

〈論 文〉

외부증착(OVD)공정에 관한 열전달과 입자부착에 관한 연구

송영휘* · 최만수** · 강신형**

(1993년 7월 10일 접수)

A Study of Heat Transfer and Particle Deposition During Outside Vapor Deposition Process

Younghuie Song, Mansoo Choi and Shin Hyoung Kang

Key Words : Outside Vapor Deposition(외부증착), Optical Fiber(광섬유), Chemical Vapor Deposition(화학증착)

Abstract

A study of heat transfer and particle deposition has been made numerically for outside vapor deposition process. Heat conduction through the two layer cylinder which consists of the target and the deposited layer is included together with heat transfer and gas jet flow onto the cylinder from the torch. Temperature and flow fields have been obtained by an iterative method and thermophoretic particle deposition has been studied. Of particular interests are effects of the thickness of the deposited layer, the torch speed and the rotation speed of the cylinder on particle deposition flux and efficiency. Effects of buoyancy, variable properties and tube rotation are included.

기 호 설 명

\bar{a}^i : Contravariant 기본 벡터	L : 이중봉의 길이
C : 입자농도	n : 이중봉표면 수직좌표
c_p : 정압비열	p : 식 (6)에서의 지수 ($p=0.785$)
C_j : 토치출구 중앙에서의 입자농도	q : 식 (7)에서의 지수 ($q=0.673$)
d_p : 입자직경	q_w : 벽면 열유속
D : 이중봉직경	R_i, R_o : 이중봉의 내경, 외경
J : 무차원 입자부착률	S : 토치에서 이중봉 중심까지의 거리
g : Jacobian의 제곱	Stk : Stokes수 ($=t_p/t_{flow}$)
$g^{i,j}$: Contravariant 메트릭텐서의 성분	t : 입자증착층 두께
g_v : 중력 가속도	t_{flow} : 유동특성시간 ($=D/U_j$)
h : 열전달계수	t_p : 입자특성시간 ($=\frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$)
\hat{i}, \hat{j} : Cartesian 좌표계에서의 기본 벡터	T : 온도
k : 열전도계수	T_a : 대기온도
K : Thermophoretic 계수	T_j : 제트속도
	u, v : x, y 방향 유속
	U^i : Contravariant속도성분
	U_j : 제트의 출구속도

*서울대학교 기계공학과 대학원

**정회원, 서울대학교 기계공학과

V_t : 토치 이동속도
 V_{th} : 열영동속도
 W : 제트폭
 x, y : Cartesian 좌표

그리이스문자

a : 열확산계수
 ε : 다공성도
 η : 입자증착효율
 μ : 점성계수
 ν : 동점성계수
 θ : 각도
 ρ : 밀도
 ω : 이중봉 회전속도 ($= -\frac{2\pi\Omega}{60}$)
 Ω : 이중봉의 1분당 회전수
 ξ^1, ξ^2 : 곡선좌표계 ($\xi^1 = \xi, \xi^2 = \eta$)

첨자

a : 대기
 f : 연속체 (공기)
 s : 불연속체 (실리카입자)
 w : 이중봉 벽면값
 ξ^1 : ξ^1 에 대한 편미분
 1 : 모봉
 2 : 입자부착층

1. 서 론

광섬유 제조공정에 사용되는 화학증착공정중 Modified Chemical Vapor Deposition(MCVD)⁽¹⁾과 함께 널리 쓰이는 방법으로 Outside Vapor Deposition(OVD)^(2,3)을 들 수 있다. OVD 공정에서는 원관의 내부에 입자를 증착시키는 MCVD와 달리 원봉의 외부에 입자를 부착시키게 된다. 토치로부터 수직상향으로 분사되는 SiCl_4 , GeCl_4 , O_2 , H_2 등이 포함된 혼합 화학가스가 O_2 , H_2 의 연소반응으로 화학반응온도 이상으로 가열되며 화학반응으로 SiO_2 나 GeO_2 와 같은 입자가 만들어지게 된다. 형성된 입자는 가스제트 유동과 함께 움직이다 원봉의 표면에 부착된다. 부착된 입자는 흰색의 다공성층을 이루며 토치가 모봉의 축방향으로 일회 이동할 때 한층의 부착층이 형성되며 굴절률 분포의 조절을 위하여 각 층의 조성을 변화시키면서 수십층을 부착하게 되므로 공정 중 부착층의 두께가 증가

하게 된다. 부착과정이 종료되면 탈수와 수축과정, 인발과정을 통하여 $125 \mu\text{m}$ 직경의 광섬유를 뽑아 내게 된다.

형성된 입자의 부착 메카니즘은 온도구배가 있는 기체중에 입자가 존재할 때 그 입자는 온도가 감소하는 방향으로 온도구배에 비례하는 힘을 받는 열영동(thermophoresis)으로 알려져 있다.⁽⁴⁾ Homsy et al.⁽⁵⁾과 Batchelor와 Shen⁽⁶⁾은 Blasius Series 해를 이용해 균일유동에 놓인 실린더 주변의 열영동력으로 인한 입자부착에 관한 연구를 수행하였으며 Garg와 Jayaraj⁽⁷⁾는 실린더 표면의 열영동 입자부착을 수치적으로 계산하였다. Alam et al.⁽⁸⁾은 평판 위 제트유동인 경우에 대하여 열영동 입자부착을 연구하였으며 실험적 연구로는 Bautista et al.⁽⁹⁾과 Graham과 Alam⁽¹⁰⁾을 들 수 있다. Kang과 Greif^(11,12)는 균일유동 대신에 제트유동을 고려하였으며 Curvilinear 좌표계를 이용한 수치적 방법으로 실린더 주변 유동과 온도장을 계산하였으며 입자 부착을 연구하였다.

