

원형 실린더 주위의 고온 유동에서 입자의 부착 해석

정석민*, 김동주*,#

*금오공과대학교 기계공학과

Simulation of the Particle Deposition on a Circular Cylinder in High-Temperature Particle-Laden Flow

Seok-min Jeong*, Dongjoo Kim*#

*Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received 12 December 2018; received in revised form 22 December 2018; accepted 3 January 2019)

ABSTRACT

Numerical simulations are performed for the thermal fluid flow around a circular cylinder, and the particle trajectories are calculated to investigate the particle motions and deposition characteristics. We aim to understand the effects of three important parameters (particle Stokes number, temperature difference in the flow and on the cylinder surface, and thermal conductivity ratio between the fluid and the particles) on the deposition efficiency. The results show that the thermophoretic effect is insignificant for particles with large Stokes numbers, but it affects particles with small Stokes numbers. The deposition efficiency increases with the increase in temperature difference between the flow and the cylinder or the decrease in ratio of thermal conductivity of the particles to the fluid. When thermophoresis becomes significant, the particles are deposited even on the back side of the cylinder.

Key Words : Circular Cylinder(원형실린더), Thermophoresis(열영동), Particle Deposition(입자 부착), Particle Interception(입자 인터셉션)

1. 서 론

원형 실린더 주위의 입자 부유 유동에서 입자의 거동, 특히 입자가 실린더 표면에 부착(deposition)되는 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 관련 응용 분야로는 필터와 보일러 열교환기를 예로 들 수 있다^[1]. 필터에서는 입자를 최대한 걸러내는 것이 목표이므로 입자가 필터 표면에 잘 부착되도록 설계해야 한다. 반면, 열교환기에서는 입자가 열교환

기 표면에 부착되면 부식을 일으키거나 열전달율을 감소시키므로 입자의 부착을 최소화시키는 설계가 필요하다.

원형 실린더 주위의 입자 부유 유동에 대한 선행 연구에서는 대부분 입자의 열영동(thermophoresis)을 고려하지 않고 관성 충돌(inertial impaction)만을 고려하여 입자 부착을 해석하였다^[1,2]. 하지만 보일러 열교환기에서는 고온의 유동과 열교환기 관 표면의 온도 차이로 인해 열영동이 입자 부착에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유동과 실린더 표면의 온도차가 있는 경우에 대해 수치해석을 수행하고, 열영동이 입자의 부착에 미치는 영향을 연구

Corresponding Author : kdj@kumoh.ac.kr
Tel: +82-54-478-7301, Fax: +82-54-478-7319

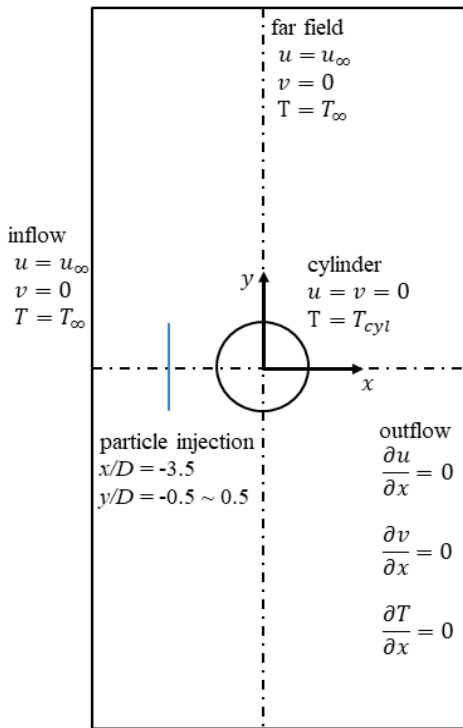


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

하였다. 특히, 주요 파라미터인 유동과 실린더 표면의 온도 차이, 유체에 대한 입자의 열전도 계수비, 입자의 Stokes 수가 입자의 부착에 미치는 영향을 분석하였다.

대부분의 선행 연구에서 입자를 하나의 점으로 가정하고 입자의 인터셉션(interception)을 무시하거나, 입자의 부착효율 계산 시 입자의 크기를 고려한 간단한 보정 모델을 사용하였다. 하지만 이 근사적 방법들의 정확성에 대한 선행연구 및 문헌을 찾기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 입자의 크기를 고려하여 인터셉션을 정확히 해석한 후, 위의 근사적 방법들이 얼마나 정확한지를 평가하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 유동해석 방법

