

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.4.239>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 실린더의 회전이 원형 실린더 주위의 입자 부유 유동 및 입자 부착에 미치는 영향

이 승 우\* · 김 동 주\*\*

\* 금오공과대학교 기계공학과

### Effects of Cylinder Rotation on Particle Laden Flow and Particle Deposition on a Rotating Circular Cylinder

Seungwoo Lee\* and Dongjoo Kim\*\*

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

(Received September 26, 2016 ; Revised January 22, 2017 ; Accepted January 24, 2017)

**Key Words:** Rotating Circular Cylinder(회전하는 원형 실린더), Particle Laden Flow(입자 부유 유동), Particle Deposition(입자 부착), Particle Dispersion(입자 분산)

**초록:** 원형 실린더 주위의 유동에 부유된 입자가 실린더 근처에서 분산되거나 실린더에 부착되는 특성을 이해하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 입자의 부착을 조절하는 방안으로 실린더의 회전을 고려해 보았고, 실린더의 회전 속도 및 입자의 Stokes 수가 실린더 주위의 유동과 입자의 분산 및 부착 특성에 미치는 영향을 수치해석적으로 연구하였다. 해석 결과 4보다 작은 Stokes 수에서는 회전속도가 증가함에 따라 부착효율이 크게 감소하였고, 4보다 큰 Stokes 수에서는 회전속도가 증가함에 따라 부착효율이 다소 증가하였다. 한편, 회전속도가 일정한 경우에는 Stokes 수가 증가함에 따라 입자의 부착효율이 증가하고, 입자의 부착 위치도 넓어졌다.

**Abstract:** It is important to understand the dispersion and deposition characteristics of particles in the flow around a circular cylinder. The rotation of a cylinder is considered as a means to modify the particle deposition in this study. We numerically investigate the effects of the rotational speed of a cylinder and the particle Stokes number on particle dispersion and deposition as well as flow characteristics. Results show that the deposition efficiency of small particles (with the Stokes number smaller than 4) decreases significantly as the rotational speed increases. However, when the Stokes number is larger than 4, the deposition efficiency increases slightly with the rotational speed of the cylinder. Meanwhile, for a given rotational speed, the increase in the Stokes number leads to an increase in deposition efficiency and deposited area.

- 기호설명 -

$\omega$  : 실린더의 회전 각속도  
 $D$  : 실린더의 직경  
 $u_\infty$  : 자유유동 속도  
 $u_i$  : 유체의 속도( $i = 1, 2$ )  
 $x_i$  : 직교 좌표계( $i = 1, 2$ )  
 $p$  : 유체의 압력  
 $\rho$  : 유체의 밀도

$\mu$  : 유체의 점성계수  
 $\nu$  : 유체의 동점성계수  
 $C_D$  : 항력계수  
 $C_L$  : 양력계수  
 $\Delta t$  : 계산 시간 간격  
 $\rho_p$  : 입자의 밀도  
 $d_p$  : 입자의 직경  
 $u_{i,p}$  : 입자의 속도( $i = 1, 2$ )  
 $x_{i,p}$  : 입자의 위치( $i = 1, 2$ )  
 $\eta$  : 입자의 부착효율  
 $\theta$  : 정체점에서 시계방향으로 측정된 각도

† Corresponding Author, kdj@kumoh.ac.ac.kr

## 1. 서 론

여러 산업분야에서 몽푁한 물체 주위의 유동을 해석하고, 유동에 부유된 입자가 벽면에 부착(deposition)되거나 유동에 의해 분산(dispersion)되는 현상을 정확히 이해하는 것은 매우 중요하다. 예를 들어, 필터 및 열교환기 표면에 입자가 부착되는 정도에 따라 필터의 효율과 산업용 보일러의 열교환 성능이 크게 달라진다. 따라서, 필터 및 열교환기 형상의 기본 요소인 원형 실린더에 대해 입자의 분산 및 부착 현상에 대한 유체역학적 이해가 필요하다.

회전하지 않는 원형 실린더 주위의 유동 및 입자의 분산과 부착에 대한 선행연구는 다음과 같다. 먼저, 실린더 주위의 유동장은 지난 수십 년간 수치해석 및 실험적 연구를 통해 유동 특성이 잘 알려져 있다. 특히 후류의 유동 구조 및 보텍스 shedding의 특성을 이해하고, 평균 항력 및 양력의 섭동량을 감소시키려는 연구가 주를 이루었다.<sup>(1~3)</sup>

실린더 주위의 입자 거동에 대한 대표적인 선행연구는 다음과 같다. Yao 등<sup>(4)</sup>은 하나의 원형 실린더에서 입자의 분산에 대해 수치해석을 수행하여 Stokes 수가 작을수록 입자들이 유동을 잘 따라가고 고르게 분포됨을 보였다. Haugen and Kragset<sup>(5)</sup>는 하나의 원형 실린더에 대해 입자의 부착을 수치해석적으로 연구하였고, Stokes 수가 증가할수록 입자의 부착효율이 증가한다고 보고하였다. 한편, Li 등<sup>(6)</sup>은 LES를 이용하여 높은 레이놀즈수의 입자 부유 유동을 해석하고, 입자의 거동이 전단층(shear layer)의 보텍스를 포함한 후류의 여러 보텍스 구조에 의해 영향을 받는다는 것을 보였다. 또한, 자유유동 속도가 증가함에 따라 실린더 뒷면에서 발생하는 입자의 부착이 감소한다고 보고하였다. 이외에도 여러 개의 원형 실린더가 이웃한 경우에 대해서도 입자 거동에 대한 연구가 수행되었다.<sup>(7,8)</sup>

한편, 회전하는 원형 실린더의 경우, 유동장에 대해서는 많은 연구가 수행되어 유동장의 기본 특성이 잘 알려져 있다. Kang 등<sup>(9)</sup>은 실린더의 회전속도가 임계값보다 크면 보텍스 shedding이 사라진다는 것을 보였다. 예를 들어,  $Re=100$ 에서 무차원 회전속도가 1.9 이상이 되면 보텍스 shedding이 완전히 사라졌다. Stojkovic' 등<sup>(10)</sup>은 Kang 등<sup>(9)</sup>보