증착이 진행되면서 입자부착층의 두께가 증가하며 모봉과 입자 부착층을 포함하는 실린더의 직경이 증가하게 된다. 따라서 실린더 주위 유동과 실린더 표면온도가 변화하게 되며 입자부착성능 즉 증착률 및 증착효율이 달라지게 된다. 또한 실제 공정에서 중요한 공정인자인 토치의 이송속도는 실린더 표면온도 및 증착 성능에 큰 영향을 미친다. 즉, 느린 속도로 이동되는 토치인 경우가 빠른 속도의 토치 이송인 경우보다 높은 표면온도를 나타낼 것이며 온도분포에 의지하는 열영동이 광섬유 제조 증착과정에서의 증착 메카니즘이므로 변화된 증착 성능을 기대할 수 있다. 입자 부착층의 두께와 토치 이송속도가 달라질 때 증착 성능이 어떠한 영향을 받는지를 파악하는 것은 공정의 최적 조건을 구하는 데에 중요하다. 본 논문에서는 입자부착층과 토치이송이 원봉과 입자부착층을 포함하는 실린더의 주위 유동 및 열전달, 그리고 열영동으로 인한 입자부착에 어떠한 영향을 미치는가를 해석하고자 한다. 지금까지의 연구에서는 원봉의 표면온도를 주어진 경계조건으로 취급하였으며 입자부착층을 포함하는 실린더내에서의 열전달을 고려하지 않았다. 따라서 기존의 연구에서 입자부착층 및 토치이송의 영향을 고려하기 위하여서는 각 경우마다 실린더 표면온도의 측정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 증가되는 입자부착층을 포함한 이중 원봉

에서의 열전도를 원봉 주위의 유체유동 및 열전달과 함께 고려하여 원봉 표면의 온도를 구하였으며 입자부착층 및 토치 이송속도가 입자부착률 및 효율에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 연구하였다. 토치에서 실린더로 분사되는 상향 제트유동에서 부력의 영향 및 온도에 따라 변화하는 물성치의 영향을 포함하였으며 이중 원봉 및 주위 가스유동에서의 열전달이 함께 고려되는 연계열전달(conjugate heat transfer) 문제를 수치해석적 방법으로 연구하였다.

2. 해 석

2.1 유체유동 및 입자농도의 지배방정식

토치에서 나오는 정상층류 제트유동을 개략도 Fig. 1에 직교좌표계를 사용하여 나타내었으며 그림에서 볼 수 있듯이 토치의 폭은 $2W$ 이며 토치 출구에서의 제트의 속도와 온도는 각각 U_j, T_j 이다. 반시계 방향으로 회전하는 이중 원봉에서 1은 모봉을 표시하며 2는 입자부착으로 형성된 입자 부착층을 의미한다. 원봉 주위의 가스유동을 해석하기 위하여 비직교 Curvilinear 좌표계를 수치해석에서 사용하였으며 C-type 격자시스템을 사용하였다.^(13,14) Fig. 2에 나타낸 좌표 변환함수 $\xi(x, y)$ 와 $\eta(x, y)$ 를 사용하면 원봉 주위의 유동장을 직교좌표계로 표시할 수 있으며 $\xi(x, y)$ 와 $\eta(x, y)$ 는 Poisson 방정식을 해석하여 구할 수 있으며 자세한 사항은 Schuh⁽¹⁴⁾에 나와 있다. Kang and Greif^(11,12)에서 사용한 변수들을 본 연구에서도 사용하며 지배방정식을 곡선좌표계에서 서술하면 다음과 같은 식을 얻는다.^(11,12)

• 연속방정식

$$(\sqrt{g} \rho U^i)_{\xi^i} = 0 \quad (1)$$

• x방향 운동량방정식

$$[\sqrt{g}(\rho U^i u - \mu g^{ij} u_{\xi^j})]_{\xi^i} + (y \xi^2 p)_{\xi^1} - (y \xi^1 p)_{\xi^2} - \sqrt{g} g_v (\rho - \rho_a) = 0 \quad (2)$$

• y방향 운동량방정식

$$[\sqrt{g}(\rho U^i v - \mu g^{ij} v_{\xi^j})]_{\xi^i} + (x \xi^2 p)_{\xi^1} - (x \xi^1 p)_{\xi^2} = 0 \quad (3)$$

• 에너지방정식

$$[\sqrt{g}(\rho c_p U^i T - k g^{ij} T_{\xi^j})]_{\xi^i} = 0 \quad (4)$$

여기서,

$$\xi^1 = \xi,$$

$$\xi^2 = \eta,$$

$$U^i = \bar{a}^i \cdot (u \bar{i} + v \bar{j}),$$

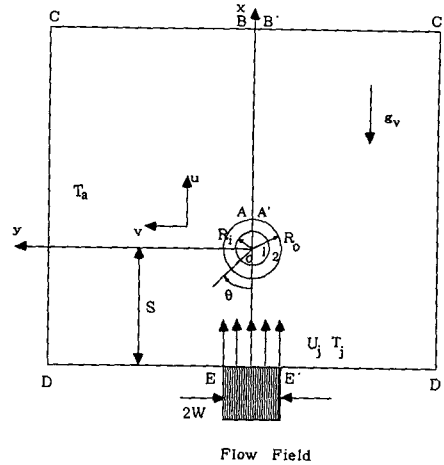


Fig. 1 Geometry and sketch of the flow system
Flow field 2 Layer Solid rod

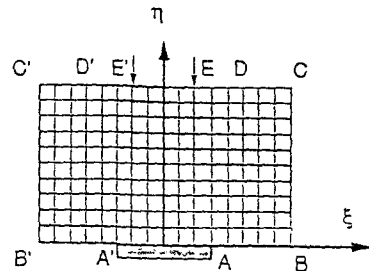


Fig. 2 Transformed domain for numerical analysis

$$\bar{a}^i = \nabla \xi^i,$$

$$g^{ij} = \bar{a}^i \cdot \bar{a}^j$$

저압, 저속유동이므로 에너지방정식에서 압력일과 소산항은 무시되었다. 밀도, 열전도계수, 점성계수는 온도에 관한 함수로 주어진 다음과 같은 식을 사용하였다.⁽¹²⁾