Fig. 1은 실린더 주위의 유동을 해석하기 위한 해

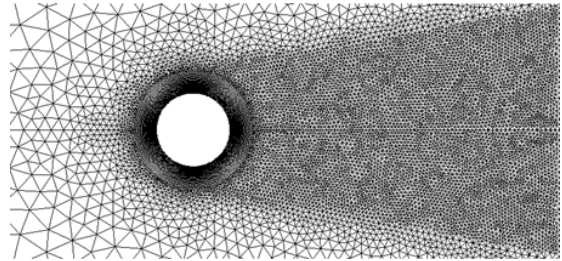


Fig. 2 Computational mesh

석 영역 및 경계조건을 보여준다. 좌표계의 중심은 실린더의 중심으로 정의하였고, 해석 영역은 x 방향으로 $-20D \sim 22D$, y 방향으로 $-50D \sim 50D$ 를 사용하였다. 경계조건으로 입구 및 원거리에서 Dirichlet 경계조건을 사용하였고, 출구에서는 Neumann 조건, 실린더 표면에서는 점착조건(No-slip condition)을 사용하였다. 자유유동의 온도는 1500K으로 고정하였고, 이 온도에서의 유체 물성을 해석에 사용하였다. 유체와 실린더 표면의 온도 차이에 따른 입자의 거동 변화를 확인하기 위해 실린더 표면의 온도를 500~1500K으로 바꾸어가며 해석을 수행하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 격자이고, 약 4만 개의 격자를 사용하였다. 실린더 주위의 경계층 영역에는 직사각형 격자(structured mesh)를 사용하였으며, 그 이외의 영역에서는 삼각형 격자(unstructured mesh)를 사용하였다.

본 연구에서는 Reynolds 수($Re = \rho u_{\infty} D / \mu$)가 100인 경우를 해석하였으며, 이 조건에서 유동은 2차원, 비정상, 비압축성, 층류 유동이다. 여기에서, ρ 는 유체의 밀도, u_{∞} 는 자유유동 속도(free stream velocity), D 는 실린더의 직경, μ 는 유체의 점성계수를 나타낸다. 유동에 대한 지배방정식으로 다음과 같이 연속방정식, Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (e u_j) = k \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

여기서, x_i , u_i , p 는 각각 직교 좌표와 유체의 속도 성분 및 압력이다. 또한 k 와 T 는 각각 유체의 열전도 계수(thermal conductivity)와 온도를 나타낸다. 속도와 압력의 연계 알고리즘으로 Fractional step method를 사용하였고, Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식에서 대류항의 공간 차분에는 2차 정확도의 상류도식(linear upwind scheme)을 사용하였다.

2.2 입자의 거동해석 방법

입자의 거동을 해석하기 위해 아래 식과 같이 Lagrangian 방법으로 해석을 수행하였으며, 입자에 작용하는 외력으로는 항력($F_{D,i}$), 양력($F_{L,i}$), 열영동 힘($F_{th,i}$)을 고려하였다. 입자는 구형으로 가정하였으며, 입자가 유동에 영향을 주지 않는 one-way coupling을 가정하였다. 또한 입자의 체적분율이 작다고 가정하여 입자간의 충돌은 무시하였다.

$$m_p \frac{du_{i,p}}{dt} = F_{D,i} + F_{L,i} + F_{th,i} \quad (4)$$

$$\frac{dx_{i,p}}{dt} = u_{i,p} \quad (5)$$

$$F_{D,i} = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi}{4} d_p^2 |u_i - u_{i,p}| (u_i - u_{i,p}) / C_c \quad (6)$$

$$C_D = \begin{cases} 0.44, & \text{if } Re_p > 1000, \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), & \text{if } Re_p \leq 1000 \end{cases} \quad (7)$$

$$Re_p = \frac{\rho |u_i - u_{i,p}| d_p}{\mu} \quad (8)$$

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-(1.1d_p/2\lambda)}) \quad (9)$$

여기서, m_p , $u_{i,p}$, $x_{i,p}$, d_p 는 각각 입자의 질량, 속도, 위치 및 직경을 나타낸다. Re_p 는 입자의 직경 및 입자와 유체의 상대 속도를 사용하여 정의한 입자의 Reynolds 수를 나타내며, C_D 는 항력 계수로서 Schiller-Naumann^[3]의 항력모델을 사용하였다. 또한, C_c 는 Stokes-Cunningham factor^[4]를 나타내고, λ 는 기체 분자의 평균자유경로(mean free path)를 나타낸다.

한편, 양력은 아래 식 (10)과 같으며 Saffman

lift^[5]라 불리고 있다. 상수 K_L 은 81.2이고, r_p , $\dot{\gamma}$, ν 는 각각 입자의 반경, 유체의 전단변형율(shear strain rate)과 동점성 계수를 나타낸다.

$$F_{L,i} = K_L \mu (u_i - u_{i,p}) r_p^2 (\dot{\gamma} / \nu)^{1/2} \quad (10)$$

