

< 논 문 >

균일 층류유동중에 있는 원형 실린더 주위의 열영동에 의한 입자 부착

홍기혁 · 강신형
(1995년 5월 22일 접수)

Thermophoretic Particle Deposition around a Circular Cylinder in a Uniform Laminar Air Flow

K. H. Hong and S. H. Kang

Key Words : Circular Cylinder(원형 실린더), Thermophoretic Particle Deposition Rate(열영동에 의한 입자 부착률), Uniform Flow(균일유동), Variable Property(변하는 물성치)

Abstract

Thermophoretic particle deposition on a circular cylinder in a uniform laminar air flow was numerically investigated using a control volume method based on the generalized non-orthogonal coordinate system. Variation of air properties due to the change of temperature was taken into account. Effects of variable property on the distribution of heat transfer and deposition rates of particle were discussed. A new correlation of thermophoretic particle deposition on a circular cylinder was proposed in the present study.

기 호 설 명	
<p>C : 수농도 [particles/cm³] c_p : 정압비열 D : 실린더의 직경 Gr : Grashof 수 [= $g\beta(T_w - T_a)D^3/\nu^2$] h : 열전달계수 [= $-k(dT/dr)_w/(T_w - T_a)$] k : 열전도계수 Nu : Nusselt 수 [= hD/k] Pr : Prandtl 수 [= $\mu c_p/k$] Re : Reynolds 수 [= UD/ν] T : 절대온도 U : 자유유동속도 u, v : x, y방향 속도</p>	<p>Y : 질량분율(mass fraction) 그리스문자 β : 체적팽창계수 μ : 점성계수 ν : 동점성계수 ξ^i : 일반좌표계 [$\xi^1 = \xi, \xi^2 = \eta$] ρ : 밀도 τ : 특성시간 하첨자 a : 주위 (ambient) m : 평균온도에서의 값 p : 입자 w : 벽면온도에서의 값</p>

*서울대학교 대학원 기계공학과
 **회원, 서울대학교 기계공학과

1. 서 론

온도구배가 있는 기체중의 미세한 입자는 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하게 되는데 이를 열영동(thermophoresis)이라고 하며 이는 입자에 부딪히는 기체 분자의 평균적인 운동량이 입자의 서로 반대 면에서 다르기 때문에 생기는 현상이다. 입자를 물체 표면까지 도달케 하는 부착 메커니즘은 유동 상황과 입자에 따라 달라지게 되는데 주로 브라운 운동이나 입자의 관성 혹은 중력 및 전기력 등에 의해 부착한다. 그러나 본 연구에서는 자유유동과 실린더 벽면의 온도차가 크므로 앞서 열거한 여러 요인들 중에 상대적으로 입자의 부착에 큰 영향을 주는 열영동만을 다루었다. 열영동에 의한 입자의 부착은 광섬유 및 반도체의 제조 공정, 공기청정, 열교환기 및 터빈 블레이드에서의 불순물 부착 등 여러 분야에서 발생하고 있다.

이러한 여러 응용분야 중에서 본 연구는 주로 광섬유의 OVD(Outside Vapor Deposition) 공정중의 입자부착과 관련하여 수행되었다. OVD 공정에서의 입자부착은 일반적으로 원형의 토치에서 분사되는 직경 $0.2 \mu\text{m}$ 정도의 미세한 SiO_2 등의 입자 덩어리 및 고온의 공기가 제트 유동의 형태로 실린더에 충돌함으로써 이루어지므로 실제 유동의 형태는 3차원의 양상을 띤다. 따라서 본 연구는 이러한 3차원 해석의 기초연구로서, 비교적 간단한 경우인 균일한 유동중에 있는 원형 실린더 주위의 층류 유동에서 열영동과 유동장 및 온도장의 관계를 2차원 해석을 통하여 파악하였다. 또한 실제의 OVD 공정에서는 균일한 입자부착을 위하여 실린더를 회전시키게 되므로 본 연구에서는 국소부착물보다는 평균부착물에 관심을 두었다.

균일한 유동중에 있는 원형 실린더 주위의 층류 유동에서 열영동에 의한 입자 부착은 실린더 주위의 온도분포에 따라 다른 양상을 띠게 된다. 그리고 온도분포는 유동과 서로 영향을 주고받게 되는데 이러한 상호 관련성을 나타내는 무차원수가 바로 Re 수 및 온도의 함수로 주어지는 Nu 수다. 즉 열영동은 온도구배에 의해 발생하므로 이때의 입자 부착률은 무차원화된 온도구배인 Nu 수와 밀접한 관련을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 열영동에 의한 입자의 부착률을 온도장 및 유동장으로부터 구

해지는 Nu 수로 표현될 수 있는 경험식을 구하는 것을 목표로 하였다.

