

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 17, No. 4: December 2021 pp. 81-89

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2021.17.4.081>

## 낮은 레이놀즈 수에서 두 개의 원형 실린더 주위 유동 및 입자 거동 해석

Diaelhag Aisa Hamid Khalifa · 정 석 민 · 김 등 주\*

금오공과대학교 기계공학과

(2021년 10월 6일 투고, 2021년 10월 18일 수정, 2021년 10월 20일 게재확정)

### Simulation of fluid flow and particle transport around two circular cylinders in tandem at low Reynolds numbers

D.A.H. Khalifa · S. Jeong · D. Kim\*

*Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology*

(Received 6 Oct 2021; Revised 18 Oct 2021; Accepted 20 Oct 2021)

#### Abstract

Understanding particle-laden flow around cylindrical bodies is essential for the better design of various applications such as filters. In this study, laminar flows around two tandem cylinders and the motions of particles in the flow are numerically investigated at low Reynolds numbers. We aim to reveal the effects of the spacing between cylinders, Reynolds number and particle Stokes number on the characteristics of particle trajectories. When the cylinders are placed close, the unsteady flow inside the inter-cylinder gap at  $Re = 100$  shows a considerable modification. However, the steady recirculation flow in the wake at  $Re = 10$  and  $40$  shows an insignificant change. The change in the flow structure leads to the variation of particle dispersion pattern, particularly of small Stokes number particles. However, the dispersion of particles with a large Stokes number is hardly affected by the flow structure. As a result, few particles are observed in the cylinder gap regardless of the cylinder spacing and the Reynolds number. The deposition efficiency of the upstream cylinder shows no difference from that of a single cylinder, increasing as the Stokes number increases. However, the deposition on the downstream cylinder is found only at  $Re = 100$  with large spacing. At this time, the deposition efficiency is generally small compared to that of an upstream cylinder, and the deposition location is also changed with no deposited particles near the stagnation point.

**Keywords:** circular cylinder, tandem arrangement, particle, dispersion pattern, deposition efficiency

---

\*Corresponding author.

Tel : +82-54-478-7301

Email : [kdj@kumoh.ac.kr](mailto:kdj@kumoh.ac.kr)

## 1. 서 론

산업 현장의 다양한 유동장을 이해하고 유동 속에 포함된 입자의 운동 궤적을 예측하는 것은 입자 및 에어로졸 분야에서 상당히 중요하다. 특히 시스템 표면에 입자가 부착(deposition)되어 시스템의 성능에 영향을 주는 대표적인 응용 분야의 예로는 필터(filter)와 보일러 열교환기가 있다. 필터에서는 유입된 유동에서 먼지 입자를 최대한 걸러내야 하므로 입자가 필터 표면에 잘 부착되도록 설계해야 한다. 반면, 열교환기에서는 입자(fly ash)가 열교환기 표면에 부착되면 부식을 일으키거나 열전달을 감소시키므로 입자의 부착을 줄여야 한다. 따라서, 필터 및 열교환기 형상의 기본 요소인 원형 실린더 주위 유동에서 입자의 분산(dispersion) 및 부착 현상을 유체역학적으로 이해하고, 나아가 목적에 맞게 설계하는 것이 중요하다(Yao et al., 2009; Haugen and Kragset, 2010). 아울러 입자측정기의 성능 연구에도 입자 유동, 전기적 특성 및 기계적 특성의 이해가 중요하다(Lee, 2019).

원형 실린더 주위의 유동에 대한 선행연구를 살펴보면 다음과 같다. 지난 수십년간 많은 연구(Braza et al., 1986; Williamson, 1989; Park et al., 1998)가 수행되어 단일 실린더의 유동 구조, 항력 및 양력 등과 같은 유동 특성이 잘 알려져 있다. 예를 들어, 50 근처의 임계값보다 낮은 레이놀즈 수(Reynolds number)에서 실린더 후류에 정상 상태의 재순환 영역(recirculation region)이 관찰되지만, 레이놀즈 수가 임계값보다 크면 비정상 상태의 보텍스 shedding(vortex shedding)이 발생한다. 단일 실린더와 마찬가지로 두 개 또는 여러 개의 원형 실린더에 대해서도 다양한 선행연구가 수행되어 항력,

후류와 실린더의 상호작용에 대해 상당히 많은 결과가 알려져 있다(Sharman et al., 2005; Singha and Sinhamahapatra, 2010; Sumner, 2010).

