

가열되는 회전원판으로의 입자침착 해석

유 경 훈*

(2001년 6월 28일 접수, 2001년 11월 18일 심사완료)

Analysis on Particle Deposition on a Heated Rotating Disk

Kyung-Hoon Yoo

Key Words : Rotating Disk(회전원판), Particle Deposition Velocity(입자침착속도), Thermophoresis(열영동력), Approximate Deposition Velocity Model(침착속도 근사모델)

Abstract

Numerical analysis was conducted to characterize particle deposition on a horizontal rotating disk with thermophoretic effect under laminar flow field. The particle transport mechanisms considered were convection, Brownian diffusion, gravitational settling and thermophoresis. The averaged particle deposition velocities and their radial distributions for the upper surface of the disk were calculated from the particle concentration equation in a Eulerian frame of reference for rotating speeds of 0~1000rpm and temperature differences of 0~5K. It was observed from the numerical results that the rotation effect of disk increased the averaged deposition velocities, and enhanced the uniformity of local deposition velocities on the upper surface compared with those of the disk at rest. It was also shown that the heating of the disk with $\Delta T=5K$ decreased deposition velocity over a fairly broad range of particle sizes. Finally, an approximate deposition velocity model for the rotating disk was suggested. The comparison of the present numerical results with the results of the approximate model and the available experimental results showed relatively good agreement between them.

기호설명

B : 입자의 기계적 유동률 [s/kg]
 c : 입자농도 [particles/cm³]
 D_B : 브라운 확산계수 [m²/s]
 g : 중력가속도(=9.8) [m/s²]
 K : 열영동계수
 p : 압력 [Pa]
 R : 원판의 반경 [m]
 Re : 자유유동 Reynolds 수, $2U_0R/\nu$
 Re_ω : 회전 Reynolds 수, $R^2\omega/\nu$
 Stk_ω : 회전 Stokes 수, $\tau_p\omega$
 r : 반경방향 좌표 [m]
 T : 유체온도 [K]
 T_d : 원판 온도 [K]
 T_0 : 자유유동 온도 [K]

u : 속도 [m/s]
 u^p : 입자속도 [m/s]
 V_{dep} : 입자침착속도 [m/s]
 z : 축방향 좌표 [m]

그리스문자

α : 유체의 열확산계수 [m²/s]
 μ : 유체의 분자점성계수 [kg/m-s]
 ν : 유체의 동점성계수 [m²/s]
 θ : 접선방향 좌표 [rad]
 ρ : 유체의 밀도 [kg/m³]
 τ_p : 입자이완시간 [s]
 ω : 원판의 회전속도 [rad/s]

1. 서 론

회전하는 수평원판으로의 입자침착문제와 관련된 공정들은 반도체 및 물질 제조공정 중에서 많이 발견할 수 있다. 대표적으로, 반도체 제조공정

* 회원, 한국생산기술연구원 에어로졸·필터연구실
 E-mail : khyoo@mail.kitech.re.kr
 TEL : (041)5608-354 FAX : (041)5608-330

