

〈논 문〉

## VAD 공정 관련 회전하는 원판으로의 입자 부착

송 창 걸\* · 황 정 호\*\*

(1997년 5월 10일 접수)

### Particle Deposition on a Rotating Disk in Application to Vapor Deposition Process (VAD)

Chang-Gull Song and Jung-Ho Hwang

**Key Words :** Optical Fiber Preform(광섬유 모재), Particle Deposition(입자부착), Diffusion(확산), Thermophoresis(열영동), Coagulation(응집), Lognormal Distribution(로그-정규분포), Moment Model(모멘트 모델)

#### Abstract

Vapor Axial Deposition (VAD), one of optical fiber preform fabrication processes, is performed by deposition of submicron-size silica particles that are synthesized by combustion of raw chemical materials. In this study, flow field is assumed to be a forced uniform flow perpendicularly impinging on a rotating disk. Similarity solutions obtained in our previous study are utilized to solve the particle transport equation. The particles are approximated to be in a polydisperse state that satisfies a lognormal size distribution. A moment model is used in order to predict distributions of particle number density and size simultaneously. Deposition of the particles on the disk is examined considering convection, Brownian diffusion, thermophoresis, and coagulation with variations of the forced flow velocity and the disk rotating velocity. The deposition rate and the efficiency directly increase as the flow velocity increases, resulting from that the increase of the forced flow velocity causes thinner thermal and diffusion boundary layer thicknesses and thus causes the increase of thermophoretic drift and Brownian diffusion of the particles toward the disk. However, the increase of the disk rotating speed does not result in the direct increase of the deposition rate and the deposition efficiency. Slower flow velocity causes extension of the time scale for coagulation and thus yields larger mean particle size and its geometric standard deviation at the deposition surface. In the case of coagulation starting farther from the deposition surface, coagulation effects increases, resulting in the increase of the particle size and the decrease of the deposition rate at the surface.

———— 기 호 설 명 ————		$b_0, b_2$	: 보정계수
$a$	: 속도구배 상수	$b_0 = 0.633 + 0.092\sigma_g^2 - 0.022\sigma_g^3$	
$A_z, A_r$	: 무차원 변수	$b_2 = 0.39 + 0.5\sigma_g - 0.214\sigma_g^2 + 0.029\sigma_g^3$	
$A_{T\infty}$	: 무차원 온도상수	$B_2, B_4, B_5$	: 상수
		$B_2 = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{6k_B T}{\rho_p}\right)^{\frac{1}{2}}$	

\*연세대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 연세대학교 기계공학과

	$B_4 = \frac{2k_B T}{3\mu}$
	$B_5 = 1.257$
C	: 상수 (0.56 for $Kn \geq 1$ , 1 for $Kn < 1$ )
D	: 입자 확산 계수
$E_0, E_1, E_2$	: 상수 (0.5, -2.5, -5.5)
$F_0, F_1, F_2$	: 상수 (2, -4, -10)
$G_1, G_2$	: 상수
	$G_1 = \frac{k_B T \rho C}{6\pi\mu^2} \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{\frac{1}{3}} v_g^{-\frac{1}{3}}$
	$G_2 = \frac{k_B T \rho \lambda B_5}{6\pi\mu^2} \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{\frac{2}{3}} v_g^{-\frac{2}{3}}$
$J_d$	: 입자 부착 플럭스
$k_B$	: 볼츠만 상수
$Kn$	: 크누센 수
$K_T$	: 열영동계수
$\dot{m}_d$	: 입자의 평균 부착률
$m_p$	: 입자 질량
$M_k$	: k번째 모멘트
n	: 입자 크기 분포 함수
Pr	: 플란트 수
q	: $\frac{\omega^2 + a^2}{\omega + a}$ or $\sqrt{\omega^2 + a^2}$
R	: 원판 반경
Re	: 레이놀즈 수
r	: 반경 좌표
$r_p$	: 입자 반경
Sc	: 슈미트 수
$Sc_k$	: k번째 슈미트 수
	$Sc_k^{-1} = G_1 v_g^{-1/3} \exp[E_k \ln^2 \sigma_g]$ $+ G_2 v_g^{-2/3} \exp[F_k \ln^2 \sigma_g]$
T	: 온도
$t_0$	: 입자 체류 시간
U	: 속도
$v, v'$	: 입자 부피
z	: 축방향 좌표

## 그리스문자

$\beta$	: 충돌빈도 함수
	$\beta_{FM} = B_2 \left(\frac{1}{v} + \frac{1}{v'}\right)^{\frac{1}{2}} (v^{1/3} + v'^{1/3})^2$
	$\beta_c = B_4 \left(\frac{C_c(v)}{v^{1/3}} + \frac{C_c(v')}{v'^{1/3}}\right) (v^{1/3} + v'^{1/3})$
$\delta$	: 경계층 두께
$\zeta$	: 응집 계수 ( $\zeta = \frac{\zeta_c \zeta_{FM}}{\zeta_c + \zeta_{FM}}$ )

