

〈논 문〉

원형 실린더에 충돌하는 고온 제트의 3차원 유동 특성 및 열전달

홍 기 혁* · 강 신 형**

(1996년 9월 7일 접수)

Three-Dimensional Flow Characteristics and Heat Transfer to a Circular Cylinder with a Hot Circular Impinging Air Jet

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), Three-Dimensional Flow(3차원 유동), Variable Property(변하는 물성치)

Abstract

Numerical calculations has been performed for the flow and heat transfer to a circular cylinder from a hot circular impinging air jet. The characteristics of the flow and heat transfer are investigated and compared with the two-dimensional flow. The present study lays emphasis on the investigation on the flow and heat transfer of the three-dimensionality. The effects of the buoyancy force and the size of jet are also studied. The noticeable difference between the three and the two-dimensional cases is that there is axial flow of low temperature into the center-plane of the cylinder from the outside in the recirculation region. Local Nusselt number over the cylinder surface has higher value for the large jet as compared with that of the small jet since the energy loss of hot jet to the ambient air decreases with increase of the jet size. As buoyancy force increases the flow accelerates so that the period of cooling by the ambient air is reduced, which results in higher local Nusselt number over the surface.

기 호 설 명

C_j : 벽면 마찰계수 $[=2\tau/\rho U_{jet}^2]$

C_p : 압력계수 $[=2p/\rho U_{jet}^2]$

c_p : 정압비열

D : 실린더의 직경

g, g_v : Jacobian의 제곱, 중력 가속도

Gr : Grashof 수 $[=g\beta(T_{jet} - T_{amb})D^3/\nu_{amb}^2]$

H : 실린더 중심으로부터 제트까지의 거리

h : 열전달계수

$$[=-k_w(dT/dr)_w/(T_{jet} - T_{amb})]$$

k : 열전도계수

Nu : Nusselt 수 $[=hD/k_{jet}]$

p : 정압

R : 실린더의 반경

R_{jet} : 원형 제트의 반경

Re : Reynolds 수 $[=U_{jet}D/\nu_{jet}]$

T : 절대온도

T_m : 평균온도 $[=(T_{wall} + T_{amb})/2]$

U_{jet} : 출구의 제트 속도

U^i : 반변 속도 성분

*회원, 서울대학교 대학원

**회원, 서울대학교 공과 대학 기계공학과

u, v, w	: x, y, z 방향 속도 성분
β	: 체적 팽창계수
θ	: 무차원 실린더 벽면온도 ($T_{wall} - T_{amb}$) / ($T_{jet} - T_{amb}$)
μ	: 점성계수
ν	: 동점성계수
ξ^i	: 일반좌표계 [$\xi^1 = \xi, \xi^2 = \eta, \xi^3 = \zeta$]
ρ	: 밀도
τ	: 벽면전단응력
Ω	: 실린더의 회전 속도

하첨자

<i>amb</i>	: 주위 (ambient)
<i>jet</i>	: 제트 출구에서의 값
<i>wall</i>	: 벽면에서의 값

1. 서론

OVD(Outside Vapor Deposition) 공정은 현재 사용되는 광섬유(optical fiber) 제조 공정 중의 하나로서 대형 모재(preform) 제조가 가능하고 부착률도 높다. OVD 공정에서의 입자 부착은 일반적으로 원형 토치에서 분사되는 직경 $0.2\mu\text{m}$ 정도의 미세한 SiO_2 등의 입자 및 고온의 공기가 제트 유동 형태로 실린더에 충돌함으로써 이루어지며 이때의 주요한 입자 부착 메커니즘은 열영동(thermophoresis)이다. 열영동에 의한 입자 부착은 유동 및 온도장에 의해 결정되며 유동장과 온도장 또한 실린더 표면의 온도에 따라 달라진다. 실제의 3차원 OVD 공정에서는 실린더 및 실린더에 부착된 입자층의 내부 열전도에 의해 벽면 온도는 축방향 및 원주 방향으로 변화한다.

열영동에 의한 입자 부착에 관한 수치 해석적 연구들은 주로 평판 및 원형 실린더와 같이 단순한 형상에서 연구되어 왔으며 최근에는 경계층 해석에서부터 실제 공정과 흡사한 3차원 해석에 이르기까지 많은 연구가 수행되고 있다. Homsy 등⁽¹⁾과 Batchelor와 Shen⁽²⁾는 Blasius 급수해를 이용하여 실린더에서의 입자 부착을 해석하였다. Garg와 Jayaraj⁽³⁾는 외부 유동의 압력구배를 사용하여 입자 부착을 계산하였으며 Alam 등⁽⁴⁾은 평판에서의 평면 제트에 대하여 연구하였다. Kang과 Greif^(5,6)는 균일 유동 대신에 실제 공정에 가까운 제트 유동을 고려하여 열전달 및 입자 부착을 해석하였다.

