

〈논 문〉

## 비균일 벽면 온도가 원형 실린더에 충돌하는 고온 제트 유동 및 열전달에 미치는 영향

홍 기 혁\* · 강 신 형\*\*

(1996년 9월 13일 접수)

### Non-Uniform Wall Temperature Effect on the Flow and Heat Transfer of a Hot Circular Air Jet Impinging on a Circular Cylinder

K.H. Hong and S.H. Kang

**Key Words :** Circular Cylinder(원형 실린더), Finite Volume Method(유한체적법), Hot Impinging Laminar Jet(충돌하는 고온의 층류 제트), Non-uniform Wall Temperature(비균일 벽면 온도), Three-Dimensional Flow(3차원 유동), Thermophoresis(열영동)

#### Abstract

A buoyant jet flow impinging on a circular cylinder is investigated including heat conduction through the cylinder. Temperature and flow fields are obtained by an iterative method, and the effects of the non-uniform wall temperature on the flow and heat transfer are analyzed. Effects of three-dimensionality and the traversing of the jet are also included. Nusselt number over the cylinder surface for the conjugate case is relatively small as compared with the constant wall temperature case due to the small temperature gradient. As the conductivity of the cylinder becomes lower, Nusselt number decreases due to the reduced temperature gradient. Increasing jet traversing speed causes the surface temperature of the cylinder to decrease, which increases local Nusselt number over the surface.

#### 기호설명

<p><math>C_f</math> : 벽면 마찰계수 [= <math>2\tau/\rho U_{jet}^2</math>]</p> <p><math>C_p</math> : 압력계수 [= <math>2p/\rho U_{jet}^2</math>]</p> <p><math>c_p</math> : 정압비열</p> <p><math>D</math> : 실린더의 직경</p> <p><math>g, g_v</math> : Jacobian의 제곱, 중력가속도</p> <p><math>Gr</math> : Grashof 수 [= <math>g\beta(T_{jet} - T_{amb})D^3/\nu_{amb}^2</math>]</p> <p><math>H</math> : 실린더 중심으로부터 제트까지의 거리</p> <p><math>h</math> : 열전달계수 [= <math>-k_w(dT/dr)_w/(T_{jet} - T_{amb})</math>]</p>	<p><math>k</math> : 열전도계수</p> <p><math>Nu</math> : Nusselt 수 [= <math>hD/k_{jet}</math>]</p> <p><math>p</math> : 정압</p> <p><math>R</math> : 실린더의 반경</p> <p><math>R_{jet}</math> : 원형 제트의 반경</p> <p><math>Re</math> : Reynolds 수 [= <math>U_{jet}D/\nu_{jet}</math>]</p> <p><math>T</math> : 절대온도</p> <p><math>U_{jet}</math> : 출구의 제트 속도</p> <p><math>U^*</math> : 반변 속도 성분</p> <p><math>V_{torch}</math> : 토치의 이송 속도</p> <p><math>u, v, w</math> : <math>x, y, z</math> 방향 속도 성분</p> <p><math>\beta</math> : 체적 팽창계수</p>
---	---

\*회원, 서울대학교 대학원

\*\*회원, 서울대학교 공과 대학 기계공학과

- $\mu$  : 점성계수
- $\nu$  : 동점성계수
- $\xi^i$  : 일반좌표계 [ $\xi^1 = \xi, \xi^2 = \eta, \xi^3 = \zeta$ ]
- $\rho$  : 밀도
- $\tau$  : 벽면전단응력
- $\Omega$  : 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) 제조 공정 중의 하나로서 대형 모재(preform) 제조가 가능하고 부착율도 높다. 외부증착 공정은 토치로부터 분사된 연료인  $H_2, O_2$  등이 연소하여 이들과 함께 분출된  $SiCl_4, GeCl_4$  등의 산화 및 가수분해에 의해 발생한  $SiO_2, GeO_2$  등의 입자를 회전하는 실린더에 부착시키는 공정이다. 이 때  $SiO_2, GeO_2$  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 실린더에 충돌함으로써 이루어지며 입자가 실린더에 부착되는 주요한 메커니즘은 열영동(thermophoresis)으로 알려져 있다. 열영동에 의한 입자 부착은 유동 및 온도에 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 원주 방향으로 변한다. 그러나 원형 실린더에 충돌하는 제트의 경우에 대한 기존의 연구들은 대부분 2차원 유동의 경우에 한하였으며 실린더의 온도도 일정하다고 가정하였기 때문에 실제의 공정에 유용한 자료를 제공하기는 어려운 실정이다. 따라서 본 연구는 실제의 공정과 비슷한 조건하에서의 입자 부착을 해석하기 위한 일련의 연구로서 수행되었다.