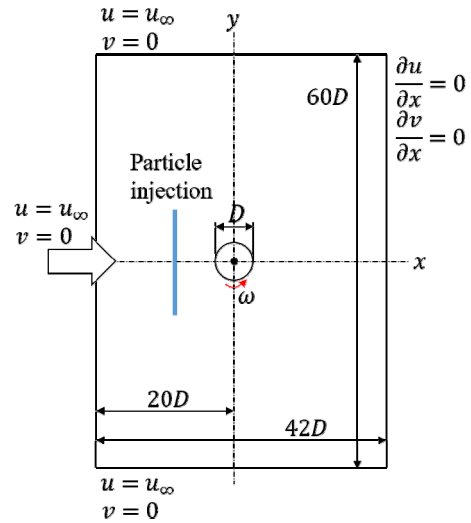


Fig. 1 Coordinate system and computational domain

다 높은 회전속도까지 해석을 수행하여 4.8과 5.15 사이의 무차원 회전속도에서 새로운 비정상 유동 영역을 발견하였고, 일반적인 보텍스 shedding보다 훨씬 낮은 주파수 특성을 가진다고 보고하였다. 하지만, 회전하는 실린더 주변의 입자 부유 유동을 해석하고 입자의 거동을 연구한 문헌은 찾아보기 힘들다. 따라서, 실린더의 회전속도 및 입자 조건에 따른 입자의 거동과 입자 부착효율의 변화에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 회전하는 원형 실린더 주위의 유동 및 부유된 입자의 거동을 수치해석적으로 연구하였다. 실린더에서 발생하는 보텍스 구조와 입자의 분산 및 부착 특성이 회전하지 않는 원형 실린더의 경우와 어떻게 다른지를 살펴보고, 특히 실린더의 회전속도 및 Stokes 수가 입자의 부착효율에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 유동해석 방법

Fig. 1은 실린더 주위의 입자 부유 유동을 해석하기 위한 좌표계, 해석영역 및 경계조건을 나타낸다. 좌표의 중심은 직경이  $D$ 인 실린더의 중심으로 정의하였고, 전체 계산영역은  $x$  방향으로  $-20D \sim 22D$ ,  $y$  방향으로  $-30D \sim 30D$ 를 사용하였다. 실린더는  $\omega$ 의 각속도로 반시계 방향으로 회전하며, 무차원 각속도  $\omega^*$ 는 직경  $D$ 와 자유유동 속도  $U_\infty$ 를 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

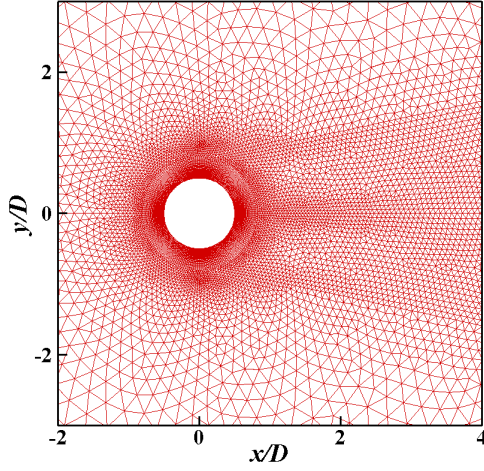


Fig. 2 Computational mesh for a rotating circular cylinder

$$\omega^* = \frac{\omega D}{2U_\infty} \quad (1)$$

경계조건으로 입구 및 원거리에서 Dirichlet 경계조건을 사용하였고, 출구에서는 Neumann 조건에 해당하는 Outflow 조건, 실린더 표면에서는 점착조건(No-slip condition)을 사용하였다. Fig. 2는 계산에 사용된 격자이며, 약 3만 개의 격자를 사용하였다. 실린더 주변의 경계층 영역에는 직사각형 격자를, 나머지 영역에는 삼각형 격자를 사용하였다.

본 연구에서는 Reynolds 수( $Re = U_\infty D/\nu$ ,  $\nu$ 는 동점성 계수)가 100인 경우를 해석하였다. 따라서, 유동은 2차원, 비압축성, 층류이며, 해석 결과에서 알 수 있듯이 실린더의 회전 속도에 따라 정상(steady) 또는 비정상(unsteady) 유동 특성을 보인다. 유동에 대한 지배방정식은 아래와 같이 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이다.

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

식 (2), (3)에서  $x_i$ ,  $u_i$ ,  $p$ 는 각각 직교좌표, 유체의 속도성분 및 압력이고,  $\rho$ 와  $\mu$ 는 각각 유체의 밀도와 점성계수이다. 속도와 압력의 연계 알고리즘으로 Fractional step method를 사용하였고, 운동량 방정식에서 대류항의 공간차분 기법으로

는 2차 정확도의 상류도식(linear upwind scheme)을 사용하였다. 해석에 사용된 시간 간격(time step)은  $\Delta t = 0.01D/u_\infty$ 이다.

## 2.2 입자의 거동 해석 방법

입자의 거동을 해석하기 위해 Lagrangian 해석을 수행하였으며, 입자에 작용하는 외력으로는 항력  $f_{D,i}$ 와 양력(Saffman lift)  $f_{L,i}$ 를 고려하였다. 입자는 구형이라 가정하였고, 입자가 유동에 영향을 주지 않는다는 one-way coupling을 가정하였다. 또한, 입자의 체적분율이 충분히 작다고 가정하여 입자간의 충돌은 무시하였다. 입자의 거동 해석에 사용된 식들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial x_{i,p}}{\partial t} = u_{i,p} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_{i,p}}{\partial t} = f_{D,i} + f_{L,i} \quad (5)$$

$$f_{D,i} = \frac{C_D Re_p}{24} \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} (u_i - u_{i,p}) \quad (6)$$

$$f_{L,i} = \frac{2K\nu^{1/2} \rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{kl})^{1/4}} (u_i - u_{i,p}) \quad (7)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \quad (8)$$

$$Re_p = \frac{|u_i - u_{i,p}| d_p}{\nu} \quad (9)$$

위 식에서  $u_{i,p}$ ,  $\rho_p$ ,  $d_p$ 는 각각 입자의 속도 성분, 밀도, 직경을 나타내며,  $Re_p$ 는 입자의 직경과 상대속도로 정의한 입자 Reynolds 수를 나타낸다.  $C_D$ 는 항력계수로서 Morsi와 Alexander<sup>(11)</sup>의 항력 모델을 사용하였으며, 식 (8)의  $a_1, a_2, a_3$ 는 모델 상수이다. 한편, 양력은 Saffman lift로 흔히 불리며, 식 (7)의  $d_{ij}$ 는 변형 텐서(deformation tensor)이고 상수  $K$ 는 2.594이다.

