

## 원형 핀이 부착된 실린더 주위의 유동 및 열전달에 관한 수치적 연구

윤현식\*\*, 전호환\*, 이동혁\*\*

부산대학교 첨단조선공학연구센터\*, LG 전자 DAC 연구소\*\*

### Numerical Study on the Fluid Flow and Heat Transfer Past a Cylinder with a Periodic Array of Circular Fins

Hyun Sik Yoon\*\*, Ho Hwan Chun\* and Dong Hyuk Lee\*\*

Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University\*  
LG Electronics DAC Lab\*\*

#### Abstract

Three-dimensional and time-dependent solution for the fluid flow and heat transfer past a circular cylinder with fins is obtained using accurate and efficient spectral methods. A Fourier expansion with a corresponding uniform grid is used along the circumferential direction. A spectral multi-domain method with a corresponding Chebyshev collocation is used along  $r$ - $z$  plane to handle fins attached to the surface of a circular cylinder. At the Reynolds number of 300 based on a cylinder diameter, results with fins are compared with those without fins in order to see the effects of the presence of fins on three-dimensional and unsteady fluid flow and heat transfer past a bluff body. The detail structures of fluid flow and temperature field are obtained as a function of time to investigate how the presence of fins changes heat transfer mechanism related to the vortical structure in the wake region.

※Keywords: Fin(핀), Vortex shedding(와의 분계), Circular cylinder(원형주상체), Heat transfer(열전달)

#### 1. 서론

실린더 뒤의 흔적류(wake flow) 영역에서의 와(vortex)의 형상 및 분계(shedding)에 관한 연구는

형상의 단순함 뿐만 아니라, 공학적 응용의 중요성 때문에 유체역학에서 가장 중요한 문제들 중 하나로 다루어져 왔다(Braza et al. 1986, Mittal and Balachandar 1994, Williamson 1996, 신영섭 2000, 김광수와 서정천 1998).

와의 분계는 구조물의 진동, 소음과 공진 및 후류에서 혼합 등에 큰 영향을 미친다. 따라서,와의

접수일: 2005년 11월 22일, 승인일: 2006년 2월 24일

†교신저자: lesmodel@pusan.ac.kr, 051-510-3685

분계 제어는 실용 공학적 측면에서 매우 중요하다.

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.

핀 튜브 열교환기의 연구는 크게 두 가지 관점에서 이루어지고 있다. 첫 번째는 미시적인 관점으로 여러 개의 핀 튜브들이 조합된 핀 튜브 열교환기에서 단일 핀 튜브 형상을 선정하여 이에 대한 박리 유동 및 열전달에 초점을 맞추어 연구하는 것이다. 이는 주로 3 차원 유동 구조와 관련되어 있으므로, 수치적 방법을 통한 연구가 효과적이라 할 수 있겠다. 두 번째는 거시적 관점으로 단일 핀 튜브 형상이 아닌 여러 개의 핀 튜브들이 조합된 핀 튜브 뱅크에 대한 유체 유동 및 열전달에 초점을 맞추어 연구하는 것이다. 이는 주로 핀 튜브 열교환기의 설계 자료로 사용되는 열전달 및 압력 강하 특성에 기초한 연구가 대부분이다.

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 후류 구조의 특성을 분석하였다.

## 2. 이론적 연구

### 2.1 지배방정식

본 연구에서 고려된 계산 영역과 좌표계를 Fig. 1 에서 볼 수가 있다. 본 연구에서는 부력에 의한 효과(buoyancy effect)를 무시하였으므로, 온도는 유동장에 전적으로 지배를 받는 수동적인 스칼라 값(passive scalar)이 된다. 비압축성이며 물성치는 일정하다고 가정하였다. 3 차원 실린더 주위의 비정상 유동 및 온도장을 지배하는 무차원화 된 질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

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

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

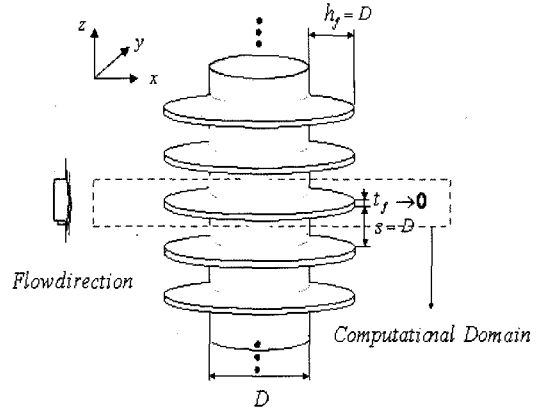


Fig. 1 A schematic of the fin-tube geometry and computational domain.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \nabla^2 T \quad (3)$$

위의 지배 방정식들을 무차원화하기 위하여 사용된 무차원 변수는 다음과 같이 정의하였다.