열영동 힘으로 가장 많이 사용되고 있는 모델은 Talbot 모델^[6]로 식 (11)과 같다. 식에서 알 수 있듯이 열영동 힘은 온도 구배($\partial T / \partial x_i$)의 반대 방향으로 작용하여 입자를 온도가 낮은 쪽으로 움직이게 한다. $D_{T,p}$ 는 열영동 계수이고, $K_n (= 2\lambda / d_p)$ 은 Knudsen 수로 유체의 평균자유경로와 입자 반경의 비이다. K 는 입자에 대한 유체의 열전도 계수비이며, $C_s = 1.17$, $C_t = 2.18$, $C_m = 1.14$ 는 모델 상수이다.

$$F_{th,i} = -D_{T,p} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (11)$$

$$D_{T,p} = -\frac{6\pi d_p \mu^2 C_s (K + C_t K_n)}{\rho (1 + 3C_m K_n) (1 + 2K + 2C_t K_n)} \quad (12)$$

$$K = \frac{1}{A} = \frac{k}{k_p} \quad (13)$$

식 (14)~(16)는 입자 해석을 하는데 있어 중요한 무차원 변수들을 나타낸다. St_k 는 Stokes 수로서 유동의 시간 스케일(flow time scale, τ_f)에 대한 입자 시간 스케일(particle time scale, τ_p)의 비이다. 본 연구에서 Stokes 수를 0.01~10 범위에서 바꾸어가며

Table 1 Particle sizes considered in this study

St_k	d_p/D
0.01	9.49×10^{-4}
0.05	2.12×10^{-3}
0.1	3.00×10^{-3}
0.5	6.71×10^{-3}
1	9.49×10^{-3}
4	1.90×10^{-2}
7	2.51×10^{-2}
10	3.00×10^{-2}

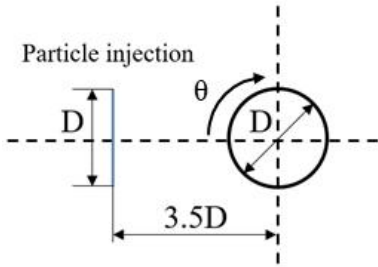


Fig. 3 Location of particle injection

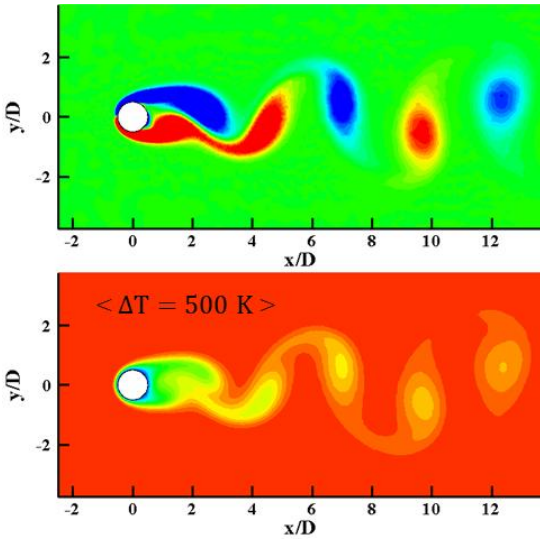


Fig. 4 Contours of vorticity and temperature

해석을 수행하였고, 밀도비($S = \rho_p / \rho$)는 1,000으로 고정하였다. 따라서, Stokes 수의 증가는 입자 직경의 증가를 의미하며, 입자와 실린더의 직경비는 식 (16) 및 Table 1과 같다. 유체에 대한 입자의 열전도 계수비($\Delta = k_p / k$)는 1, 10, 100의 세 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

$$St_k = \frac{\tau_p}{\tau_f}, \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}, \tau_f = \frac{D}{2u_\infty} \quad (14)$$

$$S = \frac{\rho_p}{\rho} \quad (15)$$

$$\frac{d_p}{D} = 3 \sqrt{\frac{St_k}{SRe}} \quad (16)$$

Table 2 Simulation results for flow field

	$\overline{C_D}$	St_r
Present study	1.345	0.166
Haugen & Kragset ^[1]	1.328	0.166
Park et al. ^[7]	1.33	0.165
Williamson ^[8]	-	0.164

Table 3 Simulation results for temperature field

	\overline{Nu}
Present study	5.21
Mahir & Altac ^[9]	5.18
Knudsen & Katz ^[10]	5.19
Churchill & Bernstein ^[11]	5.16

Fig. 3은 입자의 초기 위치와 실린더의 정체점으로부터 시계방향으로 측정된 각도 θ 를 나타낸 그림이다. 실린더에 의해 속도 및 압력의 구배가 발생하지 않는 $x = -3.5D$ 에서 입자를 분사시켰다. 입자의 초기 y 좌표는 실린더의 투영 영역에 해당하는 곳($-0.5D \leq y \leq 0.5D$)으로 제한하였다. 이는 투영 영역 밖에서 분사된 입자가 실린더 표면에 부착되지 않고 실린더 주위를 지나가기 때문이며, 아래 식과 같이 정의된 입자의 부착효율 η 는 최대값이 1이 된다.