3차원 유동 및 열전달의 특성을 연구하기 위하여 실린더 벽면을 일정한 온도로 가정하여 기존의 2차

원 유동에 대한 결과와 비교하였으며,<sup>(1)</sup> 제트 크기의 영향, 제트 출구 속도 및 실린더의 회전이 실린더 표면에서의 열전달에 미치는 영향을 살펴보았다. 원형 제트에 의한 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.

본 논문에서는 실린더의 온도를 가정하지 않고 실린더 및 실린더에 부착된 입자층 내부의 열전도 해석을 통하여 실린더 표면의 온도를 구하였고, 표면 온도의 변화가 유동 및 열전달에 미치는 영향을 벽면 온도가 일정한 경우<sup>(1)</sup>와 비교 분석하였다. 입자층의 열전도계수는 실린더의 열전도계수에 비해 매우 작으므로 실린더 주위에 입자가 부착되면 외부 유동과 실린더 사이의 열저항이 증가하게 되어 입자가 부착하게 되는 표면의 온도 및 온도 구배가 달라져서 열영동에 의한 입자 부착에 영향을 미치게 된다. 이와 같이 실린더 주위에 입자층이 형성되기 때문에 내부 열전도에 대한 해석은 서로 다른 열전도계수를 갖는 두 개의 층에 대해 수행되어야 한다. 그러나 본 연구에서는 내부 실린더의 직경이 작다고 보아 실린더의 열전도계수를 변화시키므로써 입자 부착층에 의한 열저항 증가 효과를 분석하였다. 이와 아울러 실린더의 회전 및 토치의 이송이 유동 및 실린더 표면에서의 열전달에 미치는 영향도 수치 해석적으로 연구하였다.

2. 지배 방정식 및 수치 해석 방법

2.1 지배 방정식

원형 실린더와 여기에 수직 하방에서 분사하는 원형 제트를 Fig. 1에 나타내었다. 제트의 축방향을  $x$ , 실린더의 축방향을  $z$ 라고 하고,  $x-z$  평면에 수직인 방향을  $y$ 로 하였다. 정상 상태의 층류 비압축성 유동에 대한 임의의 곡선좌표계에서의 연속 방정식,  $x, y, z$  방향의 운동량 방정식, 에너지 방정식은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 (\sqrt{g}\rho U^i)_{;i} &= 0 \\
 [\sqrt{g}(\rho U^i u^j - \mu g^{ij} u_{;k}^k)]_{;j} + p_{;i} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

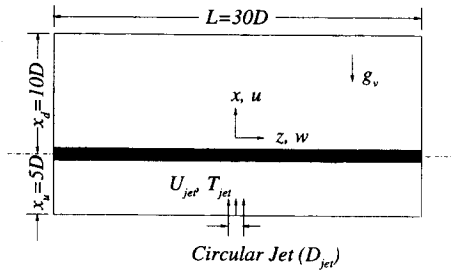


Fig. 1 Schematic diagram of the flow configuration ( $x$ - $z$  plane).

$$-\sqrt{g} g_v (\rho - \rho_a) = 0 \quad (2)$$

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

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

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

여기서  $\xi^1 = \xi$ ,  $\xi^2 = \eta$ ,  $\xi^3 = \zeta$ ,  $U^i = \vec{a}^i \cdot (\vec{u} + \vec{v} + w\vec{k})$ ,  $\vec{a}^i = \nabla \xi^i$ ,  $g^{ij} = \vec{a}^i \cdot \vec{a}^j$ 이다. 실제 공정은 고온의 기류가 상대적으로 낮은 온도의 실린더를 흐르면서 입자가 부착되는 과정이기 때문에 복사열 전달의 효과가 있으나 이공훈<sup>(2)</sup>의 연구에서는 복사 자체에 의한 효과와 이에 따른 온도구배의 효과가 상쇄되어 실제 복사열전달의 효과는 적다고 보고하였다. 본 연구는 실제 공정에 대한 해석 자체 보다는 3차원 열전달의 효과를 연구하는데 중점을 두었기 때문에 복사열전달의 효과는 무시하였고,  $Re$ 수가 작으므로 압력에 의한 일과 점성소산항 역시 무시하였다. 유체는 공기이며 밀도, 열전도계수 및 점성계수는 온도의 함수로 주었다.<sup>(3)</sup> 실린더 내부에서의 열전도 방정식은 다음과 같다.