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{u}^*}{U_\infty}, \quad p = \frac{p^*}{\rho U_\infty^2}, \quad t = \frac{t^* U_\infty}{D}, \quad T = \frac{T^* - T_\infty}{T_s - T_\infty} \quad (4)$$

여기서  $U_\infty, T_\infty$  는 자유 유동 (free-stream) 에서의 속도 및 온도를 나타내고,  $D, T_s$  는 실린더의 직경과 표면온도를 의미하며 차원을 갖는다. 그리고  $u^*, p^*, t^*, T^*$  는 각각 속도, 압력, 시간 및 온도이며 차원을 가진 변수이다. 무차원 지배방정식 (2)~(3)에 사용된 무차원변수  $\text{Re} = U_\infty D / \nu$  와  $\text{Pr} = \nu / \alpha$  은 각각 레이놀즈 수와 프란틀 수 (Prandtl number)이며, 여기서,  $\nu$  와  $\alpha$  는 동점성 계수(kinematic viscosity) 와 열확산계수 (thermal diffusivity) 이다. 본 연구에서, 고려된  $\text{Re}$  와  $\text{Pr}$  의 값은 300 과 0.7 이다.

### 2.2 수치해석방법

실린더 축 방향에 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. 1에서의 핀은  $r=0.5\sim 1.5$ ,  $z=0.5$ 에 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.  $180 < Re < 1000$ 의 영역에서 원형 실린더를 지나가는 유동 가시화 실험을 통해서 축 방향 및 유동 방향과 구조들이 실린더 축 방향으로 주기적인 구조를 가진다는 것은 잘 알려져 있다. 특히, Williamson(1996)은 레이놀즈 수가 300일 때, 실린더 축 방향으로 와 구조의 wavelength가  $0.8\sim 1.2$ 의 범위에 존재한다는 것을 확인하였다. 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 방향과 구조를 해석할 수 있음을 유동장 해석 결과들에서 확인할 수 있다.

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 더욱 더 작게 만들었으며, 원주 방향으로 Fourier expansion을 사용하였다. 각 방향으로 사용된 격자수는  $181 \times 144 \times 31$  ( $r \times \theta \times z$ )이다.

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 영역(실린더)의 중심에서 바깥 경계까지의 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 Mittal and Balachandar(1994)와 윤현식과 전호환(2004)이 사용한 Nonreflecting 경계 조건, 즉 버퍼 영역 기법을 사용하였다. 유동장을 계산하기 위해서 2단계 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 대류 항의 선형화를 위하여 3단계 Adams-Bashforth 기법이 사용되고 확산항에 대한 이산화 를 위하여 Crank-Nicolson 기법이 사용되었다. '\*' 시간 레벨에서 ' $n+1$ ' 시간 레벨까지 진행하는 동안 압력 포와송(Poisson) 방정식에 대한 해를 구한 후, 최종적으로 ' $n+1$ ' 시간 레벨에서의 속도를 구한다. 또한 스펙트럴 다영역 방법은 각 분할 영역 내 공간에서 지수적 정확도를 제공한다. 계산 시간의 효율성을 위해서 리눅스 기반의 병렬 처리 시스템을 사용하여 병렬 계산을 수행하였다(윤현식 등 2004).

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 핀이 부착되지 않은 실린더의 항력 및 양력 계수들을 보여 주고 있다. 현재 계산에서 보텍스 shedding으로 일어나는 시간에 따른 양력 계수의 변화로부터 측정된 Strouhal 수는 0.21이다. 그리고 시간 평균 항력 계수값은 1.32이다. 현재의 기하학적 형상 및 레이놀즈 수에서 Mittal 과 Balachandar(1994)은 DNS로 Strouhal 수는 0.21 및 평균 항력 계수는 1.3을 얻었고, Williamson et al.(1996)은 Strouhal 수 및 항력 계수가 0.20 및 1.22임을 실험을 통해 얻었다. 이러한 결과들은 현재의 계산이 이전에 수행된 실험 및 수치 해석 결과와 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 그리고 평균 항력 계수 값이 실험치보다 약간 높게 예측되는 이유는 현재 실린더 축 방향의 계산 영역 길이가 실험할 때 채택되었던 aspect ratio 비보다 작기 때문이라고 사료된다.