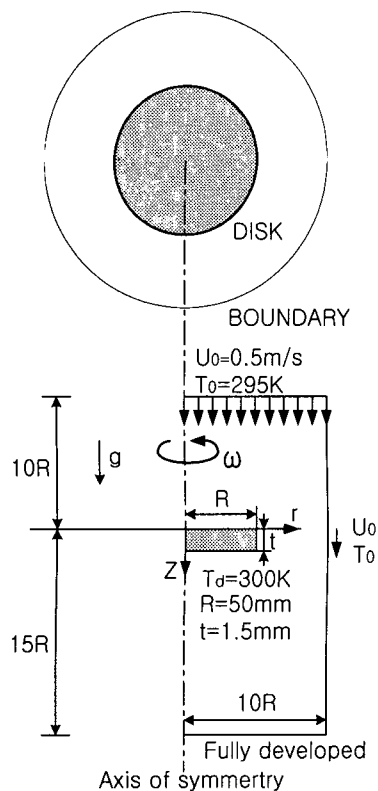


Fig. 1 Schematic diagram of the present calculation domain

의 경우에는 포토레지스터공정(photo resist)에서의 스핀코팅(spin coating), 습식식각공정(wet etching)에서의 스핀건조(spin drying), 회전원판 화학증착공정(vertical rotating disk CVD)⁽¹⁻⁴⁾ 등을 들 수 있다. 스핀코팅의 경우 PR 도포막의 두께를 $0.5\mu\text{m}$ ~ $수\mu\text{m}$ 으로 만들기 위해 직경 100mm, 200mm의 반도체 웨이퍼를 500~9000rpm 정도로 회전시키게 되며 공정결함(process defect)이 가장 심각한 공정으로 알려져 있다. 물질제조공정의 경우에는 광섬유의 모재(preform)를 제조하기 위한 VAD 공정(Vapor Axial Deposition)⁽⁵⁾ 등을 들 수 있다. 이 공정의 경우 토치(torch)로부터 생성된 $0.2\mu\text{m}$ 정도의 실리카 입자를 직경 100mm 정도의 모재 원판면에 부착시키게 되며 모재에 회전을 부가함으로써 부착막의 균일성 및 부착율의 증대를 도모할 수 있다. 한편, 컴퓨터 하드디스크 드라이브(HDD)의 경우 1000rpm 정도(order)로 회전하는 직경 3.5in의 회전 디스크상의 입자침착문제⁽⁶⁾도 중요한 이슈로 등장되고 있다.

일반적으로 스핀코팅과 스핀건조, 컴퓨터 하드디스크에서는 입자오염 제어대책의 수립을 위해, CVD 공정에서는 입자오염 제어대책과 균일한 증착막의 확보대책의 수립을 위해, VAD 공정에서는

균일한 입자부착막의 확보대책의 수립을 위해 필수적으로 해석이 요구된다.

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 적용하는데 있어 무리가 있다. 한편, 유한크기의 원판을 고려하려는 시도가 일부 수행되었으나^(2,3), 아직까지 원판의 회전이 유한원판 표면상의 입자크기별 평균 또는 국소 입자침착속도분포와 같은 입자침착 특성에 미치는 효과를 자세히 기술한 이론적 연구를 거의 찾아볼 수 없다. 또한, 입자오염 제어대책의 관점에서 열영동력에 의한 입자침착 감소효과를 회전원판 입자침착문제에 적용하는 것은 가치가 있다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 열영동력이 고려된 회전 유한원판으로의 입자침착특성에 대한 수치해석적 모사를 수행하였다. 참고로 본문중의 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 도시하였다. 회전속도 ω 로 회전하는 원판의 상부표면으로부터 원판반경 R 의 10배만큼 떨어진 계산영역의 상부 유입구에서 온도 T_0 , 속도 U_0 로 자유공기유동이 유입되고 있다. 자유공기유동은 입자들이 부유되어 있고 회전원판은 주위공기보다 높은 T_a 의 온도로 가열되어 있다. 계산영역의 측면경계면은 그곳에서의 유체 속도성분이 자유유동의 조건, 즉 $u_z = U_0$, $u_r = u_\theta = 0$ 을 회복할 수 있도록 회전원판 반경의 10배만큼 충분히 멀리 위치되어 있고 하부경계면은 완전확립조건이 달성되도록 원판반경의 15배만큼 떨어져 있다. 원판의 회전속도 ω 는 0~1000rpm의 범위가 고려되었다. 이때 최대 회전속도인 1000rpm에 대해 회전 레이놀즈수 $Re_\omega = R^2\omega/v = 1.7 \times 10^4$ 이 얻어져 Malik et al.⁽⁷⁾이 제시한 난류로의 천이가 발생하는 임계 회전 레이놀즈수 $2 \sim 3 \times 10^5$ 보다 1 order가 작으므로 공기유동장은 층류로 가정되었다. 따라서, 본 계산영역에 대해 정상상태 비압축성 축대칭 층류유동장과 온도장에 대해 다음의 지배방정식들을 각각 적용하였다.

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

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

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z u_\theta) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) - \frac{\mu u_\theta}{r^2} - \frac{\rho u_r u_\theta}{r} \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r u_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z u_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r T) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

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 유체의 분자점성계수, α 는 유체의 열확산계수이다.

한편, 본 연구의 회전유동에 대한 Stokes 수 $Stk_\omega = \tau_p \omega$ 가 가장 클 것으로 판단되는 $10\mu\text{m}$ 입자의 1000rpm 의 경우 $0.032 (<< 1)$ 가 얻어져 본 연구의 고려 입자크기영역 $0.01 \sim 10\mu\text{m}$ 전체에 걸쳐 유동장에 대한 입자의 관성력이 무시되었다. 따라서, 관성력을 무시한 회박입자상에 대한 오일러관점에서의 축대칭 입자농도장의 지배방정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r^p c) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z^p c) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_B \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_B \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$u_r^p = u_r - K \frac{v}{T} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad u_z^p = u_z + \tau_p g - K \frac{v}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

여기서, u_r , u_z , u_r^p , u_z^p 는 각각 r , z 방향으로의 유체속도와 입자속도, T 는 유체온도, c 는 입자농도, v 는 유체의 동점성계수, D_B 는 입자의 브라운확산계수, K 는 열영동계수, τ_p 는 입자이완시간, g 는 중력가속도이다.