실린더 형상에 대해 입자가 포함된 유동을 연구한 사례는 다음과 같다. Yao et al. (2009)은 레이놀즈 수가 100인 경우에 대해 하나의 원형 실린더 주위의 유동 및 입자의 분산 특성을 해석하였다. Haugen and Kragset (2010)은 CFD 해석을 수행하여 단일 원형 실린더에서 발생하는 입자의 부착 특성을 연구하였고, 스토크스 수(Stokes number)에 따라 입자의 부착효율이 달라진다고 보고하였다. 한편, 사각 실린더에서의 부착효율에 대해서는 Brandon and Aggarwal (2001)의 연구가 주목할 만하다.

지금까지 기술한 선행 연구에도 불구하고 인접한 여러 실린더 주위의 유동 내에서 입자의 분산 및 부착 특성에 대한 이해가 아직 부족한 실정이다. 이는 필터와 열교환기를 고려한 대부분의 연구에서 각각 매우 낮거나 높은 레이놀즈 수를 연구 대상으로 삼았기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 10에서 100 사이의 낮은 레이놀즈 수에 대해 직렬로 배열된 두 원형 실린더 주위의 유동을 해석하고, 유동 속 입자의 궤적에 대해 수치해석적 연구를 수행하였다. 레이놀즈 수 및 실린더 간격에 따른 실린더 후류의 보텍스 구조 변화를 먼저 살펴보고, 스토크스 수를 포함한 여러 조건에 따른 입자의 분산 및 부착 특성의 변화를 규명하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 유체 유동의 해석방법

그림 1은 본 연구에서 채택한 좌표계 및 해석영

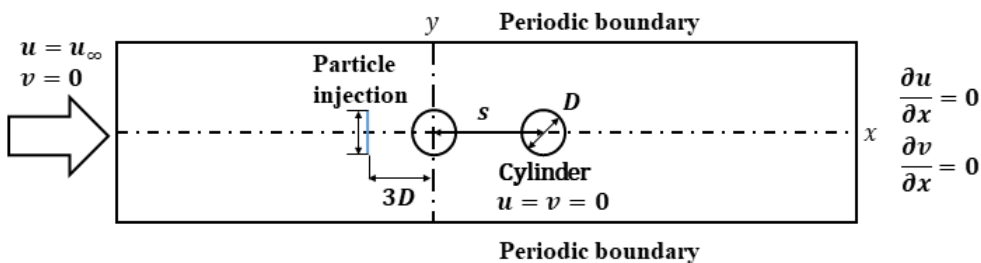


Figure 1. Computational domain and boundary conditions.

역을 경계조건과 함께 나타낸 것이다. 좌표계의 중심은 상류에 위치한 실린더의 중심으로 정의하였고, 계산영역을  $-20D \leq x \leq 20D + s$ ,  $-2D \leq y \leq 2D$ 로 정하였다. 여기서,  $D$ 와  $s$ 는 각각 실린더의 직경과 실린더 중심 사이의 거리를 나타낸다. 두 개의 실린더는 주유동 방향으로 배치되어 있고,  $s$ 가  $3D$ 와  $4D$ 인 두 경우에 대해 해석을 수행하였다.  $y$ 방향의 해석 영역이  $4D$ 로 작은 이유는  $4D$  간격의 주기적인 배치를 가정하였기 때문이며, 위와 아래 경계면에서 주기 경계조건을 사용하였다. 한편, 입구, 출구 및 실린더 표면에 각각 Dirichlet 조건, Neumann 조건 및 점착조건을 사용하였다. 그림 2는 계산에 사용된 격자의 예로서 직사각형 및 삼각형 모양의 격자를 사용하였고, 사용한 격자 수는 약 5만 개이다.

본 연구에서는 10, 40, 100의 세 가지 레이놀즈 수( $Re = u_\infty D / \nu$ )에 대해 해석을 수행하였으며,  $u_\infty$ 는 자유유동 속도,  $\nu$ 는 동점성 계수이다. 이 조건에서 유동은 2차원, 비압축성, 층류 유동이며, 무차원화된 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + \frac{\partial u_i^* u_j^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^* \partial x_j^*} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (2)$$

여기서, 위첨자 \*는 자유유동 속도  $u_\infty$ 와 실린더 직경  $D$ 를 이용하여 무차원화된 변수임을 나타낸다. 또한,  $x_i$ 와  $u_i$ 는 각각 직교 좌표와 유체 속도를,  $p$ 는 압력을 나타낸다. 속도와 압력의 연계 알고리즘으로 비정상 유동에는 fractional step method를 사용하고, 정상 유동에는 SIMPLE를 사용하였다. 해석에 사용된 무차원 시간 간격  $\Delta t^*$ ( $=u_\infty \Delta t / D$ )는 0.02이다.