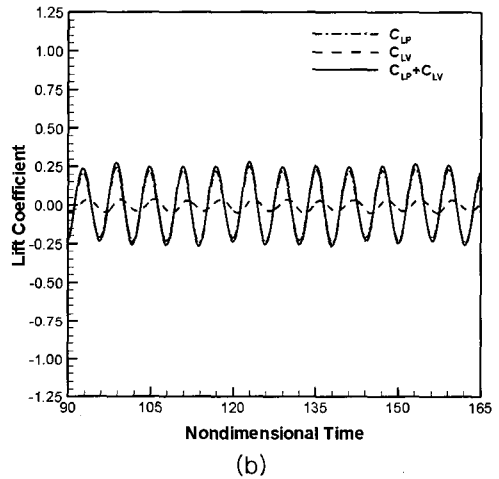
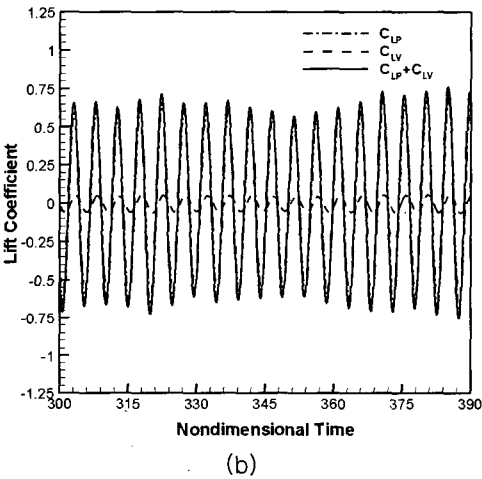
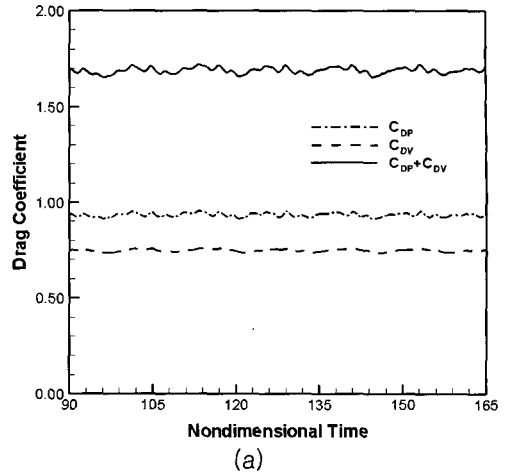
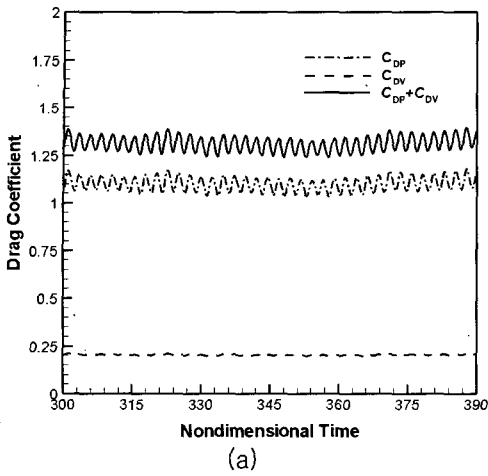


Fig. 2 Time histories of drag coefficient and lift coefficient around a smooth cylinder (a) Drag coefficient (b) Lift coefficient.

Fig. 3 Time histories of drag coefficient and lift coefficient around a finned cylinder (a) Drag coefficient (b) Lift coefficient.

Fig. 3 은 핀이 부착된 실린더의 항력 계수 및 양력 계수를 보여 주고 있다. 여기서 압력 및 점성에 의한 기여도는 실린더 표면 및 핀 표면을 모두 포함한 것이다.

현재 재료 두께를 가지는 핀의 압력에 대한 기여도는 0 이다. 핀이 부착된 실린더의 경우, Strouhal 수는 0.161 이며, 이는 핀이 부착되지 않은 실린더의 값보다 작다. 이 사실은 세딩 과정이 핀의 삽입으로 인하여 느려지고 약 20% 정도 보텍스 세딩 주기가 길어졌음을 알 수 있다.