2.2 계산조건 및 방법

해석에 고려된 유체 및 입자는 각각 공기와 PSL 입자이다. 회전원판의 반경 R 은 50mm , 두께 t 는 1.5mm 이다. 자유유동속도 U_0 는 0.5m/s , 자유유동온도 T_0 는 295K , 원판의 회전속도 ω 는 $0 \sim 1000\text{rpm}$ 으로 고려되었다. 회전원판온도 T_d 는 300K 로 선택되었고 이에 따른 온도차 $\Delta T = T_d - T_0 = 5\text{K}$ 에 대한 가열 회전원판 주위의 자연대류효과는 배경유동인 U_0 로 유입되는 자유유동에 대해 $Gr/Re^2 = 0.065$ 로 얻어져 무시되었다.

회전원판벽면에서의 입자농도는 차단효과 (Interception) 를 고려하여 원판 벽면으로부터 입자의 반경위치에서 입자농도 $c=0$ 을 지정하였고 각 경계면에서의 입자농도는 자유유동의 입자농도 $c=c_0$ 를 지정하였다.

전술한 지배방정식 (1)~(7)에 대해 유체의 압력구배항은 Patankar⁽⁸⁾의 SIMPLE 알고리즘으로 해결하고 유체와 입자의 대류항들은 Power law scheme 을 사용하여 처리하였으나, 입자농도장을 계산하는데 있어 입자의 속도장이 연속법칙을 만족하지 않으므로 Stratmann and Whitby⁽⁹⁾가 지적한대로 Patankar 의 알고리즘을 보정하였다. 계산격자계는 $180(\text{axial}) \times 110(\text{radial})$ 으로 구성된 엇물림격자계 (staggered grid system)이며, 이때 회전원판표면과 바로 이웃격자와의 간격은 유경훈 등⁽¹⁰⁾의 연구에 근거하여 $5\mu\text{m}$ 으로 설정하였고 이로부터 약 1.2 의 공비를 유지시키면서 등비수열적으로 증가되도록 격자들을 배치하였다.

수렴조건은 유동장의 경우 질량 및 속도의 정규화된 잔류소스들의 합이 1×10^{-4} 이하일 때, 온도장 및 농도장의 경우 각 격자점에서의 이전값 및 신규값의 차이를 이전값으로 나눈 값들이 모두 1×10^{-4} 이하일 때로 하였다. 격자시험 결과, 최대 회전속도 1000rpm 에 대해 상기의 $180(\text{axial}) \times 110(\text{radial})$ 의 경우와 양방향으로 각각 10 개씩 증분한 경우가 서로 동일한 계산결과가 얻어지며 각 경계면의 위치를 $2R$ 씩 증분한 경우도 Fig.1 의 계산영역의 경우와 동일한 계산결과가 얻어짐을 확인하였다. 또한, 회박입자상에 기인한 일방향성 결합(one way coupling)에 근거하여 유체의 유동장 및 온도장의 수렴된 결과를 입자농도장에 대입하여 각각의 입자크기에 대한 상부면상의 입자침착속도를 구하였다.

이외의 관련사항들은 비회전원판의 경우인 유경훈 등⁽¹⁰⁾의 수치해석방법과 동일하므로 관련내용들을 참고할 수 있다.

3. 결과 및 검토

3.1 유동장

Fig. 2 는 자유유동속도 $U_0=0$ 인 순수한 원판회전 유동만의 경우, 원판의 회전속도 $\omega=100\text{rpm}$ 일 때 유한원판($R=50\text{mm}$) 및 무한원판 상부면상의 반경 방향으로의 유체속도 u_r 의 분포를 각각 보여주고 있다. 그림에서 실선으로 표시된 무한원판 회전유동에 대한 속도분포는 Von Karman⁽¹¹⁾이 유동장 지배방정식 (1)~(4)에 상사변수를 도입하여 해석적으로 유도한 연립 상미분 방정식의 계산결과를 나타내고 있다. 그림의 x 축과 y 축은 그 상사변수들