### 2.2 입자 궤적의 해석방법

Lagrangian 해석에 기반(식 (3)~(8))하여 유동 속 입자의 궤적을 구하였고, 입자에 작용하는 외력으로 항력과 양력을 고려하였다. 입자는 구형이라 가정하였고, 입자의 양이 매우 적어 입자는 유동에 영향을 주지 않는다고 가정하였다. 또한, 입자의 체적분율이 작다고 가정하여 입자간의 충돌은 무시하였다.

$$\frac{du_{i,p}^*}{dt^*} = \frac{C_D Re_p}{24} \frac{2}{St_k} (u_i^* - u_{i,p}^*) + F_{i,li}^* \quad (3)$$

$$\frac{dx_{i,p}^*}{dt^*} = u_{i,p}^* \quad (4)$$

$$Re_p = \frac{|u_i - u_{i,p}| d_p}{\nu} \quad (5)$$

$$St_k = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (6)$$

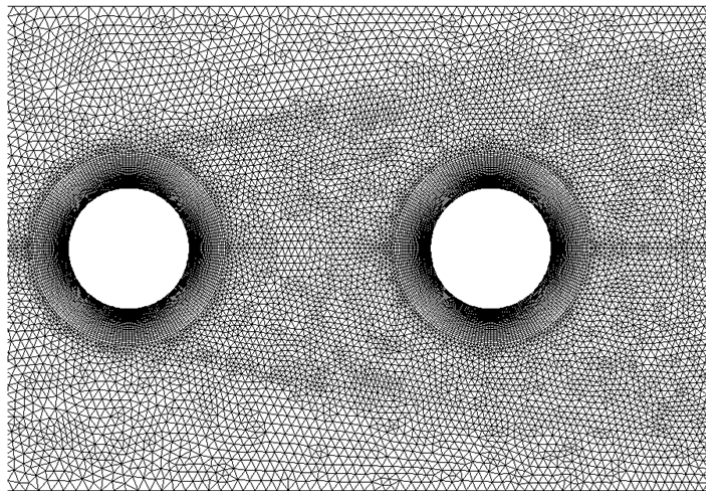


Figure 2. Computational mesh for  $s = 3D$ .

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (7)$$

$$\tau_f = \frac{D}{2u_\infty} \quad (8)$$

여기서 입자 레이놀즈 수  $Re_p$ 는 입자 직경  $d_p$  및 상대속도(유체 속도  $u_i$ 와 입자 속도  $u_{i,p}$ 의 차이)에 기반하여 정의하였으며,  $\rho_p$ 는 입자의 밀도를 나타낸다. 항력계수  $C_D$ 를 위해 Morsi and Alexander (1972)가 제안한 모델을 사용하였고, 무차원 양력  $F_{i, lift}^*$ 를 위해 Li and Ahmadi (1992)의 모델을 사용하였다. 스토크스 수  $St_k$ 는 유동에 대한 입자의 시간 스케일을 비율로 나타낸 값인데, 0.1에서 10 사이의 값을 고려하였다. 유체 밀도  $\rho$ 에 대한 입자 밀도  $\rho_p$ 의 비( $\rho^* = \rho_p/\rho$ )는 1,000으로 고정하였다. 일반적으로 스토크스 수가 크면 입자가 주유동을 따라가기 어렵다는 것을 의미하며, 식 (6)을 정리하면 아래 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d_p}{D} = 3\sqrt{\frac{St_k}{\rho^* Re}} \quad (9)$$

이 식에서 알 수 있듯이 실린더와 입자의 직경 비는 레이놀즈 수, 스토크스 수 및 밀도비의 함수로 표현된다.  $Re = 100$ ,  $\rho^* = 1,000$ 일 때를 예로 들면, 스토크스 수가 0.1에서 10으로 변할 때 입자의 직경은  $0.003D$ 에서  $0.03D$ 로 증가한다.