이는 원형 실린더와 비교했을 때 약 50 정도 낮은 레이놀즈 수에서 발생하는 세딩 주기이다. 결과적으로, 핀이 부착된 실린더의 경우 더 낮은 Strouhal 수는 핀의 존재로 인한 추가적인 점성 효과로 기인한 유효 레이놀즈 수가 낮기 때문이다. 더욱 더 중요한 것은 주기적 보텍스 세딩 과정의 세기는 항력 및 양력의 진폭으로부터 알 수 있듯이, 핀의 존재로 인하여 감소하는 것을 Fig. 2 와 비교를 통해서 알 수가 있다.

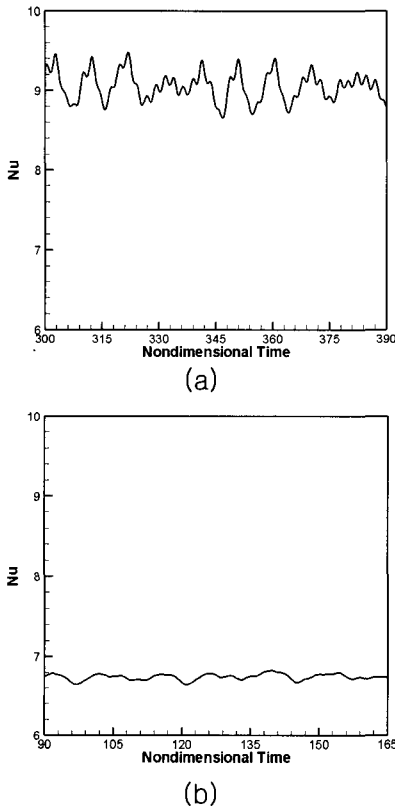


Fig. 4 Time histories of surface-averaged Nusselt number for a smooth cylinder and finned cylinder (a) Smooth cylinder (b) Finned cylinder.

Fig. 4는 핀의 유무에 따라서 면적 평균한 누셀트 수의 시간에 따른 변화를 보여준다. 여기서, 누셀트 수의 정의는 다음과 같다.

$$Nu = \int \partial T / \partial n dA / \int dA \quad (5)$$

여기서,  $A$  과  $n$  는 전열면적과 전열면적에 수직 방향을 각각 나타낸다.

핀이 부착된 실린더의 누셀트 수가 핀이 부착되지 않은 경우보다 약 25% 정도 작다. 그러나 핀이 부착된 실린더의 경우, 유동에 노출된 총 표면적이 핀이 부착되지 않은 실린더보다 약 3 배 정도 크기 때문에 평균 열전달 계수가 약 25% 정도 작아도, 총합 열전달량은 2 배 정도 증가한다.