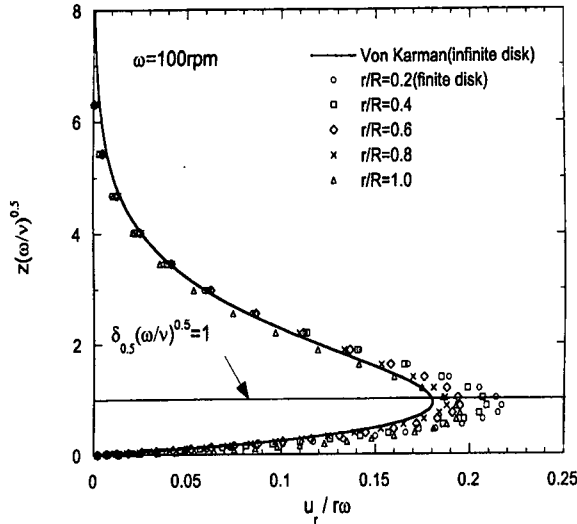


Fig. 2 Comparison of the near-wall distributions of radial flow velocity on the upper surface of the finite rotating disk with those of the infinite rotating disk when $U_0=0$

중에서 각각 무차원 반경속도 $u_r/r\omega$ 와 원판표면으로부터의 무차원 거리 $z\sqrt{\omega/\nu}$ 를 나타낸다. 또한, 원판표면상의 임의의 반경방향 위치에서의 원주방향 속도가 원판벽면의 원주방향 속도인 $r\omega$ 의 약 절반이 되는, 즉 $u_\theta/r\omega=0.5$ 인 벽면으로부터의 수직거리를 나타내는 $\delta_{0.5}\sqrt{\omega/\nu}=1$ 이 표시되어 있다. 일반적으로 이 위치에서 반경방향 속도 u_r 의 최대값이 얻어지게 되고 이 $\delta_{0.5}$ 의 크기를 속도경계층 두께로 간주할 수 있다. 한편, 그림에서 본 연구의 반경 $R=50\text{mm}$ 인 유한회전원판 상부면상의 여러가지 반경 위치에 대해 심볼로 표시된 반경방향 속도의 분포를 살펴보면, 대부분의 경우 $\delta_{0.5}$ 의 크기가 무한회전원판의 경우와 거의 일치하고 속도분포도 거의 같은 형상을 유지하고 있음을 알 수 있다. 하지만 반경방향 속도 u_r 의 최대크기가 모든 경우에 대해 약간 증가되었음을 알 수 있다. 이는 원판의 유한성에 기인한 가장자리에서의 가속효과에 의한 것이다. 그러나, 이러한 유한성에 의한 회전유동이 무한원판상의 유동장과 크게 다르지 않은 것은 본 연구에서 $\delta_{0.5}/R=0.024$ 로 얻어져 경계층의 크기에 비해 원판의 반경이 상당히 크기 때문이다.

Fig. 3 은 자유유동속도 $U_0=0.5\text{m/s}$ 일 때, 비회전 및 회전($\omega=1000\text{rpm}$) 유한원판 상부면상의 반경방향 유체속도 u_r 의 분포를 여러가지 반경위치에 대

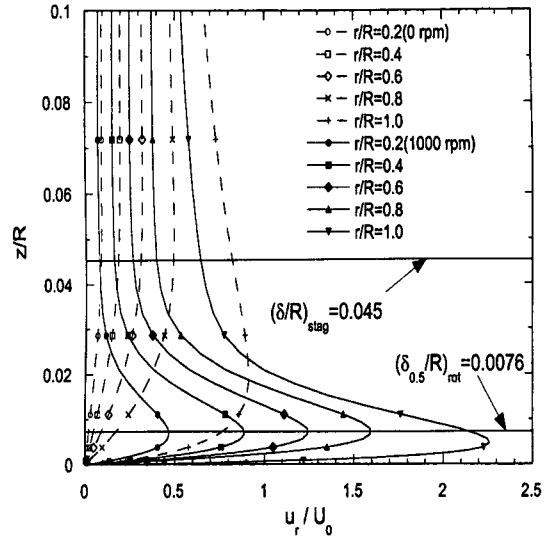


Fig. 3 Comparison of the near-wall distributions of radial flow velocity on the upper surface of the rotating finite disk with those of the stationary finite disk when $U_0=0.5\text{m/s}$

