

## 자기장을 사용한 원형주상체 주위의 유동 제어 및 저항감소

윤현식<sup>†\*</sup>, 전호환<sup>\*</sup>

부산대학교 첨단조선공학연구센터<sup>\*</sup>

### Flow Control and Drag Reduction of a Circular Cylinder by an External Magnetic Field

Hyun Sik Yoon<sup>†\*</sup> and Ho Hwan Chun<sup>\*</sup>

Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University<sup>\*</sup>

#### Abstract

The present study numerically investigates two-dimensional laminar flow past a circular cylinder in an aligned magnetic field using the spectral method. Numerical simulations are performed for flow fields with  $Re=100$  and  $200$  in the range of  $0 \leq N \leq 10$ , where  $N$  is the Stuart number that is the ratio of electromagnetic force to inertial force. The present study reports the detailed information of flow quantities on the cylinder surface at different Stuart numbers. It is shown that the vortex shedding can be controlled by the magnetic force representing the Stuart number. As  $N$  increases, the vortex shedding becomes weaker, resulting in drag reduction whose magnitude is the largest at a critical value. In addition, as the magnetic force increases, the lift amplitude decreases, reaching zero at the critical number.

※Keywords : Drag reduction(저항감소), Magnetic field(자기장), Flow control(유동 제어), Spectral method(스펙트럴 방법), Circular cylinder(원형주상체)

#### 1. 서론

선박의 저항을 감소시키는 것은 조선산업에 있어서 여러 가지 큰 변화와 함께 조선산업의 큰 발전을 가져올 수 있다. 즉 선속의 향상, 연료절감효

과 및 엔진 마력의 감소 등 경제적인 선박을 건조할 수 있다는 것이다. VLCC의 경우 총 저항의 85-90%가 마찰저항이고, 속도가 비교적 빠른 컨테이너선의 경우 75-80%가 마찰저항이므로 이를 줄이기 위한 연구가 점점 증가되고 있는 추세이다. Microbubble(김덕수 등 2003), Polymer(김형태 등 2003), Air cavity(장진호/김효철 1999), Riblets(Choi 1989), EMTC(Lee/Choi 2001), Compliant wall(Choi 1997), Blowing or Suction, (Park/Choi

접수일: 2003년 12월 27일, 승인일: 2004년 1월 30일

†주저자, E-mail: lesmodel@pusan.ac.kr,

Tel: 051-510-3673

1999)).

본 논문에서는, 저항 감소를 위한 연구의 일환으로써 외부 자기장을 추가하여 실린더 주위의 유동 제어 및 저항 감소에 대한 연구를 수행하였다. 실린더 주위의 유동과 자기장과의 상호 관계에 대한 메커니즘을 이해함으로써 차후 공학적 응용에 아이디어를 제공하고자 한다.

실린더 후류(wake flow) 영역에서의 와(vortex)의 형상 및 shedding에 관한 연구는 형상의 단순함 뿐만 아니라, 공학적 응용의 중요성 때문에 유체역학에서 가장 중요한 문제들 중 하나로 다루어져 왔다 (Braza et al. 1986, Mittal/ Balalchandar 1994, Williamson 1996, 신영섭 2000, 김광수/서정천 1998).

vortex shedding은 구조물의 진동, 소음과 공진 및 후류에서 혼합 등에 큰 영향을 미친다. 따라서, vortex shedding 제어는 실용 공학적 측면에서 매우 중요하다. 이로인해, 다양한 제어방법들을 사용한 연구들이 이루어져 왔다. 예로써, endplate 또는 splitter plate (Kwon/Choi 1996), rotation or oscillating of the cylinder (Beak/Sung 1998, Kang et al., 1999, 김광수 등 2003) 등외에 speaker, sensor와 blowing/suction slots을 이용하는 제어방법들이 있다.

최근 들어 실린더 주위의 유동에 자기장을 인가하여 그 영향을 파악하는 연구들이 진행되고 있다. Mutschke et al. (1997, 1998, 2001)은 저 레이놀즈 수 영역( $50 < Re < 300$ )에서 자기장의 인가에 따른 원형 실린더 후류에서 발생하는 불안정성 (instability)의 변화를 연구하기 위하여, 2 차원 및 3 차원 비정상상태 유동에 대하여 수치해석기법을 이용한 안정성 해석(stability analysis)를 하였다. 인가된 자기장의 세기에 따라 2 차원 유동을 안정화 시킬 수 있으며, vortex shedding 를 억제 또는 제거할 수 있다는 것을 보였다. 그리고  $Re > 188$  이상에서 spanwise 방향으로의 3 차원 효과가 나타나는 2 차 불안정성 영역에서는 3 차원 효과로 인한 안정도 구간이 2 차원 유동과 3 차원 유동구간에서 서로 다를 것을 알아내었다.