원형 실린더 주위에서의 열영동에 의한 입자 부착에 관해서는 Homsy et al.⁽¹⁾, Batchelor와 Shen⁽²⁾ 및 Garg와 Jayaraj⁽³⁾ 등의 연구가 있다. 그러나 이들의 연구는 박리점 이전까지의 경계층해석을 통하여 얻어진 결과로서 입자 농도가 실린더 표면을 따라 일정하다는 것을 전제로 하였고 더욱이 일정물성치에 대한 연구였기 때문에 유동의 박리 및 물성치 변화의 영향을 고려하지 못하였다. 한편 Epstein et al.⁽⁴⁾은 수직평판에서의 자연대류에 대하여 국소 Nu 수를 이용하여 입자부착률을 구한 바가 있으나 이 경우는 벽면 전체에서의 입자농도가 일정할 때에 한정된 연구이므로 실린더와 같이 원주 방향의 입자농도가 변하는 경우에는 적용할 수가 없게 된다.

본 연구에서는 $Re < 40$ 이고 입자의 농도가 충분히 희박한 경우에 대하여 유동 및 실린더 벽면 온도의 변화에 따른 물성치의 변화가 냉각된 실린더로의 입자 부착률에 미치는 영향을 유한체적적으로 수치해석하였다. Re 수가 40 이하인 경우에 대해서 연구를 수행한 것은 대략 다음의 이유이다. 즉, 전술한 바와 같이 본 연구는 열영동에 의한 입자의 부착률을 온도장 및 유동장으로부터 구해지는 Nu 수로 표현될 수 있는 경험식을 구하는 것이 목표이다. 따라서 Nu 수가 열영동에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 Re 수와 Nu 수의 관계식이 주어진 경우에 계산을 수행할 필요가 있다. 그러나 기존의 관계식들은 주로 실린더 벽면의 온도가 유동의 온도보다 높은 경우에 대한 것이며 본 연구와 같이 냉각된 실린더의 경우에는 그 오차가 크게 된다. 냉각된 실린더의 평균 Nu 수에 대해서는, 이전의 연구⁽⁵⁾에서 Re 수 및 온도의 함수로 상대적으로 오차가 작은($\pm 10\%$) 관계식을 구한 바 있으므로 본 연구도 이를 그대로 활용할 수 있도록 하기 위하여 식의 정확성이 검증된 범위인 $Re=40$ 이하로 제한한 것이다.

본 연구의 결과, 박리 이전까지의 실린더 표면에서의 입자의 농도는 거의 일정하지만 그 이후에는 점차 감소하다가 뒤쪽으로 가면서 급격히 감소함을 알 수 있었다. 한편, Batchelor와 Shen⁽²⁾이 제안한 일정물성치의 경우에 대한 농도와 온도의 관계식은 온도에 따른 물성치의 변화가 클 경우에는 약간의 오차를 보이고 있으나 여기서는 그들의 결과

식을 수정하여 사용하였다. 본 연구를 통하여 유동과 온도조건을 알 경우 즉, 이미 알려진 Nu 수로부터 실린더 주위의 평균 입자부착률을 예측할 수 있는 경험식을 구할 수 있었다.

를 중첩한 것인데 이것은 입자의 크기가 매우 작아서 Stokes수 ($Stk = \tau_p / \tau_{flow} = \rho_p d_p^2 / 18 \mu \tau_{flow}$) $\ll 1$ 이므로 가능한 것이다. 열영동속도는 다음의 식 (7)로 주어진다.

$$v_{th} = -K\nabla T / T \quad (7)$$

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

2.1 지배방정식

일반 비직교좌표계 ξ^1, ξ^2 에서 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

여기서, $\xi^1 = \xi, \xi^2 = \eta, U^i = \vec{a} \cdot (u \vec{i} + v \vec{j}), \vec{a} = \nabla \xi^i, g^{ij} = \vec{a}^i \cdot \vec{a}^j$ 이다. 본 연구의 경우에는 $Gr/Re^2 \sim 10^{-6}$ 이고 흑체복사에 의한 열전달량은 강제대류에 의한 열전달량의 1% 이하이므로 자연대류 및 복사열전달의 효과는 무시하였으며 압력에 의한 일과 점성소산항 역시 무시하였다 ($Re < 40$). 밀도, 열전도계수 및 점성계수는 다음과 같이 온도의 함수로 주어진다⁽⁶⁾ ($p=0.81, q=0.68$).

