



삼차원 원형주상체의 축방향 직경변화가 열·유동장에 미치는 영향

이 창 열,¹ 서 장 훈,¹ 윤 현 식,^{*2} 전 호 환³

CHARACTERISTICS OF THE FLOW AND HEAT TRANSFER AROUND A WAVY CYLINDER

Chang Yeol Lee,¹ Jang Hoon Seo,¹ Hyun Sik Yoon^{*2} And Ho Hwan Chun³

Three-dimensional characteristics of fluid flow and heat transfer around a wavy circular cylinder having sinusoidal variation in cross sectional area along the spanwise direction are numerically investigated using the immersed boundary method. The three different wavelengths of $\pi/4$, $\pi/3$ and $\pi/2$ and at the fixed wavy amplitude of 0.1 have been considered to investigate the effects of waviness on especially the forced convection heat transfer around a wavy cylinder when the Reynolds and Prandtl numbers are 300 and 0.71, respectively. The present computational results for a wavy cylinder are compared with those for a smooth cylinder. The time- and total surface-averaged Nusselt number for a wavy cylinder with is larger than that for a smooth cylinder, whereas that with $\lambda = \pi/4$ and $\pi/3$ is smaller than that for a smooth cylinder. However, because the surface area exposed to heat transfer for a wavy cylinder is larger than that for a smooth cylinder, the total heat transfer rate for a wavy cylinder with different wavelengths of $\lambda = \pi/4$, $\pi/3$ and $\pi/2$ is larger than that for a smooth cylinder.

Key Words : 파형 실린더(Wavy Cylinder), 열전달(Heat Transfer), 가상경계법(Immersed Boundary Method)

1. 서 론

몽툭한 물체 주위의 유동은 열교환기, 해양 구조물 및 선박 등의 여러 가지 공학 문제와 관련되어 있다. 이러한 몽툭한 물체 주위에서 형성되는 항력과 양력을 제어하고 열전달 성능을 향상시키기 위한 다양한 방법들이 연구되었다. 이러한 연구 중 한 가지 방법은 2차원 형상의 몽툭한 물체를 3차원 형상화 하는 것이다.

원형실린더의 경우, 최근 들어 실린더 직경이 축방향으로 주기적으로 변하는 파형 실린더에 대한 연구가 실시되고 있다.

Ahmed & Bays-Muchmor(1992) 는 레이놀즈 수(Re) 2,000 에서 파형 실린더의 파장(wavelength)에 따른 실린더 표면의 압력분포를 실험적으로 연구하였다. 그들은 node에서 항력이 saddle에서의 항력보다 크며, 축 방향의 압력구배가 3차원 유

동박리를 유발시킴을 발견했다. Lam et al.(2004) 은 실린더의 파(waviness)가 항력과 양력의 감소에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. $Re = 2,000 \sim 50,000$ 에서 Wavy 실린더의 항력 및 양력계수가 원형 실린더보다 작으며, 최대 20%의 항력이 감소하고 $Re = 10,000 \sim 60,000$ 에서의 Strouhal 수(St)는 약 0.2로서 원형 실린더와 거의 동일하다는 것을 발견하였다. Lam et al.(2004)은 $Re = 3,000 \sim 9,000$ 에서 Wavy 실린더의 평균 와 형성 영역길이는 원형 실린더보다 길며 이것이 항력과 양력을 감소하게 하고 Wavy 실린더 주위 saddle에서 Node로의 축 방향 유동이 형성되는 것을 발견하였다. Lee & Nguyen(2007)은 $Re = 5,000 \sim 20,000$ 에서 항력, 파형 실린더 후류의 평균속도와 난류강도분포에 대하여 실험적으로 연구하였으며, 그 결과 원형 실린더에 비하여 항력이 감소하고 축 방향을 따라 주기적인 후류 구조가 생성되는 것을 확인하였다. 앞서 언급한 여러 연구들은 파형 실린더 주위의 유동 특성에 대한 연구에 국한되어 있으며, 열 전달 특성에 대한 연구는 찾기 어렵다.

