

〈논 문〉

외부증착공정에서의 열영동에 의한 입자부착에 관한 3차원 해석

홍 기 혁* · 강 신 형**

(1996년 9월 13일 접수)

Three-Dimensional Analysis of the Thermophoretic Particle Deposition in the OVD Process

K. H. Hong and S. H. Kang

Key Words : Circular Cylinder (원형실린더), Finite Volume Method (유한체적법), Hot Impinging Laminar Jet (충돌하는 고온의 층류제트), Thermophoretic Particle Deposition (열영동 입자 부착), Three-dimensional Flow (3차원 유동)

Abstract

Three-dimensional conjugate heat transfer and particle deposition on a circular cylinder in the OVD process are numerically investigated. Flow and temperature fields are obtained by an iterative method, and thermophoretic particle deposition is simulated. Effects of the heat conduction in the cylinder, the rotation speed of the cylinder, and the traversing speed of torch on the deposition are studied. Effects of variable properties are also included. As the conductivity of the cylinder decreases, particle deposition rate and deposition efficiency greatly decrease due to the reduced temperature gradient. The rotation of the cylinder has no significant effect on the deposition due to the small diameter of the cylinder and low speed of rotation. Since the increase of the torch speed keeps the surface low temperature, the particle deposition increases with the traversing speed.

기 호 설 명

<p>C : 수농도 [particles/cm³]</p> <p>c_p : 정압비열</p> <p>D : 실린더의 직경</p> <p>d_p : 입자의 직경</p> <p>g, g_v : Jacobian의 제곱, 중력가속도</p> <p>Gr : Grashof 수 [= $g\beta(T_{jet} - T_{amb})D^3/\nu^2_{amb}$]</p> <p>$H$: 실린더 중심으로부터 제트까지의 거리</p> <p>h : 열전달계수 [= $-k_w(dT/dr)_w / (T_{jet} - T_{amb})$]</p>	<p>J : 무차원 입자 부착률 [= $v_{th,w}C_w/U_{jet}C_{jet}$]</p> <p>$K$: 열영동계수</p> <p>k : 열전도계수</p> <p>Nu : Nusselt 수 [= hD/k_{jet}]</p> <p>R : 실린더의 반경</p> <p>R_{jet} : 원형제트의 반경</p> <p>Re : Reynolds 수 [= $U_{jet}D/\nu_{jet}$]</p> <p>T : 절대온도</p> <p>U_{jet} : 출구의 제트 속도</p> <p>U^i : 반변 속도성분</p> <p>v_{th} : 열영동속도 [= $-K\nabla T/T$]</p> <p>V_{torch} : 토치의 이송 속도</p>
---	--

*회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

**회원, 서울대학교 공과 대학 기계공학과

u, v, w	: x, y, z 방향 속도성분
β	: 체적 팽창계수
η	: 입자 부착 효율
μ	: 점성계수
ν	: 동점성계수
ξ^i	: 일반좌표계 [$\xi^1 = \xi, \xi^2 = \eta, \xi^3 = \zeta$]
ρ	: 밀도
Ω	: 실린더의 회전 속도

하첨자

amb	: 주위 (ambient)
jet	: 제트 출구에서의 값
wall	: 벽면에서의 값

1. 서 론

외부증착(Outside Vapor Deposition)공정은 현재 사용되는 광섬유(optical fiber) 제조공정 중의 하나로서 토치로부터 분사된 연료인 H_2, O_2 등이 연소하여 이들과 함께 생성 분출된 $SiCl_4, GeCl_4$ 등의 산화 및 가수분해에 의해 발생한 SiO_2, GeO_2 등의 입자를 회전하는 실린더에 부착시키는 공정이다. 이때 SiO_2, GeO_2 등은 충돌, 응집 등의 과정을 거쳐 직경 $0.2\mu m$ 정도의 입자가 되며 회전하는 모재에 부착된다.

OVD 공정에서의 입자 부착은 일반적으로 원형의 토치에서 분사되는 미세한 SiO_2 등의 입자 및 고온의 공기가 제트 유동 형태로 상대적으로 차가운 실린더에 충돌함으로써 이루어지는데 입자가 실린더에 부착되는 주요한 메커니즘은 열영동(thermophoresis)으로 알려져 있다. 열영동에 의한 입자 부착은 유동 및 온도장에 의해 결정되며 유동장과 온도장 또한 실린더의 온도에 따라 달라진다. 실제의 3차원 OVD 공정에서는 실린더 및 실린더에 부착된 입자층의 내부 열전도에 의해 실린더 벽면 온도는 축방향 및 원주방향으로 변화한다. 그러나 원형실린더에 충돌하는 제트의 경우에 대한 기존의 연구들은 대부분 2차원 유동의 경우에 한하였으며 실린더의 온도도 일정한 온도로 가정하였기 때문에 실제의 공정에 유용한 자료를 제공하기는 어려운 실정이다. 따라서 본 연구는 실제의 공정과 비슷한 조건하에서의 입자 부착을 해석하기 위한 일련의 연구로서 수행되었다.

