

< 논문 >

원형 핀이 부착된 실린더 주위의 유체 유동에 관한 수치적 연구

이 동 혁* · 하 만 영†

(2005년 8월 22일 접수, 2005년 11월 16일 심사완료)

A Numerical Study on the Fluid Flow Past a Cylinder with a Periodic Array of Circular Fins

Dong Hyuk Lee and Man Yeong Ha

Key Words : Circular Cylinder(원형 실린더), Circular Fin(원형 핀), Near Wake(근접 후류), Fluid Flow(유체 유동), Vortex Shedding(와 유출)

Abstract

Three-dimensional, time-dependent solutions of fluid flow past a circular cylinder with a periodic array of circular fins are obtained using an accurate and efficient spectral multidomain methodology. A Fourier expansion with a corresponding uniform grid is used along the circumferential direction. A spectral multidomain method with Chebyshev collocation is used along the r-z plane to handle the periodic array of circular fins attached to the surface of the cylinder. Unlike the flow past a circular cylinder, Second instabilities like mode A and mode B are not found in the Reynolds number range 100~500. It is found that three-dimensional instability of vortical structures is suppressed due to the presence of fin. The present numerical solutions report the detailed information of flow quantities near wake of finned cylinder.

1. 서 론

몽푁한 물체(Bluff body)를 지나는 박리 유동 및 후류 구조는 공기 역학 및 열전달 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히, 몽푁한 물체들 중 원형 실린더 형상의 박리 유동 및 후류 구조는 외부 유동 연구의 기초적인 문제로 간주되고 있으며 많은 선행 연구자들에 의해 공기 역학적 힘의 평가 및 유동의 물리적 메커니즘들이 규명되고 있다. 원형 실린더를 지나는 유동은 레이놀즈 수가 증가할수록 정상 상태에서 비정상 상태로, 2 차원에서 3 차원으로서의 천이 과정을 겪는다. 이에 관한 유동의 3 차원적인 불안정성, 항력 및 양력에 영향을 미치는 와 구조의 생성, 성장 및 소멸과 후류의 천이 과정이 연구의 초점이 되고 있다.⁽¹⁻⁹⁾ 이러한 연구들은 핀이 부착되지 않은 원형 실린더와 같은

단순한 형상에 국한되어 있다. 그러나 실제 산업 현장에서는 원형 핀-튜브 열교환기와 같은 복잡한 형상에 관한 유동 메커니즘의 이해를 요구하고 있으며, 이는 단순한 원형 실린더의 유동으로는 모델링 할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 Fourier-Chebyshev 스펙트럴 다영역 방법을 이용하여 축 방향에 주기적 배열의 핀을 가진 실린더를 지나는 유동을 해석하여 레이놀즈 수에 따른 공기 역학적 힘의 평가 및 시간적, 공간적 후류 구조의 특성을 분석하였다.

2. 이론적 연구

2.1 지배 방정식

Fig. 1 은 본 연구에서 고려하는 3 차원 형상의 원형 핀이 부착된 실린더 형상 및 좌표계를 보여 주고 있다. 이 형상을 지나는 유동을 지배하는 무차원 연속 방정식 및 운동량 보존 방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : myha@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2440 FAX : (051)512-9835

* LG전자 DAC 연구소

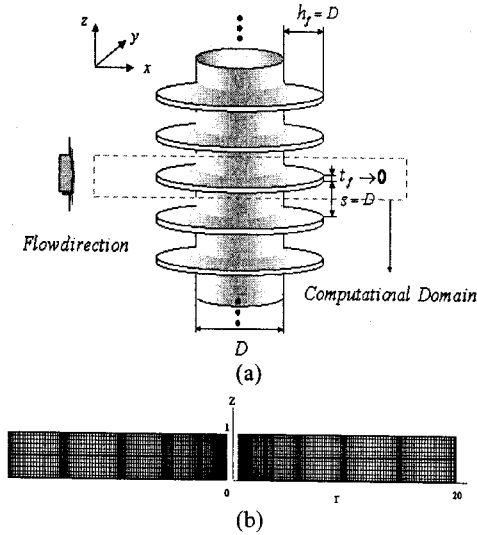


Fig. 1 (a) A schematic of the fin-tube geometry and computational domain. (b) Two-dimensional view of three-dimensional mesh system on r - z plane

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

여기서 무차원 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$t = \frac{U_\infty t^*}{D}, \mathbf{u} = \frac{\mathbf{u}^*}{U_\infty}, p = \frac{p^*}{\rho U_\infty^2} \quad (3)$$