$$\eta = \frac{N_{dep}}{N_{inj}} \quad (17)$$

여기서 N_{dep} 는 실린더 표면에 부착된 입자의 수를, N_{inj} 는 초기 위치에서 분사된 전체 입자의 수를 나타낸다. 입자의 초기 속도는 자유유동 속도와 동일한 값을 사용하였고, 입자 해석 과정에서 실린더 표면에 닿는 모든 입자는 실린더 표면에 부착된다고 가정하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 유동장 및 온도장

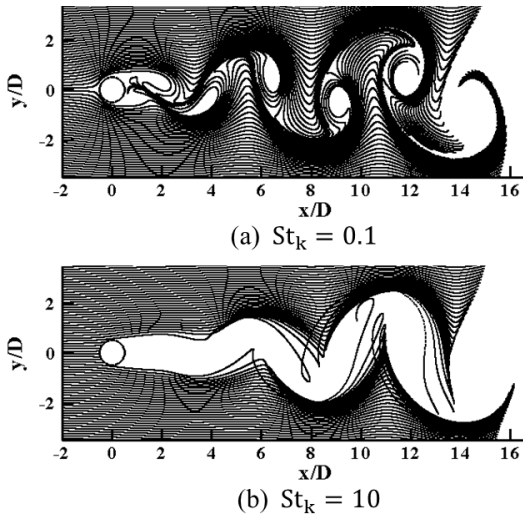


Fig. 5 Instantaneous distribution of particles

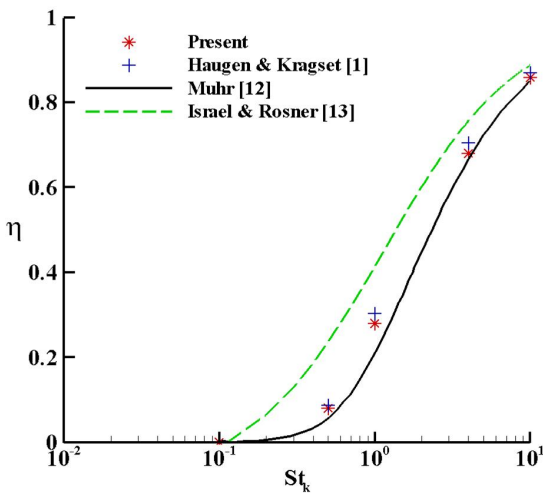


Fig. 6 Particle deposition efficiency

입자의 거동을 해석하기에 앞서 원형 실린더 주위의 유동 및 온도 분포를 먼저 해석하였다. Fig. 4는 해석 결과가 충분히 수렴한 순간의 와도 (vorticity) 분포와 온도 분포를 나타낸 것으로 전형적인 Karman 보텍스 shedding(vortex shedding)을 잘 보여주고 있다. 해석 결과의 정량적인 검증을 위해 평균 항력 계수($\overline{C_D}$), Strouhal 수(St_s) 및 평균 Nusselt 수(\overline{Nu})를 Table 2와 Table 3에 선행 연구의 결과와 비교하였다. 본 연구의 해석 결과가 선행

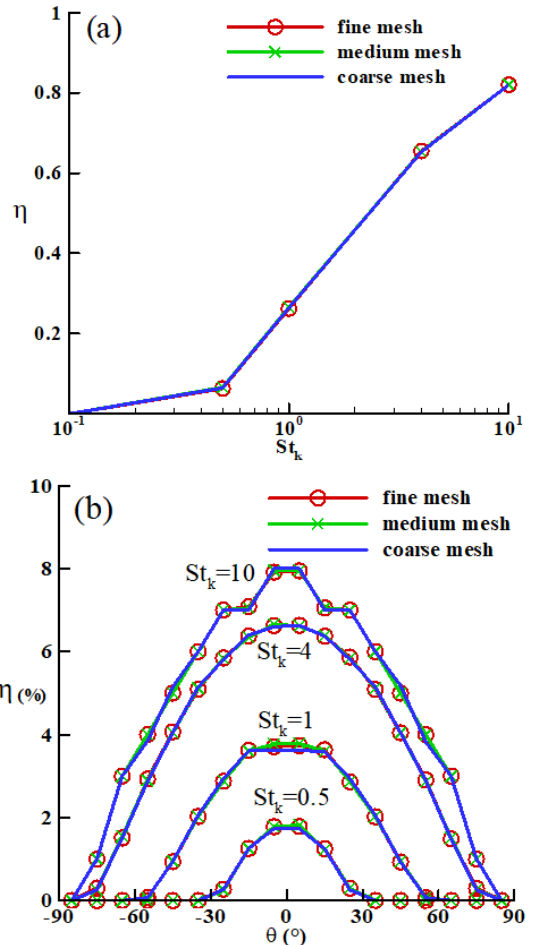


Fig. 7 Particle deposition efficiency: (a) Overall efficiency; (b) Local efficiency

연구의 결과^[1,7-11]와 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 입자의 분산과 부착

Fig. 5는 Stokes 수에 따른 입자 분포의 차이를 보여주는 것으로 많은 입자들을 작은 원으로 나타낸 것이다. Stokes 수가 0.1인 경우에는 입자의 관성력이 작아 유선을 잘 따라가기 때문에 보텍스의 중심까지 입자가 분포한다. 하지만, Stokes 수가 10인 경우에는 입자의 관성력이 크기 때문에, 보텍스 중심 부근에 입자가 존재하지 않는 영역이 관찰된다.