	$\zeta_{FM} = b_2 B_2 v_g^{\frac{1}{6}} \exp\left(\frac{3}{2} \ln^2 \sigma_g\right) \left\{ \exp\left(\frac{25}{8} \ln^2 \sigma_g\right) + 2 \exp\left(\frac{5}{8} \ln^2 \sigma_g\right) + \exp\left(\frac{1}{8} \ln^2 \sigma_g\right) \right\}$
	$\zeta_c = B_4 \left\{ 1 + \exp(\ln^2 \sigma_g) + B_5 Kn_g \exp\left(-\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_g\right) [1 + \exp(-2 \ln^2 \sigma_g)] \right\}$
$\eta$	: 상사 변수
$\eta_{da}, \eta_{d\omega}$	: 부착 효율
$\lambda$	: 평균 자유 행정
$\mu$	: 점성 계수
$\nu$	: 동점성 계수
$\xi$	: 응집 계수 ( $\xi = \frac{\zeta_c \zeta_{FM}}{\zeta_c + \zeta_{FM}}$ )
	$\xi_{FM} = b_0 B_2 v_g^{\frac{1}{6}} \left\{ \exp\left(\frac{25}{8} \ln^2 \sigma_g\right) + 2 \exp\left(\frac{5}{8} \ln^2 \sigma_g\right) + \exp\left(\frac{1}{8} \ln^2 \sigma_g\right) \right\}$
	$\xi_c = B_4 \left\{ 1 + \exp(\ln^2 \sigma_g) + B_5 Kn_g \exp\left(\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_g\right) [1 + \exp(2 \ln^2 \sigma_g)] \right\}$
$\rho$	: 기체 밀도
$\rho_p$	: 입자 고유 밀도
$\sigma_g$	: 기하 평균 표준편차
$\tau$	: 전단 응력
$\phi$	: 무차원 인자 ( $= \frac{a}{\omega}$ )
$\omega$	: 각속도

## 상첨자

\* : 무차원 변수

## 하첨자

$\infty$	: 자유유선조건
w	: 벽조건
p	: 입자상
g	: 기하평균
C	: 연속체 영역
FM	: 자유분자 영역

## 1. 서 론

오늘날 통신분야에서 전선을 대신하여 많이 쓰이는 광섬유를 인발해 내기 전 단계의 재료인 모재(preform)는 광섬유 최종 제품의 단면 굴절율 분

포를 가지므로 순도 높은 모재를 생산하는 것이 중요하다. 광섬유 모재의 성분은 굴절률의 변화를 위해  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{GeO}_2$  등이다. 이와같은 성분의 입자크기는  $1\mu\text{m}$  이하이며  $\text{SiCl}_4$ 나  $\text{GeCl}_4$  등의 원료 물질이 고온의 화염을 통과하면서 산화와 가수분해과정을 통해 형성되며 이들 입자의 부착률을 증가시키면 곧 생산의 능률을 결정짓는 요인이다. Fig. 1은 광섬유 모재를 생산하는 방법 중의 하나인 VAD (Vapor-phase Axial Deposition) 공정<sup>(1-4)</sup>에서의 입자부착에 대한 개요를 보여준다. 연소 과정을 통해 입자를 생성하므로 부착 표면에 비해 외부 유동의 온도가 매우 높는데, 이와 같이 온도 구배가 큰 경우 열영동 현상(thermophoresis)이 입자의 거동에 지배적인 현상이며<sup>(5)</sup> 열영동외의 입자부착 메카니즘으로는 부착봉 근처 경계층내에서의 확산이 있다. 또한 브라운 운동에 의해 주로 일어나는 응집 현상(coagulation)은 입자의 크기를 변화시키는 중요한 메카니즘이다. Fig. 1에서 처음에는 회전하는 원판형 타겟에 입자 부착이 이루어지지만 일정 시간이 지나면 축 방향의 성장이 일어나 부착타겟은 원봉 형상이 되고 지속적인 입자 부착이 이루어진다. 실제 공정에서는 버너로부터 분출된 유동장이 부착 목표물과 일정 각도를 이루고 있는데<sup>(1)</sup> 이렇게 되면 3차원문제가 되어 해석이 복잡하므로 그동안 각도를 고려하지 않는 대칭형상 가정하에 몇몇 연구가 진행되어 온바 있다. 먼저 회전하지 않는 원판형 부착 목표물로의 입자부착을 Hwang과 Daily<sup>(6)</sup>는 축대칭 정체점 유동으로, Tsai와 Greif<sup>(7)</sup>는 부력효과를 고려한 제트유동으로 가정하여 이론적 연구를 수행하였으며, Tsai 등<sup>(8)</sup>은 Tsai와 Greif<sup>(7)</sup>의 연구에  $\text{SiCl}_4$  산화반응을 첨가하여 Hwang과 Daily의 실험결과<sup>(6)</sup>와 비교하였다. 이와같은 연구들이 응집에 의한 입자의 크기변화를 고려하지 않음에 비하여 조장호 등<sup>(9)</sup>은 Falkner-Skan 썬기 유동장에서의 다분산(polydisperse) 입자 부착에 대한 연구를 하였다. 참고문헌[6-9]이 부착 목표물의 회전을 고려하지 않았는데 본 논문에서는 VAD 공정에 관련하여 회전을 고려하였고 응집으로 인한 다분산입자 부착을 연구하였다. 입자부착에 대한 연구를 수행하기 위해서는 열 및 유체유동에 대한 정보가 필수적이며 이에 대하여는 송창걸 등<sup>(10)</sup>의 연구결과를 이용하여 원판의 회전과 버너로부터의 외부유동속도가 다분산입자 부착에 미치는 영향을 검토하였다. 다음에는 먼저 입자

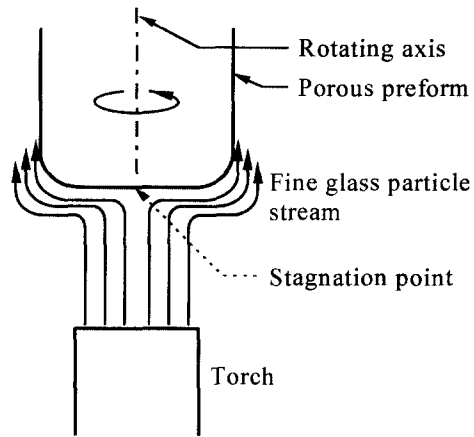


Fig. 1 Schematic of particle deposition in a VAD process.