$$\frac{\rho}{\rho_a} = \left(\frac{T}{T_a} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$\frac{k}{k_a} = \left(\frac{T}{T_a} \right)^p \quad (6)$$

$$\frac{\mu}{\mu_a} = \left(\frac{T}{T_a} \right)^q \quad (7)$$

여기서, 공기인 경우 $p=0.785$, $q=0.673$ 이다.

토치의 출구에서 형성된 입자들은 회박하여서 가스의 유동에 영향을 주지 않는다는 가정을 하였으며 입자의 크기가 작아 ($O(0.1 \mu m)$) Stokes수 ($Stk = \frac{t_p}{t_{flow}} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu t_{flow}}$)⁽¹⁵⁾가 작게 되며 입자의 속도는 가스의 유속에 열영동속도를 중첩하여 구할 수 있다. 입자는 대류, 확산, 열영동에 의해 이동되는데 입자부착에 대한 Brownian 확산은 열영동에 의한 것에 비해 상당히 작으므로 무시될 수 있는 것으로 알려져 있다.^(5,6) 따라서 2차 미분항으로 표시되는 확산항을 무시한 입자농도에 관한 지배방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[\sqrt{g}(U_{eff}C)]_{z=0} = 0 \quad (8)$$

여기서, U_{eff} 는 입자의 속도로 유속과 열영동속도를 중첩한 양이며 열영동속도는 다음 식으로 주어진다.

$$v_{th} = -K \frac{\nu}{T} \nabla T \quad (9)$$

여기서, K 는 열영동력계수로서 입자 Knudsen수와 입자와 주 유동가스의 물질치 등의 함수⁽⁴⁾인데 본 연구에서는 K 의 값으로 0.8을 사용하였다.⁽⁹⁾ 유동장에 대한 경계조건은 Kang과 Greif^(11,12)와 같은 조건을 사용하였으며 다음과 같다. (Fig. 1 참조)

• 토치출구 ($E'E$)

$$\begin{aligned} u &= U_j, \quad v = 0, \quad T = T_j, \\ C(y) &= C_j \exp[-(\ln 2)(y/W_c)^2] \end{aligned} \quad (10)$$

• 이중봉 벽 ($A'A$)

$$u = R_o \omega \sin \theta, \quad v = R_o \omega \cos \theta, \quad T = T_w(\theta) \quad (11)$$

• 이중봉 양 측면 및 아래 계산영역

$$\begin{aligned} (C'D', CD) \\ \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad T = T_a, \quad C = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} (D'E', DE) \\ u = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad T = T_a, \quad C = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

• 이중봉 뒤 계산영역 ($CB, C'B'$)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (14)$$

식(11)에서 ω 는 반시계 방향 회전으로 음의 값을 가진다. 식(12)에 나타내었듯이 원봉으로부터 멀리 떨어져 있는 $C'D'$ 과 CD 에서의 경계조건으로

유입되는 수평방향 속도 성분의 y 방향 미분항을 영으로 취급하였으며 유입된 유동이 비회전이라고 가정하여 $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$ 조건을 사용하였다. Kang과 Greif⁽¹¹⁾에 따르면 경계조건식(13)이 주 유동에 미치는 영향은 적은 것으로 알려져 있다. 입자농도에 관한 지배방정식에서 Brownian 확산은 무시하였으므로 이중봉 벽과 뒤의 경계조건은 불필요하다. 식(10)에 토치출구에서의 입자농도는 Gaussian 분포로 가정하였으며,^(9,10) W_c 는 특성입자 제트폭의 절반을 나타내며 $y = W_c$ 에서 입자농도 C 는 $C_j/2$ 이다. 단위면적당 입자부착률 (Deposition rate [$kg/s m^2$])은 원봉 벽에서의 입자농도에 벽면에 수직인 방향의 열영동속도 성분을 곱한 것이며 무차원화된 단위면적당 입자부착률 J 는 다음과 같이 정의된다.

$$J = \frac{v_{th,w} C_w}{U_j C_j} \quad (15)$$

위의 식에서 C_w 는 원봉의 벽면에서의 입자농도로서 Kang과 Greif⁽¹²⁾에서 유도된

$$\frac{1}{C_w} \frac{dC_w}{dn} = (p-q) \frac{1}{T_w} \frac{dT_w}{dn} \quad (16)$$

의 관계로부터 구할 수 있다.