$$\begin{aligned} \rho/\rho_a &= (T/T_a)^{-1}, k/k_a = (T/T_a)^p, \\ \mu/\mu_a &= (T/T_a)^q \end{aligned} \quad (5)$$

입자의 농도가 희박할 때, 즉 입자의 수농도, $C \ll 10^9$ particles/cm³ (표준상태에서의 공기 분자의 수는 10^{19} 개)의 경우에는 입자가 유동에 미치는 영향이 없고 입자의 플럭스에 의한 에너지 전달도 없으므로 입자의 온도는 유동의 온도와 같아서 결국 입자와 기체 혼합물의 물성치는 기체의 물성치와 같게 된다. 이 경우에 있어서는 농도에 대한 지배방정식은 운동량방정식 및 에너지방정식과 분리하여 풀 수 있으며 입자의 농도가 희박하기는 하지만 Knudsen수가 작으므로 ($Kn \ll 1$) 연속체로의 접근이 가능하다. 입자 농도에 대한 지배방정식은 2차 미분항으로 표시되는 확산항을 무시할 수 있으므로 (Homsy et al.,⁽¹⁾ Batchelor와 Shen⁽²⁾) 다음과 같이 표현된다.

$$[\sqrt{g} (\rho U_{eff}^i Y)]_{,i} = 0 \quad (6)$$

여기서 U_{eff} 는 입자의 속도로서 유속과 열영동속도

여기서 K 는 열영동 계수로서 Kn 수와 입자 및 유동 기체의 물성치 등에 따라 변하게 된다. (Talbot et al.⁽⁷⁾)

그러나 본 연구에서는 상수로 가정하고 이 값의 변화에 따른 입자의 부착률이 어떻게 달라지는가를 알아보았다. 또한 Y 는 질량분율(mass fraction)로서 가스의 단위 부피당 입자의 질량을 가스의 밀도로 나눈 값으로서 본 연구에서는 수농도(C) 대신에 이 질량분율(Y)을 입자의 농도로 생각하고 계산을 수행하였다.

2.2 경계조건 및 수치해석 방법

경계조건은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 직경 D 인 실린더 벽면에서는 점착조건과 등온조건을, 실린더 표면에서 충분히 떨어진 상류와 바깥 경계면에서는 균일 평행유동을 가정하였다. 하류의 출구 경계에서는 변수 u, v, T, Y 의 x 에 대한 1차미분을 0으로 하였다. 격자계는 실린더 주위의 유동 및 열전달에 큰 영향을 미치는 정체점 부근의 정확한 수치해석을 위하여 C형태의 격자계 (123×51)를 사용하였다.⁽⁸⁾

농도에 관한 지배방정식은 확산항이 없어 1차 미분항만으로 이루어져 있으므로 벽면에서의 입자농

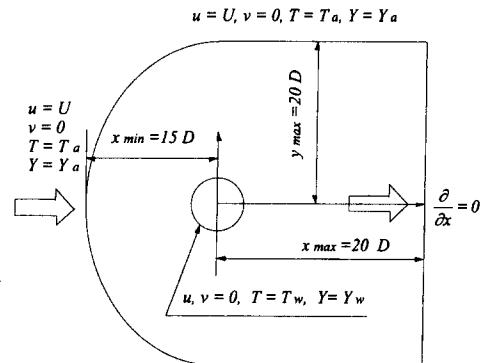


Fig. 1 A schematic of the computational model for the flow over a cylinder showing the domain of interest and the C-type grid system of 123 × 51 resolution

도(질량분율)는 식 (8)과 같이 유동방향의 열전달 및 열영동에 의한 입자 전달을 무시한 경계층 해석에 의해 계산된다. (cf. Kang과 Greif⁽⁹⁾)

$$c_p \left[\frac{\partial(\rho u T)}{\partial s} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial n} \right] = \frac{\partial}{\partial n} \left(k \frac{\partial T}{\partial n} \right)$$

$$\frac{\partial(\rho u Y)}{\partial s} + \frac{\partial(\rho v Y)}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial n} \left(K \frac{\nu \rho Y}{T} \frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad (8)$$

위의 두 식으로부터 실린더 벽면에서의 속도가 0이고 물성치의 온도에 따른 관계식 (5)를 사용하여 정리하면 벽면에서의 입자농도에 대한 경계조건은 식 (9)와 같이 쓸 수 있다. 여기서 (s, n)은 경계 밀착 직교좌표계이며 { }은 n방향의 미분을 나타낸다.

$$Y'_{w}/Y_w = (p-q+1) T'_{w}/T_w \quad (9)$$

3. 결과 및 검토

3.1 계산의 검증

실린더 주위의 유동 및 열전달에 대한 계산의 검증은 이전의 연구(Kang et al.⁽⁸⁾)에서 수행되었으며 농도장에 대한 계산의 검증은 자료의 한계로 인하여 물성치의 변화가 없는 경우에 한하였다.