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

여기서  $\Omega$ ,  $V_{torch}$ 는 각각 실린더의 회전 속도 및 토치의 이송 속도이다. 식 (6)에서 입자가 부착된 실린더의 열확산계수  $\alpha$ 는 1000 K에서의 값을 사용하였다.<sup>(4)</sup> 본 연구에서의 유동은  $Re$ 수가 1000 이하이므로 전 영역에서 층류로 가정하였다. [Tennekes and Lumley<sup>(5)</sup>]

## 2.2 경계 조건 및 수치 해석 방법

직경  $D$ 인 실린더는 제트로부터  $5D$  만큼 수직 상방에 위치하고 있으며 실린더 후류 쪽의 계산 영

역은 실린더 직경의 10배의 거리까지, 실린더의 길이는 실린더 직경의 30배까지로 하였다. 경계 조건은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 실린더 벽면에서는 점착조건을 기본으로 주었으며 실린더가 회전하는 경우에는 원주 방향의 속도를  $R\Omega$ 로 하였다. 실린더 표면에서 충분히 떨어진 외부 경계  $C'$ - $D'$ ,  $C$ - $D$ 에는 유인되는 수평 방향( $y$ ), 축방향( $z$ ) 속도 성분 및 온도의 경우에는  $y$ 에 대한 1차 미분을 0으로 하였고, 수직 방향( $x$ )의 속도 성분에 대해서는  $y$ 에 대한 2차 미분을 0으로 주었다. 상류( $D$ - $E$ ,  $E'$ - $D'$ )에서는 유인되는 유동이 평행하다고 가정하였다. 한편 하류( $C$ - $B$ ,  $B'$ - $C'$ )의 출구 조건으로는 각 변수( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $T$ )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 주었다. 실린더의 표면 온도가 주어진 상태에서 구해지는 외부의 온도장으로부터 실린더 벽면에서의 열유속이 정해지고, 열유속 조건은 열전도 방정식의 경계 조건이 되어 실린더 표면의 온도를 구하게 되며 이 표면 온도는 다시 외부 유동을 푸는데 경계 조건으로 사용하게 된다.

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 조사하였으며<sup>(1)</sup> 실린더 내부의 열전도에 대한 계산( $r \times \theta \times z = 51 \times 20 \times 11$ ) 결과는 푸리에변환(Fourier transform)에 의한 해석해와 비교할 때 상당히 정확하였다.<sup>(6)</sup>

수치 계산에서 대류항은 레이놀즈수가 크지 않으

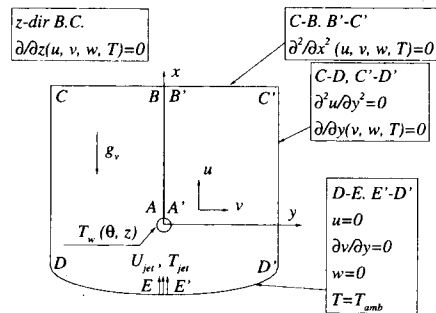


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions.

므로 HYBRID 방법을 사용하였으며<sup>(7)</sup> 압력항의 계산은 SIMPLE [Patankar<sup>(8)</sup>] 알고리즘이 사용되었다. 운동량 및 에너지 방정식은 MSI<sup>(9)</sup>[Modified Strongly Implicit], 압력의 경우에는 CGS<sup>(10)</sup>[Conjugate Gradient Solver]를 사용하여 수치 해석하였다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 주요 변수

본 계산의 주요 변수는 각속도  $\Omega$ , 실린더의 반경  $R$ , 제트와 실린더 중심과의 거리  $H$ , 제트의 반경  $R_{jet}$ , 제트의 출구 속도  $U_{jet}$ , 제트의 온도  $T_{jet}$ , 실린더의 벽면 온도  $T_{wall}$ , 주위 공기의 온도  $T_{amb}$ 이다. 선행 연구<sup>(1)</sup>에서는 실린더의 표면 온도가 일정한 경우에 대해 3차원 효과, 레이놀즈수의 영향 및 실린더 회전의 영향 등에 대해 살펴본 바가 있다. 따라서 여기서는 실린더의 열전도계수, 실린더의 회전 및 토치의 이송 속도 등에 대해서 연구를 수행하였다. 사용된 무차원 변수들은 다음과 같으며 기본 변수량은 굵게 표시하였다.

$$Re = U_{jet}D/\nu_{jet} = 213, \quad Gr/Re^2 = 40$$

$$R_{jet}/R = 1.2, \quad H/R = 10.0$$

$$k_{cyl} = 0.70, 2.87, \mathbf{7.85} \text{ W/mK}$$

$$\Omega = \mathbf{0}, 30, 60, 120 \text{ rpm}$$

$$V_{torch} = \mathbf{0}, 1, 10 \text{ cm/min}$$

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

#### 3.2 Conjugate Heat Transfer에 의한 비균일 벽면 온도의 영향

실린더 내부에서의 열전도를 고려하는 경우 실린더 표면 온도 분포는 축방향 및 원주 방향의 위치에 따라 변한다. Fig. 3에는 앞에서 제시된 기본 조건에 대하여 실린더의 외부 유동과 실린더 내부(알루미늄,  $k_{cyl} = 7.85 \text{ W/mK}$ <sup>(4)</sup>)의 열전도를 함께 연계시켜 풀었을 때의 실린더 표면의 축방향 온도 분포를 나타내었다. 고온의 제트가 충돌하는 실린더의 중심 단면( $z/R = 0.0$ )과 주위의 차가운 공기에 노출된 실린더의 끝단( $z/R = 30.0$ )의 온도차는 약 600K로서 매우 크다. 따라서 벽면 온도가 일정하다고 가정할 선행 연구<sup>(1)</sup>의 계산 결과와 본 연구