본 연구에서는 가상경계법(Immersed Boundary Methods)를 사용하여 $Re = 300$ 에서 파형 실린더 주위의 3차원 유동 및 열전달 특성에 대하여 연구하였다. 축 방향을 따라 형성된 3

1 학생회원, 부산대학교 대학원 조선해양공학과

2 정회원, 부산대학교 첨단조선공학센터

3 정회원, 부산대학교 조선해양공학과

* Corresponding author, E-mail: lesmodel@pusan.ac.kr

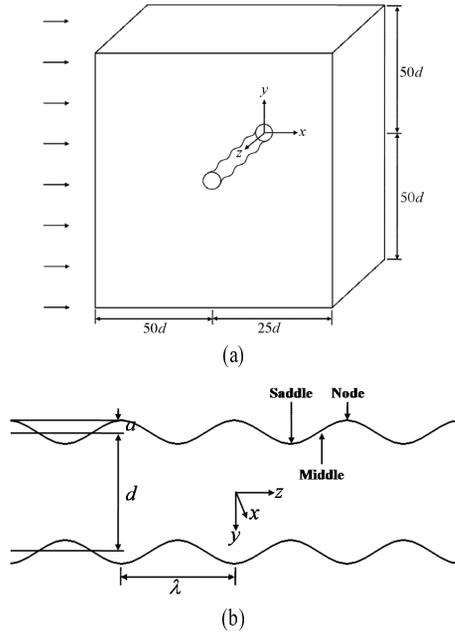


Fig. 1 (a) Computational domain and coordinate system and (b) geometry of the wavy cylinder

차원 파형이 유동 및 열전달에 미치는 영향을 보기 위하여 파형 실린더와 원형 실린더의 특성을 비교하였다.

2. 수치해석방법

원형 단면의 실린더 해석에 필요한 3차원 비정상 비압축성 운동량 보존 방정식과 연속 방정식 및 에너지 방정식은 다음과 같이 정의된다.

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - q = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_j T}{\partial x_j} = \frac{1}{Re Pr} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + h \quad (3)$$

여기서 u_i , P , t 및 T 는 각각 속도, 압력, 시간 그리고 온도를 나타낸다. 유한 체적법(Finite Volume Method)을 기반으로 가상 경계면을 사용하여 직교좌표계 상에서 원형 단면의 실린더에 대한 수치해석을 실시하였다. 식 (1)에 사용된

운동량 부가 f_i 와 식 (2)에 사용된 질량 원천 q 는 가상경계면에서의 점착 경계 조건과 가상경계면을 포함한 격자 내의 질량 보존을 만족시키기 위해 사용되었으며, 식 (3)에 사용된 열원은 가상경계면에서의 일정 벽 온도 조건을 만족시키기 위해 사용되었다.

모든 변수들은 자유흐름 속도 U_∞ 와 실린더의 직경 d 및 실린더의 표면 온도 T_∞ 로 무차원화 되었다. 식 (1)~(3)에서 사용된 무차원 수는 레이놀즈수(Re) 및 프랜틀수(Pr)이며, 이들은 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{U_\infty d}{\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4)$$

여기서 ν 와 α 는 각각 동점성 계수와 열확산 계수를 나타낸다. 본 계산에서 Pr 은 0.71, Re 는 300으로 고정하였다.

시간에 따른 해를 구하기 위해 속도장 계산을 압력 계산으로부터 분리하는 Time-split scheme을 사용하였다.(Kim and Choi, 2004 and Kim and Moin,1985) 그리고 대류항은 Third-order Adams-Bashforth scheme을, 확산항은 Crank-Nicolson scheme을 사용하였다. 온도장에 대해서는 대류 항에는 third-order Adams-Bashforth scheme이 그리고 확산 항에는 Crank-Nicolson scheme을 사용해 유사한 방법으로 해를 구하게 된다.