최근에는 Choi 등⁽⁷⁾이 입자부착층에서의 열전도를 포함하는 준 3차원적 해석을 통하여 입자부착층의 성장 및 토치의 이송 속도의 영향을 연구한 바가 있다. 그러나 원형 실린더에 충돌하는 제트의 경우에 대한 기존의 연구들은 대부분 2차원 유동의 경우에 한하였으며 실린더의 온도도 일정한 온도로 가정하였으므로 실제의 공정에 유용한 자료를 제공하기는 어려운 실정이다.

실제 공정과 비슷한 조건하에서의 입자 부착을 해석하기 위해서는 입자가 부착된 실린더 내부의 열전도 해석을 통하여 실린더 벽면의 온도 변화가 유동, 열전달 및 입자 부착에 미치는 영향이 신빙성 있게 해석되어야 한다. 본 연구는 이에 대한 전 단계의 연구로서 보다 간단한 경우인 벽면온도가 일정한 원형 실린더에 고온의 원형 제트가 충돌할 때 유동 및 열전달에 대해 계산하였으며, 기존의 2차원 제트의 경우와 비교하여 3차원의 영향이 어떻게 나타나는가에 중점을 두고 수행되었다. 또한 제트 크기의 영향, 제트 출구 속도 및 실린더의 회전이 유동 및 실린더의 표면에서의 열전달에 미치는 영향을 살펴보았다.

고온의 제트가 실린더에 충돌할 때의 유동은 평면 제트의 경우에는 대략 다음과 같은 영역으로 분리하여 생각할 수 있다⁽⁸⁾: (a)부력이 있는 자유 제트영역, (b)정체점영역, (c)벽면 제트영역, (d)재순환영역, (e)부력이 있는 후류-제트영역. 실린더에서 상당히 아래쪽에 위치해 있는 노즐에서 나오는 유동은 코어(core) 영역으로부터 발달된다고 가정한다. 제트가 실린더에 가까워짐에 따라 제트의 축방향의 속도는 급속히 감소하고 정압은 증가한다. 평판에 충돌하는 제트의 경우, 이러한 압력의 급격한 증가는 평판에서 노즐간 거리의 약 1/4 지점에서 일어난다.⁽⁸⁾ 그러나 실린더의 경우에 실린더의 직경에 영향을 받게 된다. 한편, 정체점을 지나면서 유동은 가속되며 점차 벽면 제트의 특성을 갖게 되고 하류로 진행함에 따라 유동은 박리된다. 박리점은 레이놀즈수가 낮고, 부력이 클수록 실린더 뒤쪽으로 이동하게 되며 실린더 벽면의 온도가 낮아지면 박리는 역시 지연되어 박리기포의 길이가 짧아진다. 이때 보텍스세당이 없다고 가정하면 유동은 정상 유동이 된다. 정상 유동의 경우 실린더 뒤 쪽에서 재순환기포가 생기며 하류의 후류 지역에서는 부력이 있는 제트가 발달되는 양상을 보인다.

고온의 원형 제트가 원형 실린더에 충돌하는 경우 평면 제트와는 달리 관련된 연구가 거의 없는 실정이며 유동 구조 등이 잘 알려져 있지 않아서 흥미있는 문제이다. 본 연구는 OVD 공정에 대한 전 단계의 연구로서뿐만 아니라 유동 및 열전달 특성의 파악에도 중점을 두고 수행되었다.

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.

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

$$[\sqrt{g}(\rho U^i u - \mu g^{ij} u_{\epsilon^j})]_{\epsilon^i} + p_x - \sqrt{g} g_y (\rho - \rho_a) = 0 \quad (2)$$

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

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

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

여기서 $\xi^1 = \xi$, $\xi^2 = \eta$, $\xi^3 = \zeta$, $U^i = \vec{a} \cdot (u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k})$, $\vec{a} = \nabla \xi^i$, $g^{ij} = \vec{a}^i \cdot \vec{a}^j$ 이다. 본 연구에서는 복사열전달의 효과는 무시하였으며⁽⁹⁾ Re 수가 작으므로 압력에 의한 일과 점성소산항 역시 무시하였다. 유동장 내의 온도 변화가 심하므로 밀도, 열전도계수 및 점성계수는 온도 함수로 주었고⁽⁶⁾ 유체는 공기이며 유동은 Re 수가 1000 이하이므로

전영역에서 층류로 가정하였다. (Tennekes and Lumley⁽¹⁰⁾)

2.2 경계 조건 및 수치 해석 방법

직경 D 인 실린더는 제트로부터 $5D$ 만큼 수직 상방에 위치하고 있으며, 실린더 후류 쪽의 계산 영역은 실린더 직경의 10배의 거리까지, 실린더의 길이는 실린더 직경의 30배까지로 하였다. 경계 조건은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 실린더 벽면에서는 점착조건을 기본으로 주었으며 실린더가 회전하는 경우에는 원주 방향의 속도를 RQ 로 하였다. 실린더 표면에서 충분히 떨어진 외부 경계 $C'-D'$, $C-D$ 에서는 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($D-E$, $E'-D'$)의 경계 조건으로는 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.