입자부착효율, η 는 유입되는 입자질량유량에 대한 전체 입자부착량으로 정의되며 다음식으로 표현된다.

$$\eta = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} v_{th,w} C_w R d\theta}{\int_{-\infty}^{\infty} U_j C_j dy} \quad (17)$$

2.2 이중봉에서 열전도를 지배하는 방정식

입자부착층의 두께효과를 고려하기 위해서 모봉과 입자의 부착에 의해 형성된 다공성층으로 구성된 이중구조의 원봉에서의 열전달을 고려하였다. 토치의 이송으로 인한 축방향의 대류 열전달 및 열전도 그리고 원관의 회전이 고려된 3차원 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial T_{1,2}}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\frac{1}{r} \frac{\partial T_{1,2}}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\partial T_{1,2}}{\partial z}) \\ = -\frac{\omega}{\alpha_{1,2}} \frac{\partial T_{1,2}}{\partial \theta} + \frac{V_t}{\alpha_{1,2}} \frac{\partial T_{1,2}}{\partial z} \end{aligned} \quad (18)$$

실린더 주위의 유체유동 및 열전달은 토치의 중앙, 즉 $z=L/2$ (Fig. 1 참조)에서의 단면 $x-y$ 평면

에서 해석하는 2차원 해석이며 이중봉에서의 열전도 해석은 토치이송의 영향을 포함하는 3차원 문제이다. x - y 평면 상에 있는 이중봉 표면($r=R_0$)에서 경계조건으로 이중봉과 이중봉 주위 유체의 온도와 열유속이 동일하다는 조건을 사용할 수 있다. 그러나 z 방향으로의 이중봉의 표면에서는 토치에서 나오는 유한한 두께의 화염이 이중봉에 미치는 별도의 경계조건이 필요하다. 본 연구에서는 토치에서 분출되는 화염의 두께가 전체 원봉의 길이에 비하여 작아서 토치가 원봉의 표면에 미치는 열유속을 z 방향으로의 토치의 길이만큼($a \leq z \leq b$) 균일하다고 가정하였다. 균일한 열유속을 가정한 부분을 제외한 표면에서는 봉의 회전으로 인한 강제 대류 조건을 주었으며 아래의 식으로 표시하였다.

$$T_1 = T_2, \quad k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \quad r = R_i \quad (19)$$

$$q_w(\theta) = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \quad r = R_o, \quad a \leq z \leq b \quad (20)$$

$$-k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = h(T_2 - T_w) \quad r = R_o, \quad 0 \leq z < a, \quad b < z \leq L \quad (21)$$

$$T_{1,2}|_{\theta=-\pi} = T_{1,2}|_{\theta=\pi}, \quad \frac{\partial T_{1,2}}{\partial \theta}|_{\theta=-\pi} = \frac{\partial T_{1,2}}{\partial \theta}|_{\theta=\pi} \quad (22)$$

여기서, 하첨자 1은 모봉, 2는 입자의 부착에 의해 형성된 입자부착층을 나타내고 $\alpha_{1,2} = \frac{k_{1,2}}{\rho_{1,2} c_{p1,2}}$ 이다. 모봉은 Graphite의 물성치($k_1 = 1.6 \text{ W/mK}$)를 사용했고 입자부착층에 대한 밀도는 Bautista et al.⁽⁹⁾로부터 $\rho_2 = 0.33 \text{ kg/cm}^3$ 를 사용하였으며 열전도계수는 Maxwell 모델⁽¹⁶⁾을 사용하여 계산하였다. Maxwell 모델은 다음과 같다.

$$k_2 = k_f \frac{2\varepsilon + (3-2\varepsilon) \frac{k_s}{k_f}}{(3-\varepsilon) + \varepsilon \frac{k_s}{k_f}} \quad (23)$$

여기서, ε 은 다공성도, k_f, k_s 는 각각 공기와 실리카 입자의 열전도계수를 나타내며 $\varepsilon = 0.85$, $k_f = 0.06752$, $k_s = 2.87 \text{ W/mK}$ 를 사용하였다. 식(20)의 $q_w(\theta)$ 는 가스유동해석으로부터 구하여지며 가스유동계산에서의 원봉 표면에서의 경계조건 $T_w(\theta)$ (식(11) 참조)는 식(18)~(22)의 해석결과로부터 얻어지므로 상호의존적이며 반복계산방법을 사용하여 구하게 된다. (2.3절 참조)

2.3 수치계산

수치계산에서 대류항은 본 연구의 Reynolds수가

크지 않기 때문에 HYBRID 방법⁽¹⁷⁾을 사용하였으며 압력계산에는 SIMPLE 알고리즘⁽¹⁷⁾을 사용하였다. 입자농도에 관한 식은 선형이며 다른 식들과 분리되어 있으므로 유동장과 온도장을 구한 뒤에 계산하였다. 봉 주위의 유동장 계산과정을 설명하면 다음과 같다. 먼저 식(20)에 사용되는 열유속 분포 $q_w(\theta)$ 를 임의로 가정하여 이중봉의 온도분포를 계산하여 이중봉 표면에서의 온도분포 $T_w(\theta)$ 를 구한다. $T_w(\theta)$ 를 식(11)에 대입하여 이중봉 주위의 유동장을 계산하면 새로운 $q_w(\theta)$ 를 구할 수 있다. 이것을 다시 식(20)에 대입하여 새로운 $T_w(\theta)$ 를 구한다. 이러한 과정을 되풀이 하여 수렴할 때까지 반복하여 해를 구한다. 매 반복계산시 이중봉 벽 온도분포를 얻기 위해서 이중봉에 대한 열전도방정식이 선형인 점을 이용하여 중첩 방법을 사용하였다. 즉, 하나의 원주방향 격자에 단위 열유속을 주고 식(18)에서 식(22)로 표시되는 열전도방정식을 수치해석하여 이중봉의 온도분포를 구하며 이 과정을 전 격자에 걸쳐 수행하여 각 격자에 주어진 단위 열유속으로 인한 각 격자에서의 온도 증가를 계산한다. 임의의 열유속 $q_w(\theta)$ 가 주어지면 각 격자에서의 열유속 크기를 알 수 있고 단위 열유속일 때의 온도증가에 곱하여 각 격자의 온도 증가분을 구할 수 있으며 중첩을 이용하여 새로운 $T_w(\theta)$ 를 구한다. 이와 같은 방법을 사용하면 원봉에서의 열전도해석은 매 반복계산시 할 필요가 없으며 초기의 해석결과를 이용한 산술 계산으로 원봉에서의 온도분포를 얻을 수 있다. 수렴된 결과의 열유속을 가지고 위에 설명한 중첩을 이용한 결과와 전체 열유속을 주고 해석한 결과를 비교하였으며 거의 같은 결과를 얻었다. 이중봉은 (10×101×51), (20×101×51), (30×101×51), (20×101×71), 그 주변 유동장 계산에는 (131×61), (151×71)의 격자 시스템을 사용하여 수치해의 격자 의존성을 검사하였고⁽¹⁸⁾ 본 연구에서 사용한 격자는 유동장의 경우 (151×71), 이중봉인 경우 (20×101×51)이다.