해 각각 보여주고 있다. 그림으로부터 비회전의 자유유동에 원판의 회전이 부가됨으로써 속도경계층이 벽면에 더욱 밀착되어 경계층의 두께가 상당히 얇아졌음을 알 수 있다. 한편, 그림에는 Von Karman⁽¹¹⁾이 무한원판상의 순수 정체점유동 및 순수 회전유동에 대해 각각 해석적으로 유도한 속도경계층의 두께들도 함께 도시되어 있다. 회전유동이 부가된 경우에 원판상의 각 위치에서의 반경방향 속도의 최대점의 위치와 $\delta_{0.5}$ 가 거의 동일함을 알 수 있으나 원판 모서리 $r/R=1.0$ 에서는 원판 유한성에 기인한 가속효과에 의해 속도경계층이 벽면에 더욱 밀착되었음을 알 수 있다.

3.2 평균 입자침착속도

Fig. 4 는 비가열($\Delta T=0\text{K}$)과 가열($\Delta T=5\text{K}$) 회전 원판에 대해 여러 가지 회전속도에 대한 입자크기에 따른 회전원판 상부표면상의 평균입자침착속도 곡선의 변화를 보여주고 있다. 열영동력이 고려되지 않는 비가열 회전원판의 경우, $0.1\mu\text{m}$ 이하의 입자크기영역에서는 회전속도가 증가함에 따라 침착속도가 점차 증가함을 알 수 있다. 입자크기 $0.01\mu\text{m}$ 의 경우에 회전속도 $\omega=0, 100, 1000\text{rpm}$ 일 때 입자침착속도가 각각 $0.022, 0.024, 0.057\text{cm/s}$ 가 얻어져 회전속도 $0\sim 100\text{rpm}$ 의 범위에서는 입자침착속도의 변화가 거의 없으나 1000rpm 이 되면 비회전의 입자침착속도에 비해 약 2.6 배로 증가되었음을 알 수 있다. 이는 Fig. 3 에서 관찰한 바와 같이 원판의 회전속도 $\omega=1000\text{rpm}$ 일 때 원판의 회

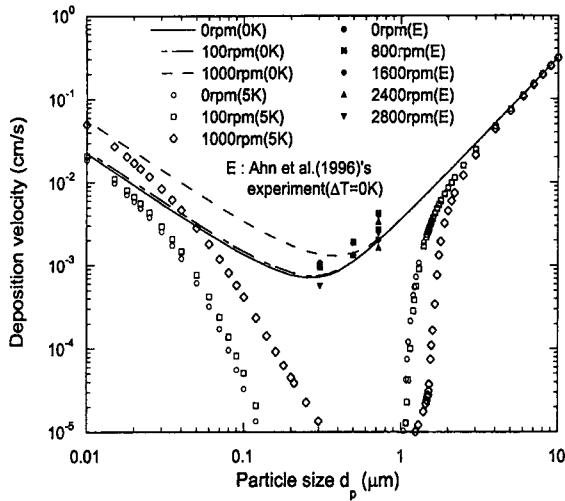


Fig. 4 Variations of the averaged particle deposition velocities on the upper surface of the rotating disk with respect to particle size

전이 원판 상부표면상의 유체의 경계층을 벽면에 상당히 밀착시켜 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 미세입자크기영역에서의 입자농도경계층의 기울기를 더욱 급격하게 함으로써 이러한 농도구배에 비례하는 브라운확산이 지배하기 때문이다. $1\mu\text{m}$ 이상의 입자크기영역에서는 침착속도의 변화없이 모두 한 곡선에 합쳐지고 있음을 알 수 있고 이는 $1\mu\text{m}$ 이상의 입자크기영역에서는 이러한 경계층의 영향을 받지 않는 중력침강이 지배적인 침착 메카니즘이기 때문이다.

또한, 비가열 회전원판에 대한 침착속도곡선들로부터 회전속도가 증가함에 따라 각 곡선들의 침착속도 최소점에 해당하는 입자크기가 큰 입자크기영역으로 이동하였음을 알 수 있다. 한편, 그림에는 본 연구와 동일한 조건하의 Ahn et al.⁽¹²⁾의 실험 결과가 도시되어 있는데 계산결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

열영동력이 고려되는 가열 회전원판의 경우를 살펴보면 미소한 온도차이 $\Delta T=5\text{K}$ 만 되어도 이미 열영동력은 입자침착에 큰 영향을 발휘하여 입자침착속도가 비교적 넓은 입자크기영역에 걸쳐 급격히 감소되었음을 알 수 있다. 특히 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 입자크기영역에서 가장 큰 폭으로 감소하였고 입자침착속도곡선이 두 개의 영역으로 분할되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 입자오염 제어대책이 요구되는 스펀코팅, 스펀건조, CVD 공정 등에서 공정중에 반도체 웨이퍼의 온도를 주위보다 5K 정도로만 가열시켜줌으로써 제품수율을 상당히 향상시킬 수 있음을 시사해준다.

