerical analysis has been conducted to characterize deposition rates of aerosol particles onto a heated, rotating disk with electrostatic effect under the laminar flow field. The particle transport mechanisms considered were convection, Brownian diffusion, gravitational settling, thermophoresis and electrophoresis. The aerosol particles were assumed to have a Boltzmann charge distribution. The electric potential distribution needed to calculate local electric fields around the disk was calculated from the Laplace equation. The Coulomb, the image, the dielectrophoretic and the dipole-dipole forces acting on a charged particle near the conducting rotating disk were included in the analysis. The averaged particle deposition velocities and their radial distributions on the upper surface of the disk were calculated from the particle concentration equation in a Eulerian frame of reference, along with a rotation speed of 0~1,000 rpm, a temperature difference of 0~5 K and a charged disk voltage of 0~1,000 V. Finally, an approximate deposition velocity model for the rotating disk was suggested. The present numerical results showed relatively good agreement with the results of the present approximate model and the available experimental data.

Key words: Rotating disk(회전원판), Particle deposition velocity(입자침착속도), Thermophoresis(열열동), Electrophoresis(정전영동) Boltzmann charge distribution(볼츠만 전하분포), Approximate deposition velocity model(침착속도 근사모델)

기 호 설 명

B : 입자의 기계적 유동률 [s/kg]
 c : 입자농도 [particles/m³]
 D_B : 브라운 확산계수 [m²/s]

F_e : 정전기력 [N]
 g : 중력가속도(=9.8) [m²/s]
 Gr : 원판직경 기준 Grashof 수, $\frac{8g\beta\Delta TR^3}{\nu^2}$
 q_e : 기본전하(=1.6×10⁻¹⁹) [C]
 R : 원판의 반경 [m]
 Re : 자유유동 레이놀즈수, $\frac{2U_0R}{\nu}$
 Re_ω : 회전 레이놀즈수, $\frac{R^2\omega}{\nu}$

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-5898-354; fax: +82-41-5898-330

E-mail address: khyoo@kitech.re.kr

- Stk_w : 회전 스토크스(Stokes)수, $\tau_p \omega$
- T : 유체의 온도 [K]
- T_d : 원판의 온도 [K]
- T_0 : 자유유동온도 [K]
- u : 유체속도 [m/s]
- u^p : 입자속도 [m/s]
- V_{dep} : 입자침착속도 [m/s]

그리스 문자

- α : 유체의 열확산계수 [m^2/s]
- β : 유체의 열팽창계수 [K^{-1}]
- ΔT : $T_d - T_0$ [K]
- ϵ_0 : 자유공간유전율($=8.85 \times 10^{-12}$) [$C^2/N \cdot m^2$]
- χ : 볼츠만 상수($=1.38 \times 10^{-23}$) [J/K]
- μ : 유체의 분자점성계수 [$kg/m \cdot s$]
- ν : 동점성계수 [m^2/s]
- ρ : 유체의 밀도 [kg/m^3]
- τ_p : 입자이완시간 [s]
- Φ_d : 원판의 전위 [V]
- ω : 회전속도 [rad/s]

상첨자

- p : 입자

하첨자

- r : 반경방향
- z : 축방향
- θ : 접선방향

1. 서론

회전하는 수평원판으로의 입자침착문제와 관련된 회전공정들은 반도체 및 물질제조공정에서 많이 발견할 수 있다. 대표적으로 반도체 제조공정의 경우에는 포토레지스터(photo resist) 공정에서의 스핀코팅(spin coating), 습식식각(wet etching) 공정에서의 스핀건조(spin drying), 회전원판 화학증착(vertical rotating disk CVD) 공정⁽¹⁻⁴⁾

등을 들 수 있고, 물질제조공정의 경우에는 광섬유의 모재를 제조하기 위한 VAD(Vapor Axial Deposition) 공정⁽⁵⁾ 등을 들 수 있다. 일반적으로 스핀코팅과 스핀건조에서는 입자오염 제어대책의 수립, 그리고 CVD 공정에서는 입자오염 제어대책과 균일한 증착막 확보대책의 수립, VAD 공정에서는 균일한 입자부착막 확보대책의 수립에 필수적으로 해석이 요구된다. 한편, 컴퓨터 하드디스크 드라이브(HDD) 내의 회전 디스크상의 입자침착으로 인한 저장 데이터의 손상문제도 중요한 이슈로 거론되고 있어 역시 입자오염 제어대책의 수립이 요구된다.⁽⁶⁾

그동안의 회전원판 입자침착문제의 해석시에는 무한원판상의 회전유동 및 정체점유동 해석이 도입되었으나,^(1,5) 이는 원판의 유한성에 기인한 원판 가장자리에서의 유체의 급격한 유로변경에 의한 가속효과 등을 배제하고 있어 실제로 적용하는 데 무리가 있다. 한편, Wilson과 Blitshteyn et al.은 반도체 제조공정중에 웨이퍼의 전위가 100 V~5kV에 이르는 상당히 높은 수준으로 하전됨을 보고하였고⁽⁷⁻⁸⁾, Pui et al.⁽⁹⁾은 하드디스크 드라이브 내의 입자전하 수준이 볼츠만 RMS 전하의 2~15배임을 측정하였다.