입자 유동을 결정하는 중요한 무차원 수에는 입자 Reynolds 수 이외에 Stokes 수와 밀도비  $S_g$ 가 있다. Stokes 수  $St_k$ 는 유동의 시간 스케일(flow time scale)  $\tau_f$ 와 입자의 시간 스케일(particle time scale)  $\tau_p$ 의 비로 정의한다.

$$St_k = \frac{\tau_p}{\tau_f}, \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}, \tau_f = \frac{D}{2u_\infty} \quad (10)$$

본 연구에서 고려한 Stokes 수의 범위는 0.1~10이며, 밀도비( $S = \rho_p/\rho$ )는 1,000으로 고정하였다. 따라서, Stokes 수가 크면 입자의 직경이 큰 것을 의미하며, 식 (10)을 정리하면 입자와 실린더의 직경비를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d_p}{D} = 3\sqrt{\frac{St_k}{SRe}} \quad (11)$$

즉, 직경비는 Reynolds 수, Stokes 수, 밀도비의 함수가 되며,  $Re = 100, S = 1,000$ 일 때 Stokes 수에 따른 직경비는 Table 1과 같다.

Fig. 3은 입자의 초기 위치(injection location)를 나타낸 그림으로  $x$  좌표는 실린더에 의해 속도 구배 및 압력구배가 발생하지 않는  $x = -4D$ 로 선정하였다. 입자의 초기  $y$  좌표는 분산 연구와 부착 연구에서 서로 다른 분포를 사용하였다. 즉, 실린더 주위의 전체적인 입자 분산을 살펴보고자 할 때는 상대적으로 넓은 구간( $-5D \leq y \leq 5D$ )에 입자를 위치시켰다. 반면, 입자의 부착 특성을 연구할 때는 입자의  $y$  좌표를  $-2D \leq y \leq 2D$ 로 설정하였다. 회전하지 않은 실린더의 입자부착

연구에서 입자의 분사 위치는 일반적으로 실린더 직경  $D$ 의 투영 영역, 즉  $-0.5D \leq y \leq 0.5D$ 로 설정하는데 이는 이 영역 밖에서 분사된 입자는 실린더에 부착되지 않기 때문이다. 하지만, 실린더가 회전하는 경우에는 이 영역 밖에서 분사된 입자도 실린더에 부착되게 된다. 따라서, 본 연구에서는 입자가 분사되는  $y$  좌표의 폭을 충분히 넓은  $4D$ 로 결정하였다.

입자의 부착효율  $\eta$ 는 분사 구간의 폭이  $4D$ 임을 고려하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta = \frac{N_{dep}}{N_{inj}/4} \quad (12)$$

여기서  $N_{dep}$ 는 실린더에 부착된 입자 수이고,  $N_{inj}$ 는 분사된 전체 입자 수이다. 이렇게 정의함으로써 회전하지 않는 실린더의 부착효율이 선행 연구에서와 동일하게 되며, 부착효율의 최댓값이 1이 된다.

입자가 분사될 때의 초기 속도는 자유유동 속도와 같다고 가정하였다. 입자는 매 시간 간격마다 분사시켰으며, 입자의 위치 역시 매번 계산하여 갱신하였다. 해석 과정에서 입자가 실린더 표면에 접촉할 때, 접촉한 모든 입자는 실린더에

Table 1 Particle size considered in this study

$St_k$	$d_p/D$
0.1	$3.00 \times 10^{-3}$
0.5	$6.71 \times 10^{-3}$
1	$9.49 \times 10^{-3}$
2	$1.34 \times 10^{-2}$
4	$1.90 \times 10^{-2}$
7	$2.51 \times 10^{-2}$
10	$3.00 \times 10^{-2}$

Table 2 Results of resolution test

Grid	$\Delta t^*$	$C_D$	$C_L$	$N_{inj, \Delta t}$	$\eta$ (%)
Coarse grid A	0.02	0.102	-10.209	400	88.00
				800	88.50
				1600	88.75
	0.01	0.102	-10.209	400	88.00
				800	88.50
				1600	88.75
	0.005	0.102	-10.209	400	88.00
				800	88.50
				1600	88.50
Fine grid B	0.02	0.099	-10.208	400	88.00
				800	88.50
				1600	88.50
	0.01	0.099	-10.208	400	88.00
				800	88.50
				1600	88.50
	0.005	0.099	-10.208	400	88.00
				800	88.50
				1600	88.50

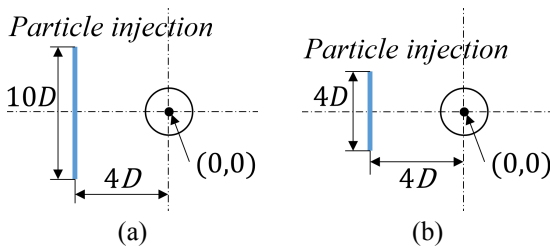


Fig. 3 Location of particle injection (denoted by a blue line): (a) particle dispersion; (b) particle deposition

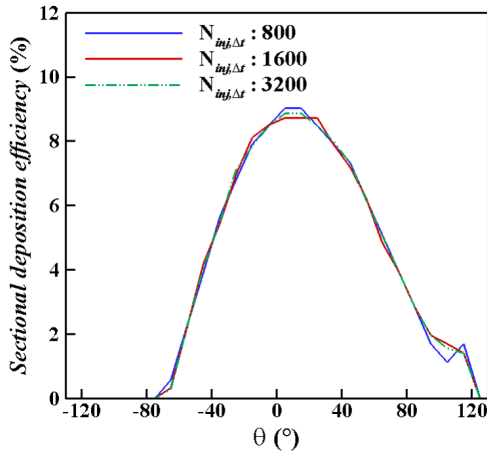


Fig. 4 Sectional deposition efficiency as a function of  $\theta$

부착된다고 가정하였다.