위의 식에서 U_∞ , D 와 ρ 는 자유 유동 속도, 실린더의 직경 및 유체 밀도를 나타낸다. 그리고 식 (3)에서 사용한 ‘*’는 변수들이 차원을 가지고 있다는 것을 나타낸다. 실린더 축 방향으로 주기적으로 부착된 두께 0 인 원형 핀을 처리하기 위해서 r - z 평면을 따라서 Chebyshev 선점 (Collocation)을 이용한 스펙트럴 다영역 방법 (Spectral multidomain method)을 사용하였다. 핀과 핀 사이의 간격(s)은 $1D$ 이고, 핀 높이(h_f) 역시 $1D$ 의 크기를 가진다. Fig. 1(a)에서 알 수 있듯이, $r = 0.5 \sim 1.5$, $z = 0.5$ 의 위치에 핀이 위치하고 있다. 계산 형상이 단지 하나의 핀을 포함하고 있지만 축 방향으로 주기 조건을 적용하였으므로 현재 계산은 원형 핀이 $z = 0.5 \pm 1.0n$ ($n = 1, 2, 3, \dots, \infty$)의 위치에 있는 조건과 동일하다. $180 < \text{Re} < 1000$ 의 영역에서 원형 실린더를 지나는 유동 가시화 실험을 통해서 축 방향 및 유동 방향 와 구조들이 실린더 축 방향으로 주기적인 구

Table 1 Characteristics of the different computational domains. N_r , N_θ , N_z , number of points in the r , θ , z direction, respectively; $\overline{C_D}$, average drag coefficient; St , Strouhal number; $(\overline{C_L'^2})^{1/2}$, RMS of drag coefficient. ($\text{Re} = 300$)

Case	$N_r \times N_\theta \times N_z$	$\overline{C_D}$	St	$(\overline{C_L'^2})^{1/2}$
1	181x144x17	1.6752	0.1440	0.1720
2	181x144x35	1.6839	0.1444	0.1692
3	244x144x17	1.6778	0.1440	0.1728

조를 가진다는 것은 잘 알려져 있다. 특히, Williamson⁽³⁾은 레이놀즈 수가 300 일 때, 실린더 축 방향으로 와 구조의 wavelength 가 0.8~1.2의 범위에 존재한다는 것을 확인하였다. 또한, Lee⁽⁸⁾는 300의 레이놀즈 수에서 실린더 축 방향 길이를 2D로 지정하고 현재 계산 방법과 동일하게 원형 실린더를 해석한 결과 두 쌍의 정형화된 유동방향 와 구조를 명확하게 모사하였다. 실린더 축 방향에 따른 기하학적 형상의 주기성이 반드시 유동의 주기성을 보장하는 것은 아니지만, 위에서 언급한 선행 연구자들의 결과를 통해서 본 연구에서 수행된 저 레이놀즈 영역에서는 실린더 축 방향 계산 영역의 길이를 $1D$ 로 지정하여 한 쌍의 유동 방향 및 축 방향 와 구조를 해석할 수 있다.

2.2 수치해석방법

스펙트럴 다영역 방법을 통하여 r - z 평면을 12개의 분할 영역으로 나누었다. 분할 영역내의 격자 점들의 비 균일 분포는 Chebyshev Gauss-Lobatto 근사에 의해서 나타내어진다. 핀-실린더에 근접한 유동 구조들의 해상도를 높이기 위해서 핀-실린더에 근접한 분할 영역의 크기를 더욱더 작게 만들었으며, 원주 방향으로 Fourier expansion을 사용하였다. 실린더 표면($r = 0.5$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$, $0 \leq z \leq 1$) 및 핀 표면($0.5 \leq r \leq 1.5$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$, $z = 0.5$)에는 점착 조건을 지정하였고, 실린더 축 방향으로 주기 조건을 지정하였다. 주기 조건은 축 방향으로 속도 및 압력의 구배가 연속성을 만족하도록 지정하였고, 다영역 방법의 계면 조건은 두 개의 부영역 사이에 존재하는 계면에서 속도 및 그 1차 구배가 동일하도록 지정하였다. 계산 영역의 중심에서 바깥 경계가

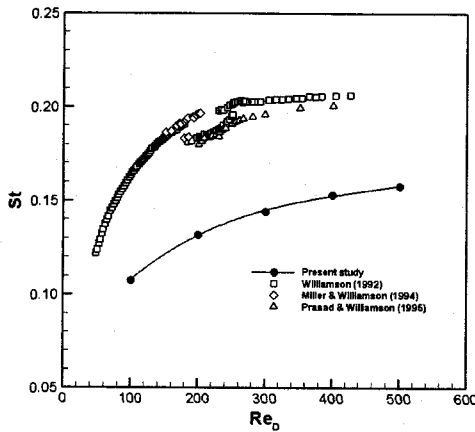


Fig. 2 Strouhal-Reynolds number relationship over laminar and 3-D transition regimes for smooth cylinder and finned cylinder