Fig. 2는 정체점에서의 입자의 질량분율과 입구에서의 질량분율의 비를 나타낸 것이다. 본 연구의 계산과 Batchelor와 Shen⁽²⁾의 Blasius series 해석을 비교할 때 실린더와 입구의 온도에 따른 변화의 양상이 거의 일치함을 볼 수 있다. 여기서

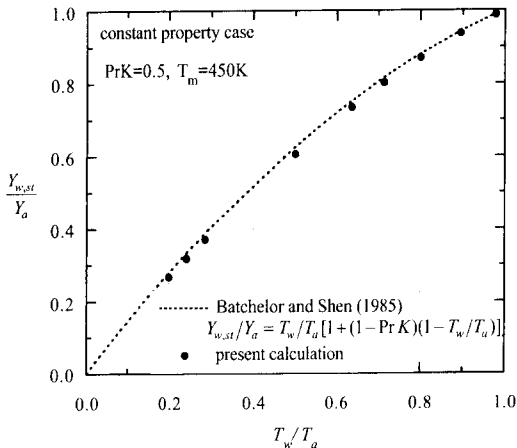


Fig. 2 The variation of mass fraction (Y) of particle at stagnation point with temperature

Batchelor와 Shen⁽²⁾의 근사식 (10)은 엄밀해로부터 얻어진 것이다. 즉, PrK=1.0의 경우, 정체점 근처에서 벽면의 입자 농도는 온도장에 의해 결정되어 $C_w/C_a = T_w/T_a$ 과 같은 엄밀해가 얻어짐을 이용하여 PrK의 함수로 구한 결과이다.

$$C_w/C_a = T_w/T_a [1 + (1 - PrK)(1 - T_w/T_a)] \quad (10)$$

Batchelor와 Shen⁽²⁾은 수농도의 비로 나타냈으나 물성치가 일정한 경우에는 질량분율의 비와 수농도의 비는 같게 된다($C_w/C_a = \rho_w Y_w / \rho_a Y_a = Y_w / Y_a$)

3.2 물성치 변화의 영향

Fig. 3은 실린더의 원주방향에 따른 벽면 입자농

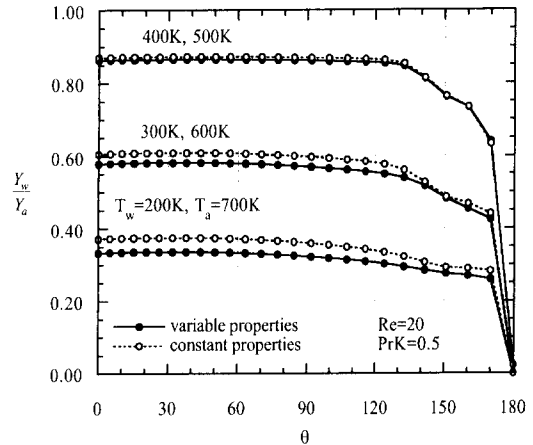


Fig. 3 Effect of property variation on local mass fraction

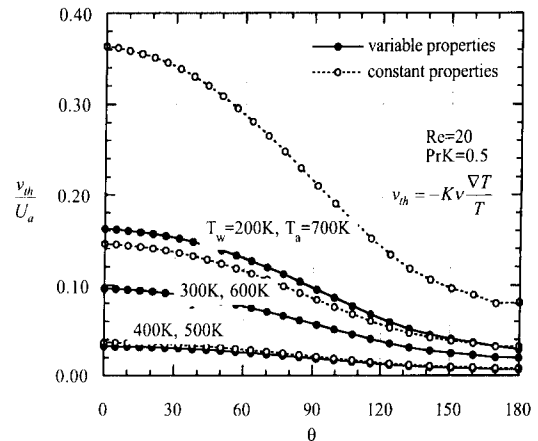


Fig. 4 Effect of property variation on local thermophoretic velocity

도의 변화를 보여준다. 온도차가 클수록 즉, $(\nabla T/T)_w$ 가 큰 쪽이 열영동속도가 커져서(Fig. 4) 벽면에서의 질량분율이 감소함을 볼 수 있다. 이는 농도에 대한 지배방정식 (6)을 다음의 (11)과 같이 표현하면 열영동속도가 흡입(suction)의 효과를 갖는 것으로부터 알 수 있다.