### 2.3 해상도 테스트

해석 격자, 시간 간격, 분사된 입자 수의 해상도를 결정하기 위하여 해상도에 따른 해석 결과의 민감도를 확인해 보았다. 해석은  $\omega^*$ 가 3이고 Stokes 수가 10인 조건에서 수행하였으며, Table 2에 해석 결과를 정리하였다. 우선, 격자는 약 30,000개의 성긴 격자 A와 약 75,000개의 조밀한 격자 B를 이용하였다. 격자 A와 B는 실린더 주변에 각각  $180 \times 40$ 개와  $360 \times 80$ 개의 직사각형 격자를 포함하고 있다. 시간 간격은 무차원 수 ( $\Delta t^* = u_\infty \Delta t / D$ )로 나타내었고,  $N_{inj, \Delta t}$ 는 매 순간 분사되는 입자의 수를 나타낸다. 격자와 시간 간격이 항력계수  $C_D$ , 양력계수  $C_L$ , 입자의 부착 효율  $\eta$ 에 거의 영향을 주지 않으므로, A 격자와  $\Delta t^* = 0.01$ 에서 400개의 입자를 분사하면 충분할 것으로 판단된다.

하지만, 본 연구에서는 입자의 부착효율뿐만 아니라 부착 위치도 정확하게 제시하고자 한다. 따라서, 격자와 시간 간격은 고정하고(A 격자,  $\Delta t^* = 0.01$ ), 분사된 입자 수가 입자의 부착 위치 및 구간별 부착효율에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 4는 실린더 표면의 구간별 부착효율을 나타낸 것으로,  $\theta$ 는 실린더의 회전과 상관없이 실린더의 정체점( $x = -D/2, y = 0$ )으로부터 시계 방향으로 측정한 각도이다. 구간별 부착효율은 실린더 표면을 10도 간격으로 나누어 중심 각도에 표시하였으며, 구간별 부착효율의 합은 전체 부착효율이 된다. 입자 수가 1,600개 이상이면 부

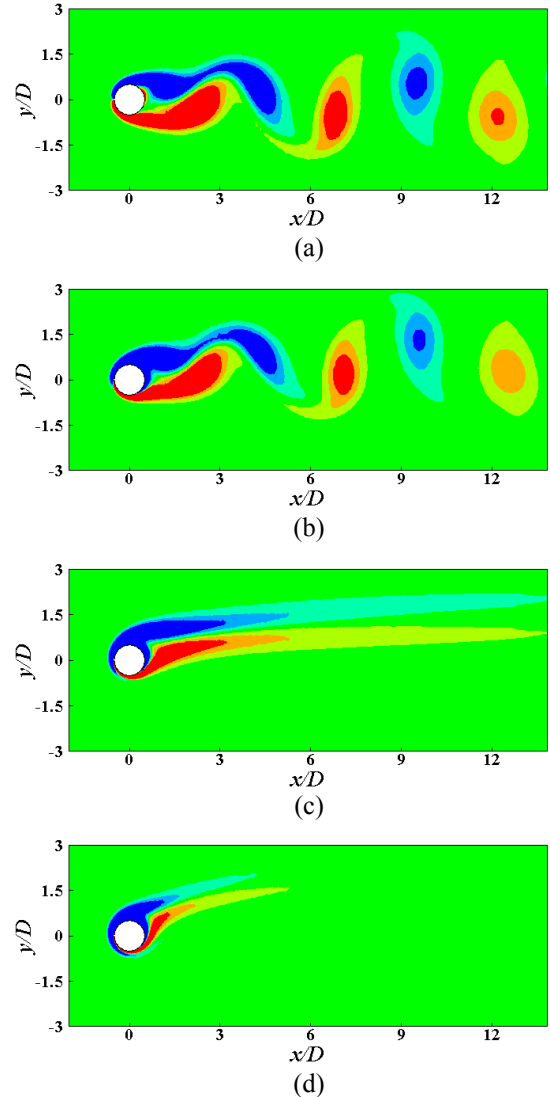


Fig. 5 Vorticity contours near stationary and rotating circular cylinders: (a)  $\omega^* = 0$ ; (b)  $\omega^* = 1$ ; (c)  $\omega^* = 2$ ; (d)  $\omega^* = 3$

착 위치 및 구간별 부착효율이 거의 일정하므로 입자 수를 1,600개로 최종 결정하였다.

## 3. 해석결과

### 3.1 유동장

입자의 거동을 해석하기에 앞서 회전하는 실린더 주위의 유동장을 해석하고 그 특징을 알아보았다. Fig. 5는 원형 실린더 주위의 순간 와도 분포를 나타낸 것으로  $\omega^*$ 의 변화에 따라 후류의 유동 구조가 어떻게 달라지는지를 보여준다. 회전하지 않는 경우( $\omega^* = 0$ )에는 보텍스 shedding이 x축을 기준으로 위아래에서 번갈아 발생하는 비정상