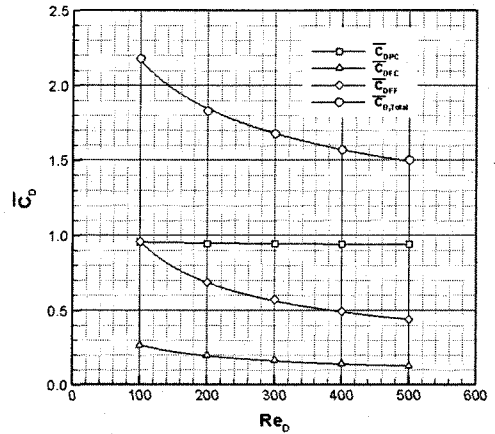


Fig. 3 Time-averaged drag coefficient for different Reynolds numbers

지의 크기는 $20D$ 이고, 입구 ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$) 조건은 포텐셜 유동 조건을 지정하였고, 출구 ($\pi/2 \leq \theta \leq -\pi/2$) 조건은 큰 와 구조들이 내부 영역의 유동장에 영향을 미치지 않고 계산 영역 밖으로 나가도록 Nonreflecting 경계 조건을 지정하였다. 여기서 Mittal & Balachandar⁽⁵⁾가 사용한 버퍼 영역 기법을 사용하였다. 유동장을 계산하기 위해서 2 단계 시간 분할 방법이 사용되었다. 먼저, 'n' 시간 레벨에서 중간 단계인 '*' 시간 레벨까지 진행하는 동안 대류-확산 방정식에 대한 수치 해를 구한다. 이 때 비선형 방정식인 대류항의 선형화를 위하여 3 단계 Adams-Bashforth 기법이 사용되고 확산항에 대한 이산화를 위하여 Crank-Nicolson 기법이 사용되었다. '*' 시간 레벨에서 'n+1' 시간 레벨까지 진행하는 동안 압력 프와송(Poisson) 방정식에 대한 해를 구한 후, 최종적으로 'n+1' 시간 레벨에서의 속도를 구한다. 그러므로, 전체 수치 해석 방법은 시간에 대해서 2 차 정확도를 가진다. 또한 스펙트럴 다영역 방법은 각 분할 영역 내 공간에서 지수적 정확도를 제공한다. 현재 모든 계산에서 초기 속도장은 포텐셜 유동으로 지정하고 원과 실린더 표면에 짧은 시간 동안 사인 함수 형태로 변화하는 미끄럼 속도를 지정하여 와 유출(Vortex shedding)을 유도하였다. 그리고 계산은 항력 및 양력이 통계학적으로 stationary 상태에 도달하는 시간까지 진행하였다. 리눅스 기반의 병렬 처리 시스템 (CPU:Pentium-4 2.66GHz, Memory:1GB)을 사용하여 병렬 계산을 수행하였다.

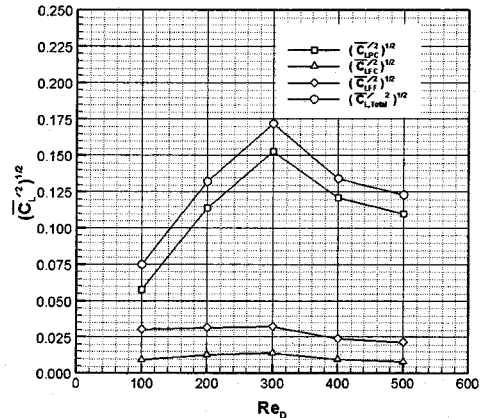


Fig. 4 Root mean square of Lift coefficient for different Reynolds numbers

3. 결과 및 고찰

현재 계산에서 사용한 격자 의존성을 평가하기 위하여 Table 1 에서와 같이 3 가지 경우에 대한 격자 시스템을 검토하였다. Case 1 은 현재 계산에 사용된 격자이며, 원주 방향으로 144 개를 사용하였고, 12 개의 각 분할 영역의 r-z 평면에서 격자들을 지정하여 전체 r-z 평면에서는 총 181×17 개의 격자들을 사용하였다. Table 1 에서 보여지는 각각의 격자 시스템에서 $\overline{C_D}$, St, $(\overline{C_L^2})^{1/2}$ 의 값들은 0.5%, 0.1%, 1.6%의 오차 범위 이내에 존재한다. 또한, 원형 판이 존재하는 실린더 유동에 대한 연구 결과가 없지만, 본 수치 해석 방법 및 결과의 타당성은 Lee⁽⁶⁾에 의해 검토된 바 있다. 그는 레이놀