먼저 3차원 유동 및 열전달의 특성을 연구하기 위하여 실린더의 벽면을 일정한 온도로 가정하여

기존의 2차원 유동에 대한 결과와 비교하였으며 제트 크기의 영향, 제트 출구 속도 및 실린더의 회전이 실린더 표면에서의 열전달에 미치는 영향을 살펴 보았다.⁽¹⁾ 3차원 유동의 경우 재순환 영역의 유동 및 열전달 특성이 2차원의 경우와 상당히 다르며 제트의 크기 및 제트 출구의 속도는 제트의 주위 공기로의 열손실량을 결정하므로 실린더 표면에서의 열전달에 큰 영향을 주게 된다. 실린더의 회전은 실린더의 원주 속도가 제트 출구의 유속에 비해 상대적으로 작기 때문에 유동 및 열전달에 미치는 영향이 작게 나타났다.

OVD 공정에서는 실린더 및 입자층의 내부 열전도에 의해 입자가 부착되는 표면 온도는 축방향 및 원주 방향으로 변화하게 되는데 이와 같은 벽면의 온도 변화가 유동 및 열전달에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되었다.⁽²⁾ 실린더 및 실린더에 부착된 입자층 내부의 열전도 해석을 통하여 실린더 벽면의 온도 변화가 유동, 열전달에 미치는 영향을 실린더의 벽면 온도가 일정한 경우⁽¹⁾와 비교 분석하였다. 입자층의 열전도계수는 실린더의 열전도계수에 비해 매우 작으므로 실린더 주위에 입자가 부착되면 외부 유동과 실린더 내부 사이의 열저항이 증가하게 되어 입자가 부착하게 되는 표면의 온도 및 온도 구배가 달라져서 열영동에 의한 입자 부착에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 실린더의 열전도율이 낮아질수록 실린더의 축방향의 열전도가 감소하기 때문에 누셀트수가 작아지며 토치의 이송 속도가 증가하면 축방향의 열전달량이 증가하여 실린더 표면의 온도는 낮아지게 된다. 그러므로 토치의 이송이 빠를수록 열경계층의 두께가 감소하며 온도 구배의 증가로 인해 실린더 표면에서의 열전달이 증가함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 위와 같은 유동 및 열전달에 관한 선행 연구^(1,2)를 기초로 하여 실린더 외부의 유동장 및 온도장 그리고 이와 연계된 실린더 내부의 열전도 해석을 통해 입자의 부착층, 실린더의 회전 및 토치의 이송이 실린더의 표면에서의 입자 부착과 부착효율에 미치는 영향을 수치해석적으로 연구하였다.

2. 지배방정식 및 수치 해석 방법

2.1 지배방정식

원형실린더와 여기에 수직 하방에서 분사하는 원

형제트를 Fig. 1에 나타내었다. 제트의 축방향을 x , 실린더의 축방향을 z 라 하고 $x-z$ 평면에 수직 한 방향을 y 로 하였다. 정상 상태의 층류 비압축 성 유동에 대한 임의의 곡선좌표계에서의 연속방정식, x, y, z 방향의 운동량 방정식, 에너지방정식은 각각 다음과 같다.

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

$$\begin{aligned} & [\sqrt{g}(\rho U^i u - \mu g^{ij} u_{\xi^j})]_{\xi^i} + p_x \\ & - \sqrt{g} g_v (\rho - \rho_a) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$[\sqrt{g}(\rho U^i w - \mu g^{ij} w_{\xi^j})]_{\xi^i} + p_z = 0 \quad (4)$$

$$[\sqrt{g}(\rho c_p U^i T - k g^{ij} T_{\xi^j})]_{\xi^i} = 0 \quad (5)$$

여기서 $\xi^i = \xi, \xi^2 = \eta, \xi^3 = \zeta, U^i = \vec{a} \cdot (\vec{u} + \vec{v} + u\vec{k}), \vec{a} = \nabla \xi^i, g^{ij} = \vec{a}^i \cdot \vec{a}^j$ 이다. 본 연구에서는 복사열전달의 효과는 무시하였으며⁽³⁾ Re 수와 Ma 수가 작으므로 압력에 의한 일과 점성소산항 역시 무시하였다. 유체는 공기이며 밀도, 열전도계수 및 점성계수는 온도의 함수로 주었다.⁽⁴⁾ 한편 실린더 내부에서의 열전도방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & = \frac{\Omega}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{V_{torch}}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 Ω, V_{torch} 는 각각 실린더의 회전 속도 및 토치의 이송 속도이다. 식 (6)에서 입자가 부착된 실린더의 열확산계수 α 는 1000K에서의 값을 사용하였다.⁽⁵⁾ 유동은 Re 수가 1000 이하이므로 전영역에서 정상층류로 가정하였다[Tennekes and Lumley⁽⁶⁾]. 입자 농도에 관한 지배방정식은 입자의 확산계수가 작아서 브라운운동에 의한 확산은 무시할 수 있으므로 다음과 같이 주어진다.^(7,8)

$$[\sqrt{g} U^i_{eff} C]_{\xi^i} = 0 \quad (7)$$

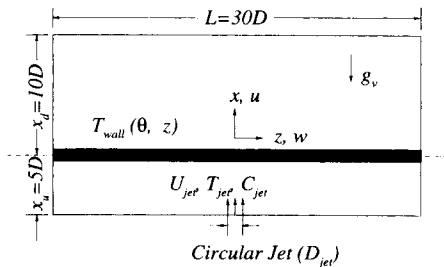


Fig. 1 Schematic diagram of flow configuration ($x-z$ plane).