위에서 언급한 자기장이 인가된 실린더 주위 유동에 관한 선행연구들은 주로 유동구조의 안정화

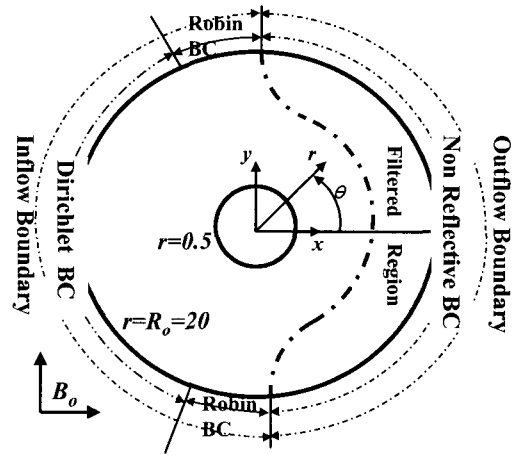


Fig. 1 Flow geometry and coordinate system along with boundary conditions.

해석을 하였다. 따라서, 자기장의 영향에 의한 실린더 표면에서의 자세한 정량적인 값들에 대한 정보는 미비하다.

따라서 본 연구에서는 유동의 정량적인 값들로서 항력 (Drag) 과 양력 (Lift) 계수들, Strouhal 수 ( $St$ ), 압력계수 ( $C_p$ )와 벽 와도 (wall vorticity) 등과 자기장의 세기와의 관계를 자세히 설명한다. 본 연구에서 고려한 레이놀즈 수 ( $Re$ )는 100 과 200 이지만, 주로 이차원 유동을 유지하는  $Re=100$  에서의 결과들을 다루었다.

## 2. 지배방정식

본 연구에서 고려된 계산 영역, 좌표계와 경계조건을 Fig. 1에서 볼 수가 있다. 경계조건들에 관해서는 3.3절에 자세히 설명되어진다.

2차원 실린더 주위의 비정상 유동을 지배하는 무차원화 된 질량 및 운동량 보존 방정식은 다음과 같다

질량 보존 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (1)$$

$r$ - 운동량 보존 방정식:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{\partial u_r^2}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(u_r u_\theta)}{\partial \theta} + \frac{u_r^2 - u_\theta^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\text{Re}} \left[ \nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right] + f_r \quad (2)$$

$\theta$  - 운동량 보존 방정식:

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + \frac{\partial(u_r u_\theta)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta^2}{\partial \theta} + \frac{2u_r u_\theta}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{\text{Re}} \left[ \nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] + f_\theta \quad (3)$$

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

$$u_r = \frac{u_r^*}{U_\infty}, u_\theta = \frac{u_\theta^*}{U_\infty}, p = \frac{p^*}{\rho U_\infty^2}, t = \frac{t^* U_\infty}{D}, r = \frac{r^*}{D} \quad (4)$$

여기서  $U_\infty$  는 자유 유동 (free-stream) 에서의 속도를 나타내고,  $D$  는 실린더의 직경을 의미하며 차원을 갖는다. 그리고  $u_r^*, u_\theta^*, p^*, t^*, r^*$  는 각각 반경 및 원주 방향의 속도, 압력, 시간 및 반경방향 좌표이며 차원을 가진 변수이다.

무차원 지배방정식 (1)~(3)에 사용된 무차원 변수  $\text{Re} = U_\infty D / \nu$  은 레이놀즈 수이며, 여기서  $\nu$  는 동점성계수(kinematic viscosity)이다. 작동 유체는 비압축성이며 물성치는 일정하다고 가정하였다.

자기장은 유동방향에 평행한  $x$ -방향으로 일정하게 작용하며, 유체에 미치는 로렌츠(Lorentz) 힘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_m = -N v \bar{e}_y \quad (5)$$

여기서,  $v$  는 직각 좌표계에서  $y$ -방향의 속도이다. 위의 식을 실린더 좌표계 ( $r-\theta$ ) 로 변환하면 아래와 같이 표현되며, 식 (2)와 (3)의 체적력 (body force) 에 적용된다.

$$\begin{aligned} f_r &= N \left[ u_r (\sin \theta)^2 + u_\theta \sin \theta \cos \theta \right] \\ f_\theta &= N \left[ u_\theta (\cos \theta)^2 + u_r \sin \theta \cos \theta \right] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $N = \sigma B_0 D / (\rho U_\infty)$  (전기전도도  $\sigma$ , 외부자기장  $B_0$ ) 은 Stuart number 또는 interaction parameter으로 전자기력과 관성력의 비를 나타낸다.