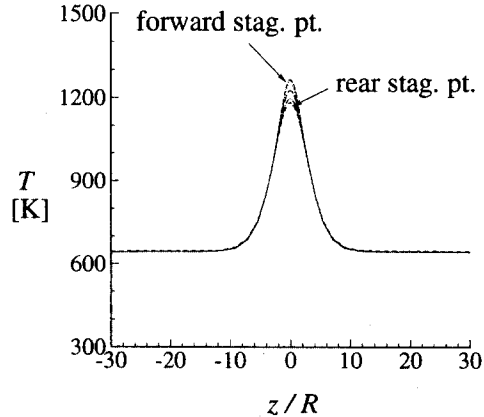


Fig. 3 Axial distributions of surface temperature at different circumferential locations.

의 결과는 큰 차이를 나타낸다. 그러나 실린더의 상류 지역인 제트의 출구로부터 정체점까지는 벽면 온도의 영향이 거의 없으므로 두 경우가 거의 동일하며, 정체점 이후부터 유동 및 열전달량 등에서 점차 다른 경향을 보인다. 이와 같이 실린더 내부의 열전도를 고려하게 되면 축방향뿐만 아니라 원주 방향의 실린더 벽면 온도도 위치에 따라 다르게 된다. 즉, 고온 제트가 실린더에 충돌하는 지점인 실린더 전면의 정체점( $\theta = 0^\circ$ )과 뒤쪽의 정체점( $\theta = 180^\circ$ )의 벽면 온도차도 약 100K 정도로 나타나고 있다. 그러나 원주 방향의 온도차는 축방향의 온도차에 비해 매우 작기 때문에 유동 및 열전달에 미치는 영향은 작아지리라 생각된다. 그러나 실제 OVD 공정에서 실린더 벽면의 온도는 토치에 의한 가열과 주위 공기에 대한 냉각에 따라서 정해지므로 미리 예측할 수는 없다.

고온의 제트가 충돌하는 실린더 중심 단면 근처에서의 유동 및 온도 분포는 벽면 온도가 균일한 경우와 비균일 벽면 온도의 경우가 거의 차이가 없으며 실린더의 중심에서 멀어져 끝단 쪽으로 가면서 점차 차이가 증가하기 시작한다. 중심 단면 근처에서 분사된 제트는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 부력에 의해 가속되어 속도가 증가하다가 정체점에서는 0이 되며 압력은 정체점 근처에서 급격히 증가한다. 재순환 영역 및 제트-후류 영역의 속도도 두 경우가 모두 비슷하며 압력도 큰 차이를 보이지 않는다. 비균일 벽면 온도의 경우를 균일한 벽면 온도의 경우( $T_{wall} = 1150\text{K}$ )와 비교할 때 실린더의

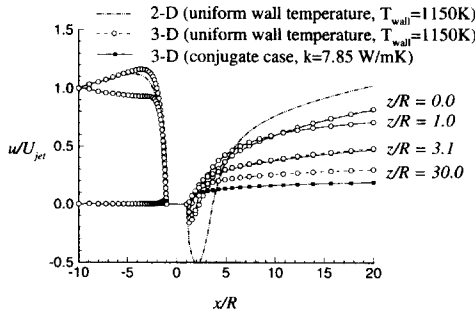


Fig. 4 Comparison of mainstream velocity along the centerline of jet axis between uniform wall temperature case and conjugate case at different axial locations.

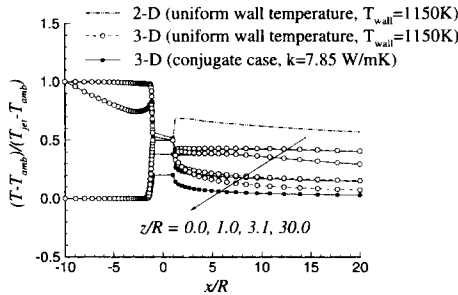


Fig. 5 Comparison of temperature distribution along the centerline of jet axis between uniform wall temperature case and conjugate case at different axial locations.