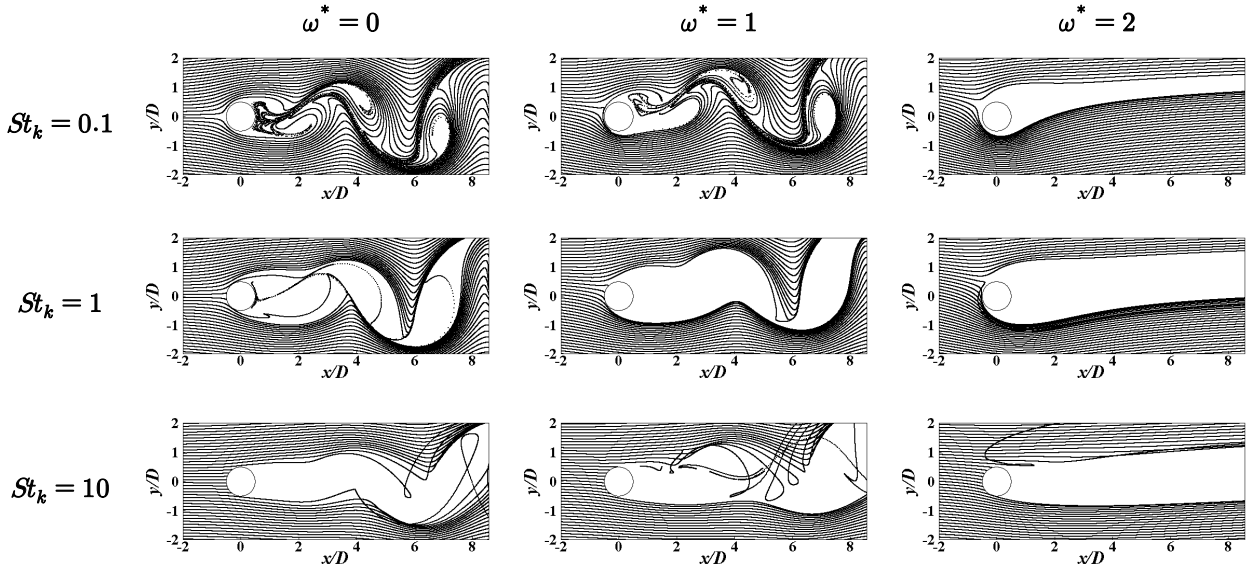


Fig. 6 Particle dispersion pattern for various rotational speeds and stokes numbers

유동이 관찰된다. 한편, 실린더의 회전속도가 작은  $\omega^* = 1$ 인 경우, 여전히 보텍스 shedding이 발생하는 비정상 유동이지만, 실린더의 회전에 의해 후류가 전체적으로  $+y$  방향으로 치우친다. 반면, 회전속도가 더욱 증가하여  $\omega^*$ 가 2 또는 3인 경우에는 실린더의 강한 회전에 의해 보텍스 shedding이 사라지고 정상 유동이 되며, 후류의  $+y$  방향 치우침이 더욱 심해진다. 이러한 유동 특징은 선행연구<sup>9)</sup>의 결과와 정성적으로 잘 일치한다.

해석 결과의 정량적인 비교를 위해 실린더에 작용하는 평균 항력계수 및 양력계수와 Strouhal 수를 선행연구 결과와 비교하여 Table 3에 나타내었다. 여기서, Strouhal 수는  $St_s = fD/u_\infty$ 로 정의하였으며, 보텍스 shedding의 주파수  $f$ 를 무차원화한 값이다. 비교한 모든 데이터가 선행연구의 결과와 정량적으로도 잘 일치함을 알 수 있다.

### 3.2 입자분산

Fig. 6은 회전속도  $\omega^*$ 와 Stokes 수에 따른 입자 분포의 차이를 보여주는 것으로 많은 입자들을 작은 원으로 나타내었다. 따라서, contour나 유선을 그린 것이 아님에 주의하기 바란다. 실린더가 회전하지 않는 경우를 먼저 살펴보면, Stokes 수가 작은 0.1인 경우, 입자의 크기 및 관성력이 작아 입자가 유선을 잘 따라가므로 보텍스의 중심에서도 입자를 관찰할 수 있다. 반면, Stokes 수가 큰 10인 경우에는 입자의 크기 및 관성력이 커서 입자들이 보텍스의 중심에 분포하지 않고 대부분

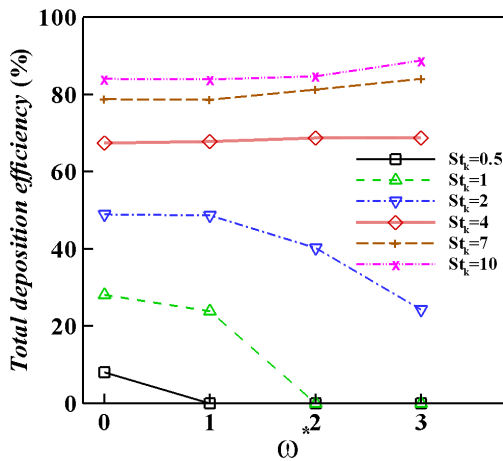
보텍스 밖에 위치하고 있다. 즉, Stokes 수가 작으면 입자가 후류에 고르게 분포하지만, Stokes 수가 증가하면 입자 분포의 균일도가 떨어진다. 이러한 특징은 실린더가 회전하는 경우에도 공통적으로 관찰할 수 있다.  $\omega^*$ 가 1인 경우, 후류의 보텍스 구조가  $\omega^* = 0$ 의 경우와 유사하므로 입자의 분포도  $\omega^* = 0$ 의 결과와 전반적으로 유사하다. 하지만, 보텍스 shedding이 발생하지 않는  $\omega^* = 2$ 인 경우에는  $\omega^* = 0$ 의 경우와 달리, 실린더 후류의 입자 분포(또는 입자가 존재하지 않는 후류 영역)에서 보텍스로 인한 주기적인 패턴을 관찰할 수 없다.

### 3.3 입자부착

Fig. 7은 실린더 표면에 부착되는 입자의 부착 효율을 회전속도  $\omega^*$ 의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 가장 눈에 띄는 사실은 실린더의 회전이 입자 부착효율에 미치는 영향이 Stokes 수에 따라 달라진다는 점이다. 즉, 낮은 Stokes 수 ( $St_k < 4$ )에서는 회전속도가 증가함에 따라 부착효율이 크게 감소하고, 심지어 입자부착이 발생하지 않는 경우도 관찰된다. 예를 들어  $St_k = 1$ 일 때, 회전하지 않는 경우의 부착효율은 28.02%이지만,  $\omega^*$ 가 2 또는 3일 때 부착효율은 영이 된다. 반면, 높은 Stokes 수( $St_k > 4$ )에서는 회전속도가 증가함에 따라 부착효율이 다소 증가한다. 이 결과를 다른 관점에서 설명하면, 입자의 Stokes 수