### 3. 수치해석 방법

#### 3.1 공간 이산화

무차원화된 지배 방정식들로부터 해를 구하기 위해서 Spectral 기법을 사용한다. 반경( $r$ ) 방향으로서는 체비셰프 전개 (Chebyshev expansion)를 사용하였으며, 이로 인하여 격자점은 비균일 Gauss-Lobatto 점들로 이루어진다. 원주( $\theta$ ) 방향으로서는 등간격 (equi-space) 점을 이용한 Fourier급수를 사용하며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r_i &= -\cos \left[ \frac{\pi(i-1)}{N_r - 1} \right], \quad 1 \leq i \leq N_r \\ \theta_j &= \frac{j L_\theta}{N_\theta}, \quad 0 \leq j \leq N_\theta - 1, \quad L_\theta = 2\pi \end{aligned} \quad (7)$$

#### 3.2 시간 이산화

시간에 따른 해를 구하기 위해 속도장 계산을 압력 계산으로부터 분리하는 time-splitting method를 사용하였다. 첫번째 단계로, 속도는 대류-확산항을 풀어 ' $n$ ' 시간레벨에서 중간시간레벨인 '\*' 로 나아간다. 이 대류-확산단계에서는 시간항은 Euler implicit scheme, 대류항은 3차 Adams-Bashforth scheme을, 확산항에 대해서는 Crank-Nicolson scheme을 사용하였다.

압력에 관해서 압력 Poisson방정식을 풀어서, ' $n+1$ ' 시간레벨에서의 압력  $p^{n+1}$  을 얻는다. 마지막 단계로서, 아래의 각 방향에 대한 압력 보정 방정식을 사용하여 ' $n+1$ ' 시간레벨에서의 최종적인 속도( $u_r^{n+1}, u_\theta^{n+1}$ )를 구한다.

$$u_r^{n+1} = u_r^* - \Delta t \frac{\partial p^{n+1}}{\partial r} \quad (8)$$

$$u_{\theta}^{n+1} = u_{\theta}^* - \Delta t \frac{\partial p^{n+1}}{r \partial \theta} \quad (9)$$

3.3 경계조건

본 계산의 초기 및 경계조건들은 Mittal/Balachandar(1994)이 사용한 조건들과 같이 부여되었다 (Fig. 1).

초기 조건으로서는 전체 유동을 포텐셜 유동으로 지정하였다.

실린더 주위의 유동장을 정확하게 계산하고자 할 때 경험하는 어려운 문제중의 하나가 후류 영역에서 생성되는 큰 와동 교란(vortical disturbance)을 계산 영역 바깥으로 잘 전달되어 나갈 수 있도록 하는 반사하지 않는 경계조건(non-reflecting boundary condition)을 지정하는 것이다. 현재의 계산에서는 Mittal/Balachandar (1994)에 의하여 제안된 완충 영역 방법(buffer domain techniques)을 사용한다. 이 방법은 출구 경계에서의 점성항 및 압력분포로부터 발생하는 타원형 미분 방정식의 소스(source)를 제거하여 지배방정식이 포물선형 미분 방정식이 되도록 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 후류 영역의 거의 모든 영역에서 1의 값을 가지나 바깥 경계(outer boundary) 근방으로 접근함에 따라서 영의 값을 가지는 필터 함수(filter function)를 정의한다. 이 필터 함수를 사용함으로써 반경 방향의 확산 항 및 압력 Poisson 방정식의 소스 항을 영역에 따라 적절히 걸러낼 수 있다.

입구 경계(inflow boundary) 조건은 위에서 언급한 초기 조건으로 사용된 포텐셜 유동으로 지정한다. 입구 및 출구 경계가 만나는 근방에서는 경계층 변위(boundary layer displacement) 효과를 고려하기 위하여 혼합 경계 조건(Robin boundary condition)을 지정하였다.

실린더 표면은 점착 경계조건(no-slip boundary,  $u=v=0$ )을 사용하였다.

본 계산에 사용된 시간간격 (time step)은 0.002 이고, Re=100인 경우, 121( $r$ )×164( $\theta$ )와 Re=200 인 경우, 151( $r$ )×164( $\theta$ )의 격자계를 사용하였다.

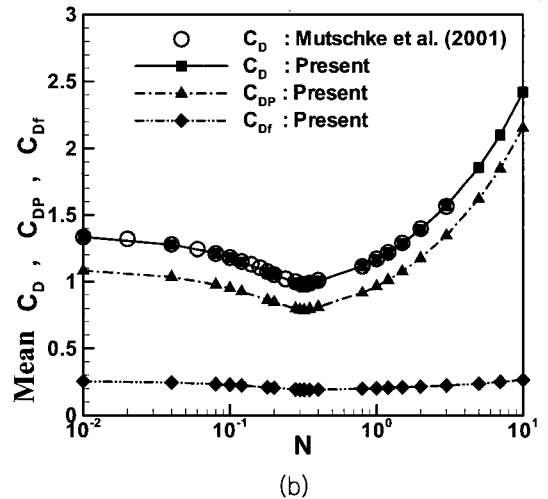
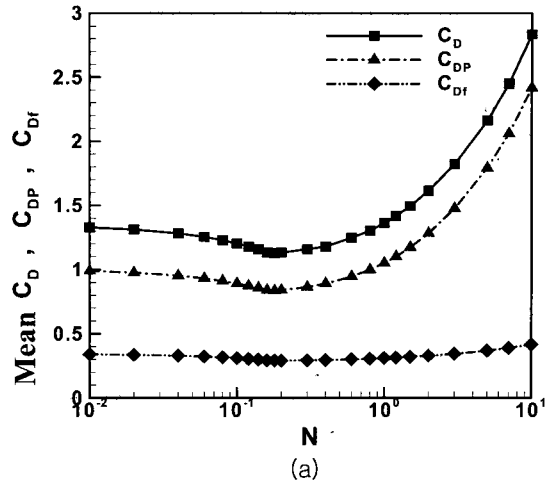