중심 단면은 고온의 제트에 의해 가열되기 때문에 벽면의 온도가 약간 높다(1200~1300K). 실린더 끝단 근처는 차가운 주위 공기에 의해 냉각되기 때문에 균일 벽면 온도 일 때에 비해 실린더 표면의 온도가 상당히 낮으나(약 600K, Fig. 3 참조), 실린더 내부의 열전도에 의해서 주위 온도보다는 높으며, 균일한 벽면 온도의 경우와 비교할 때 중심 단면보다는 끝단면 근처에서 두드러진 차이를 보이게 된다(Fig. 5). 실린더 끝단면 근처에서는 벽면의 온도와 주위 공기와의 온도차가 작아서 균일 벽면 온도의 경우에 비해 자연 대류가 감소하여 제트-후류 영역에서의 주유동 방향의 속도( $u/U_{jet}$ )는 상대적으로 작다(Fig. 4).

실린더 벽면 온도의 영향은 주로 실린더 표면과 후류 지역에 나타나게 되는데, 본 연구에서는 실린더 표면 온도 분포에 주된 관심을 두었다. 실린더 벽면에서의 압력 및 벽면 마찰 계수의 변화를

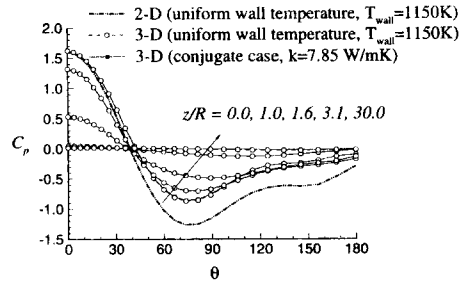


Fig. 6 Comparison of pressure coefficient over the cylinder surface between uniform wall temperature case and conjugate case at different axial locations.

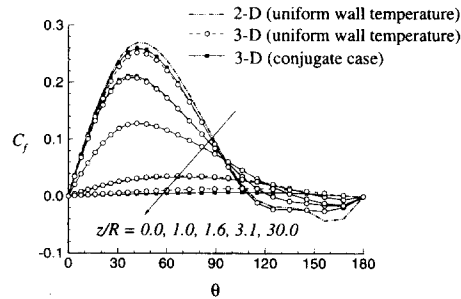


Fig. 7 Comparison of skin friction coefficient over the cylinder surface between uniform wall temperature case and conjugate case at different axial locations.

Figs. 6~7에 나타내었는데 균일 벽면 온도의 경우와 비균일 벽면 온도의 경우는 큰 차이가 없다. 그러나 실린더 표면의 온도가 서로 상당히 다르기 때문에 벽면에서의 국소누셀트수는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 다소 차이를 보인다. 실린더의 중심 단면 근처에서 온도는 비균일 벽면 온도의 경우 벽면 일정 온도의 경우 보다 높아 벽면 근처에서의 공기의 열전도계수가 약간 커지게 되지만, 점성계수의 증가를 포함한 제반 상황의 변화에 따라서 열경계층이 두꺼워지고 온도 구배가 상대적으로 감소하여 누셀트수는 작아진다. 한편 실린더의 끝단으로 갈수록 누셀트수는 점차 감소하다가 음수가 된다. 여기서 (-)의 값은 실린더가 주위 공기 속에서 냉각됨을 의미하며 비균일 벽면 온도의 경우, 온도 구배가 작기 때문에 균일 벽면 온도의 경우에 비해 누셀트수는 작아지게 된다. 재순화 영역에서 누셀트수가 2차원의 경우와는 달리 감소하는 것은 이

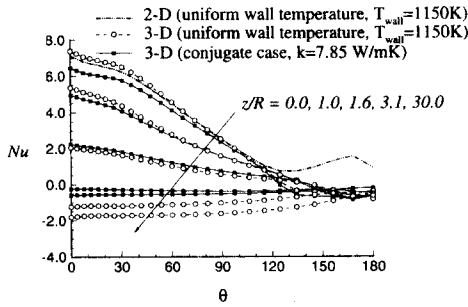


Fig. 8 Comparison of local Nusselt numbers over the cylinder surface between uniform wall temperature case and conjugate case at different axial locations.

전의 논문<sup>(1)</sup>에서 논의한바 3차원 유동의 특성이다.