한편, 가열원판에 있어 입자침착속도가 1×10^{-5}

cm/s 보다 작은 입자크기영역으로 정의되는 무침착입자크기영역(deposition free zone)이 회전속도가 증가함에 따라 $\omega=0\text{rpm}$ 일 때의 $0.128\sim 1.04\mu\text{m}$ 에서 $\omega=1000\text{rpm}$ 일 때의 $0.334\sim 1.26\mu\text{m}$ 으로 되어 큰 입자크기영역으로 이동하였음을 관찰할 수 있다. 이는 중력침강과 열영동력이 지배적인 입자크기영역($1\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$)에서는 중력침강은 일정하게 유지되는 반면 원판표면 근처의 온도구배는 원판의 회전에 의해 더 가파르게 되어 열영동력이 증가했기 때문이다. 확산과 열영동력이 지배적인 작은 입자크기영역($0.1\mu\text{m}\sim 0.3\mu\text{m}$)에서는 원판의 회전에 의한 브라운확산의 입자침착 증가효과가 증가된 열영동력에 의한 입자침착 감소효과를 여전히 압도하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, Fig. 4 에서와 같이 원판이 가열되고 있을 때에는 $1\mu\text{m}$ 보다 큰 입자크기영역에서는 원판의 회전이 비회전 원판의 경우에 비해 입자침착을 감소시키지만 $0.1\mu\text{m}$ 보다 작은 입자크기영역에서는 입자침착을 오히려 증가시킴을 알 수 있다.

3.3 국소 입자침착속도

Fig. 5 는 열영동력이 고려되지 않는 비가열 원판의 경우 비회전 및 회전(1000rpm)에 따른 입자크기별 원판 상부표면상의 국소 입자침착속도 분포의 변화를 도시하고 있다. 그림으로부터 $0.5\mu\text{m}$ 이하의 입자크기영역에서는 회전 원판의 침착속도가 모두 비회전 원판의 경우보다 국소적으로 증가되었고, 특히 원판의 가장자리보다는 중심부로 갈수록 증가 폭이 더 커지고 있음을 알 수 있다. 그리하여, 원판 상부면상의 국소 침착속도의 균일성은 회전원판의 경우가 비회전의 경우보다 훨씬 개선되었음을 알 수 있다. 이는 CVD 공정이나 VAD 공정중에 증착막과 부착막의 균일성 확보대책을 위해 원판의 회전이 크게 기여할 수 있음을 시사해준다. 한편, 가장자리 부근의 좁은 영역에서는 유체의 급격한 유로 변경에 의한 가속효과에 의해 침착속도가 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다 이는 원판보다 큰 작업대를 채용함으로써 작업대 반경의 약 0.95 배 크기의 원판을 작업대의 중심에 위치시켜 회전시킴으로써 작업대의 모서리가 이러한 가장자리문제를 담당케 함으로써 균일성을 더욱 향상시킬 수 있다는 사실을 시사해준다.

Fig. 6 은 $\omega=1000\text{rpm}$ 인 회전 원판의 경우 비가열 및 가열($\Delta T=5\text{K}$)에 따른 입자크기별 원판 상부 표면상의 국소 입자침착속도 분포의 변화를 도시하고 있다. 그림으로부터 중력침강이 지배적인 $10\mu\text{m}$ 크기의 입자와 확산이 지배적인 $0.01\mu\text{m}$ 크기의 입자를 제외한 모든 입자크기영역에서 회전 원판에 대한 가열은 국소 침착속도의 균일성을 그대로 유지시키면서 침착속도를 크게 감소시켜 입