Fig. 2 Mean drag coefficients as a function of  $N$  at (a)  $Re=100$  and (b)  $Re=200$

4. 결과 및 고찰

4.1 항력 (Drag) 과 양력 (Lift) 계수들

총 항력계수(total drag coefficient,  $C_D$ )는 압력에 의한 항력계수( $C_{DP}$ ) 성분과 마찰에 의한 항력계수( $C_{Df}$ ) 성분의 합으로 구성된다. 항력계수와 마찬가지로 총 양력계수(total lift coefficient,  $C_L$ )도 식(12)에서 나타난 것과 같이 압력에 의한 성분

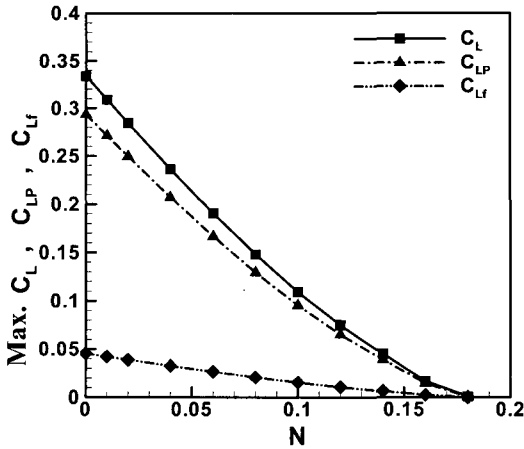


Fig. 3 Maximum lift coefficients as a function of  $N$  at  $Re=100$

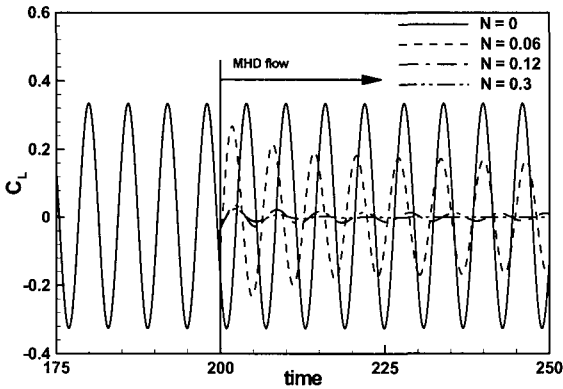


Fig. 4 Time history of lift coefficients at different  $N$  at  $Re=100$

( $C_{LP}$ )과 마찰에 의한 성분( $C_{Lf}$ )의 합으로 이루어진다.

$$C_D = C_{DP} + C_{Df}, C_L = C_{LP} + C_{Lf} \quad (10)$$

Fig. 2는 Stuart number ( $N$ )의 변화에 따른 시간과 공간에 대하여 평균한 항력계수의 변화를 보여주고 있다. Fig. 2(a)와 (b)는 각각  $Re=100$ 과  $200$ 에서의 결과를 보여주고 있다. 두 경우 모두,  $C_D$ 는  $N$ 이 증가함에 따라 감소하다가 최소값에 도달한 후  $N$ 을 계속하여 증가시키면  $C_D$ 값은 급

격하게 증가하게 된다.  $Re=100$ 인 경우  $C_D$  값이 최소가 되는  $N_{C,100}$  (임계값)은 약  $0.18$ 이고, 이때 자기장을 가하지 않은 경우에 비하여,  $C_D$ 는 약  $16.1\%$  감소한다.  $Re$ 가  $200$ 으로 증가했을 때  $C_D$ 가 최소가 되는  $N_{C,200}$ 의 값은  $0.3$ 로 증가하며, 이때  $C_D$ 는 자기장이 없을 때보다 약  $27.8\%$  감소한다. Fig. 2(b)에서 보이는 것처럼  $Re=200$ 일 때 현재의 결과는 Mutschke et al. (2001)의 계산 결과와 잘 일치하고 있다. 위의 결과들로부터 자기장을 사용하여 항력을 저감시키고자 할 때, 주어진 레이놀즈 수에 대하여 항력을 최소화시키는 임계값  $N$ 의 존재를 확인할 수 있다.