거동에 관련된 지배방정식을 유도하고 계산결과와 결과에 대한 토의를 소개한다.

## 2. 입자 거동 모델

본 절에서는 해석에 사용될 입자거동 관련 지배방정식을 유도하였다. 이 방정식은 대류-확산 방정식에 응집과 열영동을 추가하고 모멘트모델을 도입하여 설정되었다. 자세한 사항은 조장호 등<sup>(9)</sup>을 참고하기 바라는데 그 논문에서 상첨자 \*가 차원변수를 의미한 반면 본 논문에서는 무차원변수로 쓰인 점을 유의하기 바란다. 정상 상태에서 입자 보존 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (n(v) \overline{U}_p) = \frac{1}{2} \int_0^v \beta(v', v-v') n(v') n(v-v') dv' - n(v) \int_0^\infty \beta(v, v') n(v') dv' \quad (1)$$

여기에서  $v$ ,  $v'$ 은 입자 하나의 부피이며  $n$ 은 입자 크기 분포함수이다. 입자의 충돌빈도함수  $\beta$ 는 주위 기체의 평균자유경로보다 입자반경이 아주 작은 자유분자영역과 입자 반경이 비교적 큰 연속체영역의 두 경우에 대하여 각각 정의된다.  $\overline{U}_p$ 는 입자 속도벡터이며 관성력의 영향을 무시하면 아래와 같이 유동, 확산, 열영동 효과의 합으로 나타난다.

$$\overline{U}_p = \overline{U} - D \nabla \ln n(v) - K_T \nu \frac{\nabla T}{T} \quad (2)$$

위 식에서  $\overline{U}$ 는 유동속도,  $T$ 는 유동온도,  $D$ 는 확산계수,  $K_T$ 는 열영동계수,  $\nu$ 는 동점성계수를 의미

한다.

입자의 부착과 크기 분포 변화에 관한 해석을 동시에 수행하기 위하여 모멘트 모델을 도입한다. 입자부피에 관한 크기분포 함수의 k번째 모멘트는 다음과 같이 정의된다.

$$M_k = \int_0^\infty n(v) v^k dv \quad (3)$$

따라서  $M_0$ 는 입자 수밀도,  $M_1$ 는 입자 부피밀도라는 물리적 의미를 갖는다. 입자크기 분포함수  $n(v)$ 는 로그-정규 분포를 따른다고 가정하며 그 정의는 아래와 같다.

$$n(v) = \frac{M_0}{3\sqrt{2\pi}v\ln\sigma_g} \exp\left[-\frac{\ln^2(v/v_g)}{18\ln^2\sigma_g}\right] \quad (4)$$

위 식에서  $v_g$ 는 기하평균 입자 부피,  $\sigma_g$ 는 입자크기 분포의 표준편차이다. 로그-정규분포 함수의 성질을 이용하면 식 (3)은 다음과 같이 표현될 수 있으며

$$M_k = M_0 v_g^k \exp\left[\frac{9}{2} k^2 \ln^2\sigma_g\right] \quad (5)$$

식 (5)에 의해 세가지 모멘트  $M_0, M_1, M_2$ 로 다음의 식이 성립한다.

$$v_g = M_1^2 / (M_0^3 M_2)^{1/2} \quad (6)$$

$$\ln^2\sigma_g = \ln(M_0 M_2 / M_1^2) / 9$$

그러므로  $M_0, M_1, M_2$ 의 값을 알고 있다면 입자크기 분포의 변화를 알려주는 인자인 기하평균 표준편차  $\sigma_g$ 와 기하평균입자부피  $v_g$ 를 식 (6)을 통하여 계산할 수 있다.

식 (1)의 입자 보존 방정식에 식 (3)의 모멘트 모델을 도입하여 정리하면 아래와 같은 결과를 얻는다.

$$\nabla^* \cdot \left[ M_k^* (\bar{U}^* - \frac{2}{Sc_k Re} \nabla^* \ln M_k^* - \frac{2K_T}{Re} \frac{\nabla A_T}{A_T + A_{T\infty}}) \right] = C_k^* \quad (7)$$

$$k=0: C_k^* = -\frac{RM_{0\infty}}{U_\infty} \xi M_0^{*2}$$

$$k=1: C_k^* = 0$$

$$k=2: C_k^* = \frac{2RM_{0\infty}}{U_\infty} \xi M_1^{*2} \exp[-9\ln^2\sigma_{g\infty}]$$

식 (7)에서  $A_T = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty}$ 이며  $T_\infty$ 는 자유유동에 서의 기체온도이며  $T_w$ 는 원판의 온도이다. 식 (7)에서 위첨자 \*로 표시된 무차원변수는 다음과 같