여기서 U_{eff} 는 유속과 열영동 속도를 중첩한 속도이며 열영동 속도는 다음 식으로 주어진다.

$$v_{th} = -K \frac{\nu}{T} \nabla T \quad (8)$$

여기서 K 는 열영동계수이고 Knudsen 수 및 기체와 입자의 열전도계수 비의 함수이나 본 연구에서는 0.8로 가정하였다.^(9,10)

2.2 경계 조건

직경 D 인 실린더는 제트로부터 5D 만큼 수직 상방에 위치하고 있으며 실린더 후류 쪽의 계산 영역은 실린더 직경의 10배, 실린더의 길이는 실린더 직경의 30배로 하였다. 경계 조건은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 실린더 벽면에서는 점착조건을 기본으로 주었으며 실린더가 회전하는 경우에는 원주 방향의 속도를 $R\Omega$ 로, 토치의 이송이 있는 경우에는 실린더의 축방향의 속도를 이송의 반대 방향으로 주었다($w = -V_{torch}$). 실린더 표면에서 충분히 떨어진 외부 경계 C'-D', C-D에서는 유인되는 수평 방향(y), 축방향(z) 속도 성분 및 온도의 y 에 대한 1차 미분을 0으로 하였고, 수직 방향(x)의 속도 성분에 대해서는 y 에 대한 2차 미분을 0으로 주었다. 상류(D-E, E'-D')의 경계 조건으로는 유인되는 유동이 평행하다고 가정하였다. 한편 하류의 출구 조건으로는 각 변수(u, v, w, T, C)에 대하여 x 방향의 2차 미분을 0으로 하였으며 실린더의 축방향으로는 z 에 대한 1차 미분항이 0이 되도록 하였다. 제트의 출구(E-E')에서는 균일한 속도($u = U_{jet}, v = 0$) 및 온도 조건(T_{jet})을 주었으며 입자의 농도는 원형 제트의 반경 방향의 함수로서 다음 식과 같이 가우스 분포⁽¹²⁾를 가정하였다.

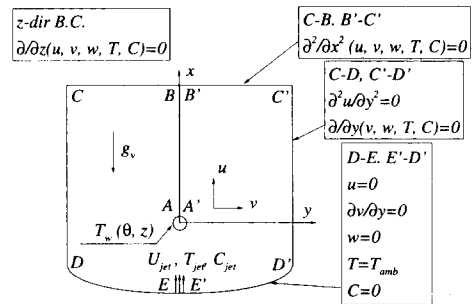


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions.

$$C_{jet}(r) = C_{jet,max} \exp[-\ln^2(r/R_c)^2] \quad (9)$$

여기서 R_c 는 입자의 농도가 $C_{jet,max}/2$ 이 되는 위치이다. 한편 실린더 외부유동과 내부의 열전도방정식은 서로 연계되어 반복적으로 풀게 되는데 이때 실린더 표면에서의 경계 조건은 다음과 같다. 즉 실린더 표면 온도가 주어진 상태에서 구해지는 외부의 온도장으로부터 실린더 벽면에서의 열 유속이 정해지고, 열유속 조건은 열전도방정식의 경계조건이 되어 실린더 표면의 온도를 구하게 되며 이 표면 온도는 다시 외부 유동을 푸는데 경계 조건으로 사용하게 된다.

2.3 입자 부착률 및 부착 효율

OVD 공정에서 입자는 알루미늄과 같은 모봉에 부착되는데, 이때 입자의 부착 성능특성은 입자부착률 (deposition rate), 입자 부착 효율 (deposition efficiency) 및 부착된 입자의 다공성도 (porosity) 등에 의해 판단한다. 입자의 부착률은 표면에서의 입자농도와 법선 방향 성분의 열영동 속도의 곱으로서 토치 출구의 입자 플럭스로 무차원화시키면 다음과 같이 표현된다.

$$J = \frac{v_{th,w} C_w}{U_{jet} C_{jet}} \quad (10)$$

입자 부착 효율은 분출된 SiO_2 의 질량에 대한 부착된 SiO_2 의 질량비로서 식 (11)로 정의된다.

$$\eta = \frac{\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-\pi}^{\pi} v_{th,w} C_w R d\theta dz}{\int_0^{R_{jet}} \int_{-\pi}^{\pi} U_{jet} C_{jet} r d\theta dr} \quad (11)$$