Fig. 3은  $Re=100$ 에서  $N$ 의 변화에 따른 양력계수들 ( $C_L, C_{LP}, C_{Lf}$ )의 최대 값의 변화를 보여주고 있다. 여기서 양력계수의 최대값은 준 정상상태 (quasi-steady state)에 도달한 후의 양력계수의 진폭을 나타낸다.  $N$ 이  $N_{C,100}=0.18$ 보다 크면 계수의 진폭은 '0'이 되고 실린더 주위의 유동은 정상상태 (steady state)를 유지한다. 이것은 자기장의 세기가 증가할수록 damping 작용을 하는 로렌츠 힘이 커지므로 유동의 비정상상태가 점점 소멸하기 때문이다. 지면 관계상 보여주지 않았지만,  $Re=200$ 에서도  $Re=100$ 과 같은 경향의  $N$ 에 따른 양력계수들의 변화를 보여준다.

Fig. 4는  $Re=100$ 에서 자기장이 인가되지 않은 유동장 ( $t=0\sim 200$ )으로부터,  $t=200$ 인 순간에 각각 다른 세기의 자기장을 인가했을 때,  $C_L$ 의 시간에 따른 변화를 보여준다.  $N_{C,100}$ 보다 작은  $N=0.06$ 에서는,  $C_L$ 의 반복 주기와 최대값은 줄어드나, 반복적인 비정상 유동상태를 유지하는 것을 알 수 있다. 그러나  $N_{C,100}=0.18$ 보다 큰  $N=0.3$ 에서는, 자기장이 가해진 후 대략  $10$  무차원 시간 후인  $t\sim 210$  이후에는  $C_L$ 의 변화는 없다. 따라서 실린더 주위의 유동은 상하 대칭 상태를 유지하면서 안정화됨을 예측할 수 있다.

Fig. 5는  $N$ 에 따른 Strouhal 수 ( $St$ )의 변화를 보여 주고 있다.  $N$ 에 따른 양력 계수의 변화에서 알 수 있는 것처럼, 자기장의 세기가 강해짐에 따라 유동의 주기가 길어지므로  $St$ 는 점점 감소한다. Fig. 5에서 보여지는 것처럼  $St$ 는 자기장 세기에 거의 비례하며 감소한다. 이는 자기장이 존

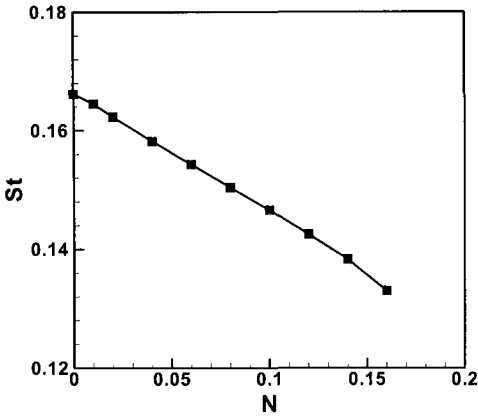


Fig. 5 Strouhal number as a function of  $N$  at  $Re=100$

재하는 경우 유동이 안정화되면서 정상상태로 변하는 것을 의미한다. 이러한 현상은 이후 설명될 순간속도 및 온도장의  $N$ 에 따른 변화에서 잘 관찰할 수 있다.

4.2 압력계수 ( $C_p$ )와 벽 와도 (wall vorticity)

Fig. 6은  $Re=100$ 에서  $N$ 에 따른 시간 평균된 실린더 표면 압력계수,  $C_p$ 의 분포를 보여준다. 먼저 자기장이 존재하지 않을 때, Park et al. (1998)의 수치해석 결과와 현재의 결과는 매우 잘 일치한다. 전방 정체점 ( $\theta=180^\circ$ )에서 압력계수는 모든 경우 약 1로서 자기장의 세기에 거의 영향을 받지 않는다. 이것은 자유유동이 가지는 운동량이 전방 정체점에서 압력으로 거의 모두 변환되었다는 것을 나타낸다. 즉, 강한 자기장이 가해지더라도 실린더 전방에서의 유동에는 거의 변화가 없음을 의미하는 것이다. 그러나 전방 정체점의 주위에서는 자기장이 강해짐에 따라 지속적으로 압력계수는 증가한다. 이것은 자기장이 인가되면 유동에 수직 방향( $y$ ) 속도( $v$ )를 감소시키는 힘이 작용하게 되므로, 실린더 표면을 따라 움직이는 유체는 저항을 받게 되고 이로 인해 압력이 증가하게 된다고 판단된다.