이  $\nabla^* = \nabla / R, \bar{U}^* = \bar{U} / R, M_k^* = M_k / M_{0\infty}$ 로 정의되며  $M_{0\infty}$ 는 자유유동에서의 입자 수밀도,  $R$ 은 원판 반경을 나타낸다.  $Re, Kn, Sc, Pr$ 은 각각 Reynolds 수, Knudsen 수, Schmidt 수, Prandtl 수로서 다음과 같이 정의된다:  $Re = 2RU_\infty / \nu, Kn = \lambda / r_p, Sc = \nu / D, Pr = \nu / a(\lambda, r_p, a$ 는 각각 유체의 평균자유경로, 입자반경, 열확산계수를 의미하며  $U_\infty$ 는 강제유동속도이다).  $Sc_k$ 는  $Sc$ 에 상응하는 계수로 입자 크기에 관한 함수이며 기하평균 입자부피  $v_g$ 의 함수이지만 본 연구에서는 실제 응집이 일어났을 때  $v_g$ 값이 그리 크게 변화하지 않으므로 공간상에서 일정한 값을 갖는다고 가정하였다. <sup>(11)</sup> 식 (7)의 우변은 응집항으로  $\xi$ 와  $\zeta$ 는 응집 상수이며 본 연구에서 관심있는 입자크기가 연속체 영역과 자유분자영역의 중간에 걸쳐 있으므로 두 영역에서 구한 값의 조화 평균값을 해석에 사용한다.

식 (7)에 송창결 등<sup>(10)</sup>의 연구에서 수행한 회전 원판 정체점 유동의 온도장, 유동장에 대한 상사해를 적용시키기 위해 아래 식 (8)과 같이 원판으로부터의 수직방향  $z$ 의 속도 및 온도 구배에 비해 원판중심으로부터의 반경방향  $r$ 의 속도 및 온도 구배가 매우 작다고 가정하고, 회전원판 정체점 유동의 상사해석변수  $\eta \equiv z \sqrt{\frac{q}{\nu}}$ 를 대입하여 정리하면 아래 식 (9)과 같이 된다. 식 (10)에서 '기호는  $\partial / \partial \eta$ 를 의미한다. 식 (8)의 가정은 Stratmann 등<sup>(12)</sup>에서도 사용했으며, Evans 등<sup>(13)</sup>과 Kleijn 등<sup>(14)</sup>의 2차원 계산 결과에서 그 타당함을 확인할 수 있다.

$$\frac{\partial M_k}{\partial r}, \frac{\partial^2 M_k}{\partial r^2}, \frac{\partial A_T}{\partial r} \ll \frac{\partial M_k}{\partial z}, \frac{\partial^2 M_k}{\partial z^2}, \frac{\partial A_T}{\partial z} \quad (8)$$

$$\frac{1}{Sc_k} M_k^{*''} + \left( -\frac{A_z}{2} + K_T \frac{A_T'}{A_T + A_{T\infty}} \right) M_k^{*'} + K_T \left[ \frac{A_T''}{A_T + A_{T\infty}} - \left( \frac{A_T'}{A_T + A_{T\infty}} \right)^2 \right] M_k^* = \frac{U_\infty}{qR} C_k^* \quad (9)$$

여기서  $q$ 는  $\sqrt{\omega^2 + a^2}$  또는  $\frac{\omega^2 + a^2}{\omega + a}$ 이며<sup>(10)</sup>  $\omega$ 와  $a$ 는 각각 원판의 회전속도와 강제유동의 속도강도를 의미하는데  $a = \frac{U_\infty}{R}$ 이라고 가정하였다. 또한  $A_z$ 는  $z$ 방향 무차원속도를 의미한다. 본 연구에서 식 (9)의 경계조건은  $k=0, 1, 2$ 에 대해 아래 식 (10)과 같다.

$$\eta \rightarrow 0: M_k^* = 0 \quad (10)$$

$$\eta \rightarrow \infty : M_k^* = 1$$

이 식을  $k=0, 1, 2$ 에 대해 풀면  $\eta$ 에 대한 입자 수밀도  $M_0$ 의 변화를 알 수 있다. 또한  $M_1, M_2$ 으로부터 식 (6)을 이용하여 기하평균 입자 부피  $v_g$ 와 표준편차  $\sigma_g$ 를 계산하여 입자 크기 분포의 변화도 알 수 있다. 본 연구에서 또한 중요한 것은 입자부착에 대한 정보이다. 입자부착 플럭스  $J_d$ 와 입자의 평균 부착률  $\dot{m}_d$ 은 다음과 같다.

$$J_d = -D \left. \frac{dM_0}{dz} \right|_w = -\frac{M_{0\infty} \sqrt{q\nu}}{Sc_0} \left( \frac{dM_0^*}{d\eta} \right)_w \quad (11)$$

$$\dot{m}_d = \pi R^2 m_{pg} J_d \quad (12)$$

입자 형상이 구형이라는 가정하에 기하평균 입자질량  $m_{pg}$ 은  $\frac{4}{3}\pi\rho_p r_{pg}^3$ 이다. 이때  $r_{pg}$ 와  $\rho_p$ 는 기하평균 입자반경과 입자의 고유밀도를 의미한다.