입자의 초기  $x$  위치는 속도구배 및 압력구배가 생기지 않는 영역에 해당하는  $x = -3D$ 로 결정하였다. 입자의 초기  $y$  위치는 분산 또는 부착의 연구 목적에 따라 각각  $-2D \leq y \leq 2D$  및  $-0.5D \leq y \leq 0.5D$ 를 사용하였다. 이 차이는  $|y| \leq 0.5D$  밖에서 분산된 입자가 부착 없이 실린더를 지나간다는 사실을 고려했기 때문이다. 부착 효율  $\eta$ 는 분산된 총 입자 수  $N_{total}$ 에 대한 부착된 입자 수  $N_{deposit}$ 의 비율로 정의된다.

$$\eta = \frac{N_{deposit}}{N_{total}} \quad (10)$$

매 순간 분사되는 입자의 수는 분산 연구에서  $4D$  구간에 40개, 부착 연구에서  $D$  구간에 300개로 정하였으며, 입자의 초기 속도는 입구에서의 유동 속도와 같다고 설정하였다. 입자의 궤적을 해석

할 때 입자가 실린더와 접촉하게 되면, 입자가 실린더에 부착되어 움직이지 않는다고 가정하였다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 한 개의 실린더

그림 3은 한 개의 실린더 주위의 유동을 해석한 후, 레이놀즈 수에 따른 실린더 주위 유선의 변화를 나타낸 것이다.  $Re = 10$ 에서 실린더 후류에 형성된 재순환 영역의 크기가  $Re = 40$ 에서 크게 증가하였으며,  $Re = 100$ 에서는 보텍스 shedding이 발생한 것을 알 수 있다. 이러한 특징은 선행연구의 결과와 정성적으로 잘 일치한다(Park et al., 1998). 또한, 정량적인 검증을 위해 본 연구에서는  $60D$ 의 해석영역을 갖고 위/아래 경계면에서 입구와 동일한 경계조건을 사용한 해석을 추가로 수행한 후, 기존의 실험 및 계산 결과와 비교하였다. 표 1은 평균 항력계수  $\overline{C_D}$  및 Strouhal 수  $St_r$ 를 비교한 것으로 본 연구가 선행 연구의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 한편,  $4D$ 의 해석영역에서 주기 경계조건을 사용하면,  $60D$ 의 해석과 비교하여 유동의 막힘 효과(blockage effect)로 인해 항력계수 및 Strouhal 수가 상대적으로 증가한다.

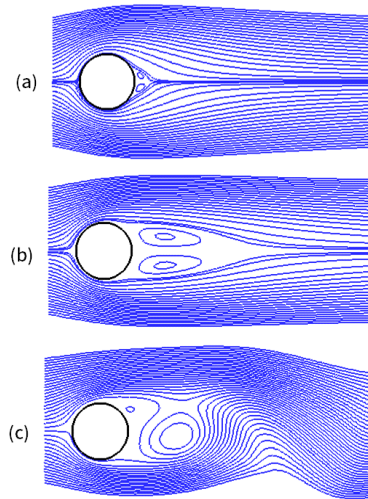


Figure 3. Streamlines for a single cylinder: (a)  $Re = 10$ ; (b)  $Re = 40$ ; (c)  $Re = 100$ .

Table 1 Simulation results for a single cylinder

	$Re$	$\overline{C_D}$	$St_r$
Present study (4D, periodic B.C.)	10	5.00	-
	40	2.51	-
	100	1.92	0.215
Present study (60D, Dirichlet B.C.)	100	1.34	0.166
Haugen & Kragset (2010)	100	1.328	0.166
Park et al. (1998)	100	1.33	0.165
Williamson (1989)	100	-	0.164
Sharman et al. (2005)	100	1.33	0.164
Singha & Sinhamahapatra (2010)	100	1.43	0.165

그림 4는 레이놀즈 수 및 스토크스 수에 따른 입자분포의 차이를 나타낸 것이다. 스토크스 수가 0.1인 경우, 입자의 관성력이 상대적으로 작기 때문에 입자가 유선을 잘 따라가며 입자 분포가 후류의 특징을 잘 반영한다. 예를 들어,  $Re = 10$ 보다  $Re = 40$ 에서 재순환 영역이 더 큰 것을 입자 분포에서도 짐작할 수 있다. 이에 비해, 스토크스 수가 10일 때에는 입자의 관성력이 커져 입자가 유동의 영향을 크게 받지 않는다. 그 결과  $Re = 10$ 과  $Re = 40$ 의 입자 분포가 매우 유사하며,  $Re = 100$ 에서는 강한 보텍스의 영향을 약간 받지만  $St_k = 0.1$ 에서와 달리 보텍스의 중심부에서 입자를 관찰할 수 없다.