Fig. 6은 실린더 표면에 부착되는 입자의 부착효

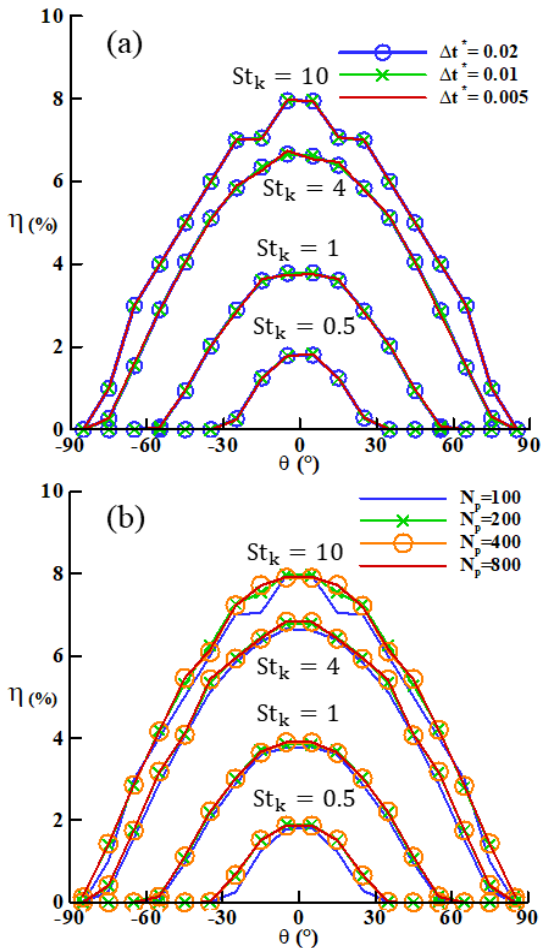


Fig. 8 Local deposition efficiency : (a) Time step size; (b) Number of particles injected

을 Stokes 수의 함수로 나타낸 그래프이다. Stokes 수가 증가할수록 입자의 부착효율이 증가하며, 본 연구의 해석 결과가 전반적으로 선행 연구의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

3.3 해상도 테스트

열영동의 효과에 대해 알아보기 전에 격자, 시간 간격 크기, 분사되는 입자 수에 대해 해상도 테스트를 수행하였다. 먼저 격자는 약 3만2천 개의 성긴 격자 A, 약 4만 개의 중간 격자 B, 약 16만 4천 개의 조밀한 격자 C의 세 가지를 고려하였다. 격자

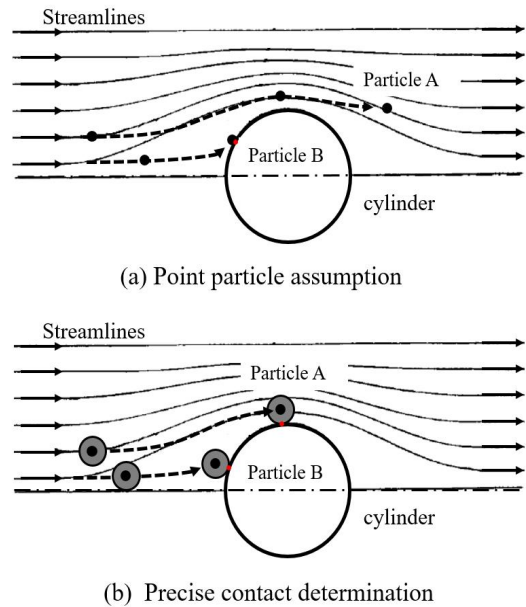


Fig. 9 Approaches for particle interception

들은 정확한 경계층 해석 및 입자부착 해석을 위해 실린더 표면 위에 각각 90×40, 180×40, 360×60개의 직사각형 격자를 포함하고 있다. Fig. 7은 실린더 표면 전체에 부착되는 입자의 부착효율과 실린더 표면을 5도 간격을 나누어 측정된 구간별 부착효율을 나타낸 것으로, 구간별 부착효율의 합은 전체 부착효율이 된다. 그림에서 알 수 있듯이 격자의 해상도가 이미 충분하여 Stokes 수에 따른 전체 부착효율 및 구간별 부착효율에 거의 영향을 주지 않는다.