실린더 주위의 유동 및 열전달에 큰 영향을 미치는 정체점 부근의 정확한 해석을 위하여 C형태의 격자계 ($\xi \times \eta \times \zeta = 91 \times 41 \times 31$)를 채택하여 유한체 적법으로 계산하였다. 격자계의 검증은 본 계산에서 사용된 격자계 외에 ($71 \times 31 \times 21$)과 ($111 \times 51 \times 41$)의 경우에 대하여 계산을 수행하여 격자의 수에 따른 영향을 조사하였다.⁽¹¹⁾ 수치 계산에서 대류항은 레이놀즈수가 크지 않으므로 HYBRID 방법을 사용하였으며^(5, 6) 압력항의 계산은 SIMPLE

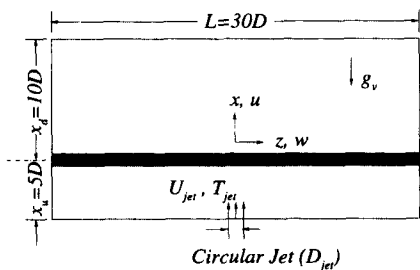


Fig. 1 Schematic diagram of flow configuration ($x-z$ plane).

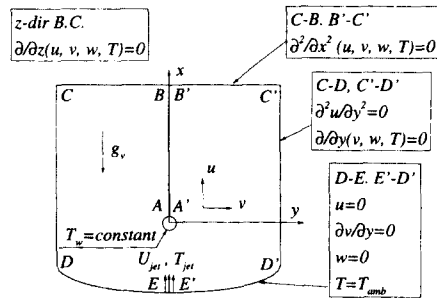


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions.

(Patankar⁽¹²⁾) 알고리즘이 사용되었다. 운동량 및 에너지 방정식은 MSI⁽¹³⁾[Modified Strongly Implicit], 압력의 경우에는 CGS⁽¹⁴⁾[Conjugate Gradient Solver]를 사용하여 수치해석하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 주요 변수

본 연구에서 주요 변수는 먼저 각속도 Ω , 실린더의 반경 R , 제트와 실린더의 거리 H , 제트의 반경 R_{jet} , 제트의 출구 속도 U_{jet} , 제트의 출구 온도 T_{jet} , 실린더의 벽면온도 T_{wall} , 주위 공기의 온도 T_{amb} 이다. 본 연구에서는 다음과 같은 무차원 변수에 대하여 계산하였으며, 기준값으로 사용된 기본 변수량은 굵게 표시하였다.

$$Re = U_{jet}D/\nu_{jet} = 106, \mathbf{213}, 426, \mathbf{639}$$

$$Gr/Re^2 = 4.4, 10, \mathbf{40}, 160$$

$$R_{jet}/R = 0.25, \mathbf{0.6}, \mathbf{1.2}, 2.4$$

$$\Theta = (T_{wall} - T_{amb}) / (T_{jet} - T_{amb})$$

$$= 0.3, \mathbf{0.5}, 0.7, \mathbf{0.9}$$

$$\Omega R / U_{jet} = \mathbf{0}, 15, \mathbf{30}, 75$$

$$H/R = 10.0$$

2차원 유동의 경우에는 각 변수들에 대해 위에 나타낸 것과 같은 변화율 주어 계산하였으나 3차원 유동에서는 계산량이 많아 밀출로 나타낸 값에 대해서만 연구를 수행하였다. 이러한 변수에서, 점성계수 ν_{jet} , ν_{amb} 는 각각 일정한 값으로 고정된 제트의 출구온도, $T_{amb}=2000K$, 주위 공기의 온도, $T_{amb}=300K$ 에서의 값을 사용하였다. 위의 무차원 변수 중에서 실린더의 벽면온도 Θ 에 따른 유동 구조 및 열전달 패턴은 크게 달라지지 않는다. 또한 실린더의 원주 속도는 제트의 출구 속도에 비해 매우 작아서 실린더의 회전은 유동 및 열전달에 미치는 영향이 다른 변수들에 비해 상대적으로 작으므로⁽¹¹⁾ 이에 대한 논의는 생략하겠다.