스 수가 300 일 때, 원형 핀이 존재하지 않고 축 방향 길이가 2D 인 실린더를 지나는 유동에 대한 계산을 수행한 결과 스트로울 수 및 평균 항력 계수가 0.21 및 1.35 의 값을 얻었다. Williamson⁽²⁾과 Mittal 및 Balachandar⁽⁶⁾는 그의 연구와 동일한 형상 및 레이놀즈 수에서 스트로울 수 및 평균 항력 계수가 0.20~0.21 및 1.22~1.3 의 값을 얻었다. 세팅 주파수의 경우 선행 연구자들과 아주 잘 일치하는 결과를 보인다. 그러나 평균항력계수는 약간 높게 예측되었는데 그 이유는 실험할 때 채택되었던 실린더의 높은 Aspect ratio 보다 작은 계산 영역에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 2 는 레이놀즈 수가 100 에서 500 까지 변화할 때 스트로울 수의 변화를 보여주고 있으며, Wiliamson⁽³⁾의 결과는 핀이 부착되지 않은 원형 실린더를 지나는 유동에 대한 결과값들이다. 일반적으로 원형 실린더를 지나는 유동의 경우, 레이놀즈 수 180~190 근방에서의 스트로울 수는 Mode A 의 3 차원 와 유출로 인하여 감소한다. 그리고 레이놀즈 수 230~260 근방에서 추가적인 Mode B 를 나타내는 또 한 번의 불연속성이 발생한다. 이러한 후류 천이 영역의 유동 변화는 실린더 유동의 아주 대표적인 특징이라 할 수 있다. 그러나 본 연구에서 수행한 핀-실린더를 지

나는 유동의 경우 유사한 레이놀즈 수의 범위에서 불연속성이 존재하지 않음을 알 수 있다. 또한, 실린더를 지나는 유동과 달리 레이놀즈 수가 증가할수록 스트로울 수의 완만한 증가를 보여 준다. 이로부터 원형 실린더를 지나는 유동은 레이놀즈 수가 100 에서 500 으로 증가할수록 2 차원 유동 구조에서 3 차원 유동 구조로, Mode A 에서 Mode B 로의 천이 과정을 거치게 되지만 핀-실린더를 지나는 유동의 경우, 핀이 유동 구조를 정형화시키고 안정화시키는 역할을 하여 유동 천이 과정을 억제시키는 효과를 내는 것을 알 수 있다.

Fig. 3 은 레이놀즈 수의 변화에 따른 시간 평균한 항력 계수($\overline{C_D}$) 값들을 보여 준다. 핀-실린더를 지나는 유동에서 항력 계수는 실린더 표면의 압력 항력 계수(C_{DPC}), 실린더 표면의 마찰 항력 계수(C_{DFC}), 핀 표면의 마찰 항력 계수($\overline{C_{DFF}}$)로 나뉘어진다. 레이놀즈 수가 100 일 때, 실린더 표면의 압력 항력 계수와 핀 표면의 마찰 항력 계수가 동일한 값을 가진다. 또한 핀 및 실린더의 마찰 항력 계수의 값이 실린더 표면의 압력 항력 계수의 값보다 크므로, 압력보다 점성에 의한 마찰력이 항력에 대한 기여도가 높음을 알 수 있다. 그리고