### 3.3 실린더 열전도계수의 영향 (입자 부착층의 영향)

OVD 공정이 진행되면서 실린더 주위에 실린더에 비하여 열전도율이 낮은 입자 부착층(SiO<sub>2</sub> layer)의 두께가 두꺼워진다. 이 실리카 층의 열전도계수는 fused 실리카의 경우 1000K에서 2.87 W/mK이고, 다공도 (porosity)가 0.85인 경우 열전도계수는 0.10 W/mK로서 앞서 토의된 알루미늄 실린더의 열전도계수 7.85 W/mK보다 매우 낮다.<sup>(11)</sup> 실제 공정에서는 실린더가 내부의 모봉과 그 외부에 부착되는 실리카 입자의 층으로 구성되어 있으므로 입자가 부착된 층과 모봉 사이의 열저항이 증가하게 되어 입자가 부착하게 되는 표면의 온도 및 온도 구배가 달라져서 열유동에 의한 입자 부착에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 실린더를 물성치가 다른 두 개의 층으로 해석해야 하겠지만 본 연구에서는 이에 대한 연구에 앞서 우선 모봉인 실린더와 그 주위에 부착된 입자층을 구별하지 않고 단일 실린더로 가정하고 연구를 수행하였다. 즉, 본 연구에서는  $T_{jet}=2000K$ ,  $T_{amb}=300K$ ,  $Re=213$ ,  $Gr/Re^2=40$ ,  $R_{jet}/R=1.2$ ,  $H/R=10$ 의 경우에 대해 단일층 실린더의 열전도율을 변화시킴으로써 낮은 열전도율을 갖는 입자의 부착 효과를 간접적으로 분석하였다.

실린더의 열전도율  $k_{cyl}$ 이 7.85, 2.87, 0.70으로 낮아짐에 따라 제트가 충돌하는 중심 단면의 정체점( $\theta=0^\circ$ )과 실린더 뒤쪽 정체점( $\theta=180^\circ$ )에서의 실린더 표면 온도분포를 Fig. 9에 나타내었다. 중

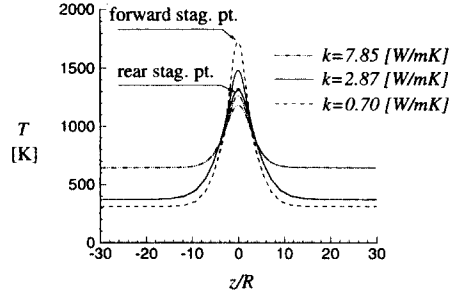


Fig. 9 Effect of thermal conductivity of the cylinder on the distribution of axial surface temperature at different circumferential locations.

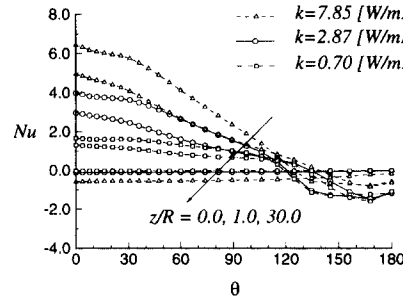


Fig. 10 Effect of thermal conductivity of the cylinder on the local Nusselt number over the cylinder surface at different axial locations.

심 단면에서 ( $z/R=0.0$ ) 열전도율이 낮아질수록 실린더 내부의 전도에 의한 열전달이 감소하여 원주 방향의 온도차가 커진다. 즉, 제트가 충돌하는 중심 단면의 정체점과 실린더의 재순환 영역의 뒤쪽 정체점의 온도차는  $k_{cyl}$ 이 7.85, 2.87, 0.7로 낮아짐에 따라 각각 80, 170, 400K로 커지게 된다. 한편, 실린더의 열전도율이 축방향의 온도 분포에 미치는 영향은 원주 방향에 비해 더욱 두드러진다. 열전도율이 낮은 경우 ( $k_{cyl}=0.7$ )에 온도차는 1000~1500K로서 열전도율이 높은 경우 ( $k_{cyl}=7.85$ )의 온도차(약 600K)에 비해 더욱 커진다. 즉, 실린더의 열전도율이 낮아질수록 실린더의 중심 단면의 온도는 고온의 제트 온도에 가까워지고 실린더의 끝단은 대기의 온도에 점차 가까워진다. 본 연구에서는 실린더의 열전도도를 실린더의 주위에 부착되는 입자의 열전도도에 가깝게 하여 입자층이 유동 및 열전달에 미치는 영향을 간접적으로 분석할 수 있도록 하였는데 Fig. 9로부터 입자층이 입자가 부착되는 표면의 온도 분포에 미치는 영향

이 매우 큼을 알 수 있다.

제트의 출구로부터 후류에 이르기까지의 유동 및 온도 분포는 실린더 열전도율의 변화에 따라 큰 차이는 없으나 실린더 표면에서의 국소누셀트수(Fig. 10)는 크게 달라진다. 즉, 실린더의 중심 단면 근처에서는, 실린더의 열전도율이 낮아질수록 벽면의 온도가 높아져서 실린더와 주위 공기간에 온도차가 작아지며 열경계층 두께의 증가로 인한 온도 구배의 감소 때문에 누셀트수도 작아지게 된다. 반면 실린더의 끝단에서는 열전도율이 높은 경우가 낮은 경우에 비해 표면의 온도가 주위 공기에 비해 온도가 높기 때문에 자연 대류의 영향이 상대적으로 커서 주위 공기에 의해 냉각되는 정도가 다소 크게 나타나고 있다. 열영동에 의한 입자의 부착은 누셀트수에 비례하므로 이와 같이 열전도율이 낮아질수록 누셀트수가 감소한다는 것은 이미 부착된 입자층이 새로운 입자의 부착을 어렵게 만든다는 것을 의미한다.