공간 이산화를 위해 2차 정확도의 중앙 차분법이 사용되었다. 또한 가상경계면에서의 점착 경계 조건과 일정 벽 온도 조건을 만족시키기 위해 2차 정확도의 liner/bilinear/trilinear 보간법을 사용하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 계산영역과 좌표계를 보여주고 있다. 계산영역은 실린더의 중심을 원점으로 하여 주 유동 방향으로 $-50d \leq x \leq 25d$, 수직 방향으로 $-50d \leq y \leq 50d$ 가 사용되었으며 축 방향의 계산영역은 파형 실린더의 파장의 길이에 따라 다르게 고려되었다. 실린더가 위치하는 영역은 격자를 조밀하게 생성하였으며, 축 방향으로는 균일간격의 격자를 사용하였다. 실린더에서 멀리 떨어진 경계에서는 자유유동 조건을 적용하였고, 출구에서는 대류 경계조건을 사용하였다. 실린더의 벽면에는 점착 조건과 일정 벽 온도 조건을 사용하였고, 축방향으로는 주기 경계조건을 사용하였다.

Table 1 Grid and geometrical parameters

	λ	$N_x \times N_y \times N_z$	L_z	a
	$\pi/4$	$260 \times 220 \times 186$	π	0.1
Wavy cylinder	$\pi/3$	$260 \times 220 \times 186$	$4\pi/3$	0.1
	$\pi/2$	$260 \times 220 \times 186$	2π	0.1
Smooth cylinder	-	$260 \times 220 \times 49$	π	0.0

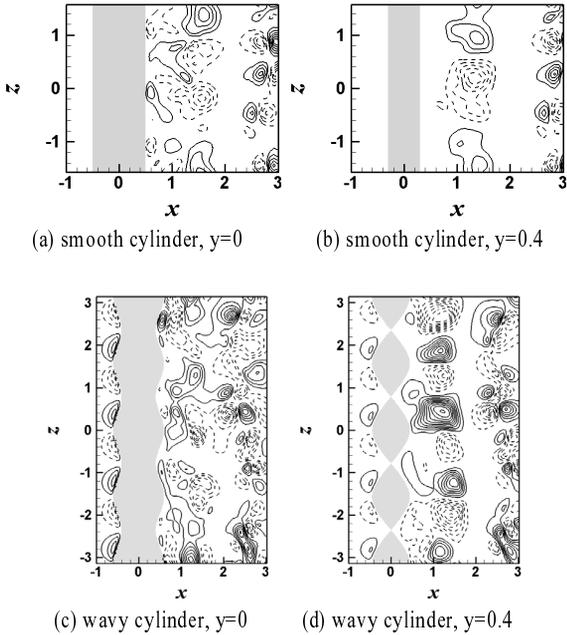


Fig. 2 Contours of instantaneous spanwise velocity in the two different x-z planes

파형 실린더의 형상은 $d_z = d + 2a \cos(2\pi z/\lambda)$ 에 의해 정의되며, d_z 는 국소지름, d 는 평균지름, a 는 표면굴곡의 크기, λ 는 파장, z 는 축 방향의 위치를 나타낸다. Fig. 1(b)는 본 연구에서 사용된 파형 실린더의 형상을 보여주며 최대 지름과 최소 지름을 갖는 축 방향의 위치를 각각 'Node'와 'Saddle'이라고 하였다.

격자수 의존성 테스트를 한 결과, $260 \times 220 \times 186$ 의 격자계가 적합한 것으로 나타났다. 그 결과 본 연구에 고려된 격자 계를 Table 1에 나타내었다. 고정된 a 에 대하여 λ 의 변화에 따른 열전달 특성에 대하여 연구하기 위하여 $a = 0.1$, $\lambda = \pi/4, \pi/3, \pi/2$ 인 파형 실린더에 대하여 전산 해석을 수행하였다.