다음으로 시간간격 크기($\Delta t^* = u_\infty \Delta t / D$)와 분사되는 입자 수가 해석 결과에 주는 영향을 살펴보았다. Fig. 8(a)에 나타낸 것과 같이 시간간격 크기 역시 해석 결과에 거의 영향을 주지 않는다. 하지만 Fig. 8(b)에서 알 수 있듯이 매 순간 분사되는 입자 수는 해석 결과에 어느 정도 영향을 준다. 즉, 입자 수가 충분히 크기 않으면, 구간별 부착효율이 부드러운 곡선이 되지 못한다. 이상의 해석 결과를 바탕으로 이후의 계산에서는 중간 해상도의 격자와 $\Delta t^* = 0.01$ 에서 매 순간 400개의 입자를 분사하여 해석하였다.

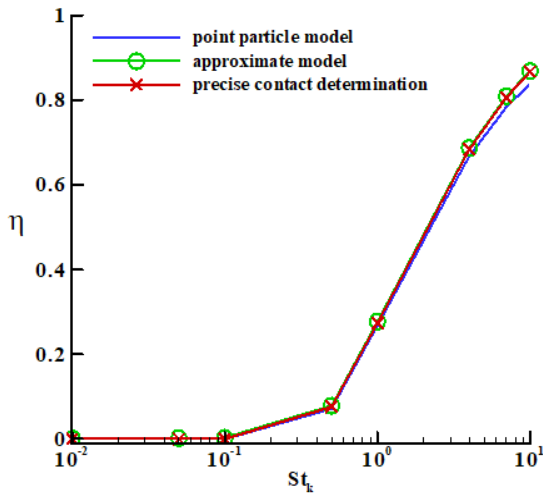


Fig. 10 Comparison of particle deposition efficiency from three different approaches

3.4 인터셉션 고려에 따른 입자부착 변화

Fig. 9는 실린더 주위를 지나가는 입자의 거동을 나타낸 그림으로 입자의 인터셉션 고려 유무에 따른 차이를 보여준다. 입자 A의 경우, Fig. 9(a)와 같이 입자의 크기를 고려하지 않으면 실린더 표면에 닿지 않고 실린더를 지나가지만, Fig. 9(b)와 같이 실제 상황에서는 입자의 크기 때문에 실린더 표면에 부착된다. 이러한 부착 현상을 인터셉션이라고 한다.

입자의 인터셉션에 관한 모델링은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 입자를 점으로 가정하고 입자의 크기 및 인터셉션을 고려하지 않는 방법(point particle model)인데, 가장 많이 사용되는 방법이다. 두 번째는 입자의 크기를 근사적으로 고려한 모델(approximate model)로 필터의 효율 계산을 위해 제안된 방법이다. 여기서는 입자의 부착효율을 계산할 때 입자를 점으로 가정하고 구한 부착효율(η_{point})에 실린더와 입자의 직경비를 더하여 보정한다($\eta_{app} = \eta_{point} + d_p/D$). 마지막으로 입자와 실린더의 접촉 여부를 판단할 때 입자의 직경을 정확히 고려하는 방법(precise contact determination)이다. 즉, 입자 중심과 실린더 중심 사이의 거리(L)가 입자

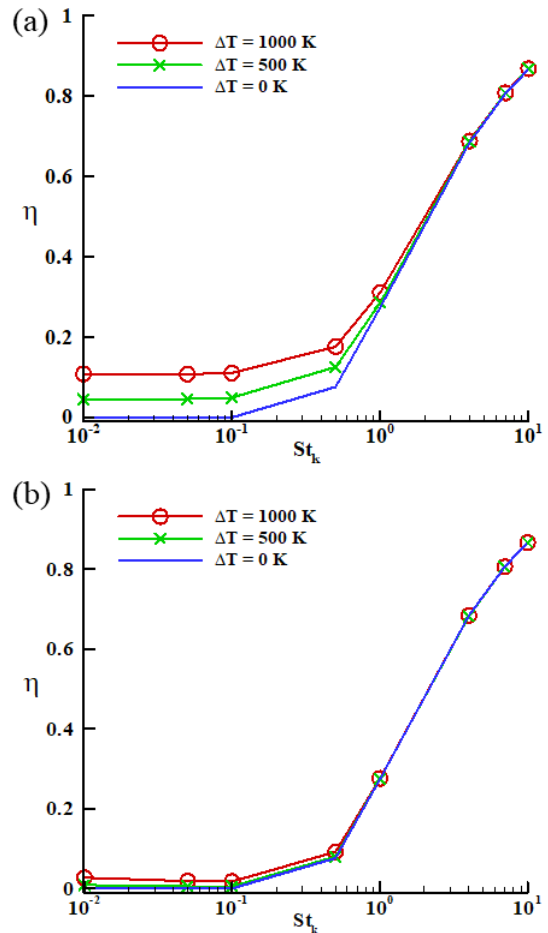


Fig. 11 Thermophoretic effect on overall deposition efficiency: (a) $\Lambda = 1$; (b) $\Lambda = 100$

반경(r_p)과 실린더 반경(R)의 합보다 작거나 같으면, 입자와 실린더가 접촉한 것으로 판단한다 ($L \leq R + r_p$).