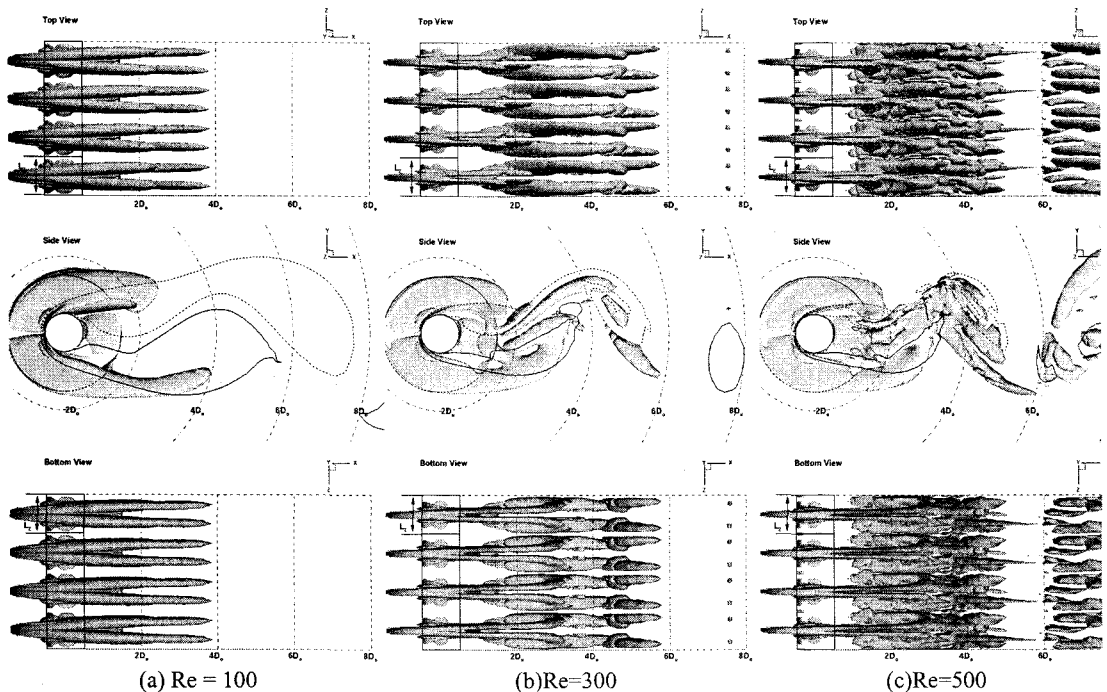
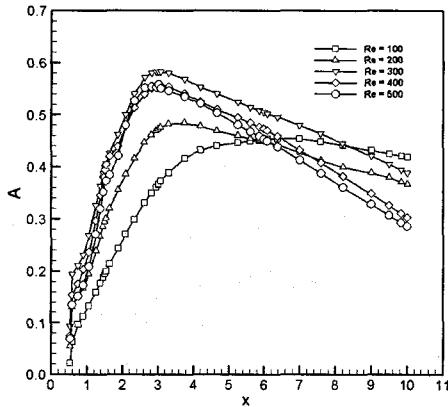
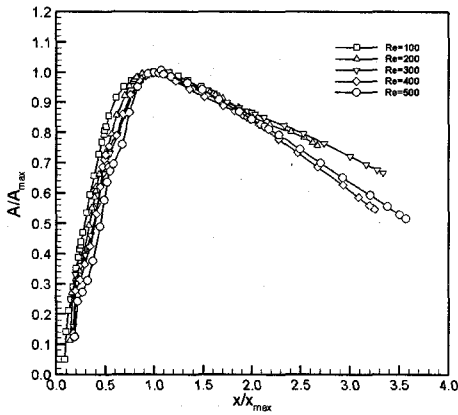


Fig. 5 The iso-surface plots of showing the vortical structures in the near wake of a finned cylinder [contour levels of ω_x are ± 0.4 , ± 1.0 , ± 1.2 for Re=100, 300, 500 and contour levels of ω_z denoted by the solid and dotted lines in the side view are ± 0.4 , ± 1.0 , ± 1.2 for Re=100, 300, 500

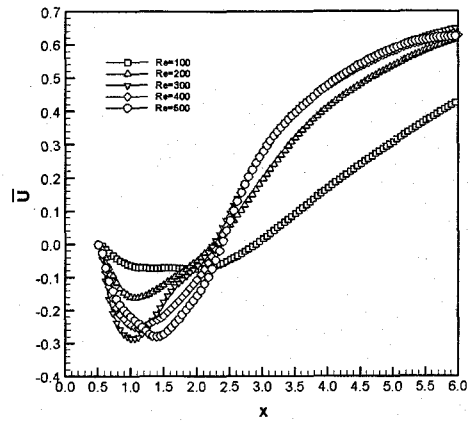


(a)

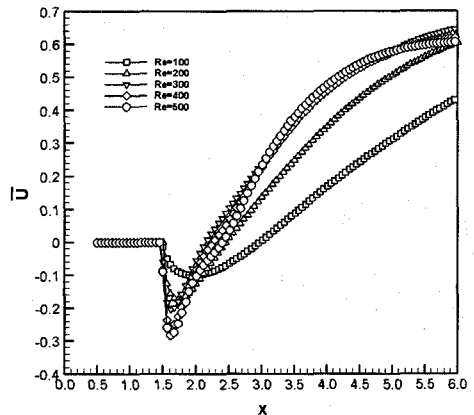


(b)

Fig. 6 Amplitude of V component versus x, along the rear axis (y=0 and z=0)



(a) z=0



(b) z=0.5

Fig. 8 Variation of time-averaged streamwise velocity along the centerline (y=0 and z=0)

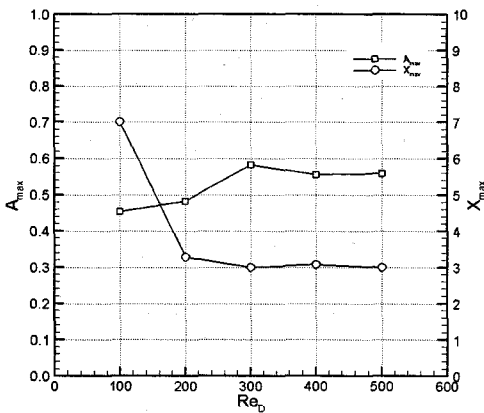


Fig. 7 Variation of A_{max} and X_{max} as functions of Reynolds number (y=0 and z=0)

실린더에 의한 마찰 항력 계수 또한 그 기울기는

작지만 감소하는 경향을 보인다. 레이놀즈 수가 200 을 지나면 항력에 대한 기여도는 마찰력보다 압력이 점점 크게 작용함을 알 수 있다.