한편, 부착된 입자는 다공층을 이루게 되는데 부착층의 다공도는 입자 부착 후의 과정인 소결 (sintering)공정의 공정 시간, 소결 후의 모재 내부에서의 기포 발생 및 균열 등에 영향을 미치게 된다.⁽¹²⁾ 다공성도는 완전히 소결된 SiO_2 (fused silica)의 밀도에 대한 부착층의 밀도비로부터 다음과 같이 구해진다.

$$porosity = 1 - \frac{\rho_{SiO_2, deposit}}{\rho_{SiO_2, fused}} \quad (12)$$

2.4 수치 해석 방법

실린더 주위의 유동 및 열전달에 큰 영향을 미치는 정체점 부근의 정확한 해석을 위하여 C 형태의 격자계 ($\xi \times \eta \times \zeta = 91 \times 41 \times 31 = 115661$)를 채택하여

유한체적법으로 계산하였다. 여러 가지 격자계에 대하여 계산을 수행하여 격자의 수에 따른 영향을 조사하였다.^(1,2) 실린더 내부의 열전도에 대한 계산 ($r \times \theta \times z = 51 \times 20 \times 11$)의 결과는 푸리에 변환 (Fourier transform)에 의한 해석해와 비교할 때 상당히 정확하였다.⁽¹³⁾

수치계산에서 대류항은 레이놀즈수가 크지 않으므로 HYBRID 방법을 사용하였으며⁽¹⁴⁾ 압력항의 계산은 SIMPLE [Patankar⁽¹⁵⁾] 알고리즘이 사용되었다. 운동량 및 에너지방정식은 MSI⁽¹⁶⁾[Modified Strongly Implicit], 압력의 경우에는 CGS⁽¹⁷⁾[Conjugate Gradient Solver]를 사용하여 수치해석하였다.

3. 결과 및 검토

OVD 공정에서 주요 변수로는 먼저 각속도 Ω 로 회전 또는 정지하고 있는 실린더의 반경 R , 토치와 실린더 중심간의 거리 H , 제트의 반경 R_{jet} , 제트의 출구 속도 H_{jet} , 제트의 온도 T_{jet} , 실린더의 벽면 온도 T_{wall} , 주위 공기의 온도 T_{amb} 및 제트 출구에서의 입자 농도 C_{jet} 등이다. 선행 연구^(4,2)에서는 실린더의 표면 온도가 일정한 경우와 축방향 및 원주 방향의 온도가 변하는 경우에 대해 3차원 효과, 레이놀즈수, 입자 부착층 및 토치 이송 속도가 유동 및 열전달에 미치는 영향 등에 대해 살펴본 바가 있다. 여기서는 실린더의 열전도계수, 실린더의 회전 및 토치의 이송 속도 등이 입자의 부착에 미치는 영향에 대해서 연구를 수행하였다. 사용된 무차원 변수들은 다음과 같으며 계산에서 사용된 기본 변수량은 굵게 표시하였다.

$$\begin{aligned} Re &= U_{jet} D / \nu_{jet} = 213, \quad Gr / Re^2 = 40, \\ R_{jet} / R &= 1.2, \quad H / R = 10.0, \\ k_{cylinder} &= 0.7, 2.87, 7.85 \text{ W/mK}, \\ \Omega &= 0, 30, 60, 120 \text{ rpm}, \\ V_{torch} &= 0, 1.0, 10.0 \text{ cm/min} \end{aligned}$$

이러한 변수에서 사용되는 점성계수 ν_{jet} , ν_{amb} 는 각각 제트의 출구 온도, $T_{jet} = 2000K$, 주위 공기의 온도, $T_{amb} = 300K$ 에서의 값을 사용하였다.

3.1 입자 부착층의 영향 (실린더 열전도계수의 영향)

부착된 입자층의 열전도계수는 다공성도에 따라

달라지는데 fused 실리카의 경우 1000K에서 2.87 W/mK 이고 다공도가 0.85인 경우 열전도계수는 0.1005 W/mK 로서 본 연구에서 사용한 알루미늄 실린더의 열전도계수인 7.85 W/mK 보다 매우 낮다. 실린더의 열전도율이 알루미늄과 같이 클 때에는 선행 연구^(2,13)에서 보고된 바와 같이 대부분의 열전달이 일어나는 실린더의 중심 단면 근처에서는 실린더 표면의 온도를 일정하다고 가정한 경우와 실린더 내부의 열전도를 고려하여 표면의 온도를 구하여 해석한 경우의 누셀트수는 큰 차이가 없다. 그러나 다공성 실리카와 같이 열전도율이 작은 경우에는 중심 단면 근처의 실린더 표면 온도가 높아지고 온도 구배는 작아지기 때문에 누셀트수는 열전도율이 큰 경우에 비해 상당히 작아진다. 따라서 실린더의 열전도계수가 입자의 부착에 미치는 영향도 증대된다.