회전원판상의 입자침착을 효과적으로 제어하기 위해서는 회전공정 및 제품의 정전기 대책이 마련되어야 한다. 최근, 회전원판의 온도가 주위공기의 온도보다 약간만 높아도 회전원판으로의 입자침착이 상당히 억제된다고 보고되었다.⁽¹⁰⁾ 따라서, 이러한 열영동력에 의한 입자침착 감소효과를 정전효과가 있는 회전원판 입자침착문제에 적용하는 것은 가치가 있다고 판단된다. 본 연구에서는 열영동력과 정전기력의 입자침착에 대한 복합적인 효과를 고찰하기 위하여 대류, 브라운 확산, 중력침강, 열영동력, 정전기력이 모두 고려된 회전 유한원판으로의 입자침착 특성에 대한 수치해석적 모사를 수행하였다. 참고로 본문 중의 모든 기계적, 전기적 변수 및 상수, 물성치들은 모두 SI 시스템의 MKS 단위계로 계산되고 표시되었다.

2. 수치해석방법

2.1 계산영역 및 지배방정식

본 연구에서 고려한 계산영역을 Fig. 1에 도시

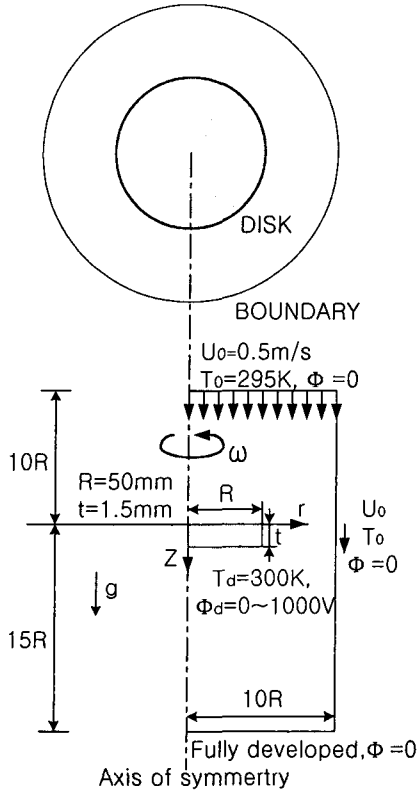


Fig. 1 Schematic diagram of the present calculation domain.

하였다. 회전속도 ω 로 회전하는 원판의 상부표면으로부터 원판반경 R 의 10배 만큼 떨어진 계산 영역의 상부유입구에서 온도 T_0 , 속도 U_0 로 유입되고 있는 자유공기유동에는 입자들이 부유되어 있고, 회전원판은 주위공기보다 높은 T_d 의 온도로 가열되어 있고 Φ_d 의 양전위로 하전되어 있다. 계산영역의 측면경계면은 그곳에서의 축방향 속도성분이 유입속도 U_0 와 같도록 회전원판반경의 10배 만큼 충분히 멀리 위치되어 있고 하부경계면은 완전확립조건이 달성되도록 원판반경의 15배 만큼 떨어져 있다.

원판의 회전속도 ω 는 0~1,000 rpm의 범위가 고려되었고, 이때 최대회전속도인 1,000 rpm에서 회전 레이놀즈수 Re 가 1.7×10^4 으로 Malik et al.⁽¹¹⁾이 제시한 난류로의 천이가 발생하는 임계회전 레이놀즈수인 $2 \sim 3 \times 10^5$ 보다 1 order가 작으므로 공기유동장은 층류로 가정되었다. 따라서, 본 계

산영역에서 정상상태 비압축성 축대칭 층류 유동장과 온도장, 정전장에 대해 다음의 지배방정식들을 각각 적용하였다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r u_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z u_r) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \\ - \frac{\mu u_r}{r^2} + \frac{\rho u_\theta^2}{r} - \frac{\partial p}{\partial r} \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z u_\theta) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \\ - \frac{\mu u_\theta}{r^2} - \frac{\rho u_r u_\theta}{r} \end{aligned} \quad (1c)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r u_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z u_z) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \quad (1d)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r T) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z T) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

여기서, u_r , u_θ , u_z 는 각각 r , θ , z 방향으로의 유체속도, p 는 압력, T 는 유체온도, ρ 는 유체의 밀도, μ 는 분자점성계수, α 는 유체의 열확산계수, Φ 는 전위이다.