3.2 계산의 검증

원형 실린더에 고온의 제트가 충돌하는 경우와 관련한 연구는 거의 없는 실정으므로 연구 결과를 실험치와 직접 비교하여 검증하기는 어렵다. 따라서 계산 결과의 정확성은 선행 연구인 2차원 유동에 대한 것으로부터 간접적으로 확인하였다. (Kang과 Greif,^(5,6) Kang 등,^(15,16) Choi 등⁽⁷⁾)

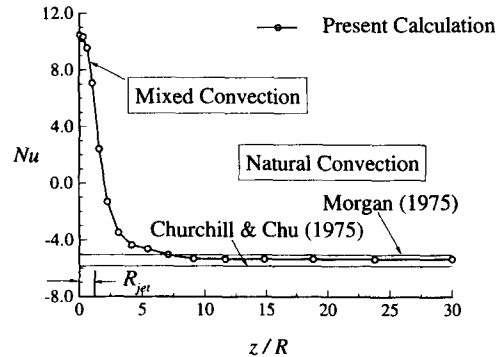


Fig. 3 Comparison of average Nusselt number distribution along the axial direction between present calculation and correlations

Fig. 3에는 $Re=213$, $Gr/Re^2=40$, $R/R_{jet}=1.2$, $\Theta=0.5$, $\Omega R/U_{jet}=0$, $H/R=10$ 의 경우에 대해 원주 방향으로 평균된 누셀트수의 실린더 축방향의 변화를 나타내었다. 고온의 제트가 충돌하는 실린더의 중간 단면에서는 혼합 대류에 의해 제트가 실린더를 가열하고 있다. 반면, 중간 단면에서 멀리 떨어진 끝 단으로 갈수록 실린더의 온도는 주위의 공기보다 높아 주위 공기에 의해 냉각되고 있다. 충돌 제트의 경우에는 균일 유동과는 달리 T_{wall} , T_{amb} 외에도 제트의 출구 온도 T_{jet} 라는 또 하나의 특성온도가 존재한다. 따라서 충돌 제트의 열전달과 균일 유동에서의 열전달을 직접 비교하기는 어렵다. 그러나 Fig. 3에 나타난 바와 같이 자연 대류 영역인 실린더 끝단에서는 비교가 가능하며, 본 계산의 결과와 기존의 Morgan,⁽¹⁷⁾ Churchill과 Chu⁽¹⁸⁾의 관계식을 비교할 때 그 오차는 각각 -5%, +9%로서 비교적 잘 일치하고 있다.

3.3 3차원 유동 및 열전달 특성

무차원 변수들의 기본값인 $Re=213$, $Gr/Re^2=40$, $R/R_{jet}=1.2$, $\Theta=0.5$, $\Omega R/U_{jet}=0$, $H/R=10$ 의 경우에 대한 유동 및 열전달을 계산하여 2차원 계산 결과와 비교하였다. Fig. 4(a)에는 실린더의 축방향 단면인 $x-z$ 평면에서의 속도 벡터를 나타내었다. 자유 제트 영역에서는 분사되는 제트에 의해 유인되는 유동을 볼 수 있으며 실린더 전면의 정체점 부근에서는 축방향의 벽면 제트가 형성된다. 후류-제트 영역에서는 부력의 영향으로 주 유동 방향의 속도(u)도 제트 출구의 유속(U_{jet})과

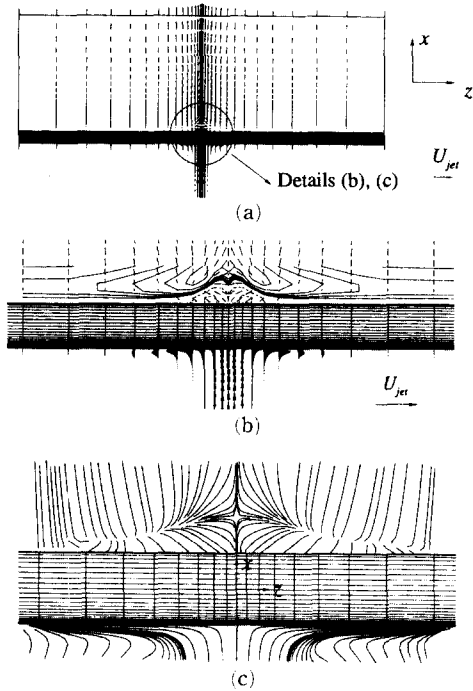


Fig. 4 (a) Variations of velocity vectors and (b) pressure contours, dashed line (-value) and (c) pathlines in x-z plane ($y=0$)

비슷한 크기 ($u/U_{jet}=0.8$) 까지 점차적으로 증가되고 있으며 상류 지역과는 달리 출구 전면에 걸쳐 유동이 유출되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 4(b)는 유동의 변화가 심한 부분을 좀 더 상세히 나타낸 것으로 속도 벡터와 함께 압력의 분포 형태를 보여 준다. 정체점에서 생긴 벽면 제트는 $z/R=1.2$ 근처에서 가장 큰 축방향의 속도 (u/U_{jet})를 보이다가 점차 감소되어 $z/R=6.0$ 이후에는 거의 볼 수가 없다. 실린더 뒤 쪽의 재순환 영역 및 후류-제트 영역의 유동은 Fig. 4(c)에 나타낸 바와 같이 유적선으로부터 좀더 잘 파악할 수가 있다. 재순환 영역 및 후류-제트 영역은 대략 $x/R=2.3$ 에 위치한 안장점을 경계로 하여 나뉘지는데 재순환 영역에서는 축방향의 압력 구배(Fig. 4(b))에 의해 바깥 쪽에서 실린더의 중심단면으로 유동이 유입되고 있으며 실린더의 중심단면에서 끝단 쪽으로 갈수록 재순환 영역이 점차 좁아지고 있다. 이러한 유입의 결과 재순환 영역에서는 압력 회복이 빨리 일어나며 2차원 유동에 비하여 박리 기포의 크기도 작아지게 된다. 후류-제트 영역 또한 바깥 쪽에서 실린