**Table 3** Comparison of simulation results for several rotational speeds at  $Re = 100$

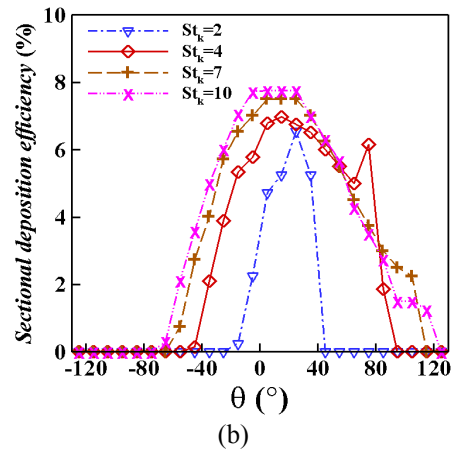
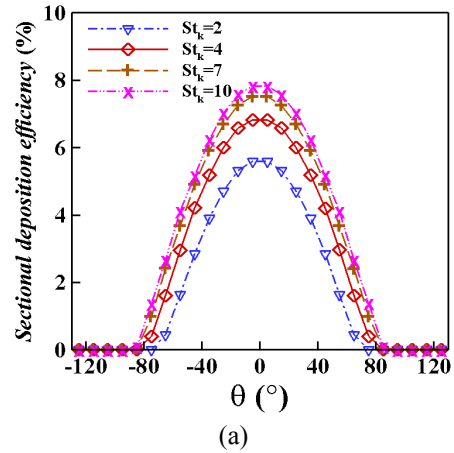
	$\omega^*$	$\overline{C_D}$	$\overline{C_L}$	$St_r$
Kang et al. <sup>(9)</sup>	0	1.343	0	0.166
	1	1.104	-2.488	0.166
	2	0.468	-5.493	-
Stojkovic et al. <sup>(10)</sup>	0	1.3371	0	0.1650
	1	1.1080	-2.504	0.1658
	2	0.46	-5.48	-
Present	0	1.344	0	0.166
	1	1.111	-2.508	0.166
	2	0.468	-5.536	-



**Fig. 7** Total deposition efficiency as a function of rotational speed  $\omega^*$

가 작은 경우에는 실린더의 회전이 크게 영향을 주지만, Stokes 수가 큰 경우에는 그 효과가 미비하다고 할 수 있다. 마지막으로 고정된 회전속도에서 Stokes 수에 따른 변화를 살펴보면, 회전속도에 상관없이 Stokes 수가 증가함에 따라 입자부착 효율이 증가한다.

입자의 부착효율과 함께 입자가 실린더에 부착되는 위치를 이해하는 것도 중요하다. Fig. 8은  $\omega^*$ 가 0 및 3인 경우에 대해 입자의 구간별 부착효율을 비교한 것이다.  $\omega^*$ 가 0인 경우에는 부착 위치가 실린더의 위쪽( $\theta > 0$ )과 아래쪽( $\theta < 0$ )에서 서로 대칭이다. 반면,  $\omega^* = 3$ 인 경우에는 부착 위치가  $\theta = 0$ 을 기준으로 대칭이 아니며, 실린더의 아래쪽( $\theta < 0$ )보다 위쪽( $\theta > 0$ )에서 입자가 많이 부착된다. 구간별 부착효율을 모두 더하면 전체 부착효율이 되므로, 회전에 관계없이 Stokes 수가 증가함에 따라 부착효율이 증가한다는 것을



**Fig. 8** Sectional deposition efficiency as a function of  $\theta$ : (a)  $\omega^* = 0$ ; (b)  $\omega^* = 3$

확인할 수 있다.

$St_k < 4$  조건에서  $\omega^*$ 가 증가함에 따라 입자의 부착효율이 크게 감소하는 원인을 밝히기 위해, 실린더 주변의 유선(Fig. 9)과  $St_k = 2$ 인 입자의 궤적(Fig. 10)을 그려보았다. 실린더가 정지한 경우와 달리 회전하는 경우에는 점성에 의해 실린더를 따라 회전하는 경계층(rotating boundary layer)을 관찰할 수 있고, 이 경계층은  $\omega^*$ 가 증가할수록 두꺼워진다. 입자의 궤적을 유선과 같이 살펴보면, 입자들이 실린더 근처에 도착했을 때 경계층이 두꺼울수록 많은 입자들의 궤적이 급격하게 바뀌며 실린더에 부착되지 않는 것을 관찰할 수 있다. 또한, Fig. 10에서 빨간색으로 표시한 부분은 실린더 표면에 부착된 입자들을 나타내는데,  $\omega^*$ 가 증가할수록 부착된 입자의 개수와 부착이 발생하는 구간이 감소한다. 따라서, 실린더 주변에 형성된 경계층이 입자부착을 방해하는 역할을 한다고 설명할 수 있다.