Fig. 6에서 보이는 것처럼 자기장의 세기가 점점 증가하여  $N \approx 0.2$ 까지는 압력계수의 최소값은 자기장이 가해지지 않은 경우보다 커진다. 이것은

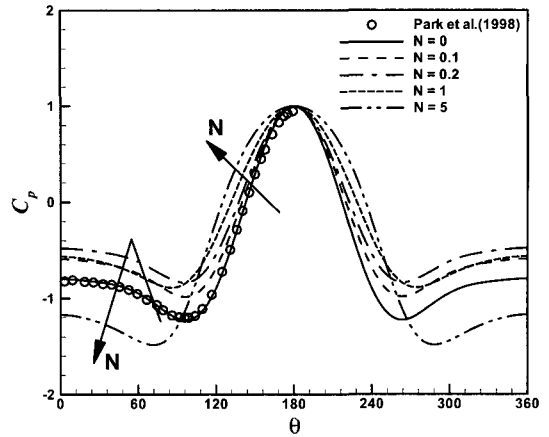


Fig. 6 Time averaged pressure coefficient as a function of  $\theta$  for different  $N$  at  $Re=100$

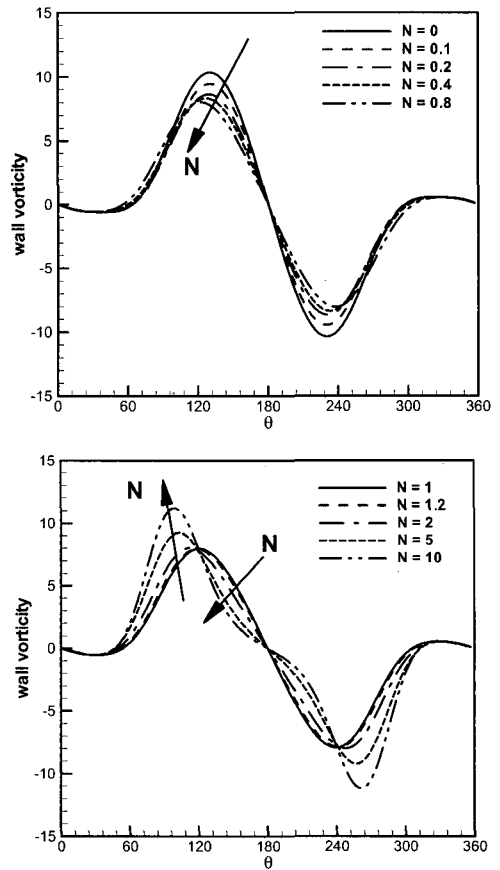


Fig. 7 Time averaged wall vorticity as a function of  $\theta$  for different  $N$  at  $Re=100$

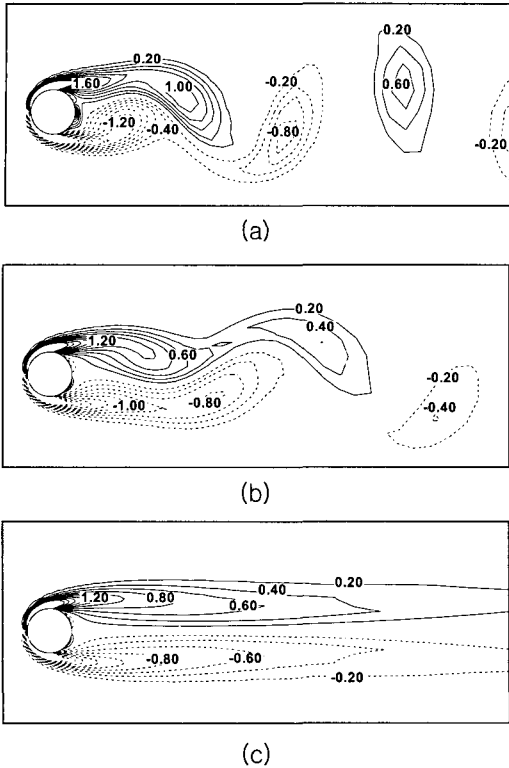


Fig. 8 Instantaneous vorticity at (a)  $N=0$ , (b)  $N=0.1$  and (c)  $N=0.2$ .

전방 정체점과 후방 정체점 ( $\theta = 0^\circ$ )에서의 압력차가 작다는 것을 의미한다. 자기장의 세기가  $N \approx 0.2$  보다 더 증가하면 압력계수의 최소값은 점점 감소하여  $N \approx 5$ 에서는 자기장이 가해지지 않은 경우보다 작아진다. 즉, 강한 자기장 ( $N > 5$ )이 인가된 경우는 최소 압력계수가 오히려 작아지며, 전방과 후방 정체점 사이의 압력차가 커짐을 관찰 할 수 있다. 이와 같이 압력 분포는 자기장의 세기에 비선형적인 경향을 갖는다. 이것은 Fig. 2의 항력계수의 변화와 밀접한 관계를 갖게 된다.