Fig. 10은 세 가지의 인터셉션 모델 각각에 대해 해석한 후, 입자의 전체 부착효율을 비교한 것이다. 여기서는 입자의 직경을 정확히 고려한 해석 결과를 기준으로 다른 두 방법의 정확성을 평가하였다. 전체적으로 살펴보면, 인터셉션 효과는 Stokes 수가 큰 입자에서 크게 발생한다. 입자를 점으로 가정하고 인터셉션을 무시한 방법에서는 예상대로 부착효율을 작게 예측하였고, 최대 3%의 오차가 발생한

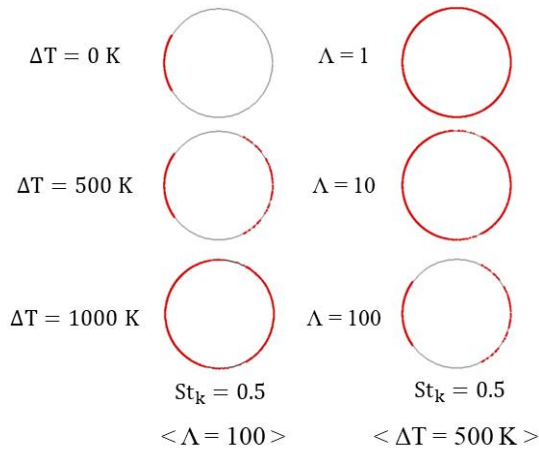


Fig. 12 Spatial distribution of deposited particles

다. 반면, 근사 모델을 사용한 경우에는 부착효율을 약간 크게 예측하며, 최대 0.3%의 오차를 보여 오차가 크지 않음을 알 수 있다.

3.5 열영동이 입자부착에 미치는 영향

마지막으로 열영동이 입자 부착에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 11은 자유 유동과 실린더 표면의 온도 차이에 따른 입자의 부착효율 변화를 보여준다. 열전도 계수비 Λ 가 1인 경우, Stokes 수가 작은 입자에서는 온도 차이가 증가할수록 입자의 부착이 증가한다. 하지만, Stokes 수가 증가할수록 입자에 작용하는 열영동의 효과가 감소하고, $St_k \geq 4$ 인 경우에는 온도 차이에 상관없이 거의 동일한 값을 갖는다. 하지만, 열전도 계수비가 100인 경우에는 열영동의 효과가 크게 감소한다. 이는 입자 내부의 열전도가 크게 증가하여 입자 주변의 온도 차이로 인한 열영동 힘이 감소하기 때문이다.

Fig. 12는 Stokes 수가 0.5인 경우에 대해 온도 차이와 열전도 계수비에 따른 입자 부착 위치의 변화를 나타낸다. 열전도 계수비가 일정한 경우, 온도 차이가 커질수록 입자가 부착되는 영역이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 또한 온도 차이가 일정한 경우에는 열전도 계수비가 증가할수록 입자의 부착 영역이 감소한다.

Fig. 13은 온도차가 500K이고 열전도 계수비가 1

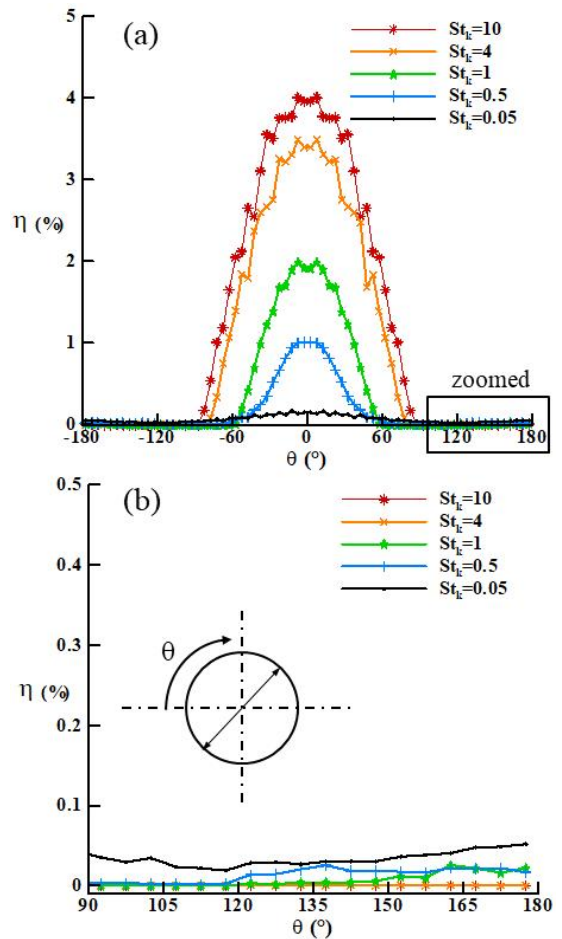


Fig. 13 Local deposition efficiency for $\Delta T=500K$, $\Lambda=1$: (a) whole cylinder surface; (b) rear side of cylinder