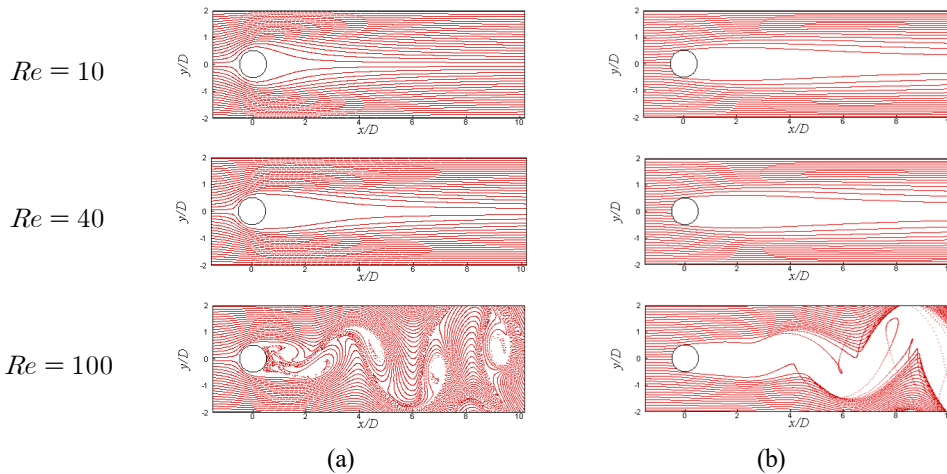


Figure 4. Particle distribution around a circular cylinder: (a)  $St_k = 0.1$ ; (b)  $St_k = 10$ .

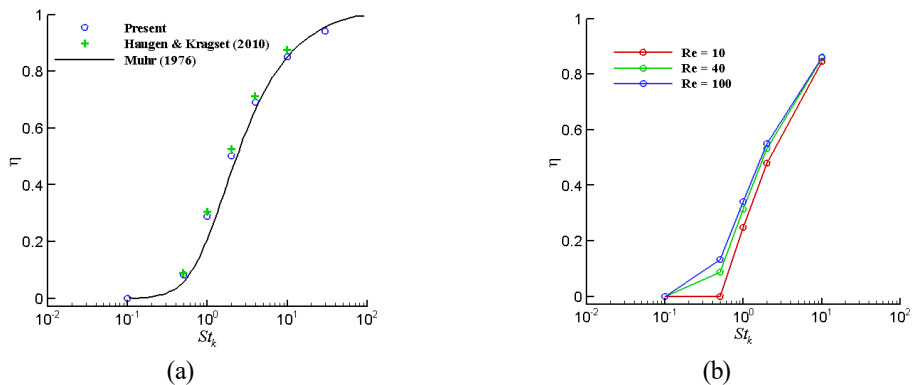


Figure 5. Overall impact efficiency as a function of Stokes number: (a) 60D domain (single cylinder in y direction); (b) 4D domain (periodic cylinders in y direction).

그림 5는 입자의 부착 효율을 스토크스 수의 함수로 나타낸 것으로 5(a)와 5(b)는 각각  $60D$ 와  $4D$ 의 해석에서 얻은 결과이다. 비교를 위해 그림 5(a)에 포함한 Haugen and Kragset (2010)의  $Re = 100$  결과는 전산해석을 수행한 결과이며, Muhr (1976)의 결과는 실험 데이터를 바탕으로 만든 상관식을 나타낸다. 스토크스 수가 증가할수록 부착 효율이 증가하는 경향이 선행연구와 마찬가지로 본 연구에서도 확인된다. 또한, 그림 5(b)에서 알 수 있듯이 동일한 스토크스 수에서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 부착 효율이 증가한다.

### 3.2 두 개의 실린더

그림 6은 실린더 주위의 유선을 나타낸 것으로 레이놀즈 수 및 실린더 간격에 따른 차이를 보여 준다.  $Re = 10$ 과  $40$ 에서는 상류에 위치한 실린더와 마찬가지로 하류에 위치한 실린더에서도 후류에 재순환 영역이 발생하며,  $s = 3D$ 와  $s = 4D$ 의 차이가 미비하다. 하지만,  $Re = 100$ 에서는 큰 차이가 관찰된다.  $s = 3D$ 에서는 하류의 실린더에서만 보텍스 shedding이 관찰되고,  $s = 4D$ 에서는 상류와 하류 실린더에서 모두 보텍스 shedding이 발생한다. 이러한 유동 구조의 차이로 인해 하류의 실린더에 작