### 3.4 실린더 회전 속도의 영향

입자를 실린더 주위에 균일하게 부착시키기 위해 실제 공정에서는 실린더를 회전시키게 된다.  $T_{jet}=2000K$ ,  $T_{amb}=300K$ ,  $Re=213$ ,  $Gr/Re^2=40$ ,  $R_{jet}/R=1.2$ ,  $H/R=10$ 의 경우에 대해 실린더를  $\Omega=0, 30, 120rpm$ 으로 회전시켰을 때의 실린더 표면의 온도 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 이 때 실린더의 물성치는 1000K에서의 fused 실리카의 물성치( $k=2.87W/mK$ ,  $c_p=1155J/kgK$ ,  $\rho=2220kg/m^3$ )를 사용하였다.<sup>(4)</sup> 원주 방향의 표면 온도 분포를 실린더의 중심 단면과 끝단면의 경우에 대해 Fig. 11에 나타내었는데 회전이 없는 경우에는 원주 방향의 온도차가 약 170K 정도이나 실린더를 회전시키에 따라 원주 방향의 온도는 균일해진다. 그러나 축방향의 온도차는 여전히 매우 크다. 실린더의 회전은 재순환 영역 및 제트-후류 영역에는 영향을 주는 반면 상류쪽 및 실린더 벽면에서의 마찰계수, 압력 및 누셀트수 등에는 거의 영향이 없다.<sup>(6)</sup> 그 이유는 실린더의 크기가 작고( $R=1cm$ ) 제트 출구의 유속( $U_{jet}=4m/s$ )이 실린더의 원주 속도에 비해 상대적으로 크기 때문이다. 그러나 제트의 속도가 작거나 실린더의 직경이 큰 경우에는 회전하는 효과가 보다 크게 나타날 것으로 예상된다. 한편 실제의 입자 부착층은 다공성 물질로서 fused 실리카보다 열전도율이 매우 낮으

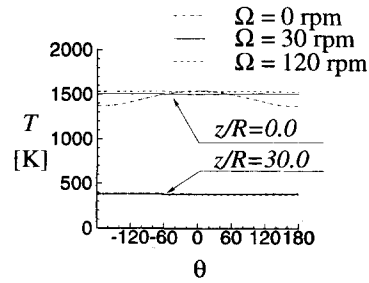


Fig. 11 Effect of rotation of cylinder on the distribution of the circumferential temperature at  $z/R=0.0$ ,  $z/R=30.0$ , respectively.

므로 원주 방향의 온도차가 더욱 커지기 때문에 회전 효과는 더욱 커질 것으로 생각된다.

### 3.5 토치 이송 속도의 영향

OVD 공정에서는 입자가 매우 얇은 여러 층으로 부착시켜 가면서 모재의 굴절율을 조절하게 되는데 이를 위해서는 토치의 반복적인 이송이 필요하다. 고온 제트에 의해 가열되는 실린더 표면의 온도는 움직이고 있는 토치로부터 실린더 표면까지의 상대적인 거리에 의해 결정된다.<sup>(12)</sup> 움직이는 토치에 고정된 좌표계를 사용하면 실린더 표면의 온도 및 주위 유동의 온도장은 준 정상상태로 볼 수 있다. 토치의 이송은 실린더 축방향의 대류 열전달을 증가시키기 때문에 이송이 없을 경우에 비해 실린더 표면의 온도가 크게 변하므로 유동 및 열전달에 상당한 영향을 미치게 된다. 여기서는 fused 실리카로 이루어진 실린더 ( $k_{cyl}=2.87W/mK$ )의 경우에 대해 토치 이송의 영향을 살펴보았다.

토치의 이송 속도  $V_{torch}$ 가 0.0, 1.0, 10.0cm/min로 변할 때, 실린더 앞뒷면의 정체점에서 실린더의 축방향 온도 분포를 Fig. 12에 나타내었다. 토치의 이송이 없는 경우에는 고온 제트가 충돌하는 중심 단면에서의 실린더 전면 정체점( $\theta=0^\circ$ )의 온도는 약 1500K, 실린더 뒷면의 정체점( $\theta=180^\circ$ )의 온도는 1300K이다. 실린더 끝단의 온도는 약 400K로서 실린더의 중심 단면과 비교할 때의 온도차는 대략 900~1100K 정도이며, 중심 단면을 기준으로 하여 축방향의 온도 분포는 대칭이다. 그러나 토치의 이송 속도가 증가하면 축방향의 대류에 의한 열전달량이 증가하며 이에 따라 실린더 표면의 온도는 낮아진다. 즉, 실린더 전면의 정체점 온

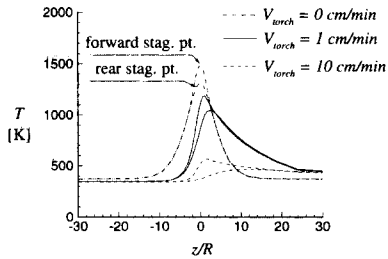


Fig. 12 Effect of the traversing speed of torch on the distribution of axial surface temperature at different circumferential locations.