인 경우에 대해 Stokes 수에 따른 입자의 구간별 부착효율을 나타낸 그림이다. 모든 Stokes 수에서 정체점 부근에서 부착 효율이 가장 높게 나타났는데, 이를 통해 입자의 관성 충돌이 지배적이라는 것을 알 수 있다. 하지만 Stokes 수가 감소할수록 입자의 부착효율의 최대값과 부착 영역이 점차 감소한다. 또한, 흥미롭게도 작은 입자($St_k \leq 1$)의 경우에는 실린더 후면에도 입자가 부착되는데(Fig. 13b), 이는 Stokes 수가 작을 때 열영동이 입자의 거동에 큰 영향을 준다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 열영동의 효과를 이해하기 위해 실린더 주위 고온 유동에서의 입자 부착을 해석하였다. 특히 입자 Stokes 수, 유동과 실린더 표면의 온도차, 입자와 유체의 열전도 계수비가 입자의 부착 효율에 미치는 영향을 분석하였다. 해석 결과, Stokes 수가 큰 입자에서는 관성 충돌이 지배적이고 열영동 효과가 미비했지만, Stokes 수가 작은 입자에서는 열영동이 큰 영향을 주었다. 즉, 유동과 실린더의 온도차가 증가하거나 열전도 계수비가 감소하는 경우에 입자의 부착 효율이 증가하였다. 또한, Stokes 수가 작은 입자의 경우에는 열영동으로 인해 실린더 후면에서도 입자 부착이 발생하였다.

본 연구에서는 입자의 인터셉션을 무시하거나 근사적으로 구하는 방법에 대해 부착효율의 정확도를 평가하였다. 입자의 직경을 정확히 고려한 해석 결과와 비교하여, 입자를 점으로 가정하고 인터셉션을 무시한 경우에는 최대 3% 오차를, 입자와 실린더의 직경비를 이용한 근사 모델의 경우에는 최대 0.3%의 차이를 보였다.

후 기

“본 연구는 금오공과대학교 교수연구년제에 의하여 연구된 실적물이며, 지원에 감사드립니다.”

REFERENCES

- Haugen, N. E. L. and Kragset, S., “Particle impaction on a cylinder in a crossflow as function of Stokes and Reynolds numbers,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 661, pp. 239-261, 2010.
- Yao, J., Zhao, Y., Hu, G., Fan, J. and Cen, K., “Numerical simulation of particle dispersion in the wake of a circular cylinder,” *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 43, pp. 174-187, 2009.
- Schiller, L. and Naumann, Z., “A drag coefficient correlation,” *Z. Ver. Deutscher Ing.*, Vol. 77, pp. 318-320, 1935.
- Ounis, H., Ahmadi, G. and McLaughlin, J. B., “Brownian diffusion of submicrometer particles in the viscous sublayer,” *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 143, pp. 266-277, 1991.
- Zheng, X. and Silber-Li, Z., “The influence of Saffman lift force on nanoparticle concentration distribution near a wall,” *Applied Physics Letters*, Vol. 95, pp. 124105-1-3, 2009.
- Talbot, L., Cheng, R. K., Schefer, R. W. and Willis, D. R., “Thermophoresis of particles in a heated boundary layer,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, No. 4, pp. 737-758, 1980.
- Park, J., Kwon, K. and Choi, H., “Numerical solutions of flow past a circular cylinder at Reynolds numbers up to 160,” *KSME Int. J.*, Vol. 12, No. 6, pp. 1200-1205, 1998.
- Williamson, C. H. K., “Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 206, pp. 579-627, 1989.
- Mahir, N. and Altac, Z., “Numerical investigation of convective heat transfer in unsteady flow past two cylinders in tandem arrangements,” *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 1309-1318, 2008.
- Knudsen, J. D. and Katz, D. L., *Fluid Dynamics and Heat Transfer*, McGraw Hill, 1958.
- Churchill, S. W. and Bernstein, M. J., “A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow,” *J. Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 300-306, 1977.
- Muhr, W., “Theoretical and experimental investigation of particle deposition in fibrous filters by field and inertial forces,” Ph.D. Thesis, Universität Karlsruhe, Germany, 1976.
- Israel, R. and Rosner, D. E., “Use of a generalized Stokes number to determine the aerodynamic capture efficiency of non-Stokesian particles from a compressible gas flow,” *Aerosol Sci. and Tech.*, Vol. 2, pp. 45-51, 1982.