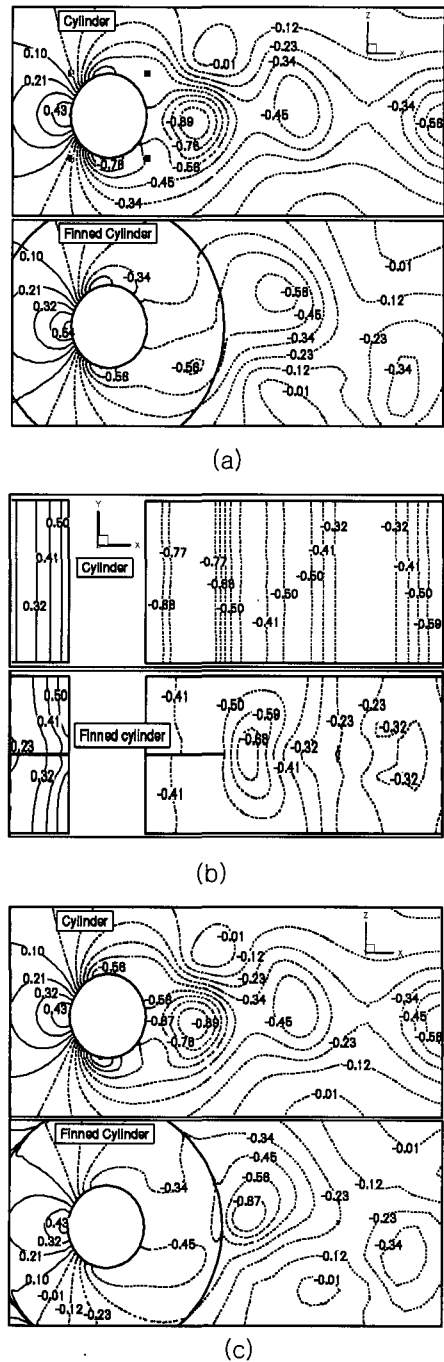


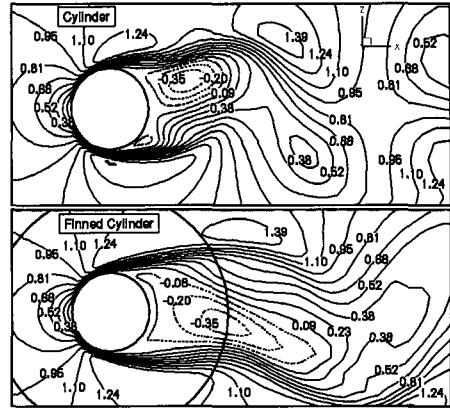
Fig. 5 Instantaneous pressure contours past a smooth cylinder and finned cylinder. (a) plane 1 (b) plane 2 (c) plane 3

Fig. 5는 핀의 유무에 따라서 3개의 다른 평면들에서의 순간 압력장들을 비교하였다. 핀의 유무에 따른 유동장 특성을 명확히 관찰하기 위하여 모든 프레임에서 동일한 contour level을 사용하였다. Plane 1은 실린더 축 방향으로  $z=0.5$ 인 위치에서의  $r-\theta$  평면이다. Plane 2는  $\theta=0$  및  $\pi$ 에 대응하며 실린더 축을 지나는  $r-z$  평면이다. 그리고, Plane 3은 실린더 축 방향으로  $z=1.0$ 인 위치에서의  $r-\theta$  평면이며 이는 핀 표면과 동일한 평면이다. 외부 유동은 왼쪽에서 오른쪽으로 흘러간다.

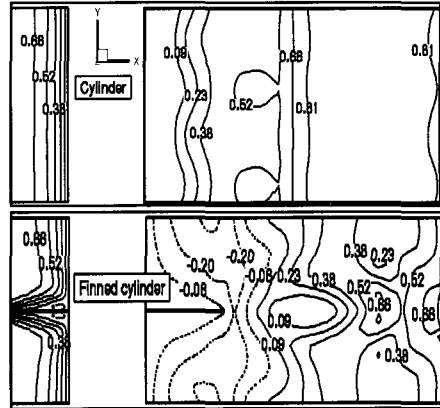
Fig. 5(a)의 Plane 1에서 알 수 있듯이, 핀의 부착 유무에 상관없이 전방 정체점 및 박리각 주위에서 압력 분포는 유사하다. 그러나 실린더 후류 영역에서의 압력 분포는 명확한 차이를 보인다. 이러한 차이의 주된 원인은 핀의 존재로 인한 운동량 손실의 증가 때문이다. 즉 핀의 표면적 증가는 마찰로 인하여 정성 항력을 증가시키며 동시에 운동량 손실을 증가시킨다.

핀이 부착되지 않은 실린더의 경우 실린더 중심에서 약 0.74 정도 떨어진 후방에서 강한 압력 최소치가 존재하며 실린더 축 방향으로의 압력 분포는 균일하다. 그러나 핀이 존재한 실린더 후방에서의 압력 최소치는 핀의 바로 후단에 존재하고 있음을 알 수 있다. 이는 핀의 삽입으로 인하여 기저 흡입 압력이 핀이 존재하지 않은 실린더의 경우보다 작음을 알 수 있다. 그러므로 핀이 부착된 실린더의 경우, 핀을 제외한 실린더의 항력 계수는 핀이 부착되지 않은 실린더의 경우보다 더 작음을 알 수 있다. 더 낮은 기저 흡입 압력은 핀이 부착된 실린더의 경우에서 더 낮은 유효 레이놀즈 수와 일치한다.