한편, 본 연구의 회전유동에 대한 스톡스수를 $Stk_\omega = \tau_p \omega$ 로 정의할 수 있고, 가장 클 것으로 판단되는 $10 \mu\text{m}$ 입자의 1,000 rpm의 경우 0.032 ($\ll 1$)가 얻어져 본 연구의 고려 입자크기 영역 0.01~10 μm 에 걸쳐 공기유동장에 대한 입자의 관성력이 무시되었다. 따라서, 관성력을 무시한 희박입자상에 대한 오일러 관점에서의 축대칭 입자농도장의 지배방정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r^p c) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z^p c) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_B \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_B \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (4a)$$

$$u_r^p = u_r - K \frac{\nu}{T} \frac{\partial T}{\partial r} + B F_{e,r} \quad (4b)$$

$$u_z^p = u_z + \tau_p g - K \frac{\nu}{T} \frac{\partial T}{\partial z} + B F_{e,z} \quad (4c)$$

여기서, u_r^p , u_z^p 는 각각 r , z 방향으로의 입자속도, T 는 유체온도, c 는 입자농도, D_B 는 입자의 브라운 확산계수, ν 는 유체의 동점성계수, K 는 열영동계수, B 는 입자의 기계적 유동률, τ_p 는 입자이완시간, g 는 중력가속도, $F_{e,r}$ 과 $F_{e,z}$ 는 각각 입자에 작용하는 r 과 z 방향의 정전기력이다.

2.2 입자전하와 정전기력

입자전하는 일반적인 대기 중의 에어로졸 입자들의 최소수준으로 대표되는 다음의 볼츠만 평형 전하분포를 고려하였다.⁽¹²⁾

$$f(n_p) = \frac{\exp(-n_p^2/2\sigma_p^2)}{\sum_{m_p=-\infty}^{\infty} \exp(-m_p^2/2\sigma_p^2)} \quad (5a)$$

$$\sigma_p = \frac{\sqrt{2\pi\epsilon_0 d_p x T}}{q_e} \quad (5b)$$

여기서, $f(n_p)$ 는 입자크기 d_p 를 가지는 에어로졸 입자들 중에서 n_p 개의 기본전하를 가지는 입자의 부분율, ϵ_0 는 자유공간의 유전율, x 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도, q_e 는 기본전하이다. 본 연구에서는 원판이 양전압으로 인가되는 경우만을 고려하므로 인력이 작용하는 음의 입자전하만을 필요로 하게 되고, 따라서 입자전하 q_p 와 입자전하의 제곱은 다음과 같이 얻어졌다.

$$q_p = q_e \sum_{n_p=-\infty}^{-1} n_p f(n_p) \quad (6a)$$

$$q_p^2 = q_e^2 \sum_{n_p=-\infty}^{-1} n_p^2 f(n_p) \quad (6b)$$

입자에 작용하는 정전기력을 구하기 위하여 입자와 회전원판은 전기적 전도체로 가정하고 다음의 4가지 정전기력을 동시에 고려하였다.⁽¹¹⁾

$$F_{e,r} = q_p E_r - \frac{q_p^2}{16\pi\epsilon_0 y^2} + \frac{q_p E_r d_p^3}{16y^3} - \frac{3\pi\epsilon_0 d_p^6 E_r^2}{128y^4} \quad (7a)$$

$$F_{e,z} = q_p E_z + \frac{q_p^2}{16\pi\epsilon_0 y^2} + \frac{q_p E_z d_p^3}{16y^3} + \frac{3\pi\epsilon_0 d_p^6 E_z^2}{128y^4} \quad (7b)$$

여기서, $F_{e,r}$ 과 $F_{e,z}$ 는 각각 입자에 작용하는 r 과 z 방향의 정전기력, E_r 과 E_z 는 각각 r 과 z 방향의 국소전기장, y 는 인접한 회전원판 표면으로부터의 수직거리, ϵ_0 는 자유공간의 유전율이다. 식(7)의 우변항은 차례로 쿨롱력, 이미지력, 국소전기장에 의해 입자 내에 유도된 쌍극자(dipole)가 회전원판 표면상의 입자전하 이미지에 의해 형성된 전기장의 구배에 의해 받는 힘(dielectrophoretic force), 유도된 쌍극자가 회전원판 표면상의 자신의 이미지에 의해 받는 쌍극자력(dipole-dipole force)이다. 식(7)에서 명심할 점은 이미지력은 국소전기장이 없는 경우에도 항상 존재하며 쌍극자력과 함께 항상 입자와 회전원판 간에 인력으로 작용하고 쿨롱력과 dielectrophoretic force는 입자전하의 극성과 국소전기장의 방향에 따라 인력 또는 척력으로 작용한다는 것이다.