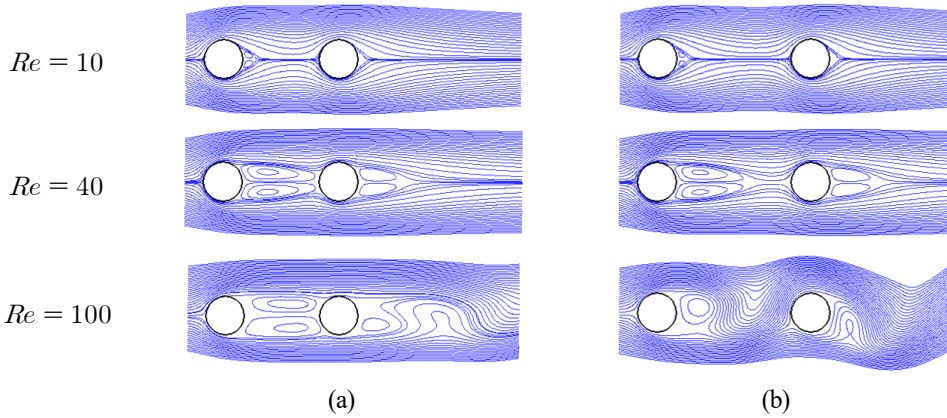


Figure 6. Streamlines for two cylinders in tandem: (a)  $s = 3D$ ; (b)  $s = 4D$ .

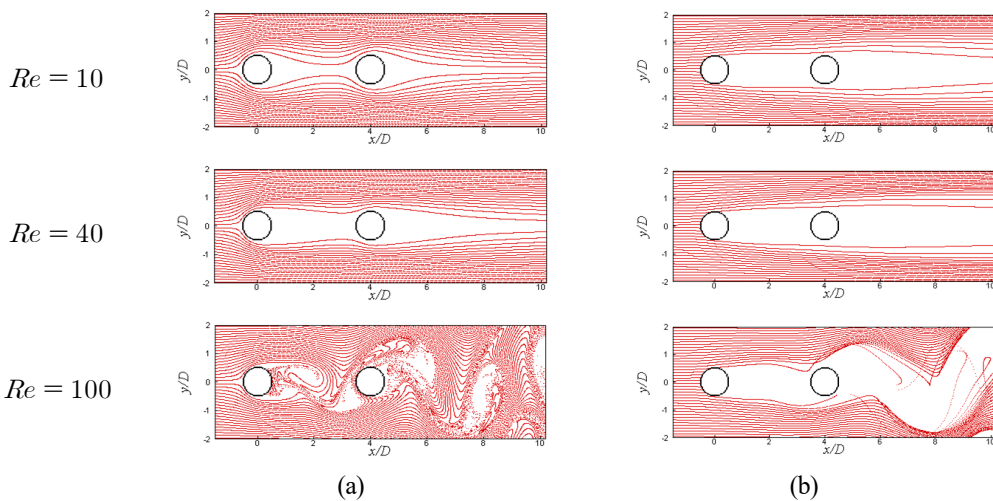


Figure 7. Particle distribution around tandem cylinders for  $s = 4D$  : (a)  $St_k = 0.1$ ; (b)  $St_k = 10$ .

Table 2 Simulation results for tandem cylinders

	$Re$	$s/D$	$\bar{C}_{D,up}$	$\bar{C}_{D,down}$	$St_r$
Present study (4D, periodic B.C.)	10	3	4.96	3.17	-
		4	4.99	3.64	-
	40	3	2.49	0.98	-
		4	2.50	1.22	-
	100	3	1.85	0.33	0.192
		4	1.93	1.46	0.208

용하는 항력 계수는 표 2에 나타난 것처럼 0.33에서 1.46으로 크게 증가한다.

그림 7은  $s=4D$ 인 경우에 대해 입자분포를 나타낸 것으로 레이놀즈 수 및 스토크스 수에 따른 차이를 보여준다. 레이놀즈 수 및 스토크스 수에 관계없이 두 번째 실린더를 지난 이후의 입자 분포는 그림 4의 단일 실린더 이후의 입자 분포와 매우 유사하다. 하지만 두 실린더 사이의 공간에 대해서는 레이놀즈 수에 따른 차이가 관찰된다. 스토크스 수가 작을 때( $St_k=0.1$ ),  $Re=10$ 과 40에서 실린더 사이의 공간으로 유입되는 입자가 매우 적지만,  $Re=100$ 에서는 첫 번째 실린더에서 발생한 보텍스의 영향으로 많은 입자가 유입된다. 하지만, 스토크스 수가 클 때에는( $St_k=10$ ) 레이놀즈 수에 관계없이 실린더 사이 공간으로 유입되는 입자가 거의 없다.