Fig. 3에는 토치의 이송 및 회전이 없는 경우에 대하여 실린더의 열전도율 k_{cyl} 이 7.85, 2.87, 0.70로 낮아짐에 따라 제트가 충돌하는 중심 단면의 정체점($\theta=0^\circ$)과 실린더 뒤쪽 정체점($\theta=180^\circ$)에서의 실린더 표면의 온도 변화를 나타내었다. 중심 단면($z/R=0.0$)에서는 열전도율이 낮아질수록 실린더 내부의 전도에 의한 열전달이 감소하여 중심 단면에서 실린더 원주 방향의 온도차가 커진다. 즉, 제트가 충돌하는 중심 단면의 정체점과 실린더의 재순환 영역의 뒤쪽 정체점의 온도차는 k_{cyl} 이 7.85, 2.87, 0.70로 낮아짐에 따라 각각 80, 170, 400 K로 커지게 된다. 한편, 실린더의 열전도율이 축 방향의 온도분포에 미치는 영향은 원주 방향에 비해 더욱 커져서 전도율이 낮은 경우($k_{cyl}=0.7$)의 실린더 중심과 끝의 온도차는 1000~1500K로서 열전도율이 높은 경우($k_{cyl}=7.85$)의 온도차인 약 600

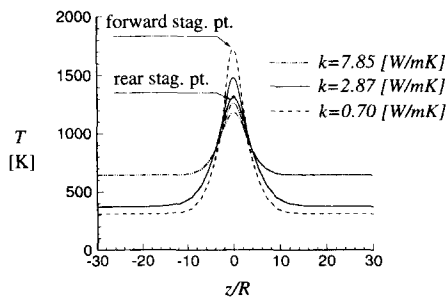


Fig. 3 Effect of thermal conductivity of the cylinder on the distribution of axial surface temperature at forward and rear stagnation points.

K에 비해 더욱 커짐을 보여준다. 즉, 실린더의 열전도율이 낮아질수록 실린더의 중심단면의 온도는 고온의 제트 온도에 가까워지고 실린더의 끝단은 대기의 온도에 점차 가까워진다.

실린더 표면에서의 압력 및 마찰계수 역시 큰 차이를 보이지는 않으나 벽면 근처의 누셀트수(Fig. 4)는 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 실린더의 중심단면 근처에서는 실린더의 열전도율이 낮아질수록 벽면의 온도가 상대적으로 높아지고, 실린더와 주위 공간에 온도차가 커진다. 또 점성계수가 증가함에 따라 열경계층 두께가 증가하고 온도 구배의 감소 때문에 누셀트수가 작아지며 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 열영동 속도 및 입자의 부착률도 작아진다. Fig. 7에는 $R/R_{jet}=1.2$ 의 경우에 대하여 원주 방향으로 평균된 입자 부착률 \bar{f} 의 변화를 나타내었다.

대부분의 입자는 실린더의 중심 단면 근처인

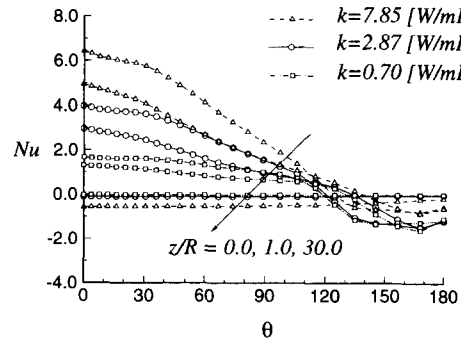


Fig. 4 Effect of thermal conductivity of the cylinder on the distribution of local Nusselt number over the cylinder surface for different axial locations of the cylinder.

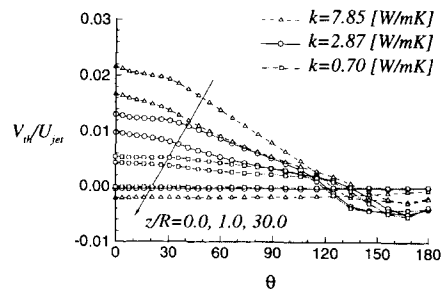


Fig. 5 Effect of thermal conductivity of the cylinder on the distribution of thermophoretic velocity over the cylinder surface for different axial locations of the cylinder.

$-2.0 < z/R < 2.0$ 에서 부착되고 있으며 열전도율이 낮아짐에 따라 표면의 온도가 상승하여 입자의 평균 부착률도 작아지고 있다. 이것은 입자의 부착이 진행될수록 입자의 부착률이 저하됨을 의미한다.

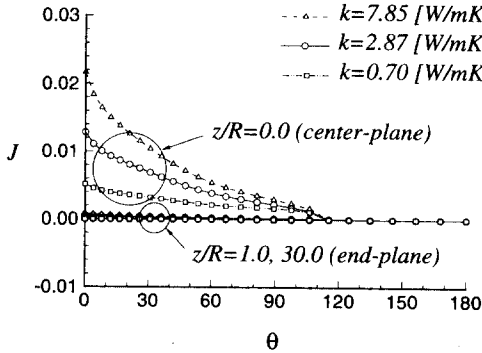


Fig. 6 Effect of thermal conductivity of the cylinder on the distribution of local particle flux over the cylinder surface for different axial locations of the cylinder.