본 연구에서는 음의 입자전하와 양전위의 원판을 다루므로 4가지 정전기력 모두 원판표면과 인력으로 작용하게 된다. 식(7a)는 Fig. 1에서 원판의 측면영역인 $r > R$, $0 < z < t$ 에 적용되고 식(7b)는 원판의 상부영역인 $z < 0$, $r < R$ 에 적용되고 하부영역은 식(7b)의 우변의 두번째항과 네번째항의 부호를 '-'로 변경하여 적용되고 그 이외의 계산영역에서는 쿨롱력만 적용된다.

2.3 계산조건 및 방법

해석에 고려된 유체 및 입자는 각각 공기와 밀도 $1,030 \text{ kg/m}^3$ 인 구형의 PSL(PolyStyrene Latex)

입자이다. 회전원판의 반경 R 은 50 mm, 두께 t 는 1.5 mm이다. 자유유동속도 U_0 는 0.5 m/s, 자유유동온도 T_0 는 295 K, 원판의 회전속도 ω 는 0~1,000 rpm, 원판의 전위 Φ_d 는 0~1,000 V가 고려되었다. 회전원판온도 T_d 는 300 K로 선택되었고 이에 따른 온도차 $\Delta T = T_d - T_0 = 5$ K에 대한 가열 회전원판 주위의 자연대류효과는 배경유동인 자유유동에 대해 $Gr/Re^2 = 0.065$ 로 얻어져 무시되었다. 회전원판 표면에서의 입자농도는 차단효과(interception)를 고려하여 입자의 반경위치에서 $c=0$ 을 지정하였다. 이외의 경계조건들은 Fig. 1에 수록하였다.

지배방정식(1)~(4)의 차분방정식을 유도하는 데 있어 유체의 압력구배항은 Patankar⁽¹⁴⁾의 SIMPLE 알고리즘으로 해결하고 대류항들은 Power law scheme을 사용하여 처리하였다. 한편, 입자농도장을 계산하는 데 있어 입자의 속도장이 중력 및 열영동력, 정전기력 등의 외력에 의해 발생하는 입자의 속도성분 때문에 유체와는 달리 $\partial u_i^p / \partial x_i \neq 0$ (여기서, u^p 는 입자속도)이므로 연속(continuity) 법칙이 만족되지 않기 때문에 Patankar 알고리즘을 사용하기 위해서는 Stratmann and Whitby⁽¹⁵⁾가 지적한대로 입자농도장을 계산할 때 외력에 의한 입자속도에 의한 대류항을 생성항으로 처리하도록 보정하였다. 계산격자계는 180(axial)×110(radial)으로 구성된 엇물림격자계(staggered grid system)이며, 이때 회전원판표면과 바로 이웃격자와의 간격을 5 μm 으로 설정하였고 이로부터 약 1.2의 공비를 유지시키면서 등비수열적으로 증가되도록 격자들을 배치하였다.

수렴조건은 유동장의 경우 질량 및 속도의 정규화된 잔류소스들의 합이 1×10^{-4} 이하일 때, 온도장과 농도장, 정전장의 경우 각 격자점에서의 이전값 및 신규값의 차이를 이전값으로 나눈 값들이 모두 1×10^{-4} 이하일 때로 하였다. 회박 입자상에 기인한 일방향성(one way coupling)에 근거하여 유체의 유동장 및 온도장, 정전장의 수렴된 결과를 입자농도장에 대입하여 각각의 입자크기에 대한 입자침착속도를 구하였다.

이외의 관련사항들은 비회전원판의 경우인 Yoo et al.⁽¹²⁾의 수치해석방법과 동일하므로 관련내용들을 도입하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 평균 입자침착속도

Fig. 2는 비가열($\Delta T=0$ K)과 가열($\Delta T=5$ K) 회전원판에 대해 여러 가지 원판 전위에 따른 회전원판 상부표면상의 입자크기별 평균 입자침착속도의 변화를 보여주고 있다. 열영동력이 고려되지 않는 비가열 회전원판의 경우인 선으로만 표현된 침착속도곡선들을 살펴보면, 원판의 전위 $\Phi_d=0$ V일 때 약 0.3 μm 이하의 입자크기영역에서 회전속도 $\omega=1,000$ rpm으로 증가하면 비회전의 경우에 비해 침착속도가 크게 증가하나, 약 0.7 μm 이상의 입자크기영역에서는 침착속도의 변화없이 한 곡선에 합쳐지고 있음을 알 수 있다. 이는 저자가 이전 연구⁽¹⁰⁾에서 언급한 것처럼 0.3 μm 이하의 미세입자크기영역에서 원판의 회전이 원판 상부표면상의 유체의 경계층을 표면에 더욱 밀착시켜 입자농도 경계층의 기울기가 커져 농도구배에 비례하는 브라운 확산이 증가했기 때문이고, 0.7 μm 이상의 입자크기영역에서는 이러한 경계층의 영향을 받지 않는 중력침강이 지배적인 침착 메카니즘이기 때문이다. 이로부터 원판의 전위가 1 kV까지 증가함에 따라 침착속도가 더욱더 증가되어 $\Phi_d=1$ kV가 되면 동일 회전속도 $\omega=$