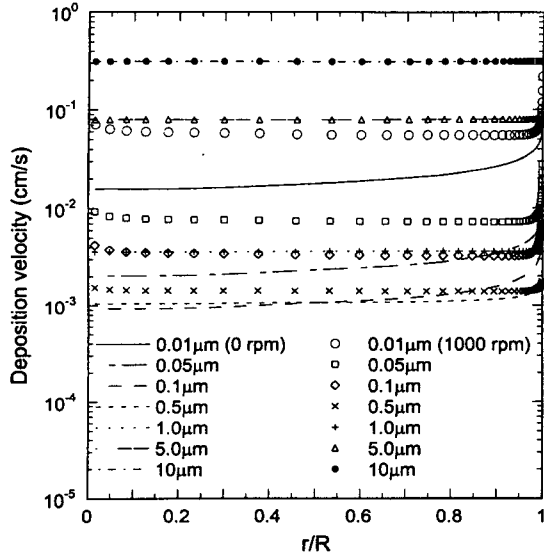


Fig. 5 Variations of the local particle deposition velocities on the upper surface of the unheated disk with respect to particle size($\Delta T=0K$)

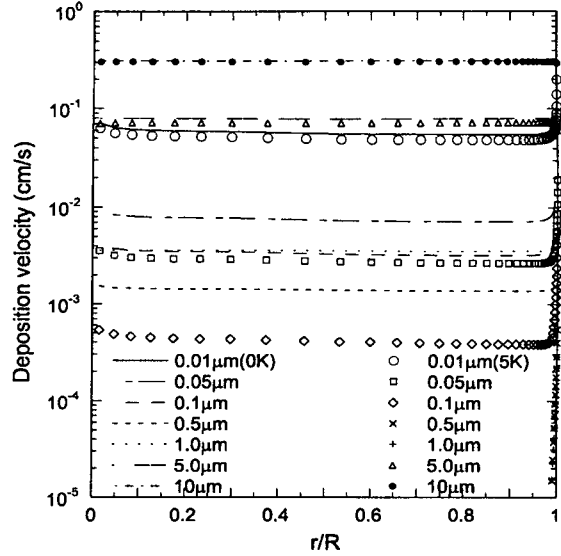


Fig. 6 Variations of the local particle deposition velocities on the upper surface of the rotating disk with respect to particle size($\omega=1000rpm$)

자 침착을 억제하고 있음을 알 수 있다.

3.4 입자침착속도 근사모델

본 수치해석모델이 입자침착속도에 대한 엄밀한 해석결과를 얻기 위해서는 회전원판 주위의 복잡한 유동장, 온도장, 입자농도장의 해를 필요로 하므로 계산이 복잡하고 많은 시간과 비용이 요구된다. 따라서, 가열 회전원판으로의 입자침착속도를 간단히 예측할 수 있는 근사모델이 필요하다. 유경훈 등⁽¹⁰⁾은 비회전 원판에 대해 입자농도 경계층에 대한 1 차원 확산방정식으로부터 유도된 입자침착속도 근사모델을 제안하였다. 본 연구에서는 이와 동일한 방식으로 유한 회전원판에 대한 입자침착속도 근사모델을 다음과 같이 유도하였다.

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

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

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

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

여기서, V_{df} 는 확산속도, V_{se} 는 중력침강속도, V_{th} 는 열영동속도, D_B 는 브라운확산계수, R 은 원판의 반경, τ_p 는 입자이완시간, g 는 중력가속도, K 는 열영동계수, v 는 유체의 동점성계수, T_0 는 자유유동온도, T_d 는 원판온도, B 는 입자의 기계적 유동율, \overline{Sh} 는 원판 상부면상의 지름기준 평균 Sherwood 수, \overline{Nu}_R 은 반경기준 평균 Nusselt 수이다.

식 (8)에 요구되는 본 연구의 자유유동 및 회전 유동의 혼합유동에 대한 Sherwood 수 및 Nusselt 수는 순수 자유유동⁽¹³⁾과 순수 회전유동⁽¹⁴⁾에 대해 나프탈렌 승화법으로 구한 Sherwood 수와 이로부터 열 및 물질전달 유사성을 이용하여 유도한 Nusselt 수를 통하여 다음과 같이 적용하였다.