다음으로 입자의 부착 특성을 살펴보았다. 논문 에 그림으로 나타내지 않았지만, 해석을 수행한 모든 경우에 대해 상류에 위치한 실린더의 부착 효율은 단일 실린더의 결과와 거의 일치한다. 반면, 하류에 위치한 실린더의 부착 효율은 그림 8에 도시한 바와 같이 레이놀즈 수에 따라 다른 특성을 보인다.  $Re=10$ 에서는  $s=3D$ 와  $s=4D$ 에서 모두 부착이 발생하지 않아 효율이 영이 된다. 반면,  $Re=100$ 에서는  $s=3D$ 에서 부착이 발생하지 않고  $s=4D$ 에서는 부착이 발생한다. 하지만, 이 경우에도 대부분의 스토크스 수에서 단일 실린더의 부착 효율보다는 작은 효율을 갖는다.

입자의 부착효율과 함께 입자의 부착위치를 이해하는 것도 중요하다. 그림 9는  $St_k=10$ 인 경우에 대해 입자의 부착 위치를 나타낸 것으로 정체점에서부터 측정된 최대 각도를 같이 도시하였다. 상류에 위치한 실린더는 정체점 주변에서 많은 입자가 부착되고, 실린더 전면의 대부분 위치에서 부착된다( $s=4D, Re=10$ 에서  $|\theta| \leq 81.5^\circ$ ,  $Re=100$ 에서  $|\theta| \leq 83.4^\circ$ ). 또한, 이웃한 실린더에 의한 부착 각도의 변화도 크지 않다. 하지만, 하류의 실린더에서는 실린더 간격에 따라 부착 특성이 매우 달라지며, 부착되는 위치도 변하여 정체점 주변이 아닌 위치( $|\theta|=25.6^\circ \sim 95.6^\circ$ )에서 부착이 발생한다.

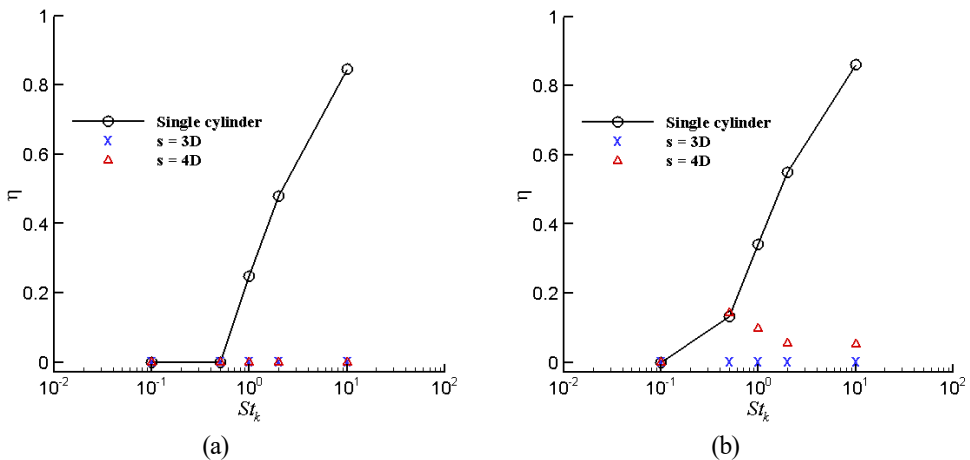


Figure 8. Overall deposition efficiency for downstream cylinder: (a)  $Re=10$ ; (b)  $Re=100$ .

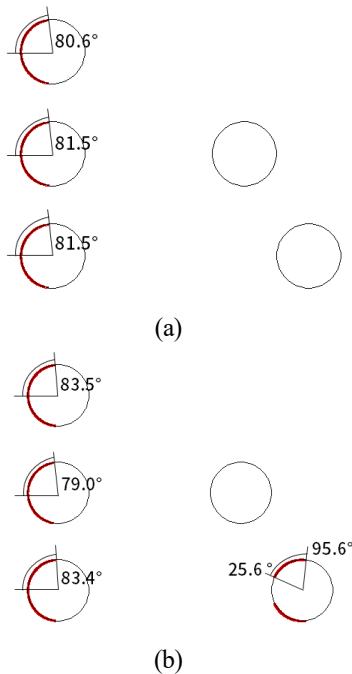


Figure 9. Distribution of particles impacting the cylinder surface at  $St_k = 10$ : (a)  $Re = 10$ ; (b)  $Re = 100$ .