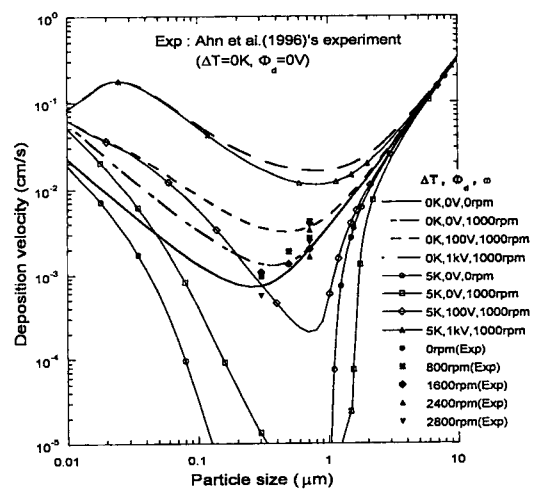


Fig. 2 Variations of the averaged upper deposition velocities with respect to particle size.

1,000 rpm의 무정전의 경우에 비해 서브마이크론 입자크기영역에서 약 10배의 침착속도의 증가가 발생하면서 정전력이 입자침착을 지배하게 됨을 알 수 있다. 이때 입자크기에 대한 침착속도곡선이 약 $0.025 \mu\text{m}$ 에서 최대침착속도를 이루어 이보다 입자크기가 작아지면 침착속도가 감소되는 역전현상이 발생되었음을 알 수 있다. 이는 Yoo et al.⁽¹²⁾이 비회전원판의 경우에서 관찰한 것과 동일한 현상으로서 불쓰만 평형전하분포에 의한 입자전하량이 이러한 미세입자크기영역에서 입자크기가 작아짐에 따라 감소하여 입자전하량과 기계적 유동력의 곱으로 산출되는 전기적 유동물을 감소시키기 때문이며, Fuchs의 평균 전하분포의 경우에는 이러한 역전현상이 관찰되지는 않는다.⁽¹²⁾ 또한, 비가열 원판에서 회전속도와 원판 전위가 증가함에 따라 침착속도곡선의 최소점의 입자크기가 점점 증가함을 알 수 있다.

열영동력이 고려되는 가열($\Delta T=5 \text{ K}$) 회전원판의 경우인 선과 심볼로 표현된 침착속도곡선들을 살펴보면, 원판의 전위 $\Phi_d=0 \text{ V}$ 일 때 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 보다 작은 침착속도를 가진 입자크기영역으로 정의되는 무침착 입자크기영역(deposition free zone)이 원판의 전위 $\Phi_d=100 \text{ V}$ 가 될 때 완전히 사라졌으며, $\Phi_d=1 \text{ kV}$ 가 되면 거의 비가열의 경우와 비슷함을 알 수 있다. 따라서, $\Delta T=5 \text{ K}$ 정도의 가열은 1 kV의 원판 전위에 의한 입자침착속도의 증가에는 거의 효과를 발휘할 수 없음을 알 수 있다.

이러한 결과는 입자오염제어대책이 요구되는 스피닝, 스피닝조, CVD 공정 등에서 공정 중에 제품의 정전기대책이 요구됨을 시사한다. VAD 공정에서 광섬유 모재의 제조에 사용되는 실리카 입자의 크기가 약 $0.2 \mu\text{m}$ 이므로, Fig. 2의 비가열원판의 경우($\Delta T=0 \text{ K}$)에 대한 침착속도곡선들로부터 $0.2 \mu\text{m}$ 에 대한 입자침착속도는 차례로 $7.649 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ($\Phi_d=0 \text{ V}$, $\omega=0 \text{ rpm}$), $1.726 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ (0 V , $1,000 \text{ rpm}$), $4.645 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ (100 V , $1,000 \text{ rpm}$), $2.876 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ (1 kV , $1,000 \text{ rpm}$)가 얻어져 비회전 무정전의 원판에 1,000 rpm의 회전과 1 kV의 하전을 가함으로써 약 38배의 입자부착률의 증가를 달성할 수 있다. 이러한 사실로부터 본 연구의 불쓰만 평형전하량보다 일반적으로 상당히 높은 코로나 하전에 의한 입자전하량이라면