Fig. 4 는 레이놀즈 수에 따른 성분별 양력 계수의 RMS 값에 대한 변화를 보여준다. 실린더 표면의 압력 양력 계수 ($\overline{C_{LPC}}$) 의 RMS 값이 전체 양력 계수 ($\overline{C_{LTotal}}$) 의 RMS 값에 가장 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있고, 핀 표면의 마찰 양력 계수 ($\overline{C_{LFF}}$) 및 실린더 표면에서의 마찰 양력 계수 ($\overline{C_{LFC}}$) 의 RMS 값들은 레이놀즈 수에 따라서 미소하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 그리고 여기서 흥미로운 사실은 레이놀즈 수가 100 에서 300 으로 증가할 때 양력 계수의 RMS 값은 증가하나 레이놀즈 수가 300 에서 500 으로 증가하면서 다시 감소하는 특성을 보인다는 것이다. 이는 레이놀즈 수 300 을 기점으로 핀-실린더 후류 구조의 불안

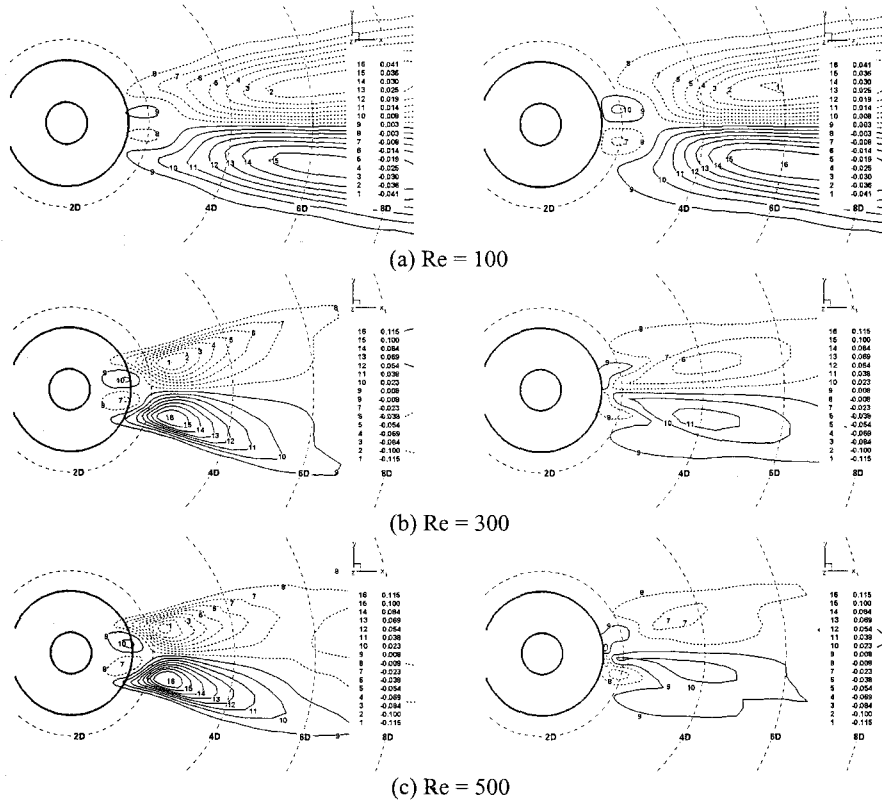


Fig. 9 Contours of Reynolds shear stress at $z=0$ plane (left) and $z=0.5$ plane (right) for $Re = 100, 300$ and 500

정성으로 인한 결과로 사료된다.

레이놀즈 수가 100 에서 300 일 때는 양력 계수의 최대 및 최소치가 시간의 변화에 따라 거의 일정한 값을 가지고 있으나, 레이놀즈 수가 400 에서 500 일 때는 양력 계수의 최대 및 최소치는 시간에 따라 낮은 변조(low modulation)를 가지는 준 주기적 특성을 가진다.