$$[\sqrt{g}\rho(U_{eff}^i + v_{th}^i)Y]_{\xi=0} = 0 \quad (11)$$

즉, 열영동속도가 큰 경우에는 입자가 실린더로 많이 흡입되어 벽면 근처에서의 입자 농도가 낮아지게 된다. 한편 동일한 온도(예를들면, $T_w=200$, $T_a=700$ K)에서 물질성치의 변화가 입자농도에 미치는 영향을 보면, 일정물질성치의 경우가 물질치가 변하는 경우에 비하여 열영동속도의 차가 큰데 반하여 상대적으로 표면에서의 입자의 농도도 그 차이가 작게 나타나고 있다. 이것은 부착률(식 (12))이 벽면에서의 혼합물의 밀도($\rho = \rho_p + \rho_a \cong \rho_a$)에 비례하기 때문으로 일정물질성치의 경우는 $T_m = (T_w + T_a)/2 = 450$ K에서의 밀도를, 물질치가 변하는 경우에는 $T_w=200$ K에서의 밀도를 갖기 때문이다. 즉, 일정물질성치의 경우가 열영동속도는 크지만 밀도는 상대적으로 작은 것에 기인한다.

3.3 입자의 부착률(J)

실린더 표면으로의 국소 입자 부착률은 실린더 표면에서의 열영동속도 및 질량분율의 함수로 식 (12)와 같이 주어지는데 이들은 모두 θ 의 함수임을 알 수 있다(Fig. 5).

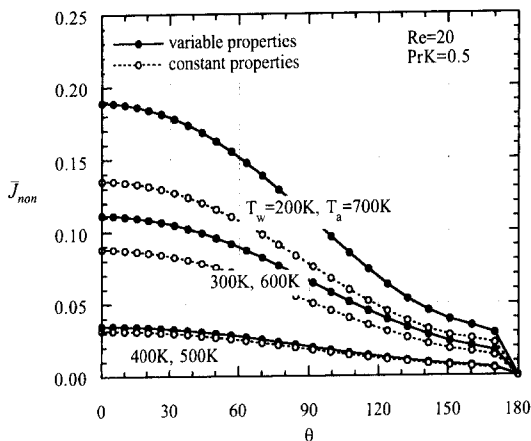


Fig. 5 Effect of property variation on local particle flux

$$J = v_{th,w}(\theta) \rho_w Y_w(\theta) \quad (12)$$

그러나 지금까지 대부분의 연구들은 실린더 표면에서의 입자 농도는 일정하다는 전제(실제로 $\theta \sim 120^\circ$ 까지는 거의 일정한 값을 갖는다)하에 입자의 부착률을 예측하였으며 이러한 가정은 평균 입자부착률을 계산할 때 $Y_w(\theta) = Y_w$ 이므로 다음의 식 (13)과 같이 $v_{th,w}(\theta)$ 만을 적분하여 평균 입자 부착률을 알 수 있도록 해준다.

$$\begin{aligned} \bar{J} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v_{th,w}(\theta) \rho_w Y_w(\theta) d\theta \\ &\cong \frac{1}{2\pi} \rho_w Y_w \int_{-\pi}^{\pi} v_{th,w}(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 열영동속도는 아래의 식 (14)와 같이 국소 Nu 수 및 온도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$v_{th,w}(\theta) = K\nu \frac{k_w}{k_m} \frac{1}{D} \frac{T_w - T_a}{T_w} Nu(\theta) \quad (14)$$

평균 입자부착률에 관한 식 (13)에 식 (14)를 대입하고 이를 입자의 플럭스로 무차원화하면 다음의 식 (15)와 같이 입자의 부착률은 Re 수, 평균열전달계수인 Nu 수 및 온도의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{J}_{non} &= \bar{J} / U_a \rho_a Y_a \\ &\cong \frac{K}{Re} \frac{T_w - T_a}{T_w} \left[\frac{\nu_w}{\nu_m} \frac{k_m}{k_w} \frac{\rho_w}{\rho_a} \right] \cdot \frac{Y_w}{Y_a} \cdot \overline{Nu} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, Y_w 는 원래 θ 에 따라 변하는 값이며 열영동속도 및 부착률과도 관계가 있으므로 유동변수(Re 수, Nu 수) 및 온도의 함수이지만 일정하다고 가정하였기 때문에 식 (15)는 이에 대한 보정을 해주어야 한다. 본 연구에서는 일단 실린더 벽면의 농도를 정체점에서의 농도와 같은 값을 갖는다($Y_w \cong Y_{w,st}$)고 전제한 후 이에 대한 보정을 식 (16)의 형태로 해주었다.