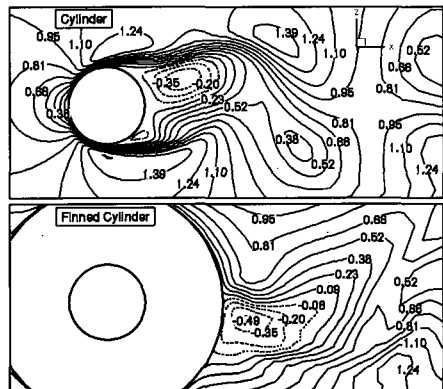
그러므로, 압력 분포를 비교해 보면 핀이 부착되지 않은 실린더의 경우, 칼만 보텍스 형성이 실린더 베이스에 근접하여 발생하지만, 핀이 부착된 실린더의 경우, 칼만 보텍스 형성 길이가 실린더 베이스에서 하류로 더욱 더 늘어나 있음을 알 수 있다. 그 결과로 핀이 부착된 실린더의 후류의 크기는 핀이 부착되지 않은 경우보다 더 큼을 알 수 있다. 이것은 보텍스 길이 및 세딩 주기를 증가시킨다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Instantaneous streamwise velocity contours past a cylinder with and without fins. (a) plane 1 (b) plane 2 (c) plane 3

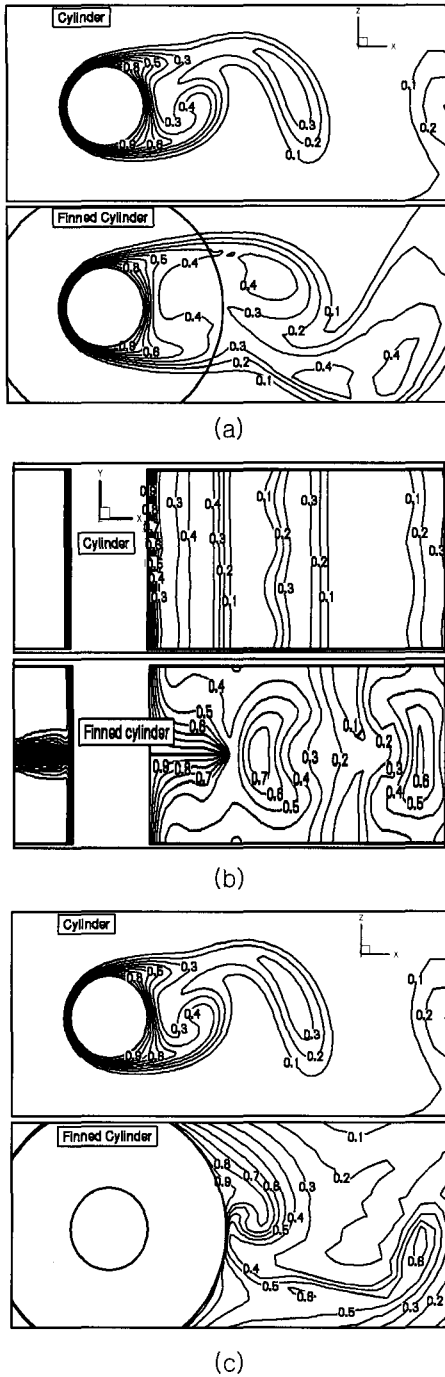


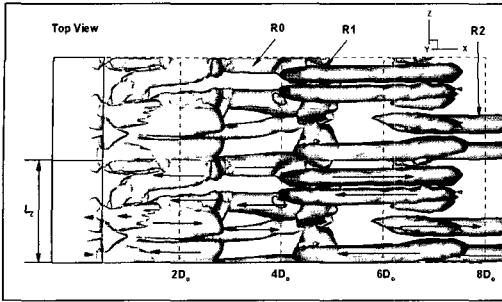
Fig. 7 Instantaneous temperature contours past a cylinder with and without fins. (a) plane 1 (b) plane 2 (c) plane 3

Fig. 6은 핀의 유무에 따라서 유동 방향 속도장을 3 가지 평면에서 보여준다. 순간 시간은 Fig. 5의 시간과 동일하다. 핀이 존재하지 않더라도, 3차원적 유동 특성으로 인한 두 파형의 주기적 신호가 실린더 후류에서 나타남을 Fig. 6(b)에서 알 수가 있다. 핀의 존재로 인한 경계층 발달이 핀-실린더 상부에 명확하게 관찰되고 있으며, 이러한 특성이 핀-실린더 후방 영역에 저속 영역의 후류 구조를 형성하게 된다. 지배적인 실린더 축 방향 wavelength는  $\lambda_z$ 의 크기를 가진다. 이것은 핀의 간격과 동일하다.