Fig. 7은  $Re=100$ 에서 자기장 세기의 변화에 따른 시간평균된 벽 와도의 분포를 원주방향 ( $\theta$ )의 함수로써 나타내었다. 자기장이 없는 경우, 전방 정체점(stagnation point)에서 약  $\pm 60^\circ$  떨어진 지점에서 와도는 최대값을 가진다. 그러나 자기장의 세기가 강해지면 최대 와도가 발생하는 지점은 점

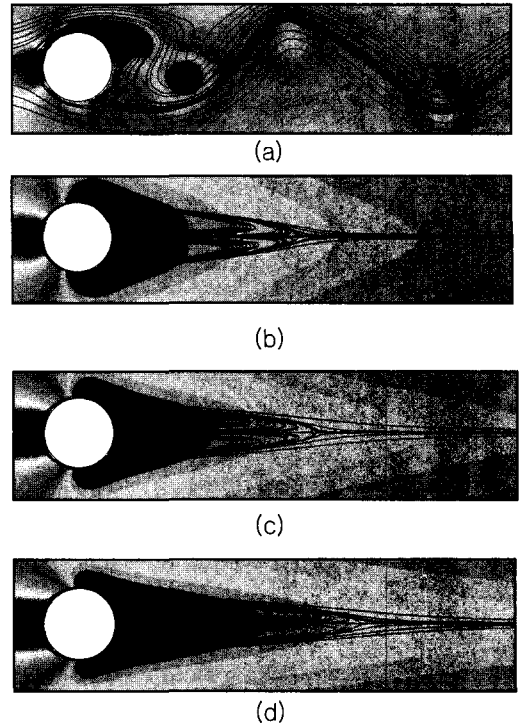


Fig. 9 Streamline and pressure contours for different  $N$  at  $Re=200$ : (a)  $N=0$ , (b)  $N=2$ , (c)  $N=5$ , (d)  $N=10$

점 후류 방향으로 이동하게 되며, 전방 정체점 근처에서의 와도는 오히려 감소하게 된다. 이것은 주 유동으로부터 정체점 근처에 도달한 유체는 실린더 벽을 따라 움직이게 되고, 이 때 정체점 근처에서는  $v$ 가 상대적으로 크므로 자기장의 영향에 의해 와도가 작아진다. 그리고 자기장이 강해질수록 유속이 가장 강한 전방 정체점으로부터  $\pm 90^\circ$  지점에서  $v$ 는 감소하게 되고 주 유동 속도인  $u$ 가 증가하게 되어 와도가 커지게 된다.

### 4.3 순간 유동장

자기장의 영향에 의한 vortex shedding의 억제와 같은 순간 유동장의 구조의 변화를 관찰하였다. Fig. 8은  $Re=100$ 에서  $N$ 에 따른 순간 와도 (instantaneous vorticity,  $\omega_z$ )의 분포를 보여주고

있다. 자기장이 가해지지 않은 경우와  $N_{C,100}$  보다 작은  $N=0.1$ 이 가해진 경우에는 후류에서 vortex street가 형성되는 비정상유동 패턴을 Fig. 8(a)와 (b)에서 각각 보여주고 있다.  $N_{C,100}$  이하에서는,  $N$ 이 증가할수록 실린더 후류에서 와의 강도가 작아지면서 와가 늘어나지만 (elongation), 여전히 vortex street을 형성하면서 비정상상태를 유지함을 Fig. 8(b)에서 볼 수가 있다. 이에 반해, Fig. 8(c)의  $N_{C,100}$  보다 큰  $N=0.2$ 에서는 유동이 정상상태가 됨으로써 더 이상 vortex street을 볼 수가 없다.

Fig. 9는  $Re=200$ 에서 자기장의 세기( $N=0\sim 10$ )에 따른 순간 압력분포와 유선(streamline)을 보여준다. 위에서 언급한 것처럼,  $N_{C,100}$  보다 큰 자기장이 인가 되었을 때 유동은 상하 대칭(symmetry)을 이루며 정상상태가 되는 것을 Fig. 9(b), (c)와 (d)에서 확인 할 수 있다.  $N$ 이 증가함에 따라 와도의 형상은 전체적으로 실린더의 후류 방향으로 길게 늘어나며  $y$  방향으로의 폭은 좁아진다.

### 5. 결론

본 연구에서는 매우 정확한 수치해석 기법인 스펙트럴 방법을 사용하여, 외부 자기장을 부가하여 실린더 주위의 유동제어 및 저항 감소에 대한 연구를 수행하였다. 수치해석은 전자기력과 관성력의 비를 나타내는 Stuart number( $N$ )는  $0 \leq N \leq 10$  범위에서, 레이놀즈 수 100, 200에 관해서 수행되어졌다.

유동방향에 평행한  $x$ -방향으로 일정하게 인가된 자기장에 의해, 유체에 미치는 로렌츠(Lorentz) 힘은 vortex shedding에 의한 유동에 기인한 진동(flow-induced vibration)을 상쇄(damping)시키는 역할을 하였다. 따라서, 자기장의 세기가 증가할수록 유동은 정상상태에 빨리 다다른 것을 알 수 있었다.