엄청난 입자부착률의 증가가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 2에는 계산결과와의 비교를 위하여 본 연구와 동일한 조건에서 수행한 비가열($\Delta T=0 \text{ K}$) 무정전($\Phi_d=0 \text{ V}$) 회전원판에 대한 Ahn et al.⁽¹⁶⁾의 실험결과가 함께 도시되어 있다. 그들의 실험에는 원판의 회전속도 0~2,800 rpm 범위에 대해 입자크기 0.305, 0.497, $0.72 \mu\text{m}$ 의 PSL 입자들이 사용되었다. 실험결과들은 원판의 회전속도와는 일정한 상관성이 없이 비가열 무정전 회전원판의 경우인 $\Delta T=0 \text{ K}$, $\Phi_d=0 \text{ V}$, $\omega=0 \text{ rpm}$ 와 1,000 rpm의 계산결과들의 주위에 분포하고 있으며 전체적으로는 입자크기가 감소함에 따라 침착속도가 감소하면서 계산결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2 국소 입자침착속도

Fig. 3은 열영동력이 고려되지 않은 비가열($\Delta T=0 \text{ K}$) 무정전($\Phi_d=0 \text{ V}$) 및 정전($\Phi_d=1 \text{ kV}$) 회전($\omega=1,000 \text{ rpm}$) 원판과 가열정전 회전원판에 대해 입자크기별 원판 상부표면상의 국소침착속도 분포의 변화를 보여주고 있다. 먼저, 선들로 표시

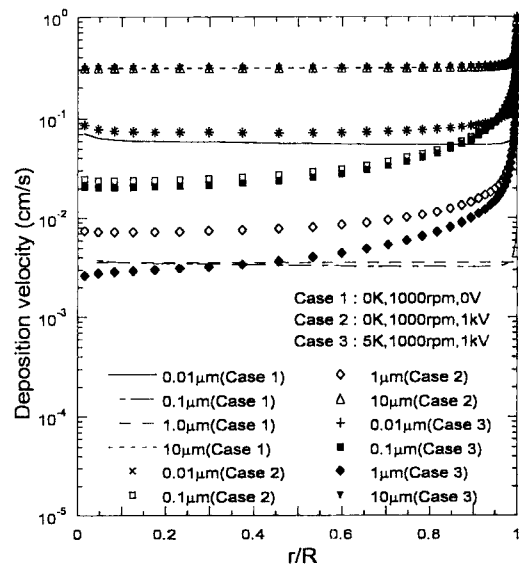


Fig. 3 Variations of the local upper deposition velocity profiles with respect to particle size.

된 비가열 무정전 회전원판인 Case 1의 경우 원판상부 표면상의 국소침착속도들이 위치에 상관없이 모든 입자크기에 대해 원판표면상에서 거의 균일하고 0.1 μm와 1 μm에서는 침착속도분포가 거의 동일함을 알 수 있다. 여기에 원판 전위 1kV가 인가되는 Case 2의 경우 0.01 μm에서는 침착속도가 약간 증가하면서 국소침착속도의 균일성은 유지되고 있으나 0.1 μm에서는 무정전에 비해 1 order 만큼의 증가가 발생하나 가장자리(edge) 영역에서 중심부로 갈수록 감소되는 경향을 나타내는 침착속도분포를 가짐을 알 수 있다. 1 μm에서는 0.1 μm의 경우에 비해 로그척도상에서 무정전의 Case 1과의 차이가 감소하나 국소적인 분포형태는 유사함을 알 수 있고, 10 μm에서는 중력침강이 지배적이므로 아무런 변화가 없음을 알 수 있다.

열영동력이 고려되는 가열(ΔT=5 K) 정전회전 원판인 Case 3의 경우를 살펴보면 0.01 μm와 10 μm에서는 비가열의 경우인 Case 2에 비해 아무런 변화가 없으나 0.1 μm에서 약간 감소하고 1 μm에서는 크게 감소함을 알 수 있다. 또한, 그 감소폭은 원판상의 중심부에서 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.3 입자침착속도 근사모델

본 수치해석모델을 사용하여 입자침착속도에 대한 엄밀한 해석결과를 얻기 위해서는 회전원판 주위의 복잡한 유동장, 온도장, 정전장, 입자농도장의 해를 구해야 하므로 계산이 복잡하고 많은 시간과 비용이 요구된다. 따라서, 정전가열 회전원판으로의 입자침착속도를 간단히 예측할 수 있는 근사모델이 필요하다. Yoo et al.⁽¹²⁾은 비회전 원판에 대해 입자농도 경계층에 대한 1차원 확산방정식으로부터 유도된 입자침착속도 근사모델을 제안하였고, 이와 동일한 방식을 도입하여 본 연구의 회전원판에 대한 입자침착속도 근사모델을 다음과 같이 적용하였다.