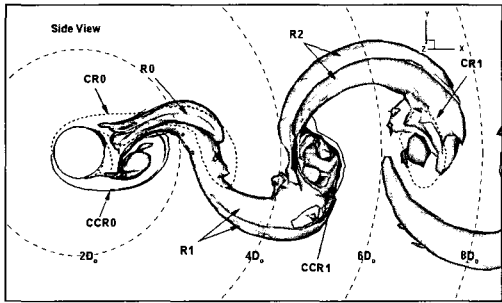
Fig. 7은 핀의 유무에 따라서 순간 온도장을 3 가지 평면에서 보여 준다. 거동 특성이 유동 방향 속도 성분과 정성적으로 비슷함을 알 수 있다. Fig 6 및 Fig. 7은 핀의 삽입으로 보텍스 형성 길이가 길어지고 후류 길이가 실린더 하류로 더욱 더 늘어남을 알 수 있다.

Fig. 8과 9는 핀의 부착 유무에 따른 와 구조의 isosurface를 보여 준다. 와 구조에 대한 더 나은 해석을 돕기 위하여, Top view 및 Bottom view에서는 실린더 축 방향의 주기 조건을 이용하여 계산 영역의 두 배에 해당하는 와 구조를 나타내었다.

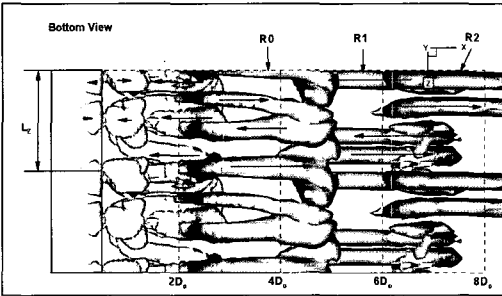
먼저, Fig. 8에 나타난 핀이 부착되지 않은 실린더의 유동 구조를 살펴 본다. Fig. 8(b)의 Side view에서, 실린더 표면 근처의 전단층에 반 시계 방향으로 회전하며 Rollup하는 과정에 있는 로울러(CCR0)가 존재하고 상부 전단층에는 시계 방향으로 회전하는 로울러(CR0)가 존재하고 있으며 이는 전단층으로부터 박리하고 있는 과정을 보여 준다. 또한 박리되어 반 시계방향으로 회전하는 로울러(CCR1)는 실린더의 하류에 존재하고 있으며, 여러 개의 유동방향 Rib 모양의 와(R0)구조들에 의하여 CR0와 연결되어 있다. 이 Rib 모양의 와 구조들은 Fig. 8(a)의 Top view에서 명확하게 관찰되고 있으며, 여기에 나타난 화살표들은 회전 방향을 나타내고 있다. 또한 이 구조들보다 더 하류에는 앞서 형성된 Rib 모양의 와(R1)구조들이 시계 방향 로울러(CR1)과 CCR1을 연결하고 있음을 알 수 있다.



(a)



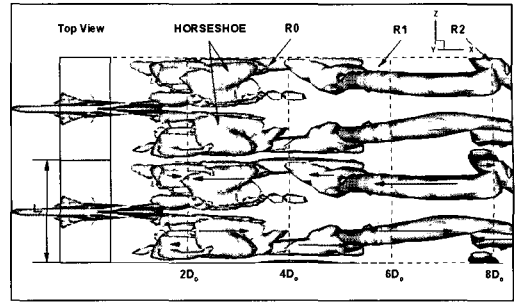
(b)



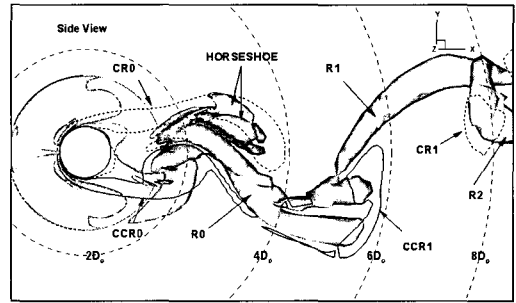
(c)

Fig. 8 The isosurface plots of showing the vortical structures in the near wake for smooth cylinder. (a) Top view, (b) Side view and (c) Bottom view.