### 3. 계산 및 토의

대류, 확산, 열영동, 응집을 동시에 고려한 입자 거동을 계산하였고 이때 식 (9)의 상미분 방정식을 풀기 위해 IMSL의 DVCPR 루틴<sup>(15)</sup>을 사용하였다. 식 (9)를 풀기 위해서는 회전원판 정체점 유동에서의 유동속도와 온도를 나타내는  $A_z$ 와  $A_T$ 에 대한 정보가 필요한데 여기에 대해서는 송창걸 등<sup>(10)</sup>의 연구결과를 이용하였다.  $\eta$ 의 원판 표면에서의 경계값  $\eta_w$ 은  $\eta_w=0$ 으로 취했을 때는 특이점(singular point)이 되므로 표면으로부터의 거리가 자유유동에서의 입자 반지름과 같을 때 ( $z_w \approx r_{pg\infty}$ )의 값, 즉  $\eta_w = \sqrt{q/\nu} \cdot r_{pg\infty}$ 로 취하였다. 또한 자유유선 경계값  $\eta_\infty$ 은  $z_\infty^* = z_\infty/R = 0.5$ 에 상응하는  $\eta_\infty \approx 10$ 을 취하였는데<sup>(9)</sup> 이 값은 유동장, 온도장 경계층 두께를 포함하는 충분히 큰 값이다. 계산에 사용한 물성치와 상수들은 VAD 공정과 관련하여 정지된 원판으로의 입자부착을 이론적, 실험적으로 연구한 Hwang과 Daily<sup>(6)</sup>를 참고하였다.

$$T_w = 1300 \text{ [K]} \quad \mu = 6.07 \times 10^{-4} \text{ [g/cm} \cdot \text{s]}$$

$$\rho = 1.97 \times 10^{-4} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$R = 4.5 \text{ [cm]} \quad \sigma_{g\infty} = 1$$

$$r_{pg\infty} = 0.1 \text{ [\mu m]} \quad T_\infty = 2300 \text{ [K]}$$

$$\rho_p = 2.2 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$M_{0\infty} = 2.7 \times 10^9 \text{ [particles/cm}^3\text{]} \quad K_T = 0.55$$

여기서  $\mu$ 와  $\rho$ 는 각각 유체의 점성계수와 밀도이며

하첨자  $\infty$ 는 응집이 시작되는 자유유선에서의 조건을 의미한다.  $\sigma_{g\infty}=1$  조건은 응집시작시 입자가 균일한 크기(monodisperse)임을 의미한다. 위에서 나열한 인자들 외에 계산을 수행하기 위해서는 강제유동속도  $U_\infty$ 와 원판의 회전속도  $\omega$ 를 알아야 한다. 본 연구에서는  $U_\infty$ 와  $\omega$ 값을 변화시키면서 계산을 수행하였다. 다음에는 정체점 유동에 회전이 미치는 영향에 대하여 먼저 정리한 뒤에 회전 원판 유동에 외부 유동이 첨가되는 경우에 대해 정리하였다. 본 연구에서는 응집이 시작되는 자유유선에서의 위치  $z_\infty^*$ 값을 임의로 선정하였는데 이 값은 VAD 공정에서 버너 형상 등에 따라 달라지는 값이다. 마지막으로 이에 대해 정리하였다.

#### 3.1 정체점 유동에 회전이 미치는 영향

주어진 강제유동에 대하여 원판의 회전이 입자부착, 부착효율, 부착면에서의 입자 평균 크기와 표준편차의 변화에 미치는 영향을 살펴보았다. 강제유동속도가  $U_\infty=15 \text{ cm/s}$  ( $a=3.333 \text{ sec}^{-1}$ ),  $30 \text{ cm/s}$  ( $a=6.667$ ),  $60 \text{ cm/s}$  ( $a=13.33$ )인 세가지 경우에 대하여 계산하였으며 이때 부착효율은 다음과 같이 정의된다.<sup>(16)</sup>

$$\eta_{d\omega} = \frac{m_{pgw} J_d}{m_{pg\infty} M_{0\infty} U_\infty} \quad (13)$$

계산결과가 Table 1에 요약되어 있는데, 회전이 증가함에 따라 원심력에 의해 유입 속도가 증가하게 되므로 경계층이 얇아지고, 따라서 원판 표면에서의 온도와 입자농도 구배가 커지므로 입자 부착 플럭스  $J_d$ 가 커지게 된다. 그리고 응집 경향을 예측하기 위해서 입자가 표면에 부착하기까지의 시간  $t_0$ 를 아래와 같이 정의한다.

$$t_0 \sim \frac{1}{q} \quad (14)$$

따라서 입자가 유동장에 머물러 있는 시간  $t_0$ 이 길수록 응집 효과가 커지는데 응집 효과가 증가하면 입자 평균 반지름은 커지고 입자 분포의 표준 편차도 커지게 된다. Table 1의 결과를 보면  $\omega$ 가 증가함에 따라 응집효과가 적어짐을 알 수 있다. 하지만 입자부착 플럭스가 더 크게 증가하기 때문에 질량 부착률과 부착효율은  $\omega$ 에 따라 증가한다. Fig. 2는 Table 1에서의 질량 부착률과 효율의 변화를 도식화한 것인데  $\omega/a=2, 5, 10$  일때 대략 9%, 33%, 70%의 증가를 보였으며  $\omega/a < 2$ 에서는 별다

Table 1 Particle deposition with variation of rotating speed.