실린더 표면에서의 국소, 시간 및 공간 평균된 여러 Nusselt 수를 다음 식 (5)와 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 Nu &= \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{wall}} & \overline{Nu} &= \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} Nu dt \\
 \langle Nu \rangle &= \frac{1}{W_z} \int_0^{W_z} Nu dz & \langle \overline{Nu} \rangle &= \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \langle Nu \rangle dt \\
 \langle\langle Nu \rangle\rangle &= \frac{1}{L} \int_0^L \langle Nu \rangle dz & \langle\langle \overline{Nu} \rangle\rangle &= \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \langle\langle Nu \rangle\rangle dt
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 n 은 실린더 표면에 수직한 방향, W 는 실린더의

표면, t_p 는 시간적분 주기, L 은 실린더의 축 방향 길이를 나타낸다.

본 계산의 타당성 검증을 위하여 $Re = 300$ 에서 원형 실린더의 선행연구결과들과 비교하였다. Table 2는 본 연구의 결과가 Kim & Choi(2005), Kravchenko et al.(1999) Posdziech & Grundmann(2001), Churchill & Bernstein(1997)의 결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

3. 결 과

파형 실린더 표면굴곡에 의한 온도장의 변화는 유동 특성으로부터 설명이 가능하다. 파형 실린더주위의 유동은 원형 실린더에 비하여 3차원 유동이 증가한다.

Fig. 2는 $y = 0$ 와 $y = 0.4$ 인 $x - z$ 평면에서 원형 실린더와 $\lambda = \pi/2$ 인 파형 실린더의 순간 축 방향 속도장을 나타낸다.

원형 실린더는 2차원 형상이지만, $Re = 194$ 이상에서는 후류에서 3차원 효과가 나타난다.(Williamson, 1996)

Fig. 2(a), (b)에서 보는 것처럼 본 연구에서 역시 $Re = 300$ 에서는 원형 실린더 후류에 축 방향 유동이 발달하는 것을 알 수가 있다. 그러나 원형 실린더와 달리 파형 실린더의 경우, Fig 2(c), (d)에서 보는 것처럼 상류에서 축 방향의 표면굴곡을 따라 축 방향 유동이 규칙적으로 바뀌며 $y = 0.4$ 에서 상대적으로 작은 표면굴곡의 영향으로 상류에서 축 방향 유동은 약해지지만 후류에서는 $y = 0$ 에 비해 규칙적인 유동이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 3은 $\lambda = \pi/2$ 인 파형 실린더의 유동 방향을 따른 $y - z$ 평면의 시간평균 축 방향 속도장과 온도장을 나타낸다.

원형실린더는 축 방향으로 동일한 형상이기 때문에 축 방향 속도 성분은 나타나지 않지만 파형 실린더의 경우 표면굴곡을따라 축 방향 속도가 나타나게 된다. 그 결과, Fig. 3(a)에서 보는 것처럼 상류인 $x = -0.5$ 에서 유동은 node에서 saddle로 흐르게 되며 Fig. 3(b), (c)에서 보는 것처럼 실린더의 표면을 따라 흐르면서 유동 방향이 반대로 바뀌어 saddle에서 node로 흐르는 것을 볼 수 있다. 등온선은 상류 지역인

Table. 2 Comparisons between the present study with previous results

	$\overline{C_D}$	$C_{L,rms}$	$\overline{C_{pb}}$	$\langle\langle \overline{Nu} \rangle\rangle$
Present	1.30	0.46	-1.01	8.87
Kim & Choi(2005)	1.32	0.46	-1.03	-
Kravchenko et al.(1999)	1.28	0.40	-1.01	-
Posdziech & Grundmann(2001)	1.27	0.44	-1.00	-
Churchill & Bernstein(1997)	-	-	-	8.71