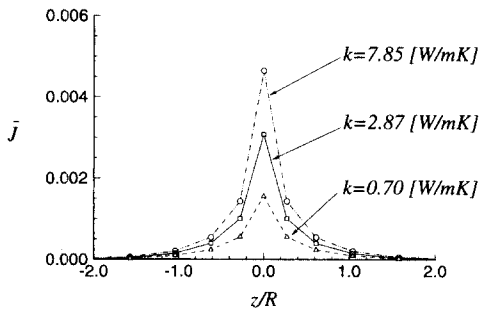


Fig. 7 Effect of thermal conductivity of the cylinder on the axial distribution of circumferentially averaged particle flux over the cylinder surface.

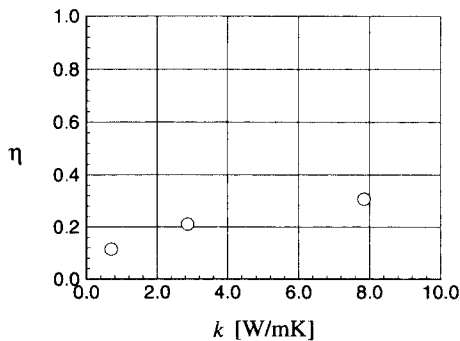


Fig. 8 Effect of thermal conductivity of the cylinder on the deposition efficiency.

입자의 부착 효율의 변화를 Fig. 8에 나타내었는데 실린더의 열전도계수가 낮아짐에 따라 부착 효율도 감소한다. 2차원의 경우와 비교해 볼 때 부착 효율이 매우 작은데 3차원의 경우에는 정체점 상류에서 실린더의 축방향 유동으로 인해 실린더 표면에서의 입자 농도가 작기 때문이다.⁽¹³⁾

3.2 실린더 회전 속도의 영향

입자를 실린더 주위에 균일하게 부착시키기 위해 실제의 공정에서는 실린더를 회전시키게 된다. 실린더의 물성치는 1000K에서의 fused 실리카의 물성치($k=2.87 \text{ W/mK}$, $c_p=1155 \text{ J/kgK}$, $\rho=2220 \text{ kg/m}^3$)를 사용하였으며⁽⁶⁾ 기본 변수에 대해 계산한 결과⁽¹³⁾에 대해 논의해 보겠다.

회전하지 않는 경우에는 원주 방향의 온도차가 약 170K 정도이나 실린더를 회전시키기에 따라 원주 방향의 온도는 균일해진다. 그러나 본 연구에서 실린더의 회전은 재순환 영역 및 제트-후류 영역에는 영향을 주는 반면 상류 쪽 및 실린더 벽면에서의 마찰계수, 압력, 누설트수 및 입자의 부착률 등에는 거의 영향이 없다.⁽¹³⁾ 그 이유는 본 연구에서 실린더의 크기가 작고($R=1\text{cm}$) 제트 출구의 유속($U_{jet}=4\text{m/s}$)이 실린더의 원주 속도에 비해 상대적으로 크기 때문이다. 그러나 OVD 공정의 말기에 실린더의 직경이 큰 경우와 부착층의 열전도율이 매우 낮은 경우에는 원주 방향의 온도차가 커지기 때문에 회전의 효과는 중요하게 될 것으로 생각된다. 본 연구에서는 보다 다양한 변수의 변화에 대해서 고려하지 않았다.

3.3 토치의 이송 속도의 영향

OVD 공정에서는 서로 다른 성분의 입자를 여러 층으로 부착시켜 가면서 모재의 굴절률을 조절하게 되는데 이를 위해서는 토치의 반복적인 이송이 필요하다. 토치에서 나온 고온의 제트에 의해 가열되는 실린더 표면의 온도는 움직이고 있는 토치로부터 실린더 표면까지의 상대적인 거리에 의해 결정된다.⁽¹²⁾ 즉, 움직이는 토치에 고정된 좌표계를 사용하면 실린더 표면의 온도 및 실린더 주위의 온도장은 준정상상태로 볼 수 있게 된다. 토치의 이송은 실린더 축방향의 대류 열전달량을 증가시키기 때문에 실린더 표면의 온도가 이송이 없을 경우에 비해 크게 변하므로 유동 및 열전달에 상당한 영향을 미치게 된다. 여기서는 fused 실리카로 이루어

진 실린더 ($k_{cyl}=2.87 \text{ W/mK}$)의 경우에 대해 토치 이송의 영향을 살펴보았다.