3. 결과 및 고찰

본 논문의 연구 목적은 입자부착층의 두께가 커지면서 또한 토치이송속도가 바뀌면서 이중봉 및 이중봉 주위 유체에서의 온도분포가 어떻게 변화되며 또한 이 중요한 두 공정인자가 증착 성능에 어

며한 영향을 미치는가를 파악하는 데에 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 공정에서 발생하는 범위의 입자부착층 두께로서 $t=0$ 부터 $t=0.015$ m까지 변화시켰으며 토치이송속도는 $V_t=0.001$ m/s, 0.005 m/s, 0.01 m/s의 경우를 계산하였다. 이와 더불어 원관 회전의 영향을 파악하기 위하여 회전속도 $\Omega=0$ rpm, 60 rpm, 120 rpm의 경우의 계산을 수행하였다.

3.1 입자부착층 두께의 영향

모봉에 실리카 입자들이 부착됨으로써 다공성의 입자부착층의 두께가 증가하며 모봉에 작용하는 열저항 및 모봉과 입자부착층을 포함하는 이중봉의 표면적이 달라지게 되므로 표면의 온도분포가 달라지게 된다. 이는 열영동속도를 변화시켜 증착성능, 즉 증착효율 및 증착물을 변화시킨다. Fig. 3에 입자부착층 두께에 따른 이중봉 표면의 온도분포의 변화를 나타내었다. 입자부착층이 증가되면서 처음에는 표면온도가 올라가게 된다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 $t=0$ (모봉만 있을 경우)에서 $t=0.001$ m 그리고 $t=0.005$ m로 증가할 때 전반적인 표면온도가 상당히 올라가게 되는데 이는 다공성의 입자부착층의 열전도도가 모봉에 비하여 상당히 작기 때문에 입자부착층이 단일효과를 나타내기 때문이다. 본 연구에서 모봉의 열전도계수는 1.6 W/m K, 입자부착층의 다공성도는 0.85 이며 식 (23)에 표시한 Maxwell 모델을 사용한 입자부착층의 열전도계수는 0.1005 W/m K 이다. 입자부착이 계속되어 입자부착층의 두께가 $t=0.005$ m에서 $t=0.01$ m, $t=0.015$ m로 증가될 경우에는 표면온도의 감소를 나타내는데 이는 원봉의 열용량이 증가하여 토치의 축방향 이동으로 인한 이중봉의 축방향 대류 열전달량이 증가하는데에 기인하고 있다. 원주방향으로의 변화량을 살펴보면 실선(모봉만 있는 경우)은 거의 변화가 없으나 부착층이 존재하는 경우 부착층의 낮은 열전도도로 인하여 최고 온도와 최저 온도와의 차가 약 100 K 정도가 됨을 보여준다. 표면의 온도가 원주방향으로 큰 변화가 없는 실선(즉 모봉만 있는 경우)인 경우에도 가스의 온도구배는 큰 변화를 나타낸다. (송영희⁽¹⁸⁾의 Fig. 10, 11 참조) 이는 $\theta=0$ (정체점)에서부터 온도경계층이 성장하여 온도구배가 정체점으로부터 멀어질 때 감소하기 때문에 온도구배에 비례하는 열영동속도 분포도 원주방향으로 큰 변화를 보인다.

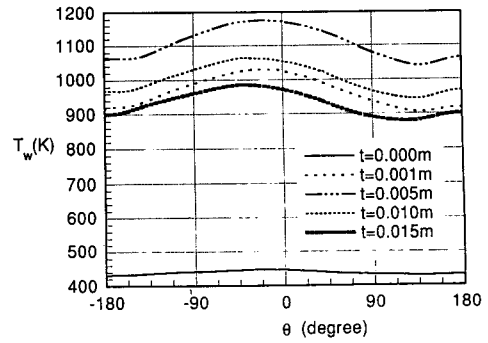


Fig. 3 Wall temperature distribution with respect to the angular direction for different thicknesses of deposited layer ($U_j=2$ m/s, $T_j=2273$ K, $T_a=300$ K, $W=0.015$ m, $h=80$ W/m²K, $V_t=0.001$ m/s, $\Omega=60$ rpm, $S/R_o=3.33$, $\epsilon=0.85$)

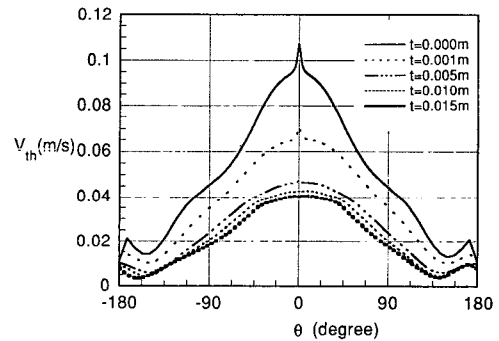


Fig. 4 Thermophoretic velocity distribution with respect to the angular direction for different thicknesses of deposited layer ($U_j=2$ m/s, $T_j=2273$ K, $T_a=300$ K, $W=0.015$ m, $h=80$ W/m² K, $V_t=0.001$ m/s, $\Omega=60$ rpm, $S/R_o=3.33$, $\epsilon=0.85$)