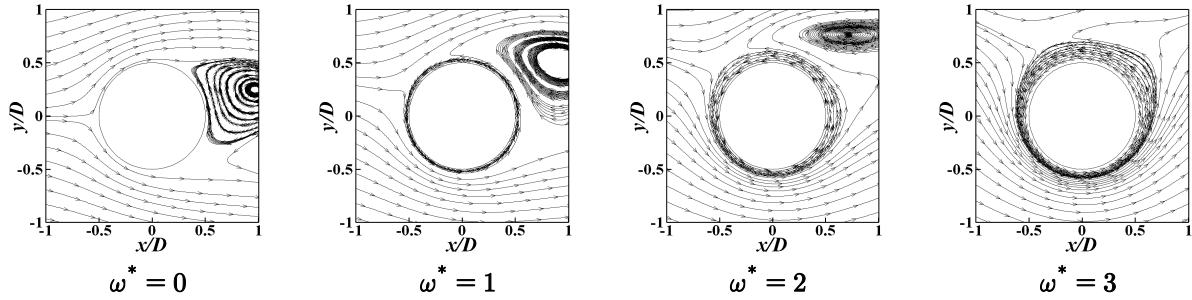


Fig. 9 Streamlines near the cylinder

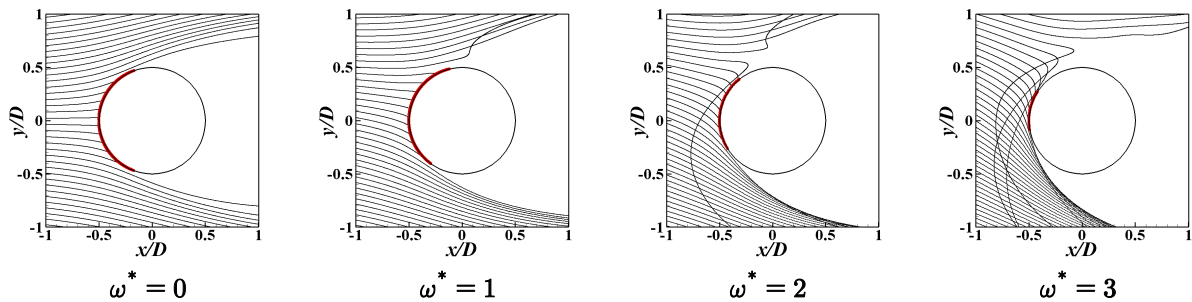


Fig. 10 Particle pathlines near the cylinder for  $St_k = 2$

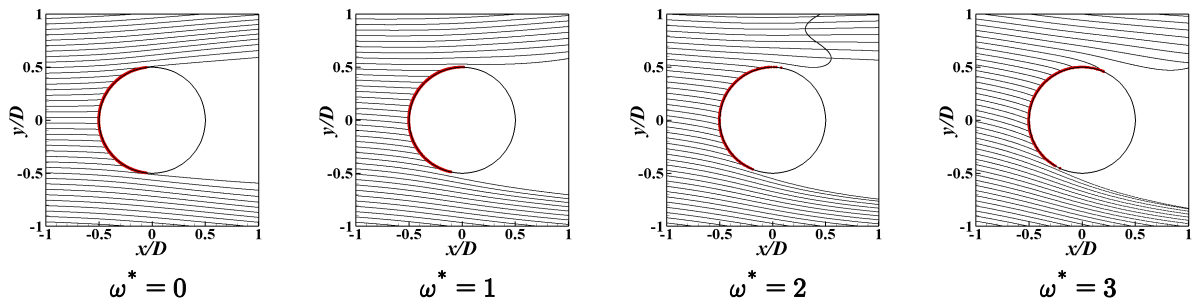


Fig. 11 Particle pathlines near the cylinder for  $St_k = 10$

이제,  $St_k > 4$  조건에서  $\omega^*$ 가 증가함에 따라 입자의 부착효율이 다소 증가하는 원인을 설명하고자 한다. Fig. 11은 실린더의 회전속도가  $St_k = 10$ 인 입자의 궤적에 미치는 영향을 나타낸 것이다.  $St_k = 2$ 의 결과(Fig. 10)와 비교해 보면,  $St_k = 10$ 인 입자는 관성이 크므로  $\omega^*$ 에 상관없이 실린더 주위의 경계층을 뚫고 들어와 실린더 표면에 부착된다. 즉, 경계층이 입자 부착을 방해하는 효과가  $St_k = 10$ 에서는 매우 미비하다고 할 수 있다. Fig. 12는  $\omega^* = 0$ 과  $\omega^* = 3$ 의 조건에서  $St_k = 10$  입자의 구간별 부착효율을 비교한 그림이다. 실린더의 회전에 의해 입자부착 위치가 전체적으로 실린더 위쪽으로 이동하였고,  $100\sim 120^\circ$  구간을 제외하면 전체적으로 정규분포에 가깝다. 또한,  $100\sim 120^\circ$  구간의 부착효율이 영이 아니므

로  $\omega^* = 3$ 의 전체 부착효율이  $\omega^* = 0$ 에 비해 약 4.5% 증가한 것임을 알 수 있다.  $100\sim 120^\circ$  구간에서 입자 부착이 발생하는 이유는 실린더 근처에서 벽 쪽을 향하는 양력이 발생하기 때문이라 판단된다.

$100\sim 120^\circ$  구간에서 부착효율이 증가한 이유가 양력 때문이라는 것을 확인하기 위해 입자에 작용하는 힘 모델식 (5)에서 양력을 무시하고 항력만을 고려하여 해석을 추가로 수행해 보았다. Fig. 13은 양력의 포함 여부가 입자의 구간별 부착효율에 미치는 영향을  $\omega^* = 3$ 에 대해 분석한 결과이다. 항력만을 고려한 경우와 항력과 양력을 모두 고려한 경우를 비교해 보면, 전체적으로 유사한 부착효율을 보이지만 실린더의 위쪽에서는 차이를 관찰할 수 있다. 즉, 양력을 무시하고



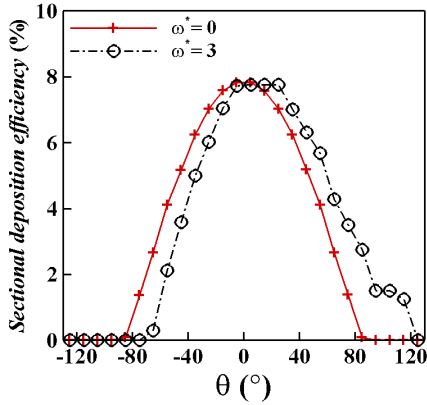


Fig. 12 Effect of cylinder rotation on sectional deposition efficiency for  $St_k = 10$

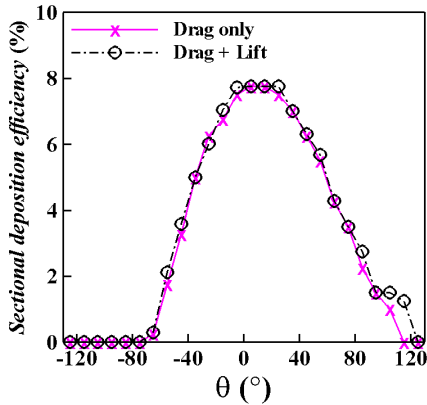
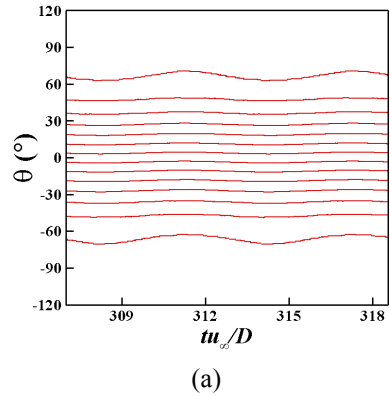


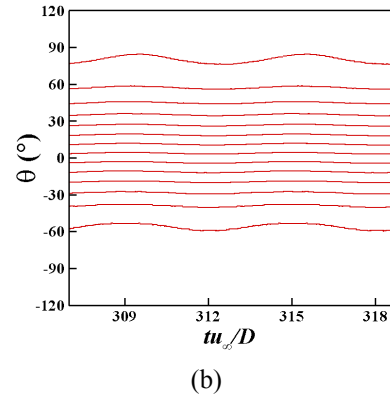
Fig. 13 Effect of Saffman lift on sectional deposition efficiency for  $\omega^* = 3$  and  $St_k = 10$

항력만을 고려하면  $\theta > 100^\circ$ 의 입자부착 구간 및 부착효율이 감소하며 전체 부착효율이 약 85%가 된다. 이 값은 양력을 고려할 때보다 약 3% 감소한 값으로 실린더가 회전하지 않는 경우와 거의 비슷한 값이다. 따라서,  $St_k > 4$  조건에서  $\omega^*$ 가 증가함에 따라 입자의 부착효율이 다소 증가하는 이유는 입자에 작용하는 양력 때문이라 할 수 있다.