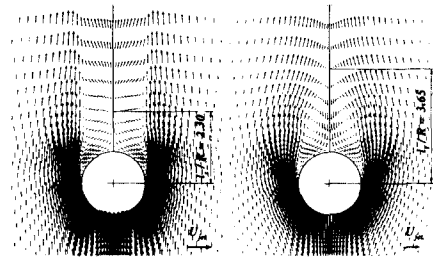


Fig. 5 Comparison of velocity vectors in the center-plane of the cylinder between 2-D and 3-D cases

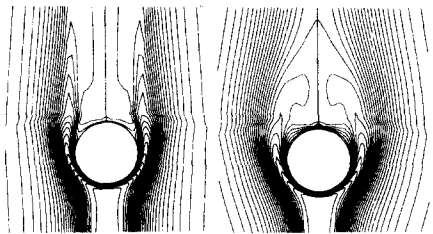


Fig. 6 Comparison of temperature contours in the center-plane of the cylinder between 2-D and 3-D cases

더의 중심 단면으로 유동이 유입되고 있음을 볼 수 있는데 이렇게 유입된 유동은 주유동 방향의 속도 증가에 기여하게 된다.

3차원 계산 결과를 2차원 계산과의 비교하기 위하여 실린더의 중심 단면인 x-y 평면에서의 유동장 및 온도 등고선을 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다. 제트의 출구에서 정체점까지의 유동 패턴은 하류의 영향을 적게 받기 때문에 두 경우가 거의 비슷하다. 그러나 3차원 유동의 경우(Fig. 5(a))에는 실린더의 중심 단면 바깥으로부터 유입되는 유동이 있기 때문에 박리 기포의 길이 (l_s)는 $l_s/R=2.3$ 으로서 2차원의 경우($l_s/R=3.65$)와 비교하여 짧다. 또한 재순환 영역에서 주유동 방향 속도의 최대값은 $u/U_{jet}=-0.13$ 으로 2차원 유동에서의 값 $u/U_{jet}=-0.52$ 에 비해 상당히 작다. 한편, 노즐에서 분출되는 고온의 제트(2000K)가 저온의 주위 공기(300K)에 의해 냉각되면서 상대적으로 낮은 온도의 실린더(1150K)를 가열하게 될 때 등온선을 Fig. 6에 나타내었다. 3차원의 경우(Fig. 6(a))에는 주위에서 상대적으로 차가운 공기가 실린더 축의

중심 단면으로 유입되어 재순환 영역의 온도는 오히려 실린더의 온도보다도 낮다. 따라서 3차원의 경우에는 실린더의 대부분은 고온의 제트에 의해 가열되고 있지만 하류의 재순환 영역 쪽($\theta > 160^\circ$)에서는 상대적으로 차가운 유입된 공기에 의해 냉각됨을 알 수 있다. 이러한 3차원 유동과는 달리 Fig. 6(b)에 나타낸 2차원 유동의 경우에는 고온의 제트가 실린더의 주위를 거의 감싸고 있어서 실린더 전체가 고온 제트에 의해 가열되고 있다.

2차원 유동과 3차원 유동의 차이를 Figs. 7~12에 나타내었다. Fig. 7은 제트의 출구로부터 후류-제트 영역에 이르기까지의 주유동 방향의 속도 변화를 실린더의 축방향 위치(z/R)에 따라 나타내었다. 제트는 부력에 의해 가속되어 속도가 증가하다가 실린더의 정체점에서는 0이 된다. 재순환 영역에서의 역류는 3차원의 경우에 비하여 2차원의 경

우가 두드러진다. 압력의 변화는 Fig. 8에 나타나 있다. 제트 출구로부터 정체점 사이에서는 급격한 압력의 증가가 일어나게 되는데 그 지점은 3차원 유동의 경우와 비교할 때 2차원 유동의 경우가 보다 상류 쪽에 위치하고 있다. 또한 재순환 영역에서의 압력은 3차원 유동의 경우 실린더의 중심 단면으로 유입되는 유동이 있기 때문에 압력의 회복이 2차원 유동의 경우에 비해 매우 빨리 일어나고 있다. 온도 분포는 Fig. 9에 나타내었는데 고온의 제트는 정체점에 이르기까지 주위의 차가운 공기에 의해 점차 냉각되고 있으며 재순환 영역에서의 온도는 2차원의 경우, 고온 제트의 영향으로 벽면의 온도보다 높다. 그러나 3차원 유동의 경우에는 축방향으로 유입되는 차가운 공기 때문에 고온 제트의 영향이 재순환 영역의 온도에 거의 영향을 주지 못하게 되어 재순환 영역의 온도는 벽면 온도보다