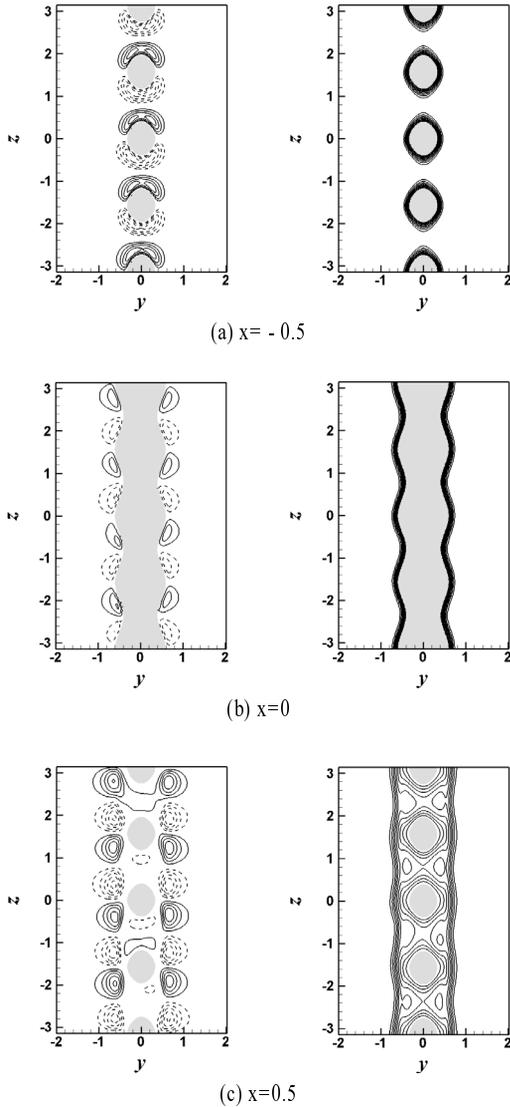


Fig. 3 Contours of the time-averaged spanwise velocity (left column) and temperature (right column) for the wavy cylinder with $\lambda=\pi/2$

$x = -0.5$ 와 $x = 0$ 에서 조밀하게 분포하지만 하류 지역은 유동이 혼합되기 때문에 넓게 분포하게 된다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 나타내었던 표면굴곡에 의해 생성된 축 방향 유동을 관찰하기 위하여 원형 실린더와 파형 실린더 표면 근처에서의 유선을 $x-z$ 평면에서 나타낸 것이다. 원형 실린더와 달리 Wavy 실린더 주위의 유동은 상류에서 saddle 수렴하게 되고, 원형 실린더와 달리 Wavy 실린더 주위의 유동은 상류에서 saddle로 수렴하게 되고, 후류에서는 saddle로부터 출구방향으로 발산하게 된다. 이 결과는 Lam et al.(2004)

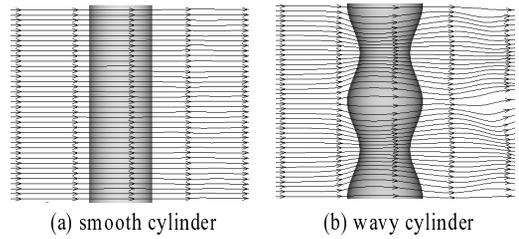


Fig. 4 Streamlines patterns

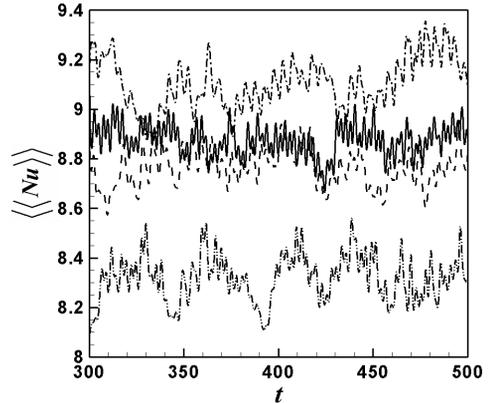


Fig. 5 Total surface-averaged Nusselt number as a function of time: \dots , $\lambda=\pi/4$; $---$, $\lambda=\pi/3$; $- \cdot -$, $\lambda=\pi/2$; $---$, smooth cylinder

의 결과와 유사함을 알 수 있다.