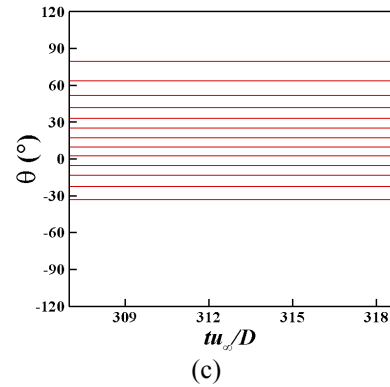
마지막으로 입자의 부착각도의 시간 변화를 살펴보았다. Fig. 14는  $St_k = 4$ 의 결과로 부착각도의 시간 변화를 명확하게 보기 위해 부착된 입자들 중 일부만을 표시하였다. 유동장이 비정상 유동인 경우( $\omega^*$ 가 0 또는 1)에는 보텍스 shedding으로 입자의 부착각도가 주기적으로 변하는 것을 알 수 있으며, 부착각도의 변화 주기가 보텍스 shedding 주기(=  $6.03u_\infty/D$ )와 정확히 일치한다. 하지만, 정상 유동인  $\omega^*$ 가 2인 경우에는 입자의 부착각도가 시간에 관계없이 일정하다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 14 Temporal variation of particle deposition location for  $St_k = 4$ : (a)  $\omega^* = 0$ ; (b)  $\omega^* = 1$ ; (c)  $\omega^* = 2$

#### 4. 결론

본 연구에서는 회전하는 원형 실린더 주위에서 입자가 부유된  $Re = 100$ 의 층류 유동을 해석하였다. 해석 결과를 바탕으로 실린더의 회전 속도  $\omega^*$  및 Stokes 수가 입자의 거동 및 입자 부착에 미치는 영향을 분석하였다. 우선 후류의 보텍스 구조 및 항력과 양력을 분석하여 선행 연구와 잘 일치함을 확인하였다. 회전 속도를 증가시키면

따라 유동장의 대칭성 및 보텍스 웨딩이 사라져,  $\omega^*$ 가 2 이상인 경우에는 유동장이 정상 상태가 되었다. 입자의 분산 특성은 회전 속도에 따른 보텍스 구조의 변화와 입자의 Stokes 수에 따라 크게 달라졌다. 하지만, 실린더의 회전과 상관없이 Stokes 수가 작으면 입자가 후류에 고르게 분포하는 반면, Stokes 수가 증가하면 입자 분포의 균일도가 감소하였다. 마지막으로 입자의 부착 특성은 Stokes 수에 따라 달라졌다. 낮은 Stokes 수( $St_k < 4$ )에서는 회전속도가 증가함에 따라 부착효율이 크게 감소하였고, 이는 실린더 주변의 회전하는 경계층이 입자의 부착을 방해하기 때문이다. 하지만, 높은 Stokes 수( $St_k > 4$ )에서는 회전속도가 증가함에 따라 부착효율이 다소 증가하였다. 이러한 변화는 입자에 작용하는 양력 때문이라 판단된다. 한편, 회전속도가 일정한 경우에는 Stokes 수가 증가함에 따라 입자의 부착효율이 증가하고, 입자의 부착 위치도 넓어졌다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문으로 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Williamson, C. H. K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Annual review of fluid mechanics*, Vol. 28, pp. 477~539.
- (2) Norberg, C., 2001, "Flow around a Circular Cylinder: Aspects of Fluctuating Lift," *J. Fluids Struct.*, Vol. 15, No. 3~4, pp. 459~469.
- (3) Thomas, F. O., Kozlov, A. and Corke, T. C., 2008, "Plasma Actuators for Cylinder Flow Control and Noise Reduction," *AIAA J.*, Vol. 46, No. 8, pp. 1921~1931.
- (4) 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 Sci. Technol.*, Vol. 43, No. 2, pp. 174~187.
- (5) Haugen, N. E. L. and Kragset, S., 2010, "Particle Impaction on a Cylinder in a Crossflow as Function of Stokes and Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 661, pp. 239~261.
- (6) Li, X., Zhou, H. and Cen, K., 2008, "Influences of Various Vortex Structures on the Dispersion and Deposition of Small Ash Particles," *Fuel*, Vol. 87, No. 7, pp. 1379~1382.
- (7) Haugen, N. E. L., Kragset, S., Bugge, M., Warnecke, R. and Weghaus, M., 2013, "MSWI Super Heater Tube Bundle: Particle Impaction Efficiency and Size Distribution," *Fuel Process. Technol.*, Vol. 106, pp. 416~422.
- (8) Mavridou, S. G. and Bouris, D. G., 2012, "Numerical Evaluation of a Heat Exchanger with Inline Tubes of Different Size for Reduced Fouling Rates," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 55, No. 19~20, pp. 5185~5195.
- (9) Kang, S., Choi H. and Lee, S., 1999, "Laminar Flow Past a Rotating Circular Cylinder," *Phys. Fluids*, Vol. 11, No. 11, pp. 3312~3321.
- (10) Stojković, D., Breuer, M. and Durst, F., 2002, "Effect of High Rotation Rates on the Laminar Flow around a Circular Cylinder," *Phys. Fluids*, Vol. 14, No. 9, pp. 3160~3178.
- (11) Morsi, S. A. and Alexander, A. J., 1972, "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems," *J. Fluid Mech.*, Vol. 55, No. 2, pp. 193~208.