토치의 이송 속도 V_{torch} 가 0, 1.0, 10.0cm/min로 변할 때의 실린더 앞뒷면의 정체점에서 실린더의 축방향에 따른 온도분포를 Fig. 9에 나타내었다. 토치의 이송이 없는 경우에는 고온 제트가 충돌하는 중심단면에서의 실린더 전면 정체점 ($\theta=0^\circ$)의 온도는 약 1500K, 실린더 뒷면의 정체점 ($\theta=180^\circ$) 온도는 1300K이며 실린더 끝단의 온도는 약 400K로서 실린더의 중심 단면과 비교할 때의 온도차는 대략 900~1100K 정도이며 중심 단면을 기준으로 하여 축방향의 온도 분포는 대칭이 된다. 그러나 토치의 이송 속도가 증가하면 축방향의 대류에 의한 열전달량이 증가하며 실린더 표면의 온도는 낮아지게 된다. 즉, 실린더 전면의 정체점 온도를 보면 토치의 이송 속도의 증가에 따라 약 1500, 1200, 600K로 현저하게 표면 온도가 낮아짐을 볼 수 있다.

이와 같이 토치의 이송은 실린더 표면의 온도를 저하시키기 때문에 유동 및 열전달에 큰 영향을 준다. 그러나 제트의 출구에서 실린더 전면의 정체점까지는 토치 이송의 효과가 매우 작으며 정체점 이후에 그 영향이 나타난다. 토치의 이송 속도의 증가에 따라 실린더 표면의 온도는 내려가서 열전도 계수는 작아지지만 열경계층은 얇아지게 된다. 이러한 열경계층 두께의 감소는 벽면 근처의 온도 구배를 크게 만들기 때문에 토치의 이송이 빠를수록 실린더 표면에서의 국소누셀트수 및 입자의 부착률

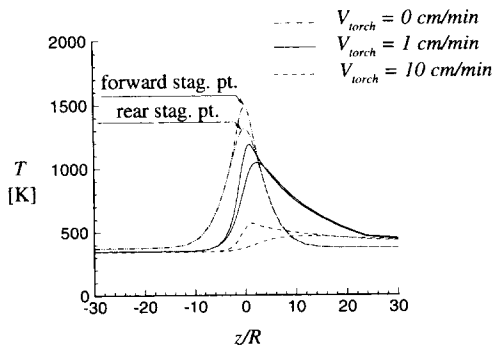


Fig. 9 Effect of traversing speed of torch on the distribution of axial surface temperature at forward stagnation point ($\theta=0^\circ$) and rear stagnation point ($\theta=180^\circ$) particle flux over the cylinder surface for different axial locations of cylinder .

(Fig. 10)이 크게 증가한다. Fig. 11에는 $R/R_{jet}=1.2$ 의 경우에 대하여 원주 방향으로 평균된 입자 부착률의 변화를 나타내었다. 대부분의 입자는 실린더의 중심 단면 근처인 $-2.0 < z/R < 2.0$ 에서 부

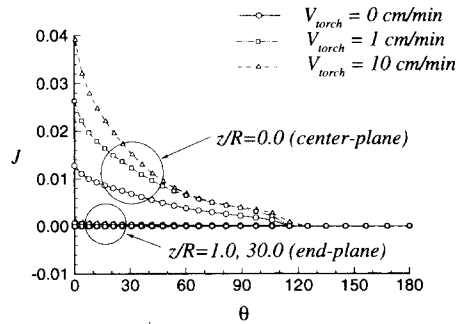


Fig. 10 Effect of traversing speed of torch on the distribution of local particle flux over the cylinder surface for different axial locations of the cylinder.

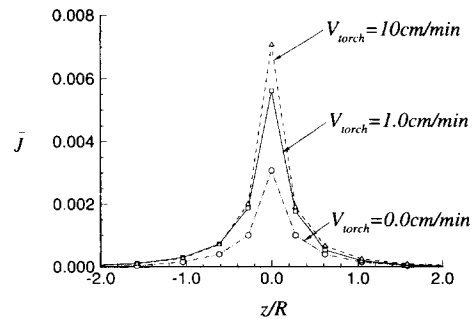


Fig. 11 Effect of traversing speed of torch on the axial distribution of circumferentially averaged particle flux over the cylinder surface.

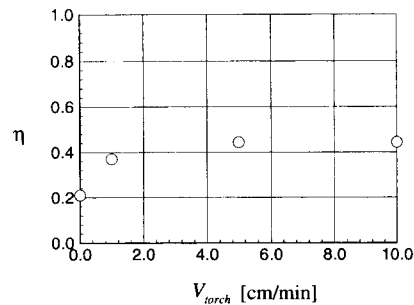


Fig. 12 Effect of traversing speed of torch on the deposition efficiency.

착되고, 실린더 끝에서는 표면 온도와 주위 공기의 온도차이가 작아서 열전달 및 입자의 부착은 거의 없다. 토치의 이송 속도가 0에서 10cm/min로 증가함에 따라 표면 온도가 감소하여 입자의 평균 부착률이 증가한다. 입자의 부착 효율의 변화를 Fig. 12에 나타내었는데 토치의 이송 속도가 10cm/min의 경우, 이송이 없을 때에 비해 부착 효율이 약 20% 정도 상승한다. 이와 같이 토치의 이송이 입자의 부착 성능에 미치는 영향이 매우 크다는 것은 입자의 부착 공정에서 토치 이송이 입자의 부착을 제어하는 데 효과적인 수단임을 의미한다. 그러나 이송 속도가 증가함에 따라 효율 상승의 증분이 점차 감소할뿐만 아니라 이송 속도의 증가에 의해 표면의 온도가 낮아지게 되어 입자 부착층의 다공성도가 커지기 때문에 소결공정 등에 영향을 미치므로 이송 속도에 의한 입자 부착의 제어에는 한계가 있다.