$U_\infty$ (cm/s)	$\frac{\omega}{a} = \phi^{-1}$	$\omega$ (rad/s)	$J_d$ (#/cm <sup>2</sup> sec)	$\sigma_{kw}$	$r_{pgw}$ ( $\mu$ m)	$\dot{m}_d$ (g/min)	$\eta_{da}$
15	0	0.000	$1.868 \times 10^8$	1.2800	0.19954	0.05220	0.0366
	0.1	0.333	$1.869 \times 10^8$	1.2800	0.19951	0.05221	0.0366
	0.2	0.667	$1.872 \times 10^8$	1.2800	0.19945	0.05225	0.0367
	0.5	1.667	$1.896 \times 10^8$	1.2799	0.19897	0.05254	0.0369
	1	3.333	$1.977 \times 10^8$	1.2796	0.19743	0.05352	0.0376
	2	6.667	$2.256 \times 10^8$	1.2786	0.19268	0.05676	0.0398
	5	16.67	$3.471 \times 10^8$	1.2747	0.17851	0.06945	0.0488
	10	33.33	$5.661 \times 10^8$	1.2689	0.16466	0.08890	0.0624
30	0	0.000	$4.081 \times 10^8$	1.2724	0.17234	0.07348	0.0258
	0.1	0.667	$4.083 \times 10^8$	1.2724	0.17232	0.07349	0.0258
	0.2	1.333	$4.090 \times 10^8$	1.2724	0.17227	0.07355	0.0258
	0.5	3.333	$4.138 \times 10^8$	1.2722	0.17192	0.07396	0.0260
	1	6.667	$4.301 \times 10^8$	1.2718	0.17075	0.07531	0.0264
	2	13.33	$4.859 \times 10^8$	1.2701	0.16719	0.07988	0.0280
	5	33.33	$7.246 \times 10^8$	1.2640	0.15658	0.09784	0.0343
	10	66.67	$1.139 \times 10^9$	1.2555	0.14631	0.12553	0.0440
60	0	0.000	$8.726 \times 10^8$	1.2590	0.15005	0.10370	0.0182
	0.1	1.333	$8.731 \times 10^8$	1.2590	0.15003	0.10371	0.0182
	0.2	2.667	$8.744 \times 10^8$	1.2589	0.15000	0.10381	0.0182
	0.5	6.667	$8.838 \times 10^8$	1.2587	0.14974	0.10438	0.0183
	1	13.33	$9.156 \times 10^8$	1.2580	0.14889	0.10630	0.0187
	2	26.67	$1.024 \times 10^9$	1.2555	0.14631	0.11279	0.0198
	5	66.67	$1.473 \times 10^9$	1.2467	0.13871	0.13829	0.0243
	10	133.3	$2.219 \times 10^9$	1.2353	0.13151	0.17750	0.0312

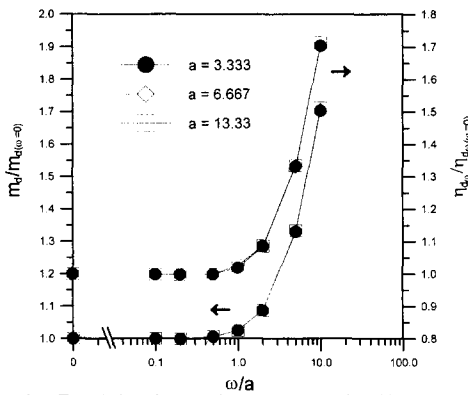


Fig. 2 Particle deposition rate and efficiency with respect to rotating speed.

른 증가를 보이지 않았다. 따라서 원판의 회전을 통해 입자부착을 증가시키기 위해서는  $\omega/a > 2$ 를 만족시키도록 회전속도가 강제유동속도에 비해 커

야 한다는 것을 알 수 있다. 이것은 송창걸 등<sup>(10)</sup>에서 연구된 바와 같이  $\omega/a > 2$  일 때 온도 경계층 두께가 현저히 감소하여 열영동 효과가 크게 증가하는데 기인한다.

### 3.2 회전 유동에서 외부 유동 속도를 증가시킨 경우

이번에는 주어진 원판의 회전속도에 대하여 강제 유동속도  $U_\infty$ 가 입자부착, 부착효율, 부착면에서의 입자 평균 크기와 표준편차의 변화에 미치는 영향을 살펴보았다. 원판의 회전속도는  $\omega$ 가 3.333, 6.667, 13.33 rad/sec인 세가지 경우를 고려하였으며 이때 부착효율은 다음과 같이 정의된다.

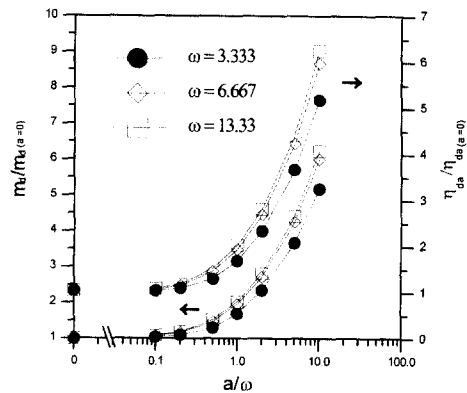
$$\eta_{da} = \frac{m_{pgw} J_d}{m_{pg\infty} M_{0\infty} R \omega} \quad (15)$$