이중봉 벽을 향한 열영동속도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 열영동속도는 식 (9)에 나타난 바와 같이 온도구배와 동점성계수에 비례하고 온도에는 반비례한다. 이중봉의 표면온도가 증가할 경우 그에 반비례하는 열영동속도가 항상 감소한다고 할 수 없다. 그 이유는 온도의 증가와 더불어 동점성계수가 증가하며 따라서 열영동속도를 증가시키기 때문이다. 즉, 온도의 증가는 열영동속도를 감소시키거나 증가시키는 두 효과를 동시에 나타낸다. 입자부착층의 두께가 증가하면서 초기의 작은 증가, 즉 $t=0$ 에서 $t=0.005$ m로 증가할 때 표면온도는 증가하고 Fig. 4에 나타난 열영동속도는 감소하는데 이는 동점성계수의 증가보다는 온도의 증가에 따른

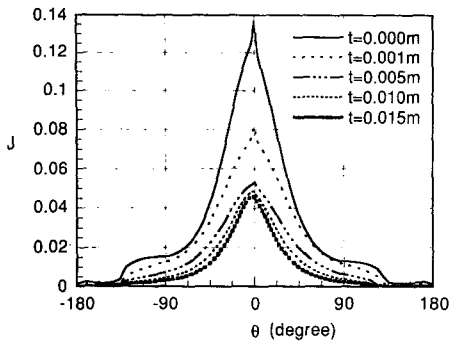


Fig. 5 Distribution of deposition rate with respect to the angular direction for different thicknesses of deposited layer ($U_j=2$ m/s, $T_j=2273$ K, $T_a=300$ K, $W=0.015$ m, $h=80$ W/m²K, $V_t=0.001$ m/s, $\Omega=60$ rpm, $S/R_o=3.33$, $\epsilon=0.85$)

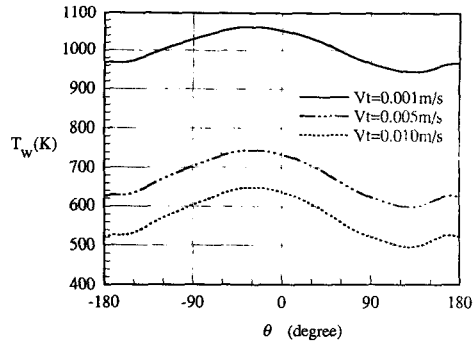


Fig. 7 Wall temperature distribution with respect to the angular direction for different torch speeds ($U_j=2$ m/s, $T_j=2273$ K, $T_a=300$ K, $W=0.015$ m, $h=80$ W/m²K, $t=0.01$ m/s, $\Omega=60$ rpm, $S/R_o=3.33$, $\epsilon=0.85$, $R_o=0.015$ m)

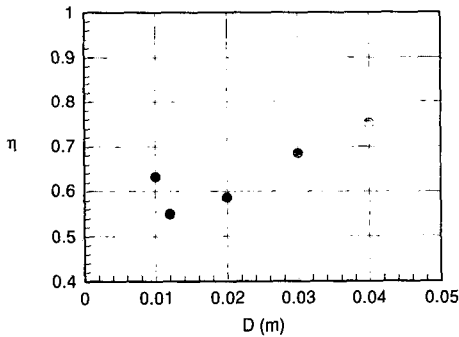


Fig. 6 Efficiency of deposition with different diameters for two layered cylinder ($U_j=2$ m/s, $T_j=2273$ K, $T_a=300$ K, $W=0.015$ m, $h=80$ W/m²K, $V_t=0.001$ m/s, $\Omega=60$ rpm, $S/R_o=3.33$, $\epsilon=0.85$)

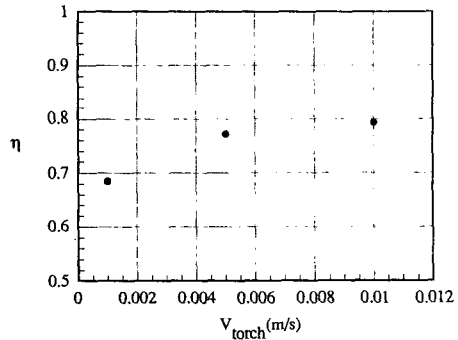


Fig. 8 Efficiency of deposition with different torch speeds for two layered cylinder ($U_j=2$ m/s, $T_j=2273$ K, $T_a=300$ K, $W=0.015$ m, $h=80$ W/m² K, $t=0.01$ m/s, $\Omega=60$ rpm, $S/R_o=3.33$, $\epsilon=0.85$, $R_o=0.015$ m)

열영동속도의 감소가 지배적이기 때문이다. $t=0.005$ m 이상의 증가에는 표면의 온도가 감소함에도 불구하고 열영동속도가 감소하고 있음을 보여주고 있는데 이의 주된 원인은 온도가 감소함에 따른 동점성계수의 감소가 지배적이기 때문이다. Fig. 5는 식 (15)에 정의된 단위면적당 무차원화된 입자부착률 J 를 도시한 것인데 열영동속도 분포와 마찬가지로 두께가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며 유동박리점을 지나서 재순환영역에서 입자부착량은 거의 없는 것으로 나타나 있다.