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

$$\overline{Nu}_R = 0.484 Re^{1/2} + 0.411 Re_\omega^{1/2} \quad (9b)$$

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

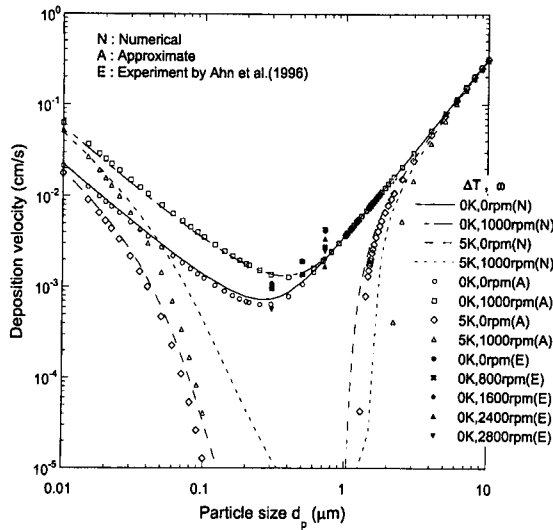


Fig. 7 Comparison of the results of the approximate deposition model with the numerical results and the available experimental data

Fig. 7 은 입자침착속도 근사모델 식 (8)의 계산 결과와 본 연구의 수치해석 결과, Ahn et al.⁽¹²⁾의 실험 결과를 함께 보여주고 있다. 그림으로부터 근사모델의 계산 결과들이 수치해석 결과 및 실험 결과들과 비교적 잘 일치하고 있으나, $\Delta T=5K$, $\omega=1000rpm$ 의 경우에 근사모델 계산결과와 수치해석 결과들의 차이가 $0.1\mu m \sim 1.0\mu m$ 입자크기영역에서 커지고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구의 근사모델이 확산 성분의 보상이 각각 독립적으로 유도된 침착속도 성분들을 적용한 점과 열영동력이 지배적인 입자크기영역인 $0.1\mu m \sim 1.0\mu m$ 에서 식 (9b)와 같이 순수 자유유동 및 순수 회전유동의 상관식들을 단순함에 의한 열영동속도 산출로 인하여 실제보다 과다하게 고려된 점에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구의 자유유동과 회전유동의 혼합유동에 대한 정확한 나프탈렌 상관식이 요구된다.

4. 결론

열영동력이 고려된 회전 유한원판으로의 입자 침착문제를 수치해석을 통하여 고찰하고 계산된 결과들을 기존의 실험결과, 근사모델 결과들과의 비교를 통하여 다음과 같은 사항들이 관찰되었다.

(1) 본 연구의 입자침착속도에 대한 수치해석 결과는 기존의 실험결과와 본 연구에서 제안한 근사모델의 결과들과 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

(2) 원판의 회전은 유체의 속도경계층을 원판 표면에 더욱더 밀착시켜 $0.1\mu m$ 이하의 입자크기 영역에서 원판 상부면상의 평균 입자침착속도를 증가시키지만 $1\mu m$ 이상의 입자크기영역에서는 증가 효과가 없음이 관찰되었다.

(3) 원판의 회전은 $0.5\mu m$ 이하의 입자크기영역에서 원판 상부면상의 가장자리보다 중심부 근처의 국소 입자침착속도를 더욱더 증가시켜 입자침착속도의 균일성을 크게 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

(4) 회전 원판을 주위보다 5K 만큼 가열시킴으로 인한 열영동 효과는 입자침착속도를 급격히 감소시켜 $0.1 \sim 1\mu m$ 의 입자크기 범위내에 무침착 영역(deposition free zone)을 만들 수 있으며 비회전 원판의 무침착 영역에 비해 큰 입자크기영역으로 이동시킴을 확인하였다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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. Crystal Growth*, Vol. 132, pp. 513~522.
- (3) Hirano, H. and Ozoe, H., 1995, "Numerical Computation of the Particle Deposition onto the Rotating and Heated Circular Plate," *ASME/JSM Thermal Engineering Conference*, Vol. 2, pp. 157~164.
- (4) 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.
- (5) 송창걸, 황정호, 1998, "VAD 공정 관련 회전하는 원판으로의 입자 부착," *대한기계학회논문집(B)*, 제 22 권, 제 1 호, pp. 61~69.
- (6) 박희성, 황정호, 좌성훈, 2000, "헤드/디스크 인터페이스 내에서 오염 입자의 거동에 관한 수치해석적 연구," *대한기계학회 논문집(B)*, 제 24 권, 제 3 호, pp. 477~484.
- (7) 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.
- (8) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw Hill, New York.
- (9) 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.
- (10) 유경훈, 오명도, 명현국, 1995, "가열 또는 냉각되는 수평웨이퍼 표면으로의 입자침착에 관한 해석," *대한기계학회논문집*, 제 19 권, 제 5 호, pp.

- 1319~1332.
- (11) Schlichting, H., 1979, *Boundary Layer Theory*, McGraw Hill, New York, pp.102~107.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) 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.