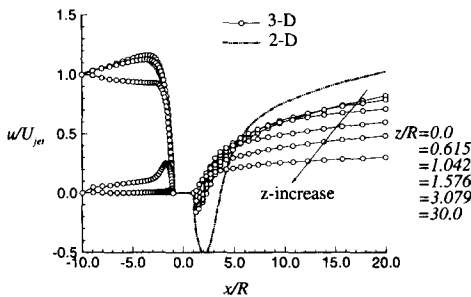


Fig. 7 Comparison of main stream velocity along the centerline of jet axis ($z=0$ plane) between 2-D and 3-D cases.

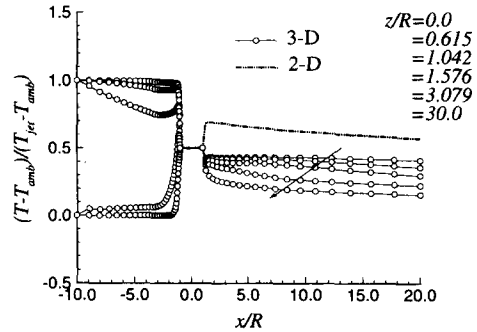


Fig. 9 Comparison of temperature along the centerline of jet axis ($z=0$ plane) between 2-D and 3-D cases.

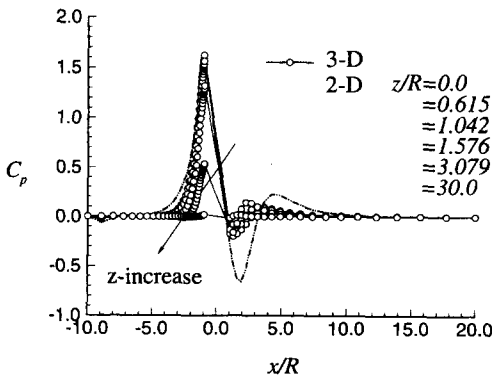


Fig. 8 Comparison of pressure coefficient along the centerline of jet axis ($z=0$ plane) between 2-D and 3-D cases.

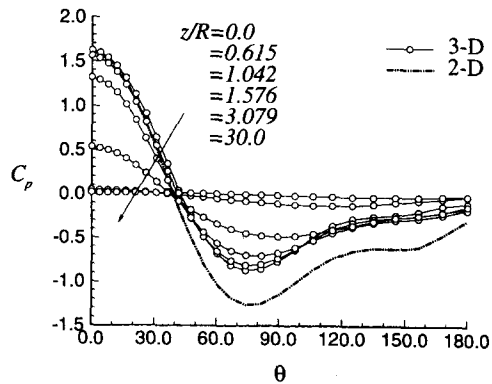


Fig. 10 Comparison of pressure coefficient over the cylinder surface ($z=0$ plane) between 2-D and 3-D cases.

낮은 경향을 보이고 있으며 두 경우의 유동은 모두 하류로 가면서 점차 냉각되고 있다.

실린더 벽면에서의 압력 계수와 마찰계수의 변화를 Figs. 10과 11에 나타내었다. 3차원 유동의 경우 축방향의 유입 유동에 의해 재순환 영역에서의 압력이 증가하여 2차원의 경우와 비교할 때 상대적으로 큰 압력을 유지하고 있다. 실린더 표면에서의 마찰계수는 두 경우 큰 차이를 보이지는 않으나 3차원의 경우 제트의 중심을 벗어나면서 속도가 감소하기 때문에 마찰저항계수는 감소한다. 국소 누셀트수 (Fig. 12) 및 온도 구배는 정체점 부근에서 최대가 되고 뒤 쪽으로 가면서 점차 감소하며 $\theta < 120^\circ$ 까지는 2차원 유동과 3차원 유동의 경우 거의 비슷한 양상을 보인다. 그러나 실린더의 뒤 쪽에서는 3차원의 경우 실린더의 중심 단면으로 축방향을 따라 저온의 공기가 유입되기 때문에 2차원의 경우와는 상당히 다르다. 2차원의 경우에는 실린더의 모든 표면이 가열되는데 반하여 3차원의 경우에는

실린더의 뒷면에서는 주위의 차가운 공기에 의해 냉각되는 결과를 볼 수 있다. 한편, 축방향으로의 국소 누셀트수의 변화를 살펴보면, 대부분의 열전달은 중심 단면 근처 ($-2.0 < z/R < 2.0$)에서 일어난다고 알 수 있다. 실린더의 끝단으로 가면서 벽면의 온도는 상대적으로 주위 공기의 온도보다 높기 때문에 열전달의 방향이 바뀌어서 실린더는 주위 공기에 의해서 냉각된다.