Fig. 5는 원형 실린더와 파형 실린더의 $\langle\langle Nu \rangle\rangle$ 을 시간에 따라 나타낸 것이며, 시간에 따른 변화가 큼을 알 수 있다. 파형 실린더는 그 형상에 따라 유동장 및 온도장의 분포가 서로 다르기 때문에, 각각의 파형 실린더는 다른 $\langle\langle Nu \rangle\rangle$ 를 가진다. Table 3에 보는 것처럼 $\lambda = \pi/2$ 인 실린더의 $\langle\langle Nu \rangle\rangle$ 는 원형 실린더에 비해 2.4% 크고, $\lambda = \pi/3$ 와 $\lambda = \pi/4$ 인 실린더는 각각 1.2% 와 6.2% 가 작다. 하지만 유동에 노출된 총 면적이 원형 실린더에 비해 $\lambda = \pi/2, \pi/3, \pi/4$ 인 파형 실린더가 4%, 9%, 15% 크기 때문

Table 3 Time- and total surface-averaged Nusselt number and time- and spanwise local surface-averaged Nusselt number

	λ	$\langle\langle Nu \rangle\rangle$	$\langle Nu \rangle$		
			Node	Middle	Saddle
Wavy cylinder	$\pi/4$	8.32	11.79	7.65	6.62
	$\pi/3$	8.76	10.46	8.36	7.89
	$\pi/2$	9.11	9.64	8.92	8.86
Smooth cylinder	-	8.87	-	-	-

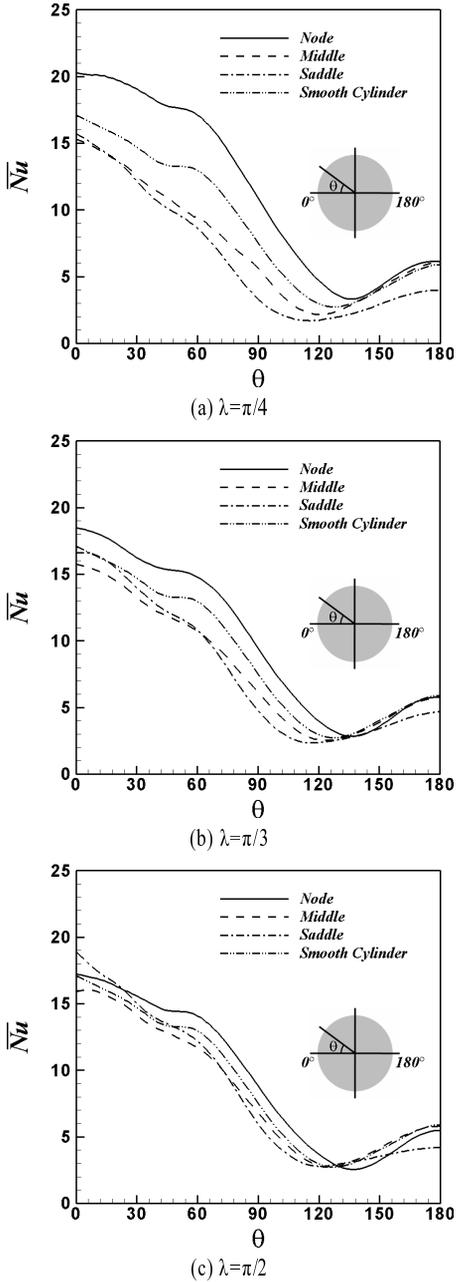


Fig. 6 Time-averaged local Nusselt number as a function of the circumferential direction θ

에 표면적을 고려한 총열전달은 약 7%, 8%, 8%가 각각 크게 된다.