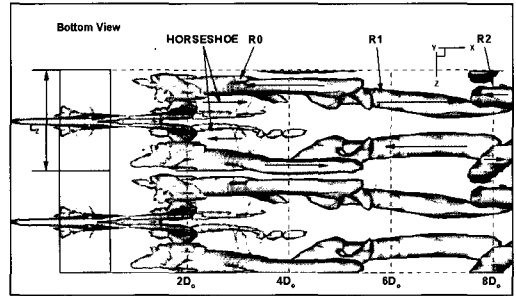
Fig. 9는 핀이 부착된 실린더의 유동 구조를 나타낸 것이며, 핀이 부착되지 않은 실린더의 유동 구조와 비교하였을 때 수정된 형태의 유동 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 9(b)의 Side view에서 보면, 유동 방향 Rib 모양의 와 구조들에 의해서 시계 방향 및 시계 반대 방향으로 회전하는 실린더 축 방향 와들이 연결되어 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 The isosurface plots of showing the vortical structures in the near wake for finned cylinder. (a) Top view, (b) Side view and (c) Bottom view.

Top view에서는 핀이 부착되지 않은 실린더 후류에서 관찰된 두 쌍의 유동 방향 와 구조들이 사라진 것을 알 수 있으며 말발굽 모양을 한 보텍스 루프들이 반시계 방향으로 회전하는 한 쌍의 유동 방향 와구조로 나타나 있다. 이러한 와 유동 구조들로부터 후류의 3 차원적 특성이 설명될 수 있다.



4. 결론

Fourier-Chebyshev 스펙트럴 방법을 이용하여 원형 실린더 및 핀이 부착된 실린더를 지나는 3차원 비정상 유체 유동 및 온도장을 구하였다. 실린더 축 방향에 주기적으로 배열된 원형 핀을 고려하기 위하여 다 영역 기법을 적용하였다. 핀이 부착된 실린더의 경우, Strouhal 수, 평균 항력 계수 및 Nusselt 수를 구한 결과 원형 실린더의 값들보다 작은 결과를 얻었다. 순간 유동장의 해석 결과, 핀이 존재한 실린더 후방에서의 압력 최소치가 핀의 바로 후단에 존재하고 있음을 알 수 있다. 이는 핀의 삽입으로 인하여 기저 흡입 압력이 핀이 존재하지 않은 실린더의 경우보다 작음에 기인한다. 그러므로, 핀이 부착된 실린더 유동에서 핀을 제외한 실린더의 항력 계수는 핀이 부착되지 않은 실린더의 경우보다 더 작다. 더 낮은 기저 흡입 압력은 핀이 부착된 실린더의 경우에서 더 낮은 유효 레이놀즈 수와 일치한다. 그리고, 압력 분포를 비교해 보면 핀이 부착되지 않은 실린더의 경우, 칼만 보텍스 형성이 실린더 베이스에 근접하여 발생하지만, 핀이 부착된 실린더의 경우, 칼만 보텍스 형성 길이가 실린더 베이스에서 하류로 더욱 더 늘어나 있음을 알 수 있다. 그 결과로 핀이 부착된 실린더의 후류의 크기는 핀이 부착되지 않은 경우보다 더 큼을 알 수 있다. 이것은 보텍스 길이 및 세딩 주기를 증가시킨다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- 김광수, 서정천, 1998, "와도를 기조로 한 초기 순간 출발하는 실린더 주위의 점성유동해석," 대한조선학회 논문집, 제 35 권, 제 4 호, pp. 1-10.

- 신영섭, 2000, "스펙트럴법을 이용한 원형주상체 주위 층난류해석," 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 4 호, pp. 31-39.
- 윤현식, 구본국, Osama A. El-Samni, 박종천, 전호환, 2004, "마찰저항감소를 위한 난류유동의 DNS/LES 해석기술의 개발," 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 1 호, pp. 47-54.
- 윤현식, 전호환, 2004, "자기장을 사용한 원형주상체 주위의 유동제어 및 저항감소," 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 2 호, pp. 70-78.
- Braza, M., Chassaing, P. and Minh, H.H., 1986, "Numerical Study and Physical Aanalysis of the Pressure and Velocity Fields in the near Wake of a Circular Cylinder," J. of Fluid Mechanics, Vol. 165, pp. 79-130.
- Mittal, R. and Balachandar, S., 1994, "Direct Numerical Simulation of Flow Past Elliptic Cylinders," J. of Comp. Physics, Vol. 124, pp. 351-367.
- Williamson, C.H.K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," Annu. Rev. Fluid. Mech., Vol. 28, pp. 477-539.



< 윤 현 식 > < 전 호 환 > < 이 동 혁 >