Fig. 6는 이중봉의 직경이 증가함에 따른 입자부착효율의 변화를 보여주고 있다 모방만 있는 경우 즉 $D=0.01$ m 인 경우의 부착효율이 부착층의 두께가 0.005 m 인 경우, 즉 $D=0.02$ m 인 경우보다

높은 효율을 나타내는데 그 이유는 낮은 봉 벽온도로 인하여 열영동속도가 커지기 때문이며 입자부착층이 형성된 경우 직경이 커질수록 입자부착효율은 증가하고 있는데 이는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 입자부착률은 감소하나 직경의 증가로 인한 입자부착면적의 증가가 원인이며 Bautista et al.⁽⁹⁾과 Graham과 Alam⁽¹⁰⁾의 결과도 같은 경향을 보이고 있다.

3.2 토치이송속도의 영향

토치의 이송속도가 증가하면 축방향 열전달량이 증가하여 봉의 평균온도가 감소하게 된다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 토치이송속도가 커질수록 이중봉의 표면온도가 낮아지며 이에 반비례하는 열영동

속도는 증가하게 된다. 표면온도의 큰 변화는 OVD 공정에서의 토치이송속도의 조절이 전체적인 생산성 결정에 중요한 역할을 하리라는 것을 보여 주며 본 연구에서 사용한 모델은 이러한 토치속도의 영향을 고려할 수 있다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 토치이송속도가 0.001 m/s에서 0.01 m/s로 증가하였을 때 부착효율은 약 10% 증가하였음을 알 수 있으며 토치이송속도가 증가할수록 입자부착효율의 증분은 감소하는 경향을 보이고 있다. 토치이송속도의 증가에 따라 이중봉 표면온도가 감소되고 증착효율이 증가하지만 낮은 표면온도는 표면에서의 입자의 부착정도에 영향을 주며 화학증착 후의 후속 공정인 소결에도 영향을 미칠 것으로 사려 되어 표면온도의 감소에는 한계가 있을 것으로 생각된다.

3.3 원봉 회전 방향

기존의 연구에서는 원봉의 표면에서 원주방향으로 균일한 온도를 가정하여 해석하였으나 본 연구에서는 표면온도의 계산을 수행하여 예측할 수 있다. 이는 이중봉에서의 열전도를 주위 가스유동의 열전달과 함께 고려하였기 때문이며 토치의 운전 조건(예를 들면 토치이송속도, 토치 표면에서의 가스 제트속도 및 온도 등)이 주어지면 표면온도를 구할 수 있다. Fig. 9는 여러가지 다른 회전속도에 대하여 원주방향으로의 이중봉의 표면온도의 분포를 보여주고 있으며 $\Omega=0$ rpm일 때 표면온도는 원주방향으로 큰 변화를 보여주고 있다. 회전속도가

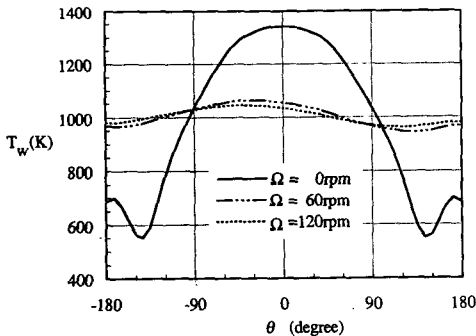


Fig. 9 Wall temperature distribution with respect to the angular direction for different rotational speeds of two layered cylinder ($U_j=2$ m/s, $T_j=2273$ K, $T_a=300$ K, $W=0.015$ m, $h=80$ W/m²K, $t=0.01$ m, $V_t=0.001$ m/s, $S/R_o=3.33$, $\epsilon=0.85$, $R_o=0.015$ m)

증가할수록 최대 온도가 떨어지고 원주방향으로 더욱 균일한 분포를 보이고 있으나 $\Omega=60$ rpm일 경우에도 최고 온도와 최저 온도의 차가 약 100 K 정도임을 알 수 있다. Fig. 10은 입자부착률 J 에 미치는 원봉의 회전속도의 영향을 도시한 결과로서 이중봉이 정지된 경우가 회전하는 경우보다 대체로 낮은 분포를 보이는데 이는 입자가 주로 부착되는 지점인 정체점 근방의 표면온도가 원봉이 회전하지 않는 경우 높아져 그 구간의 열영동속도가 작아지기 때문이다. Fig. 11에 나타나있는 입자부착효율도 봉이 정지해 있는 경우보다 회전하는 경우 증가하며 $\Omega=60$ rpm과 $\Omega=120$ rpm의 효율은 거의 같음을 알 수 있다.

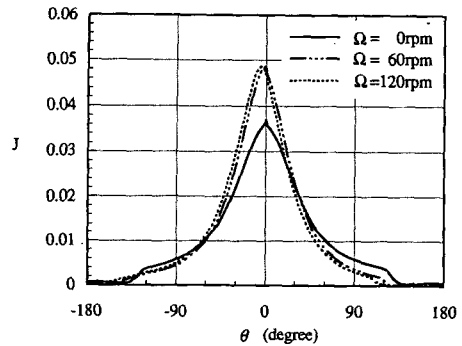


Fig. 10 Distribution of deposition rate with respect to the angular direction for different rotational speeds of two layered cylinder ($U_j=2$ m/s, $T_j=2273$ K, $T_a=300$ K, $W=0.015$ m, $h=80$ W/m²K, $t=0.01$ m, $V_t=0.001$ m/s, $S/R_o=3.33$, $\epsilon=0.85$, $R_o=0.015$ m)