Fig. 6는 원주 방향에 따른 파형 실린더의 \overline{Nu} 을 다른 축 방향 위치에서 나타낸 것이며 $\theta = 0^\circ$ 와 $\theta = 180^\circ$ 은 전방 정체점과 후방 정체점을 의미한다. 원형 실린더와 파형 실린

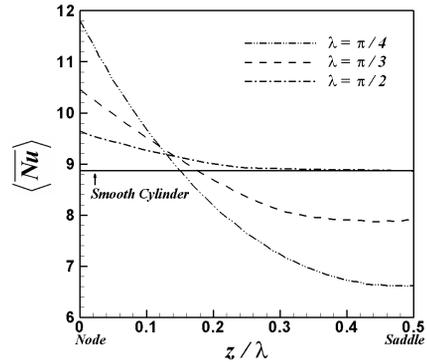


Fig. 7 Time- and spanwise local surface-averaged Nusselt number as a function of z/λ

더의 \overline{Nu} 모두 유사 한 분포를 보이며, 전방 정체점에서 최대값을 가진다. \overline{Nu} 는 전방 정체점에서 박리점으로 이동 할수록 감소되며, 박리점에서 최소값을 가진다. 유동은 박리점 이후, 혼합이 더욱 강해지므로 박리점에서 후방 정체점으로 갈수록 \overline{Nu} 는 커진다. 파형 실린더의 \overline{Nu} 는 파장에 큰 영향을 받는다.

Node에서는 단면적의 지름이 크기 때문에 입구로부터 흘러온 유체와 상대적으로 먼저 만나게 되므로, Nu 가 middle과 saddle에서의 값보다 크게 된다. 만약 파장이 짧다면 표면굴곡의 기울기가 크게 되고 유동에 더 큰 저항을 준다. 그 결과, $\lambda = \pi/4$ 인 파형 실린더의 경우 다른 파형 실린더에 비해 축 방향 위치에 따라 \overline{Nu} 의 값이 큰 차이가 나게 된다. 파장이 길어질수록 표면굴곡의 기울기는 작아지므로, 유동의 저항이 작아지게 되어 축 방향 위치에 따라 \overline{Nu} 의 값의 차이가 작아진다.

Node에서는 단면적의 지름이 크기 때문에 입구로부터 흘러온 유체와 상대적으로 먼저 만나게 되므로, \overline{Nu} 가 middle과 saddle에서의 값보다 크게 된다. 만약 파장이 짧다면 표면굴곡의 기울기가 크게 되고 유동에 더 큰 저항을 준다. 그 결과, $\lambda = \pi/4$ 인 파형 실린더의 경우 다른 파형 실린더에 비해 축 방향 위치에 따라 \overline{Nu} 의 값이 큰 차이가 나게 된다.

파장이 길어질수록 표면굴곡의 기울기는 작아지므로, 유동의 저항이 작아지게 되어 축 방향 위치에 따라 \overline{Nu} 의 값의 차이가 작아진다. Fig. 7은 원형 실린더와 파형 실린더의 z/π 에 따른 $\langle \overline{Nu} \rangle$ 을 나타낸다. 원형 실린더의 경우 2 차원 형상이므로 $\langle \overline{Nu} \rangle$ 가 일정하지만 파형 실린더의 경우 축 방향에 따라 node에서 최대값을 갖고 node에서 saddle로 갈수록 감소한다. 파형 실린더의 경우 node에서의 $\langle \overline{Nu} \rangle$ 은 원형 실린더의 경우보다 크며, 특히 $\lambda = \pi/4$ 인 파형 실린더인 경우 가장 크다. saddle에서의 $\langle \overline{Nu} \rangle$ 는 $\lambda = \pi/4$ 인 파형 실린더에



서 상대적으로 가장 작으며, $\lambda = \pi/4$ 인 파형 실린더의 경우 node에서 saddle로 갈수록 원형 실린더의 값에 접근한다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 형상의 파형 실린더 주위의 유동 및 열전달 특성에 대하여 수치적으로 연구하였다. 수치해석은 직교 좌표계에서 2차 정확도의 유한체적법을 사용하였으며, 파형 실린더 주위의 열유동 현상을 모사하기 위해 가상경계법을 도입하였다. 계산에는 1000만개 이상의 격자를 사용하였고 선행 연구 결과들과 비교를 통해 본 연구에서 사용된 수치해석 기법의 타당성을 검증하였다.