3.4 제트 크기 (R_{jet}/R)의 영향

유동 및 열전달은 제트의 크기에 영향을 받는다. 여기서는 실린더의 반지름 (R)에 대해 제트의 반경 R_{jet} 를 2차원 계산의 경우에는 0.25, 0.6, 1.2, 2.4로 변화시켰으며 3차원 계산의 경우에는 0.6, 1.2의 두 경우에 대해 계산을 수행하였다 ($Re = 213$, $Gr/Re^2 = 40$, $\Theta = 0.5$, $\Omega R/U_{jet} = 0$, $H/R = 10$). 제트 출구에서 정체점까지 제트는 점성에 의해 운동량이 감소하고 주위 공기로의 열손실이 있게 된다. 그러나 제트가 클수록 이러한 손실은 상대적으로 작아져서 출구로부터 정체점에 이르기까지의 최대 속도 (u/U_{jet})는 크고 박리도 일찍 시작되어 박리 기포의 크기도 커진다. 정체점까지의 온도는 $R_{jet}/R = 1.2$ 의 경우가 직경이 작은 $R_{jet}/R = 0.6$ 의 경우에 비해 높으며 후류-제트 영역에 있어서도 정체점 이전의 영향으로 직경이 큰 제트가 상대적으로 온도가 높다. 이와 같이 직경이 큰 제트는 운동량 및 열손실이 작아 실린더 벽면에서의 마찰계수도 높게 나타나며 실린더의 중심 단면 근처에서의 누셀트수도 Fig. 13에 나타난 바와 같이 크다. 한편 실린더의 끝단 근처에서는 혼합 대류에 의해 가열되는 중심 단면과는 달리 두 경우 모두

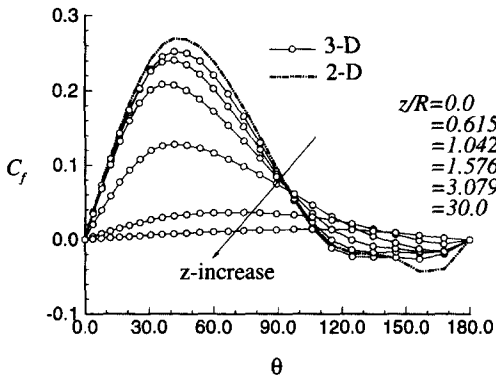


Fig. 11 Comparison of skin friction coefficient over the cylinder surface ($z=0$ plane) between 2-D and 3-D cases

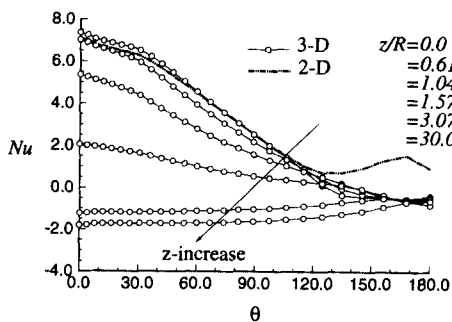


Fig. 12 Comparison of Nusselt number over the cylinder surface ($z=0$ plane) between 2-D and 3-D cases

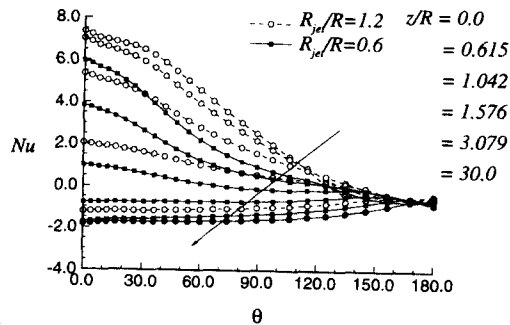


Fig. 13 Effect of the size of circular jet on the local Nusselt number over the cylinder surface at different axial locations

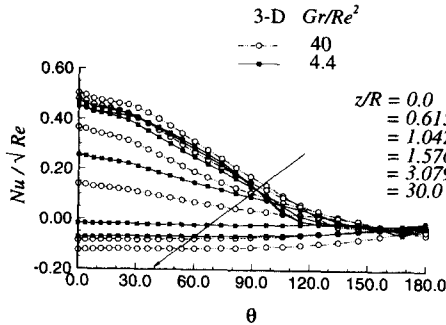


Fig. 14 Effect of Reynolds number on the local Nusselt number over the cylinder surface at different axial locations.

고온 제트의 영향이 거의 없으므로 자연 대류에 의해 실린더가 주위 공기에 의해 냉각된다.