$$\bar{J}_{non} = \frac{K}{Re} \frac{T_w - T_a}{T_w} \left[\frac{\nu_w}{\nu_m} \frac{k_m}{k_w} \frac{\rho_w}{\rho_a} \right] \cdot \frac{Y_{w,st}}{Y_a} \cdot \overline{Nu} \cdot f \quad (16)$$

$Y_{w,st}/Y_a$ 는 Batchelor와 Shen⁽²⁾의 온도-농도 관계식 (10)을 그대로 사용하였고, 첨자 st는 정체점을 나타낸다. 일정물질성치의 경우에 대해서도 역시 이 식을 사용할 수 있는데 이 때에는 모든 물질치가 평균온도에서의 값을 갖게 되므로 []항이 1이 된다.

입자의 평균부착률을 식 (16)의 형태로 구하려고 할 때, 우선 문제가 되는 것이 정체점에서의 입자

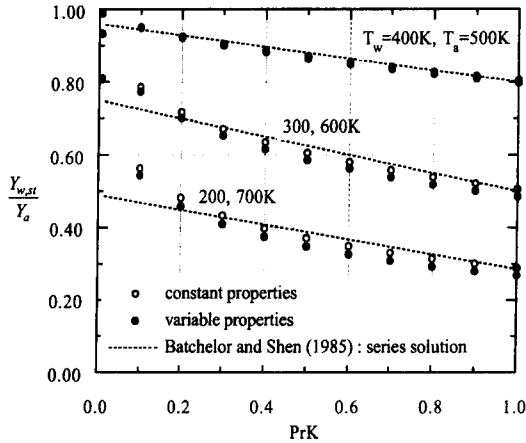


Fig. 6 Effect of property variation on mass fraction at stagnation point with thermophoretic coefficient K

의 농도($Y_{w,st}$)에 대한 예측이다. 따라서 온도 및 K 의 변화에 따른 정체점의 입자 농도가 정확히 구해지는지를 Fig. 6에 나타내 보았다. 실제로 응용되는 대부분의 경우에 해당하는 $PrK > 0.2$ 에 대해서는 약 10%의 오차 범위에서 표면 농도를 예측하고 있다. 그러나 $(\nabla T/T)_w$ 가 크고 PrK 의 값이 커질수록 물성치 변화의 영향이 증대됨을 알 수 있으며 이러한 경향은 열영동 속도에서도 잘 나타나고 있다(Fig. 7). 일정물성치의 경우가 물성치가 변하는 경우에 비하여 열영동 속도가 크게 나타나는 것은 동점성계수가 상대적으로 큰 값을 갖기 때문이다. Fig. 8에는 입자부착률이 온도 및 PrK 의 변화에 따라 어떠한 양상을 보이는지를 나타내었다. 대체적인 경향은 국소부착률의 경우와 비슷하다. 즉, 온도차가 크고 벽면의 온도가 낮을수록 입자부착률이 증가함을 보이고 있다.

결과적으로 식 (10)을 사용하면 정체점의 벽면 농도에 대해서는 온도 및 PrK 의 변화에 따른 비교적 정확한 계산이 가능함을 알 수 있으며 $Y_w = Y_{w,st}$ 라는 가정과 물성치의 변화에 따른 대한 보정을 해주면 식 (16)과 같이 입자의 평균부착률을 예측할 수 있을 것이다. 한편 식 (16)을 살펴보면 f 및 \overline{Nu} 외의 다른 변수들은 실린더 및 자유유동의 온도, 유동 조건이 주어지면 구할 수 있는 값들로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그러나 \overline{Nu} 또한 식 (17)과 같이 주어지므로 남은 것은 f 를 구하는 일이다.

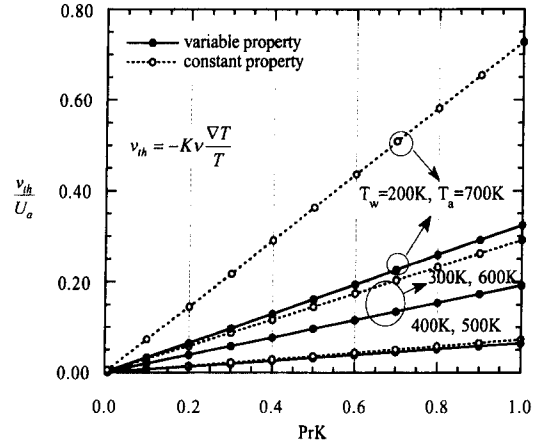


Fig. 7 Effect of property variation on thermophoretic velocity at stagnation point with thermophoretic coefficient K