#### 4. 결 론

직렬로 배열된 두 개의 원형 실린더 주위에서 100 이하의 레이놀즈 수를 갖는 층류 유동 및 유동에 포함된 입자의 궤적을 해석하였다. 해석 결과를 바탕으로 실린더 간격, 레이놀즈 수 및 스토크스 수가 유동 및 입자의 거동에 미치는 영향을 정리하면 다음과 같다.

우선 단일 실린더에서는 선행연구와 마찬가지로  $Re = 10$ 과  $40$ 에서는 재순환 영역을 갖는 정상 유동,  $Re = 100$ 에서는 보텍스 웨딩으로 인한 비정상 유동을 관찰하였다. 두 개의 실린더가 서로 가까이 배치됨에 따라  $Re = 10$ 과  $40$ 의 실린더 후류 구조는 거의 변화하지 않았지만,  $Re = 100$ 에서는 큰 변화가 관찰되었다. 즉, 실린더의 간격이 재순환 영역의 크기보다 작아짐에 따라 상류 실린더에서 발생하던 보텍스 웨딩이 억제되었다. 이러한 유동 구조의 변화로 인해 입자의 분산 특성 역시 달라

졌고, 스토크스 수가 작은 입자에서 그 차이가 뚜렷하였다. 스토크스 수가 큰 입자의 경우에는 실린더 간격 및 레이놀즈 수의 영향이 상대적으로 작았고, 실린더 사이의 공간에서 입자를 관찰하기가 어려웠다.

상류에 위치한 실린더에 부착되는 입자의 부착 효율은 모든 해석 조건에서 단일 실린더에서와 거의 일치하였고, 스토크스 수가 증가함에 따라 부착 효율이 증가하였다. 하지만, 하류에 위치한 실린더의 경우에는  $Re = 10$ 과  $40$ 을 포함한 대부분의 경우에 입자의 부착이 발생하지 않은 반면,  $Re = 100$ 에서 실린더 간격이 큰 경우에만 부착이 발생하였다. 이때 부착 효율은 상류 실린더의 부착 효율보다 일반적으로 작았고, 입자의 부착 위치도 변하였다. 상류 실린더에서는 정체점을 중심으로 실린더 앞쪽에 넓게 부착되었지만, 하류 실린더에서는 정체점 주변에 입자가 부착되지 않았다.

#### References

Brandon, D.J., and Aggarwal, S.K. (2001). A numerical investigation of particle deposition on a square cylinder placed in a channel flow, *Aerosol Science and Technology*, 34, 340-352.

Braza, M., Chassaing, P., and Ha Minh, H. (1986). Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, 165, 79-130.

Haugen, N.E.L., and Kragset, S. (2010). Particle impaction on a cylinder in a crossflow as function of Stokes and Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 661, 239-261.

Lee, J. (2019). Performance test of MicroAeth® AE51 at concentrations lower than  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in indoor laboratory, *Applied Sciences*, 9(13), 2766.

Li, A., and Ahmadi, G. (1992). Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow, *Aerosol Science and Technology*, 16, 209-226.

Morsi, S.A., and Alexander, A.J. (1972). An investigation



- of particle trajectories in two-phase flow systems, *Journal of Fluid Mechanics*, 55(2), 193-208.
- Muhr, W. (1976). Theoretical and experimental investigation of particle deposition in fibrous filters by field and inertial forces, Ph.D. thesis, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Universität, Karlsruhe, Germany.
- Park, J., Kwon, K., and Choi, H. (1998). Numerical solutions of flow past a circular cylinder at Reynolds numbers up to 160, *KSME International Journal*, 12(6), 1200-1205.
- Sharman, B., Lien, F.S., Davidson, L., and Norberg, C. (2005). Numerical predictions of low Reynolds number flows over two tandem circular cylinders, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 47, 423-447.
- Singha, S., and Sinhamahapatra, K.P. (2010). High-resolution numerical simulation of low Reynolds number incompressible flow about two cylinders in tandem, *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 132, 011101.
- Sumner, D. (2010). Two circular cylinders in cross-flow: A review, *Journal of Fluids and Structures*, 26, 849-899.
- Williamson, C.H.K. (1989). Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 206, 579-627.
- Yao, J., Zhao, Y., Hu, G., Fan, J., and Cen, K. (2009). Numerical simulation of particle dispersion in the wake of a circular cylinder, *Aerosol Science and Technology*, 43, 174-187.