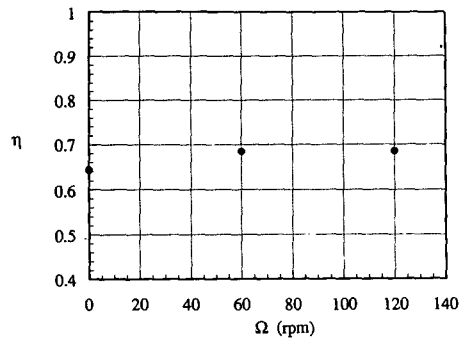


Fig. 11 Efficiency of deposition with different rotational speeds for two layered cylinder ($U_j=2$ m/s, $T_j=2273$ K, $T_a=300$ K, $W=0.015$ m, $h=80$ W/m²K, $t=0.01$ m, $V_t=0.001$ m/s, $S/R_o=3.33$, $\epsilon=0.85$, $R_o=0.015$ m)

4. 결 론

외부증착공정에 대한 열전달과 입자부착에 관한 해석을 수치적으로 수행하였다. 입자부착으로 인하여 형성된 입자부착층 및 토치이송의 영향을 고려한 모델을 사용하였으며 입자부착층의 두께, 토치이송속도, 붕의 회전속도가 입자부착에 미치는 영향이 주된 관심거리이고 다음과 같은 결론을 유추해낼 수 있었다.

(1) 입자부착층의 두께가 증가하여 이중붕의 직경이 커지면 초기의 작은 입자부착층 두께의 증가에는 이중붕 표면온도가 부착층의 낮은 열전도도로 인하여 증가하나 어느정도 이상의 두께 증가에는 이중붕의 열용량이 증가하여 표면온도가 감소하게 되며 동점성계수의 감소로 열영동속도도 감소된다. 따라서 단위면적당 입자부착률 J 는 감소하게 되지만 원붕의 표면적이 늘어나므로 입자부착효율 η 는 증가한다.

(2) 토치이송속도의 증가는 이중붕 표면온도를 감소시켜 열영동속도의 증가를 가져오고 따라서 입자부착률이 커져 입자부착효율을 증가시킨다.

(3) 붕이 정지해 있는 경우보다 회전하는 경우에 입자부착효율은 약 4%정도 증가하였으며 $\Omega=60$ rpm과 $\Omega=120$ rpm의 두 경우에 입자 부착효율은 거의 같다.

후 기

본 연구에 많은 조언을 해주신 생산기술연구원의 백운출 박사께 감사사를 드린다.

참고문헌

- (1) Nage, I. S. R., MacChesney, J. B. and Walker K. L., 1982, "An Overview of Modified Chemical Vapor Deposition Process and Performance," IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-18, No. 4, pp. 459~476.
- (2) Vandewoestine, R. V. and Morrow, A. J., 1986, "Developments in Optical Waveguide Fabrication by the Outside Vapor Deposition Process," J. of Lightwave Technology Vol. LT-4 No. 8, pp. 1020~1025.
- (3) Blankenship, M. G. and Deneka, C. W., 1982, "The Outside Vapor Deposition Method of Fabricating Optical Waveguide Fibers," IEEE J. of Quantum Electronics Vol. QE-18, No. 10, pp. 1418~1423.
- (4) Talbot, L., Cheng, D. K., Schefer, R. W. and Willis, D. R., 1980, "Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer," J. of Fluid Mechanics, Vol. 101 pp. 737~758.
- (5) Homsy, G. M., Geyling, F. T. and Walker, K. L., 1981, "Blasius Series for Thermophoretic Deposition of Small Particles," J. of Colloid and Interface Sci., Vol. 83, No. 2, pp. 495~501.
- (6) Batchelor, G. K. and Shen, C., 1985, "Thermophoretic Deposition of Particles in Gas Flowing over Cold Surface," J. of Colloid and Interface Sci. Vol. 107, No. 1, pp. 21~37.
- (7) Garg, V. K. and Jayaraj, 1990, "Thermophoretic Deposition Over a Cylinder," Int. J. of Eng. Fluid Mech., Vol. 3, No. 2, pp. 175~196.
- (8) Alam, M. K., Graham, G., Janakiaman, V. and Greaves, J., 1990, "Numerical Analysis of Thermophoretic Transport in the OVD Process," HTD-Vol. 130, Numerical Heat Transfer, ASME, pp. 67~72.
- (9) Bautista, J. R., Walker K. L. and Atkins R. M., Feb. 1990, "Modeling Heat and Mass Transfer in Optical Waveguide Manufacture," J. of Chemical Engineering Process pp. 47~52.
- (10) Graham, G. M. and Alam, M. K., 1991, "Experimental Study of the Outside Vapor Deposition Process," J. of Aerosol Science and Technology, Vol. 15, pp. 69~76.
- (11) Kang, S. H. and Greif, R., 1992, "Flow and Heat Transfer to a Circular Cylinder with a Hot Impinging Air Jet," International J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 35, pp. 2173~2183.
- (12) Kang, S. H. and Greif, R., 1993, Thermophoretic Transport in the Outside Vapor Deposition Process, International J. of Heat and Mass Transfer, in press.
- (13) Thompson, J. F., Warsi, Z. A. and Mastia C. W., 1985, "Numerical Grid Generation, Foundations and Applications," North-Holland, New

- York.
- (14) Schuh, M. J., 1987, "Numerical Prediction of Fluid and Particle Motions in Flows Past Tubes," Ph. D. Thesis University of California, Berkely.
- (15) Rosner, D. E., 1986, "Transport Processes in Chemically Reacting Flow Systems," Butterworths, Boston, p. 314.
- (16) Progelhof, R. C., Throne, J. L. and Ruetsch, R. R., 1976, "Methods for Predicting the Thermal Conductivity of Composite Systems ; A Review," Polymer Engineering and Science, Vol. 16, pp. 615~625.
- (17) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere Publishing, New York.
- (18) 송영휘, 1993, "Outside Vapor Deposition 공정에서의 열전달과 입자부착에 관한 연구," 서울대학교 석사학위논문.