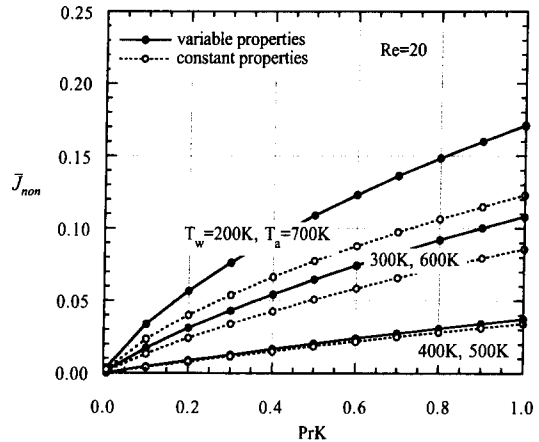


Fig. 8 Effect of property variation on particle flux at stagnation point with thermophoretic coefficient K

$$\overline{Nu} = (0.22 + 0.58Re^{0.45}) (T_w/T_a)^{0.113} \quad (17)$$

위 식은 이전의 연구⁽⁵⁾에서 구한 관계식으로서 $Re = 0.5 - 40$, $T_a = 200 - 900$ K, $T_w = 300 - 900$ K의 균일 유동에 대해 성립하며 가열된 실린더 및 냉각된 실린더의 두 경우에 모두 적용할 수 있다.

이제, 앞서 제안된 식 (16)의 보정인자를 구해보기로 하자. 본 연구에서는 단순히 실린더 표면의 농도를 정체점의 농도와 같다고 가정하였다. 그러나 전술한 바와 같이 표면의 농도는 다시 열영동 속도 및 부착률과 연계(couple)되어 있을뿐만 아니

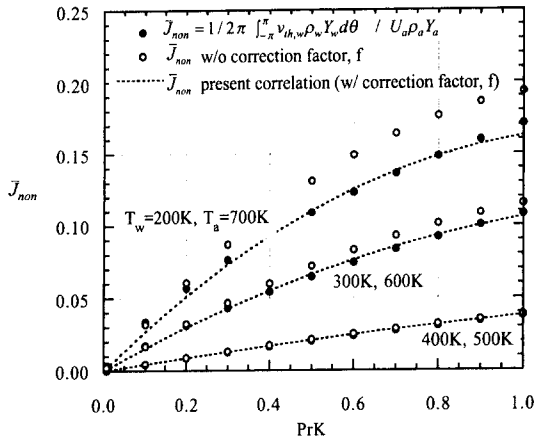


Fig. 9 A new correlation suggested in this work as a function of Nusselt number

라 실린더의 원주방향으로도 변화하는 복잡한 양상을 보인다. 또한 이와 함께 물성치의 변화에 따른 영향도 있기 때문에 보정인자에 대한 물리적인 설명을 한다는 것은 매우 어렵다고 생각된다. 그러나 이들에 대한 복합적인 영향을 고려한다면 식 (16)의 보정인자는, 일정물성치에서의 정체점의 농도를 사용하여 관계식을 수립한 데 따른 물성치의 변화에 대한 오차 보정이라고 할 수 있겠다. 본 연구의 결과 보정인자는 다음의 식 (18)과 같이 온도의 함수로 구할 수 있었다.

$$f = 1 - (\Delta T / 2T_a)^2, \Delta T = T_a - T_w \quad (18)$$

위 식에서 알 수 있듯이 실린더와 외부유동의 온도차, ΔT 가 증가할수록 보정량 ($f=0.75 \sim 1.0$)도 커진다.

기존의 연구에서는 국소 Nu 수를 이용하여 국소 입자부착률을 구한 바가 있으나 벽면 전체에서의 입자농도가 일정할 때에 한정된 연구이며 더욱이 일정물성치의 경우에 대한 연구이므로 실린더와 같이 원주방향의 입자농도가 변하는 경우에는 적용할 수가 없다. 또한 온도차가 커짐에 따라 그 오차도 커지게 된다. 그러나 본 연구는 식 (18)과 같이 보정인자를 새로이 도입함으로써 평균 입자부착률에 대한 예측을 가능케 하였다.