본 연구의 결과들로부터 자기장을 사용하여 항력을 저감시키고자 할 때, 주어진 레이놀즈 수에 대하여 항력을 최소화시키는 임계값  $N$ 의 존재를

확인할 수 있다. 즉,  $Re=100$ 인 경우  $C_D$  값이 최소가 되는  $N_{C,100}$  (임계값)은 약 0.18 이고, 이때 자기장을 가하지 않은 경우에 비하여,  $C_D$ 는 약 16.1%감소하였다.  $Re$ 가 200으로 증가했을 때  $C_D$ 가 최소가 되는  $N_{C,200}$ 의 값은 0.3 이고, 이때  $C_D$ 는 자기장이 없을 때보다 약 27.8% 감소하였다. 본 논문에서 고려된 레이놀즈 수에서의 임계값과 Mutschke et al. (2001)의 결과값과 잘 일치하였다.

본 연구에서의, 비록 이차원 유동조건일지라도, 실린더 주위의 유동과 자기장과의 상호 관계에 대한 자세한 결과들은 향후, 자기장을 사용하여 선체 표면 마찰저항을 감소시키고자 할 때 기초 아이디어 제공에 기여할 것으로 판단된다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

### 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.
- 김광수, 이승재, 서정천, 2003, “진동하는 원형 주상체 주위의 와류 수치 모사,” 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 2 호, pp. 21-27.
- 김덕수, 김형태, 김우전, 2003, “미소기포 주입에 의한 마찰저항 감소에 대한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 3 호, pp. 1-8.
- 김형태, 김덕수, 김우전, 2003, “폴리머 수용액 주입에 의한 난류마찰저항 감소에 대한 실험 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 3 호, pp. 9-15.
- 신영섭, 2000, “스펙트럴법을 이용한 원형주상체주위 층난류 유동 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 4 호, pp. 31-39.
- 장진호, 김효철, 1999, “선저에 부착된 공기공동에 의한 선박의 저항감소에 관한 연구,” 대



- 한조선학회 논문집, 제 36 권, 제 2 호, pp. 1-8.
- Baek, S. J. and Sung, H. J., 1998, " Numerical simulation of the flow behind a rotary oscillating circular cylinder," *Phys. Fluids*, Vol. 10, pp. 869-876.
  - Braza, M., Chassaing, P. and Minh, H. H., 1986, " Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 165, pp. 79-130.
  - Choi, K. S., 1989, " Near-wall structure of turbulent boundary layer with riblets," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 208, pp. 417-458.
  - Choi, K. S., Yang, X., Clayton, B. R., Glover, E. J., Atlar, M., Semenov, B. N. and Kulik, V. M., 1997, " Turbulant drag reduction using compliant surfaces," *Proc. R. Soc. Lond. A*, 453, pp. 2229-2240.
  - Kang, S. M., Choi, H. C. and Lee, S. S., 1999, " Laminar flow past a rotating circular cylinder," *Phys. Fluids*, Vol. 11, pp. 3312-3321.
  - Kwon, K. Y. and Choi, H. C., 1996, " Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates," *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 479-486.
  - Lee, D. H. and Choi, H. C., 2001, " Magneto-hydro-dynamic turbulent flow in a channel at low magnetic Reynolds number," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 439, pp. 369-394.
  - Mittal, R. and Balachandar, S., 1994, " Direct numerical simulation of flow past elliptic cylinders," *J. of Comp. Physics*, Vol. 124, pp. 351-367.
  - Mutschke, G., Gerbeth, G., Shatrov, V. and Tomboulides, A., 1997, " Two- and three dimensional instabilities of the cylinder wake in an external magnetic field," *Phys. Fluids*, Vol. 9, pp. 3114-3116.
  - Mutschke, G., Gerbeth, G. and Shatrov, V., 1998, " Cylinder wake control by magnetic field in liquid metal flows," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 16, pp. 92-99.
  - Mutschke, G., Gerbeth, G., Shatrov, V. and Tomboulides, A., 2001, " The scenario of three dimensional instabilities of the cylinder wake in an external magnetic field : A linear stability analysis," *Phys. Fluids*, Vol. 13, pp. 723-734 .
  - Park, J., Kwon, K. and Choi, H., 1998, " Numerical solutions of flow past a circular cylinder at Reynolds number up to 160," *KSME Int. J.*, Vol. 12, pp. 1200-1205.
  - Park, J. and Choi, H., 1999, " Effects of uniform blowing or suction from a spanwise slot on a turbulent boundary layer," *Phys. Fluids*, Vol. 11, pp. 3095-3105.
  - Williamson, C. H. K., 1996, " Vortex dynamics in the cylinder wake," *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, Vol. 28, pp. 477-539.



&lt; 윤 현 식 &gt;



&lt; 전 호 환 &gt;