$$V_{dep} = \frac{V_{se} + V_{th} + V_{es}}{1 - \exp\left(-\frac{(V_{se} + V_{th} + V_{es})}{V_{df}}\right)} \quad (8a)$$

$$V_{df} = \frac{D_B}{2R} \overline{Sh} \quad (8b)$$

$$V_{se} = \tau_p g \quad (8c)$$

$$V_{th} = \frac{K\nu}{R} \left(\frac{T_0}{T_d} - 1\right) \overline{Nu}_R \quad (8d)$$

$$V_{es} = Bq_p E_{ef} \quad (8e)$$

여기서, V_{df} 는 확산속도, V_{se} 는 중력침강속도, V_{th} 는 열영동속도, V_{es} 는 정전속도, D_B 는 브라운 확산계수, R 은 원판의 반경, τ_p 는 입자이완시간, g 는 중력가속도, K 는 열영동계수, ν 는 유체의 동점성계수, T_0 는 자유유동온도, T_d 는 원판온도, B 는 입자의 기계적 유동률, q_p 는 입자전하량, E_{ef} 는 원판 상부면상의 평균전기장강도(= $\frac{5.67\Phi_d}{2R}$),⁽¹²⁾

\overline{Sh} 는 원판상부면상의 지름기준 평균 Sherwood 수, \overline{Nu}_R 는 반경기준 평균 Nusselt 수이다.

식(8)에 요구되는 본 연구의 자유유동 및 회전 유동의 혼합유동에 대한 Sherwood 수 및 Nusselt 수는 순수 자유유동⁽¹⁷⁾과 순수 회전유동⁽¹⁸⁾에 대한 나프탈렌승화법으로 구한 Sherwood 수와 이로부터 열 및 물질전달 유사성을 이용하여 각각 다음과 같이 적용하였다.

$$\overline{Sh} = 1.08Re_\omega^{1/2} Sc^{1/3} + 0.9172Re_\omega^{1/2} Sc^{1/3} \quad (9a)$$

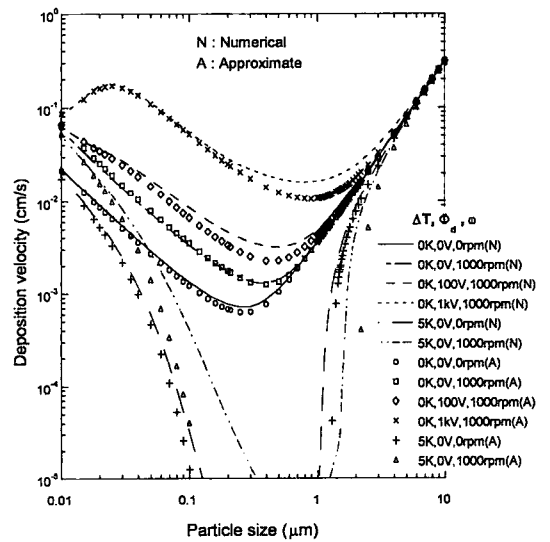


Fig. 4 Comparison of the approximate results with the numerical results.

$$\overline{\text{Nu}}_R = 0.484 \text{Re}^{1/2} + 0.4110 \text{Re}_\omega^{1/2} \quad (9b)$$

여기서, $\text{Re} = \frac{2U_0 R}{\nu}$, $\text{Re}_\omega = \frac{R^2 \omega}{\nu}$, $\text{Sc} = \frac{\nu}{D_B}$ 이다.

Fig. 4는 근사모델 식(8)의 계산결과와 수치해석결과와의 비교를 보여주고 있다. 전체적으로 입자크기에 따른 침착속도의 크기와 변화거동이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, $\Delta T=5 \text{ K}$, $\Phi_d=0 \text{ V}$, $\omega=1,000 \text{ rpm}$ 의 경우 근사모델 계산결과와 수치해석결과들의 차이가 열영동력이 지배적인 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 입자크기영역에서 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구의 근사모델이 확산성분의 보상없이 각각 독립적으로 유도된 침착속도 성분들을 적용한 점과 열영동력이 지배적인 입자크기영역에서 식(9b)와 같이 단순함에 의한 열영동속도 산출로 인하여 과다하게 고려된 점에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구의 자유유동과 회전유동의 혼합유동에 대한 정확한 나프탈렌상관식이 요구된다. 한편, 원판에 전압이 인가되는 경우인 $\Delta T=0 \text{ K}$, $\Phi_d=100 \text{ V}$ 와 1 kV , $\omega=1,000 \text{ rpm}$ 인 경우에 근사모델의 계산결과들이 수치해석결과들보다 특히 침착속도의 최소점의 입자크기 근처에서 다소 낮게 얻어지고 있음을 알 수 있다. 이는 본 근사모델의 경우 식(7)의 우변의 두번째항인 이미지력의 기여도가 고려되지 않은 것에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

볼츠만 평형전하분포를 가진 에어로졸 입자에 대해 열영동력이 고려된 정전 회전원판으로의 입자침착문제를 수치해석을 통하여 고찰하고 계산된 결과들로부터 다음과 같은 사항들이 관찰되었다.