3.5 레이놀즈수의 영향

$R/R_{jet}=1.2$, $\theta=0.5$, $\Omega R/U_{jet}=0$, $H/R=10$ 의 경우에 대하여 Re 수를 106, 213, 426, 639로 변화시키므로써 그 영향을 살펴보았으며 이에 따른 Gr/Re^2 는 각각 160, 40, 10, 4.4이다. 여기서 레이놀즈수는 제트 출구의 유속을 변화시킨 것이므로 Gr 수는 일정한 상태에서 Gr/Re^2 를 변화시켜 준 것이다. 레이놀즈수가 감소하면 Gr/Re^2 가 증가하게 되며 부력의 영향이 상대적으로 커져 더욱 가속되기 때문에 정체점에서의 압력도 커지게 된다. 또한 Gr/Re^2 가 커지면 가속에 의해 고온의 제트가 주위 공기에 의해 냉각되는 시간이 짧아지므로 정체점에 이르기까지의 제트온도도 높게 나타나며 제트가 주위 공기와 상호 작용을 하는 영역도 좁아진다. 유동은 부력에 의해 가속되어 실린더 벽면의 마찰계수도 커지고 Gr/Re^2 의 증가에 따라 박리가 지연되는 경향을 보이며 재순환 영역의 크기는 작아진다. 한편, 제트-후류 영역의 속도는 부력의 영향으로 점차 증가하게 된다. Fig. 14에는 $Gr/Re^2=4.4, 40$ 의 두 경우에 대해 실린더 벽면에서의 국소 누셀트수를 실린더의 축방향 위치에 따라 나타내었다. Gr/Re^2 가 큰 경우가 주위 공기에 의해 냉각되는 정도가 작기 때문에 혼합 대류가 일어나는 중심 단면 근처의 누셀트수(Nu/\sqrt{Re})도 크다.

4. 결 론

본 연구에서는 OVD 공정에 대한 선행 연구로서

고온의 제트가 균일한 온도의 원형 실린더에 충돌하는 경우의 유동 및 열전달의 특성에 대하여 연구를 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 3차원 유동과 2차원 유동의 두드러진 차이는 3차원 유동에서는 재순환 영역에서 실린더의 중심 축상으로 유입되는 저온의 축방향 유동이 있다는 점이다. 이 결과 3차원의 경우에는 재순환 영역의 온도가 2차원 유동에 비해 낮아진다.

(2) 제트의 직경이 커짐에 따라 주위 공기로의 열손실이 감소하여 제트 출구에서 정체점까지의 온도가 높아지며 실린더 표면에서의 국소 누셀트수도 제트의 직경이 큰 경우가 더 크게 된다.

(3) 제트의 속도에 비해 부력이 커질수록 유동은 부력에 의해 가속되어 주위 공기에 의해 냉각되는 정도가 작기 때문에 실린더 벽면에서의 누셀트수가 크게 된다.

참고문헌

- (1) Homsy, G. M., Geyling, F. T. and Walker, K. L., 1981, "Blasius Series for Thermophoretic Deposition of Small Particles," *J. Colloid Interface Sci.* 83, pp. 495~501.
- (2) 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.
- (3) Garg, V. K. and Jayaraj, S., 1990, "Thermophoretic Deposition over a Cylinder," *Int. J. Eng. Fluid Mechanics*, Vol. 3(2), pp. 175~196.
- (4) Alam, M. K., Graham, G., Janakiam, V. and Greaves, J., 1990, "Numerical Analysis of Thermophoretic Transport in the OVD Process," *ASME Numer. Heat Transfer*, HDT, Vol. 130, pp. 67~72.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Gutmark, E., Wolfstein, M. and Wygnanski, I., 1978, "The Plane Turbulent Impinging Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 88, pp. 737~756.
- (9) 이공훈, 1995, "비직교좌표계에서 유한체적법을 사용한 복사열전달 해석 및 입자부착에 관한 연구," 서울대학교 대학원, 공학박사 학위논문.
- (10) Tennekes, H. and Lumley, J. L., 1972, *A First Course in Turbulence*, Cambridge, MA: MIT Press.
- (11) 홍기혁, 1996, "실린더 주위의 열전달 및 열영동에 의한 입자 부착에 관한 연구, 서울대학교 대학원," 공학박사 학위논문.
- (12) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York: Hemisphere Publishing.
- (13) 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.
- (14) Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., 1992, *Numerical Recipe*, New York, Cambridge Press.
- (15) Kang, S. H., Hong, K. H. and Kauh, S., 1995, "A Unified Correlation of Laminar Convective Heat Transfer from Hot and Cold Cylinders in a Uniform Air Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 4, pp. 752~755.
- (16) 홍기혁, 강신형, 1996, "균일 층류유동 중에 있는 원형 실린더 주위의 열영동에 의한 입자 부착," 대한기계학회논문집, 제20권, 제2호, pp. 641~648.
- (17) Morgan, V. T., 1975, "The Overall Convection Heat Transfer from Smooth Circular Cylinders," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 11, Academic Press, New York, pp. 199~264.
- (18) Churchill, S. W. and Chu, H. H. S., 1975, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18, pp. 1049~1053.