Fig. 5 는 레이놀즈 수가 100, 300, 500 이고 양력 계수 값이 최대일 때 유동 방향 및 축 방향의 와 구조들을 보여 주고 있다. 좀 더 명확하게 와 구조들을 보여 주기 위하여 축 방향으로 계산 영역의 4 배를 나타내었다. 레이놀즈 수가 증가할수록 핀-실린더 후류에서의 유동 방향 와 구조(streamwise vortical structure)들은 점점 3 차원적으로 복잡하게 형상이 변하면서 소규모 와 구조들로 나뉘어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(a)는 유동장에서 유동 방향 중심선 상에서 하류 방향($y=0, z=0$)의 x 의 위치에 따라 V 속도 성분의 기본 주파수의 진폭을 보여준다. 그리고 Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)로부터 최대 진폭이 나타나는 거리 X_{max} 값, 최대 진폭 A_{max} 값으로 정규화하여 나타내었다. 최대 진폭 값까지의 증가 부분은 본

칼만 불안정성에 관한 정형화된 특성이며 이 과정은 시험한 모든 레이놀즈 수에서 동일한 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 곡선의 감소 부분은 핀-실린더 하부에서 정형화된 특성이 소멸되고 있음을 나타낸다. 정형화된 패턴은 낮은 레이놀즈 수에서 명확하게 나타나고 레이놀즈 수가 증가할수록 감소 부분의 기울기는 증가하면서 포화하는 특징을 가지고 있다. 이로부터 근접 후류에서 기본 모드의 공간적 발달을 알 수 있다.

Fig. 7 은 유동장에서 유동 방향 중심선 상에서 하류 방향($y=0, z=0$)의 x 의 위치에 따라 V 속도 성분의 기본 주파수의 최대 진폭 위치 및 그 값을 레이놀즈 수에 따라 나타내었다. 레이놀즈 수가 증가할수록 최대 진폭의 크기는 증가하고 레이놀즈 수가 300 을 지나면서 포화되는 특성을 보인다. 또한 최대 진폭의 위치는 레이놀즈 수가 증가할수록 핀-실린더에 접근하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8 은 시간 평균한 유동장에서 유동 방향 중심선 상에서 하류 방향($y=0, z=0$)으로 U 속도 성분을 추출한 그림이다. 일반적으로 재순환 영역의 길이는 U 속도 성분이 역류하는 영역을 지나 0 인 지점까지의 거리로 판단한다. 본 계산에서 수행한

레이놀즈 수에 따라 재순환 영역의 길이는 민감하게 변하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6(a)는 $z=0$ 인 평면의 경우이며, 레이놀즈 수가 100에서 200으로 가면서 U 속도는 급격하게 감소하다가 그 이상의 레이놀즈 수에서는 미소하게 증가하는 경향을 보인다. 또한, 최대 역류 속도는 레이놀즈 수가 증가할수록 $-0.28 U_\infty$ 에 수렴하는 것으로 보이며, 그 위치는 $1.0 \leq x \leq 1.5$ 영역이며, 이는 편과 편 사이의 영역임을 알 수 있다. 그러나, $z=0.5$ 인 평면의 경우, 재순환 영역의 길이는 레이놀즈 수가 300을 기점으로 감소하다가 증가하는 경향을 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 또한 최대 역류 속도는 $z=0$ 인 평면의 경우와 마찬가지로 레이놀즈 수가 증가할수록 $-0.28 U_\infty$ 에 수렴하는 것으로 보인다. 그러나 그 위치는 편 바로 후단인 $1.6 \leq x \leq 2.0$ 영역임을 알 수 있다. U 속도의 x 위치에 따른 속도의 기울기는 레이놀즈 수가 증가할수록 기울기가 급해지고 최대 역류 속도를 기점으로 더 빨리 자유 유동 속도로 회복함을 알 수 있다. 이로부터 레이놀즈 수가 작은 경우, 점성에 의한 영향으로 편에 의한 속도 결손이 크게 작용함을 알 수 있고, 이와 반대로 레이놀즈 수가 큰 경우, 관성에 의한 영향으로 편에 의한 속도 결손이 편 후단에서 빨리 회복됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 시간 평균 유동장으로부터 레이놀즈 전단 응력($\overline{u'v'}$)을 $z=0$ 와 $z=0.5$ 의 평면에서 나타낸 것이다. $Z=0$ 인 평면에서 보면 난류 전단 응력은 난류 성분간의 상호 작용과 운동량의 이동을 의미하는 것으로 재순환 영역의 끝 지점보다 하류에서 최대값을 나타내고 하류로 갈수록 그 값이 점차 감소하면서 넓게 분포함을 알 수 있다. 그리고, 레이놀즈 수가 증가할수록 끝 지점에 가깝게 이동하는 것을 알 수 있다. 이 때 그 값들은 $y > 0$ 에서 음(-), $y < 0$ 에서 양(+의 값을 가지고, $y = \pm 0.95$ 근방에서 난류 전단 응력이 가장 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 그래서 본 연구에서는 레이놀즈 수가 증가할수록 재순환 영역의 끝 지점보다 하류에서 끝 지점 근방으로 접근하면서 난류 에너지의 생성이 가장 활발하다는 것을 알 수 있다. 또한, 편 후단에 작은 한 쌍의 전단 응력치가 존재함을 알 수 있다. 그리고 레이놀즈 수가 100 일 때, $z=0.5$ 인 평면에 보여지는 레이놀즈 전단 응력 분포와 $z=0$ 인 평면에서의 레이놀즈 전단 응력 분포와 비교해 보면 레이놀즈 전단 응력의 최고치의 위치가 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 레이놀즈 수가 100 일 때는 난류 성분간의 상호 작용 및 운동량 이동이 편에 존재와 상관 없다는