(1) 본 연구의 수치해석결과는 기존의 실험결과와 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

(2) 회전원판의 전위가 1 kV 가 되면 서브마이크론 입자크기영역에서 정전력이 입자침착을 완전히 지배하게 되고 약 $0.025 \mu\text{m}$ 에서 입자침착의 최대 피크치를 보인다.

(3) $1,000 \text{ rpm}$ 의 원판 회전효과에 의한 원판상부 표면상의 국소침착속도의 균일성은 1 kV 의 원판 정전효과에 의해 $0.1 \mu\text{m}$ 와 $1 \mu\text{m}$ 의 입자크기

에서 원판의 가장자리에서 중심부로 갈수록 입자침착속도가 감소하는 경향으로 바뀌게 된다.

(4) 주위보다 5 K 정도의 회전원판 가열에 의한 열영동효과는 1 kV 의 원판하전에 의한 정전효과를 압도할 수는 없다.

(5) 본 연구에서 제안한 침착속도 근사모델은 수치해석결과와 비교적 잘 일치하나 보완을 위하여 열영동속도에 대한 정확한 상관식과 이미지력에 대한 정전속도성분이 추가로 요구된다.

참고문헌

- Breiland, W.G. and Evans, G.H., 1991, Design and verification of nearly ideal flow and heat transfer in a rotating disk chemical vapor deposition Reactor, J. Electrochem. Soc., Vol. 138, pp. 1806-1816.
- Davis, R.W., Moore, E.F. and Zachariah, M.R., 1993, Numerical modeling of particle dynamics in a rotating disk chemical vapor deposition reactor, J. of Crystal Growth, Vol. 132, pp. 513-522.
- Hirano, H. and Ozoe, H., 1995, Numerical computation of the particle deposition onto the rotating and heated circular plate, ASME/JSME Thermal Engineering Conference, Vol. 2, pp. 157-164.
- Kleijin, C.R., 2000, Computational modeling of transport phenomena and detailed chemistry in chemical vapor deposition—a benchmark solution, Thin Solid Films, Vol. 365, pp. 294-306.
- Song, C.G. and Hwang, J.H., 1998, Particle deposition on a rotating disk in application to vapor deposition process (VAD), Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B, Vol. 22, No. 1, pp. 61-69.
- Park, H.S., Hwang, J.H. and Choa, S.H., 2000, Numerical investigation of contamination particle's trajectory in a head/slider disk interface, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B, Vol. 24, No. 3, pp. 477-484.
- Fissan, H.J. and Turner, J.R., 1988, Elec-

- trostatic effects in particle deposition onto product surfaces, Proc. of the 34th IES Annual Technical Meeting, Institute of Environmental Sciences, King of Prussia, Pennsylvania, pp. 400-404.
8. Sakata, S., Inoue, M., Chirifu, S., Yoshida, T. and Okada, T., 1988, Aerosol deposition on wafer surface, Proc. of the 9th International Symposium on Contamination Control, pp. 65-72.
 9. Pui, D. Y. H., Tsai, C.-J. and Liu, B. Y. H., 1988, Charge level on aerosol particles: measurement of particle charge and size distribution in disk drive, Proc. of the 34th IES Annual Technical Meeting, Institute of Environmental Sciences, King of Prussia, Pennsylvania, pp. 395-399.
 10. Yoo, K. H., 2002, Analysis on particle deposition on a heated rotating disk, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B, Vol. 26, No. 2, pp. 245-252.
 11. Malik, M. R., Wilkinson, S. P. and Orszag, S. A., 1981, Instability and transition in rotating disk flow, AIAA J., Vol. 19, No. 9, pp. 1131-1138.
 12. Yoo, K. H., Oh, M. D. and Myong, H. K., 1997, Analysis on particle deposition onto a heated, horizontal freestanding wafer with electrostatic effect, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B, Vol. 21, No. 10, pp. 1284-1293.
 13. Cooper, D. W., Peters, M. H. and Miller, R. J., 1989, Predicted deposition of submicrometer particles due to diffusion and electrostatics in viscous axisymmetric stagnation-point flow, Aerosol Science and Technology, Vol. 11, pp. 133-143.
 14. Patankar, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw Hill, New York.
 15. Stratmann, F. and Whitby, E. R., 1989, Numerical solution of aerosol dynamics for simultaneous convection, diffusion and external forces, J. Aerosol Science, Vol. 20, pp. 437-440.
 16. Ahn, K.-H., Bae, G. N. and Lee, C. S., 1996, Particle deposition velocities on a rotating wafer, Proc. of the 13th International Symposium on Contamination Control, pp. 465-469.
 17. Sparrow, E. M. and Geiger, G. T., 1985, Local and average heat transfer characteristics for a disk situated perpendicular to a uniform flow, J. Heat Transfer, Vol. 107, pp. 321-326.
 18. Owen, J. M. and Rogers, R. H., 1989, Flow and heat transfer in rotating-disc systems rotor-stator systems, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 93-124.