도를 보면 토치의 이송 속도가 증가하면 약 1500, 1200, 600K로 현저하게 표면 온도가 낮아진다. 이와 같이 토치의 이송이 실린더의 표면 온도에 미치는 영향이 매우 크다는 것은 입자의 부착 공정에서 토치의 이송이 부착의 제어에 효과적인 수단임을 의미한다고 볼 수 있다. 한편 토치의 이송은 축방향의 온도를 비대칭으로 만들며 토치가 이미 지나간 영역( $z/R > 0.0$ )이 토치 전면의 표면 온도에 비해 상대적으로 높은 온도를 유지하고 있다.

토치의 이송은 실린더 표면 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 속도가 증가할 수록 벽면의 온도가 감소하여 점성계수가 작아지기 때문에 실린더 벽면의 마찰계수는 토치의 이송 속도의 증가에 따라 감소한다. 한편, 토치의 이송 속도의 증가에 따라 실린더 표면의 온도는 내려가서 열전도계수는 작아지지만 점성계수의 감소 등에 따라서 열경계층은 얇아지게 된다. 이러한 열경계층 두께의 감소는 벽면 근처의 온도 구배를 크게 만들기 때문에 Fig. 13과 같이 토치의 이송이 빠를수록 실

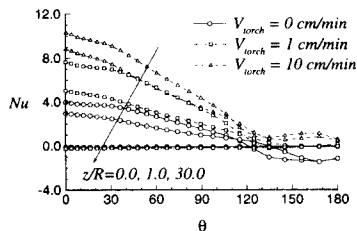


Fig. 13 Effect of the traversing speed of torch on the local Nusselt number over the cylinder surface at different axial locations.

린더 표면에서의 국소누셀트수가 크게 증가한다. 그러나 실린더 끝단의 경우에는 실린더의 표면 온도와 주위 공기와의 온도차가 작아서 열전달은 거의 없음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고온의 제트가 원형 실린더에 충돌하는 경우에 3차원 유동 및 열전달 특성에 대하여 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 비균일 벽면 온도의 경우에는 일정 벽면 온도일 때에 비하여 중심 단면 근처에서의 벽면 온도 구배가 감소하여 누셀트수는 작아진다. 한편, 실린더의 중심 단면에서 멀어질수록 누셀트수는 점차 감소하다가 실린더의 끝단에서는 실린더가 주위 공기에 의해 냉각되는데 비균일 벽면 온도의 경우가 균일 벽면 온도의 경우에 비해 자연 대류의 영향이 감소하여 누셀트수가 작다.

(2) 실린더의 열전도율이 낮아질수록 실린더의 축방향의 열전도가 감소하여 고온의 제트가 충돌하는 중심 단면의 온도는 높아지고 실린더 끝단의 온도는 낮아진다. 따라서 실린더의 열전도율이 낮아지면 실린더의 중심 단면의 벽면 온도와 제트의 온도차가 감소하며 온도 구배가 감소하여 누셀트수가 작아지게 된다. 실린더의 끝단의 경우도 온도 구배가 작아지기 때문에 열전달이 감소하게 된다.

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

(4) 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 열전달은 증가된다.

#### 참고문헌

- (1) 홍기혁, 강신형, 1996, "원형 실린더에 충돌하는 고온 제트의 3차원 유동 특성 및 열전달," 대한기계학회논문집, 21(2), pp. 285~293.
- (2) 이공훈, 1995, "비직교좌표계에서 유한체적법을 사용한 복사열전달 해석 및 입자 부착에 관한



- 연구," 서울대학교 대학원, 공학박사 학위논문.
- (3) 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.
- (4) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1990, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons. Inc.
- (5) Tennekes, H. and Lumley, J. L., 1972, *A First Course in Turbulence*, Cambridge, MA: MIT Press.
- (6) 홍기혁, 1996, "실린더 주위의 열전달 및 열영동에 의한 입자 부착에 관한 연구," 서울대학교 대학원, 공학박사 학위논문.
- (7) 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.
- (8) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York: Hemisphere Publishing.
- (9) 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.
- (10) Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., 1992, *Numerical Recipe*, New York, Cambridge Press.
- (11) 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.
- (12) 김재운, 1995, "외부증착공정에서 입자부착에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원, 공학 석사 학위논문.