Fig. 9에는 무차원화된 입자부착률을 식 (18)을 사용하여 보정한 경우와 그렇지 않은 두 경우에 대하여 나타내었다. 본 연구에서 제안된 관계식 (16)을 계산된 부착률과 비교해 볼 때 약 10% 이내의 오차 범위에서 입자의 부착률을 잘 예측하고 있음

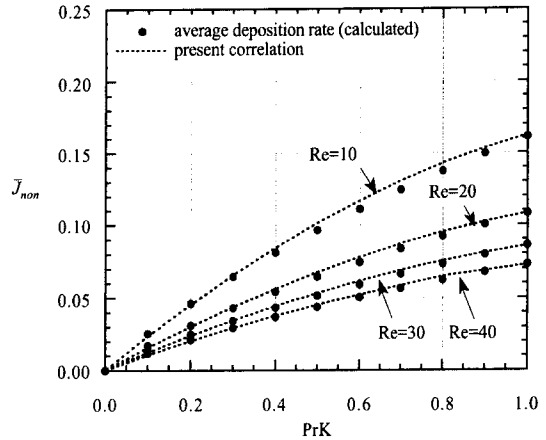


Fig. 10 Confirmation of the proposed correlation for different Reynolds numbers. ($T_w=300, T_a=600$ K case)

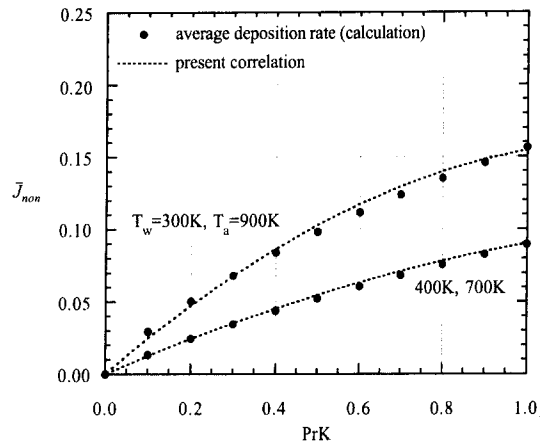


Fig. 11 Confirmation of the proposed correlation for different mean temperature, T_m . ($Re=20$)

을 볼 수 있다. 또한 식 (16)은 일정한 Re 수 (=20) 및 평균온도 ($T_m=450$ K)에 대해서 구해진 것이지만 Re 수 (Fig. 10) 및 평균온도 (Fig. 11)가 다른 경우에 대해서도 성립함을 확인하였다. 결론적으로, 본 연구의 결과식 (16)은 $T=200 \sim 900$ K, $(\Delta T)_{max}=700$ K의 범위에서 적용될 수 있으며 입자의 부착률도 비교적 잘 예측하고 있음을 확인하였다.

4. 결 론

균일 유동중에 있는 원형 실린더에서 유동 및 벽

면온도에 따른 물성치의 변화가 냉각된 실린더로의 열영동에 의한 입자부착률에 미치는 영향을 유한체 적법으로 수치해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존의 경계층 해석을 통한 연구는 박리 이전까지의 해석만을 하였으며 일정물성치의 경우에 한하였다. 본 연구의 결과 실린더 표면에서의 입자 농도 및 입자의 부착률은 박리 이전까지는 거의 일정해서 경계층 해석과 마찬가지로의 결과를 보인다. 그러나 그 이후에는 경계층 해석의 결과와는 달리 점차 감소하다가 뒤 쪽으로 가면서 급격히 감소한다.

(2) 유동과 온도 조건을 알면 평균 Nu 수를 알 수 있다. 본 연구에서는 이 Nu 수를 이용하고 물성치의 변화를 고려하는 보정인자를 도입하여 실린더 주위의 평균 입자부착률을 10% 이내의 오차 범위에서 예측할 수 있는 경험식을 구하였다. 본 연구에서 확인된 이 경험식의 적용 온도 범위는 $T = 200 \sim 900$ K, $(\Delta T)_{\max} = 700$ K이다.

후 기

본 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

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.*, Vol. 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. of Eng. Fluid Mechanics*, Vol. 3(2), 175~196
- (4) Epstein, M., Hauser G. M. and Henry, R. E., 1985, "Thermophoretic deposition of particles in natural convection flow from a vertical plate," *J. Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 272~276.
- (5) 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
- (6) Chen, C. H. & Weng, F. B., 1990, "Heat transfer for incompressible and compressible fluid flow over a heated cylinder," *Numer. Heat Transfer*, Vol. 18, pp. 325~342
- (7) 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, part4, pp. 737~758.
- (8) 강신형, 홍기혁, 고상근, 1993, "물성치의 변화를 고려한 균일유동 중에 있는 원형 실린더 주위의 층류 열전달, 대한기계학회논문집, 제17권, 제6호, pp. 1584~1595.
- (9) 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.