파형 실린더의 축 방향에 따른 표면형상 변화가 유동과 열전달에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 $a = 0.1$, $\lambda = \pi/4$, $\pi/3$ 및 $\pi/2$ 로 변화시켰다. 파형 실린더와 원형 실린더와의 비교를 통하여 아래의 결론을 도출하였다.

- (1) 파형 실린더의 축 방향 표면형상변화에 따라 상류에서의 유동은 node에서 saddle로 흐르게 되고, 실린더의 표면을 따라 흐르면서 유동 방향이 바뀌어 saddle에서 node로 흐르게 된다.
- (2) 파형 실린더의 원주 방향에 따른 \overline{Nu} 의 변화는 원형 실린더와 비슷한 패턴을 가지나, 축 방향 위치에 영향을 받으며 node에서의 \overline{Nu} 이 saddle에서보다 크다.
- (3) $\langle \langle \overline{Nu} \rangle \rangle$ 는 $\lambda = \pi/2$ 인 파형 실린더의 경우만 원형 실린더에 비해 크고, $\lambda = \pi/3$ 와 $\lambda = \pi/4$ 인 경우는 오히려 작다. 하지만 유동에 노출된 총 면적을 고려한 총열전달은 모든 파형 실린더가 원형 실린더보다 크다.

참고문헌

- [1] 1992, Ahmed, A. and Bays-Muchmore, B., "Transverse flow over a wavy cylinder," *Phys. Fluids A*, Vol.4, pp.1959-1967.
- [2] 2004, Lam, K., Wang, F.H., Li J.Y. and So, R.M.C. "Experimental investigation of the mean and fluctuating forces of wavy (varicose) cylinders in a cross-flow," *J. Fluids Struct.*, Vol.19, pp.321-334.
- [3] 2004, Lam, K., Wang, F.H. and So, R.M.C. "Three-dimensional nature of vortices in the near wake of a wavy cylinder," *J. Fluids Struct.*, Vol.19, pp.815-833.
- [4] 2007, Lee, S. and Nguyen, A.T., "Experimental investigation on wake behind a wavy cylinder having sinusoidal cross-sectional area variation," *Fluid Dynamics Research*, Vol.39, pp.292-304.
- [5] 2001, Kim, J., Kim, D. and Choi, H., "An immersed-boundary finite volume method for simulations of flow in complex geometries," *J. Comput. Phys.*, Vol.171, pp.132-150.
- [6] 2004, Kim, J. and Choi, H., "An immersed-boundary finite-volume method for simulation of heat transfer in complex geometries," *KSME Int. J.*, Vol.18, pp.1026-1035.
- [7] 1985, Kim, J. and Moin, P., "Application of a Fractional Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *J. Comput. Phys.*, Vol.59, pp.308-323.
- [8] 1994, Zang, Y., Street, R.L. and Koseff, J.R. "A Non-Staggered Grid, Fractional Step Method for Time-Dependent Incompressible Navier - Stokes Equations in Curvilinear Coordinates," *J. Comput. Phys.*, Vol.114, pp.18-33.
- [9] 2005, Kim, J. and Choi, H., "Distributed forcing of flow over a circular cylinder," *Phys. Fluids*, Vol.17, 033103.
- [10] 1999, Kravchenko, A.G. Moin, P. and Shariff, K. "B-spline method and zonal grids for simulations of complex turbulent flows," *J. Comput. Phys.*, Vol.151, pp.757-789.
- [11] 2001, Posdziech, O. and Grundmann, R., "Numerical simulation of the flow around an infinitely long circular cylinder in the transition regime," *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*, Vol.15, pp.121-141.
- [12] 1997, Churchill, S.W. and Bernstein, M., "A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow," *J. Heat Transfer*, Vol.99, pp.300-306.
- [13] 1996, Williamson, C.H.K., "Vortex dynamics in the cylinder wake," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, pp.477-539.