것을 알 수 있다. 이는 레이놀즈 수가 증가할수록 편에 의한 마찰로 인해서 유동 구조가 복잡해지고 난류 성분간의 상호 작용 및 운동량 이동이 더욱 더 활발하게 일어난다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

현재의 연구는 Fourier-Chebyshev 스펙트럴 해석을 통하여 원형 편이 실린더 축 방향에 주기적으로 배열된 실린더를 지나는 유체 유동을 해석하였다. 주기적 배열의 원형 편을 고려하기 위하여 스펙트럴 다영역 기법을 채택하였다. 원형 실린더를 지나는 유동과는 달리 레이놀즈 수가 100에서 500으로 변화할 때 Mode A와 Mode B와 같은 불연속성은 나타나지 않았다. 이는 실린더에 부착된 편들이 와 구조의 3차원 불안정성을 억제시키는 역할을 하기 때문이다. 그리고 현재 고려된 레이놀즈 수 영역에서 항력 계수 및 양력 계수는 실린더 표면의 압력에 의해서 지배적인 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있고 레이놀즈 수가 300을 기점으로 와 구조의 불안정성으로 인하여 양력 계수의 RMS 값은 증가하다가 감소한다. 또한 낮은 변조를 가지는 준 주기적 특성이 나타난다는 것을 알 수 있다. 평균 및 난류 유동장 해석과 주파수 분석으로부터 근접 후류에서의 유동 특성 및 불안정성을 레이놀즈 수에 따라 정량적으로 평가할 수 있다.

참고문헌

- (1) Persillon, H. and Braza, M., 1998, "Physical Analysis of the Transition to Turbulence in the Wake of a Circular Cylinder by Three-Dimensional Navier-Stokes Simulation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 365, pp. 23~88.
- (2) Williamson, C.H.K., 1996, "Vortex Dynamics in The Cylinder Wake," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 28, pp. 477~539.
- (3) Williamson, C.H.K., 1996, "Three Dimensional Wake Transition," *J. Fluid Mech.*, Vol. 328, pp. 345~407.
- (4) Karniadakis, G.E. and Triantafyllou, G.S., 1992, "Three Dimensional Dynamics and Transition to Turbulence in the Near Wake of Bluff Objects," *J. Fluid Mech.*, Vol. 238, pp. 1~30.
- (5) Mittal, R. and Balachandar, S., 1994, "Direct Numerical Simulation of Flow Past Elliptic Cylinders," *J. Comput. Phys.* 124, pp. 351~367.
- (6) Mittal, R. and Balachandar, S., 1995, "Effect of Three-Dimensionality on the Lift and Drag of Circular and Elliptic Cylinders," *Phys. Fluids*, Vol. 7, No.8, pp.

- 1841~1865.
- (7) Mittal, R. and Balachandar, S., 1995, "Generation of Streamwise Vertical Structures in Bluff Body Wakes," *Phys. Rev. Lett.* 75, pp. 1300~1302.
- (8) Lee, D.H., Ha, M.Y., Balachandar, S. and Lee, S.S., 2004, "Numerical Simulations of Flow and Heat Transfer Past a Circular Cylinder with a Periodic Array of Fins," *Phys. Fluids*, Vol. 16, No. 5, pp. 1273~1286.
- (9) Roshko, A., 1993, "Perspective on Bluff Body Aerodynamics," *J. Wind Eng. And Industrial Aero.* 49, pp. 79~100.
- (10) Canuto, C., Hussaini, M.Y., Quarteroni, A. and Zhang, T.A., 1988, *Spectral methods in Fluid Dynamics*, Springer Verlag.
- (11) Pacheco, P.S., 1997, *Parallel programming with MPI*, Morgan Kaufmann Publishers Inc.