계산결과가 Table 2에 요약되어 있는데 원판의 회

**Table 2** Particle deposition with variation of forced flow speed.

$\omega$ (rad/s)	$\frac{a}{\omega} = \phi$	$U_\infty$ (cm/s)	$J_d$ (#/cm <sup>2</sup> sec)	$\sigma_{gw}$	$r_{pgw}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\dot{m}_d$ (g/min)	$\eta_{da}$
3.333	0	0	$5.157 \times 10^7$	1.2846	0.25943	0.03167	0.0222
	0.1	1.5	$5.760 \times 10^7$	1.2846	0.25371	0.03309	0.0232
	0.2	3	$6.584 \times 10^7$	1.2846	0.24626	0.03459	0.0243
	0.5	7.5	$1.046 \times 10^8$	1.2832	0.22330	0.04099	0.0288
	1	15	$1.977 \times 10^8$	1.2796	0.19743	0.05352	0.0376
	2	30	$4.138 \times 10^8$	1.2722	0.17192	0.07396	0.0519
	5	75	$1.108 \times 10^9$	1.2530	0.14387	0.11603	0.0815
	10	150	$2.215 \times 10^9$	1.2286	0.12815	0.16395	0.1151
6.667	0	0	$9.252 \times 10^7$	1.2836	0.22811	0.03863	0.0136
	0.1	3	$1.074 \times 10^8$	1.2831	0.22202	0.04133	0.0145
	0.2	6	$1.296 \times 10^8$	1.2822	0.21417	0.04478	0.0157
	0.5	15	$2.256 \times 10^8$	1.2786	0.19268	0.05676	0.0199
	1	30	$4.301 \times 10^8$	1.2718	0.17075	0.07531	0.0264
	2	60	$8.838 \times 10^8$	1.2587	0.14974	0.10438	0.0366
	5	150	$2.218 \times 10^9$	1.2285	0.12812	0.16405	0.0576
	10	300	$4.107 \times 10^9$	1.1962	0.11707	0.23177	0.0813
13.33	0	0	$1.826 \times 10^8$	1.2803	0.20155	0.05258	0.0092
	0.1	6	$2.203 \times 10^8$	1.2790	0.19439	0.05691	0.01
	0.2	12	$2.732 \times 10^8$	1.2771	0.18643	0.06227	0.0109
	0.5	30	$4.859 \times 10^8$	1.2701	0.16719	0.07988	0.014
	1	60	$9.156 \times 10^8$	1.2580	0.14889	0.10630	0.0187
	2	120	$1.804 \times 10^9$	1.2370	0.13248	0.14756	0.0367
	5	300	$4.111 \times 10^9$	1.1961	0.11705	0.23192	0.0407
	10	600	$7.022 \times 10^9$	1.1597	0.10988	0.32769	0.0575

전에 의해서만 유동이 생기는 경우 유입되는 유동 속도가 느리므로 경계층 두께가 두껍고 입자 농도 구배가 작으므로 부착률이 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 따라서 입자가 부착 되기까지의 시간  $t_0$ 가 길기 때문에 응집 효과가 커져서 표준 편차와 입자 평균크기는 큰 값을 나타낸다. 하지만 송창결 등<sup>(10)</sup>에서 볼 수 있듯이, 일정한 원판의 회전 속도에 대해서 강제대류 속도  $U_\infty$ 가 조금만 증가해도 급격히 경계층 두께가 감소하기 때문에 입자 부착률과 부착효율이 현저하게 증가하는 것을 Fig. 3에서 볼 수 있다. 역시 응집시간  $t_0$ 가 강제유동속도가 증가함에 따라 짧아지게 되므로 응집 효과가 작아져서 표준편차에서의 입자 평균크기와 표준편차 모두 작아진다.



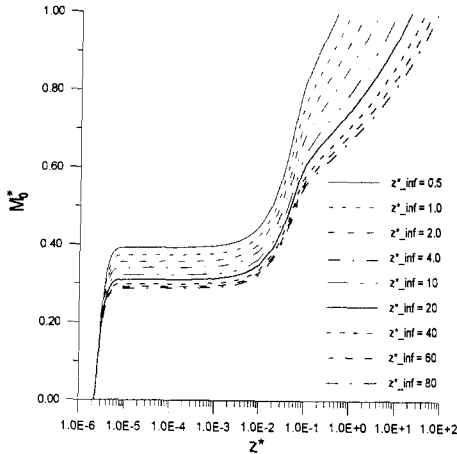
**Fig. 3** Particle deposition rate and efficiency with respect to forced flow speed.

### 3.3 입자 응집 시작점에 대한 고찰

지금까지의 계산에 사용된 자유유선에서의 경계 조건은  $z^* = 0.5$ , 즉 응집이 시작되는 위치가 원판

**Table 3** Effect of coagulation starting point.

$z_0^*$	$J_d$ (#/cm <sup>2</sup> sec)	$\sigma_{gw}$	$r_{pgw}$ ( $\mu$ m)
0.5	$4.105 \times 10^9$	1.196	0.1171
1.0	$3.891 \times 10^9$	1.204	0.1192
2.0	$3.703 \times 10^9$	1.211	0.1212
4.0	$3.534 \times 10^9$	1.216	0.1231
10.0	$3.335 \times 10^9$	1.222	0.1255
20.0	$3.200 \times 10^9$	1.227	0.1272
40.0	$3.076 \times 10^9$	1.230	0.1289
60.0	$3.008 \times 10^9$	1.232	0.1299
80.0	$2.962 \times 10^9$	1.233	0.1305