4. 결 론

OVD 공정에서의 입자 부착 특성에 대한 3차원 수치 해석을 통하여 연구하였다. 사용된 변수의 범위 내에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 실린더의 열전도율이 낮아질수록 실린더의 축방향의 열전도가 감소함으로써 고온의 제트가 충돌하는 중심단면의 온도는 높아지고 실린더 끝단의 온도는 낮아진다. 따라서 실린더의 열전도율이 낮아지면 실린더의 중심단면의 벽면 온도와 제트의 온도차가 감소하여 열경계층이 두꺼워지고 온도 구배가 감소하여 누셀트수 및 입자의 부착률이 작아지게 된다. 실린더의 끝단의 경우도 열전도율이 낮아짐에 따라 온도 구배가 작아져서 누셀트수 및 입자의 부착률이 감소하게 된다.

(2) 실린더의 원주 방향 속도가 제트 출구의 유속 보다 작기 때문에 실린더의 회전이 열전달 및 입자 부착에 미치는 영향은 실린더의 열전도계수 및 토치의 이송 속도 등에 비하여 상대적으로 작다.

(3) 토치의 이송 속도가 증가하면 축방향의 열전달량이 증가하여 실린더 표면의 온도가 낮아지게 된다. 그러므로 토치의 이송이 빠를수록 열경계층 두께가 감소하며 온도 구배의 증가로 인해 실린더 표면에서의 입자의 부착률 및 부착 효율은 증가된다.

참고문헌

- (1) 홍기혁, 강신형, 1996, "원형실린더에 충돌하는 고온 제트의 유동 및 열전달에 관한 3차원 해석," 대한기계학회논문집(심사중).
- (2) 홍기혁, 강신형, 1996, "비균일 벽면 온도가 원형실린더에 충돌하는 고온 제트의 유동 및 열전달에 미치는 영향," 대한기계학회논문집(심사중).
- (3) 이공훈, 1995, "비직교좌표계에서 유한체적법을 사용한 복사열전달 해석 및 입자 부착에 관한 연구," 서울대학교 대학원, 공학박사 학위논문.
- (4) Kang, S. H. and Greif, R., 1992, "Flow and Heat Transfer to a Circular Cylinder with a Hot Impinging Air Jet," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 2173~2183.
- (5) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1990, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons. Inc.
- (6) Tennekes, H. and Lumley, J. L., 1972, *A First Course in Turbulence*, Cambridge, MA : MIT Press.
- (7) Batchelor, G. K. and Shen, C., 1985, "Thermophoretic Deposition of Particles in Gas Flowing over Cold Surfaces," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 107(1), pp. 21~37.
- (8) Garg, V. K. and Jayaraj, S., 1990, "Thermophoretic Deposition over a Cylinder," *Int. J. Eng. Fluid Mechanics*, Vol. 3(2), pp. 175~196.
- (9) Choi, M., Song, Y. and Kang, S. H., 1995, "Conjugate Heat Transfer and Particle Transport in Outside Vapor Deposition Process," *Numer. Heat Transfer*, Vol. 28, pp. 39~54.
- (10) Bautista, J. R., Walker, K. L. and Aktins, R. M., 1990, "Modeling Heat and Mass Transfer in Optical Waveguide Manufacture," *Chemical Eng. Prog.*, pp. 47~52.
- (11) Talbot, L., Cheng, R. K., Schefer, R. W. and Willis, D. R., 1980, "Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, part 4, pp. 737~758.
- (12) 김재운, 1995, "외부증착공정에서 입자부착에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원, 공학석

- 사 학위논문.
- (13) 홍기혁, 1996, "실린더 주위의 열전달 및 열영동에 의한 입자 부착에 관한 연구," 서울대학교 대학원, 공학박사 학위논문.
- (14) Kang, S. H. and Greif, R., 1993, "Thermophoretic Transport in the Outside Vapor Deposition Process," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 1007~1018.
- (15) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York: Hemisphere Publishing.
- (16) Zedan, M. and Schneider, G. E., 1983, "A Three-dimensional Modified Strongly Implicit Procedure for Heat Conduction," *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 2, pp. 295~303.
- (17) Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., 1992, *Numerical Recipe*, New York, Cambridge Press.
- (18) Kim, K. S. and Pratsinis, S. E., 1988, "Manufacture of Optical Waveguide Preforms by Modified Chemical Deposition," *AIChE J.*, Vol. 34, pp. 912~920.
- (19) Tsai, H. C. and Greif, R., 1995, "Thermophoretic Transport for a Three-dimensional Reacting Flow Impinging on a Disk with Burner Misalignment," *Journal of Material Processing & Manufacturing Science*, Vol. 3, pp. 217~242.