**Fig. 4** Effect of coagulation starting point on particle number density.

표면에서  $z$ 축 방향으로 2.25 cm 떨어진 위치에서 시작되는 것을 의미한다. 만약 다른  $z_0^*$ 을 이용하여 계산을 수행하면 입자거동방정식 계산결과  $M_k$ 가 변하게 된다. 원판의 회전이 없고  $U_\infty=300$  cm/sec인 경우, 응집이 시작되는 위치에 따라 계산결과가 어떻게 달라지는가가 Table 3에 요약되어 있다. 원판으로부터 먼 곳에서 계산이 시작될수록 응집이 많이 일어난 상태에서 부착이 되게 되므로 입자크기와 그 표준 편차가 크고 입자부착률이 작아진다는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 여러 응집 시작점에 대해 입자 수밀도  $M_0^*$ 의 공간분포를 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 회전 원판 정체점 유동에서의 입자 거동과 부착에 대한 해석을 기존의 VAD모델 실험에 사용했던 조건을 적용하여 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 강제유동 속도가 증가하면 속도 및 온도 경계층 두께가 줄어서 입자부착률은 커지게 된다.

(2) 원판으로의 유입되는 속도가 느리면 입자의 응집시간이 길어지므로 응집효과가 커져서 부착표면에서의 입자 평균크기와 그 표준편차가 커진다.

(3) 입자응집 시작점이 원판으로부터 멀어지면 응집시간이 길어지므로 응집효과가 커져서 입자 평균크기와 그 표준편차가 커지고 입자부착률은 적어진다.

(4) 원판의 회전속도가 증가하면 점성에 의해 주위의 유체가 같이 회전하게 되고 원심력에 의해 빠져 나가는 만큼의 유동속도가 강제유동 속도에 더해지게 된다. 회전속도가 강제유동속도에 비해 작을 때에는 이 효과가 크지 않으나  $\omega/a > 2$ 인 비교적 큰 회전 속도가 주어질 때 회전에 의한 경계층 두께의 감소와 함께 입자부착의 증가를 볼 수 있다. 계산결과에 따르면  $\omega/a=2, 5, 10$  일때 부착률과 부착효율이 9%, 33%, 70%의 증가를 보였다.

#### 참고문헌

- (1) Li, T., 1985, *Optical Fiber Communication*, Academic Press.
- (2) Senior, C. L., 1987, "Manufacture of Optical Waveguides using Aerosols: A Review," *Particulate Science and Technology*, Vol. 5, pp. 13~26.
- (3) Miller, T. J., Potkay, E. and Yuen, M. J., 1987, "Review of Chemistry and Mechanisms of Deposition for Optical Waveguide Fabrication by Vapor-phase Deposition from a Combustion Flame," *AICHE Symposium Series* Vol. 83, pp. 1~11.
- (4) Bautista, J. R. and Atkins, R. M., 1991, "The Formation and Deposition of SiO<sub>2</sub> Aerosols in Optical Fiber Manufacturing Torches," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 22, pp. 667~675.



- (5) Talbot, L., Cheng, R. K., Schefer, R. W. and Willis, D. R., 1980, "Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 101, pp. 737~758.
- (6) Hwang, J. and Daily, J. W., 1995, "Electric Field Enhanced Deposition in Flame-synthesized Materials Manufacturing," *J. of Aerosol Sci.*, Vol. 26, pp. 5~18.
- (7) Tsai, H. C. and Greif, R., 1994, "Thermophoretic Transport with Application to External Chemical Vapor Deposition Processes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 257~268.
- (8) Tsai, H. C., Greif, R. and Joh, S., 1995, "A Study of Thermophoretic Transport in a Reacting Flow with Application to External Chemical Vapor Deposition Processes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1901~1910.
- (9) 조장호, 황정호, 최만수, 1995, "포크너-스캔 경계층유동에서의 다분산 입자부착에 대한 연구," 대한기계학회논문집 제19권 제9호, pp. 2342~2352.
- (10) 송창걸, 황정호, 1997, "증착공정에서의 회전 원판 정체점 유동에 대한 상사해석," 대한기계학회논문집, 제21권, 제3호, pp. 371~379.
- (11) Bai, H. and Biswas, P., 1990, "Deposition of Lognormally Distributed Aerosols Accounting for Simultaneous Diffusion, Thermophoresis, and Coagulation," *J. of Aerosol Science*, Vol. 21, pp. 629~640.
- (12) Stratmann, F., Fissan, H., Papperger, A. and Friedlander, S., 1988, "Suppression of Particle Deposition to Surfaces by the Thermophoretic Force," *Aerosol Science and Technology* Vol. 9, pp. 115~121.
- (13) Evans, G. and Greif, R., 1987, "A Numerical Model of the Flow and Heat Transfer in a Rotating Disk Chemical Vapor Deposition Reactor," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 928~935.
- (14) Kleijn, C. R., van der Meer, Th. H. and Hoogendoorn, C. J., 1989, "A Mathematical Model for LPCVD in a Single Wafer Reactor," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 136, pp. 3423~3433.
- (15) IMSL., 1987, Problem-Solving Software Systems, *International Mathematical and Statistical Libraries*, User's Manual.
- (16) Tsai, H. C. and Greif, R., 1994, "Thermophoretic Transport in with Application to External Chemical Vapor Deposition Processes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 257~268.