

가상경계법을 사용한 횡단 진동하는 실린더 주위의 유동 해석

김정후*, 윤현식†**, H.A.Tuan*, 전호환*

부산대학교 조선해양공학과*
부산대학교 첨단조선공학연구센터**

Immersed Boundary Method for Flow Induced by Transverse Oscillation of a Circular Cylinder in a Free-Stream

Jeong Hu Kim*, Hyun Sik Yoon†**, H.A.Tuan* and Ho Hwan Chun*

Department of Naval Architecture and , Ocean Engineering, Pusan National University*
Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University**

Abstract

Numerical calculations are carried out for flow past a circular cylinder forced oscillating normal to the free-stream flow at a fixed Reynolds number equal to 185. The cylinder oscillation frequency ranged from 0.8 to 1.2 of the natural vortex-shedding frequency, and the oscillation amplitude extended up to 20% of the cylinder diameter. IBM (Immersed Boundary Method) with direct momentum forcing was adopted to handle both of a stationary and an oscillating cylinder. Present results such as time histories of drag and lift coefficients for both stationary and oscillating cases are in good agreement with previous numerical and experimental results. The instantaneous wake patterns of oscillating cylinder with different oscillating frequency ratios showed the synchronized wakes pattern in the lock-in region and vortex switching phenomenon at higher frequency ratio than the critical frequency ratio.

※Keywords: Immersed-boundary method(IBM, 가상경계법), Moving body (움직이는 물체), Lock-in region(lock-in 영역), Phase switch (위상 변화)

1. 서론

유체와 구조물의 연성관계를 해석하고자, 공학적 단순함과 응용 면에서 실린더 후류(Wake)의 와(Vortex)의 형상 및 흘림(shedding)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(김광수와 서정천 1998

윤현식과 전호환 2004, 문진국 등 2005).

특히 진동하는 실린더 후류에 대한 연구들은 정지한 실린더에서 와의 고유 흘림(vortex shedding) 주파수와 가진 주파수의 비에 따른 와의 형성의 과정에 대해 주로 초점을 맞추고 있다(Sherdian et al. 1998, Gu et al. 1994, Guilmineau and Queutey 2002, Lu and Dalton 1996).

본 연구에서는 정지 상태 및 진동하는 원형 실린더 주위의 유동장을 수치 해석하기 위하여 가상 경계법을 도입하였다.

가상경계법은 격자와 일치하지 않는 유동장 내에 존재하는 임의의 형상의 물체를 모사하기 위해서 지배방정식에 추가적인 운동량 부가(momentum forcing)를 함으로써, 복잡한 형상이나 움직이는 물체 등을 포함한 문제들의 수치적 해석의 어려움을 극복하기 위해서 최근 제안된 방법이다. 운동량 부가와 관련해서 최근까지 다양한 방법들(Peskin 1982, Goldstein et al.1993, 1995, Saiki and Biringen 1996, Mohd-Yusof 1997, Lee 2003)이 제안되고 있다. 특히, Kim et al.(2001)은 이전의 연구들이 제안한 운동량 부가에 추가적으로 연속방정식에서 질량 원천(mass source) 개념을 도입하여 가상 경계에서 점착 조건(no-slip condition)의 정확도를 향상시켰다.

따라서, 본 연구에서는 Kim et al.(2001)이 제안한 가상경계법을 사용하여 2 차원 정지 상태 및 진동하는 원형 실린더 주위의 유동장을 수치 해석하였다.

본 연구에서 사용된 레이놀즈 수(Reynolds number)는 3 차원 효과가 발생하는 레이놀즈 수 영역($Re > 200$)을 고려하여 185 로 고정하고, 진동 주파수의 변화에 따른 유동의 정량적인 값인 항력과 양력 계수, 압력 계수, Strouhal 수, 벽 와도 등에 관해서 상세한 연구를 수행하였다.

2. 수치 해석 방법

2.1 지배방정식

Kim et al.(2001)이 제안한 가상경계법을 적용한 2 차원 원형 실린더 주위의 비정상 유동을 지배하

는 무차원화 된 질량 및 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\int_{CS} \vec{u} \cdot \hat{n} dS - q = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \vec{u} dV + \int_{CS} \vec{u}(\vec{u} \cdot \hat{n}) dS \\ = - \int_{CS} p \hat{n} dS + \frac{1}{Re} \int_{CS} \nabla \vec{u} \cdot \hat{n} dS + \vec{f} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 \hat{n} 검사체적 표면에 수직인 단위 벡터이고 $\vec{u} = (u, v)$ 는 x, y 방향의 속도벡터를 나타낸다. 무차원 지배방정식 (2)에 사용된 무차원변수 $Re = U_{\infty} D / \nu$ 은 레이놀즈 수이며, 여기서 U_{∞} 는 자유 유동 (free-stream) 속도, D 는 실린더의 직경, ν 는 동점성계수(kinematic viscosity)이다. 작동 유체는 비압축성이며 물성치는 일정하다고 가정하였다. 식(1)의 q 는 질량 원천(mass source)을, 식(2)의 \vec{f} 는 운동량 부가(momentum forcing)를 각각 나타낸다.

2.2 수치해석 방법

위의 지배 방정식 (1), (2)를 수치해석 해석하기 위하여, 공간에 대한 이산화는 비정규 직교 좌표계에서 2 차 정확도를 가지는 중앙차분법(central-difference scheme)을 사용하였다. 시간 항에 대해서는 Kim and Moin(1985) 과 Zang et al. (1994) 이 사용한 속도장 계산을 압력 계산으로부터 분리하는 second-order two-step method 을 사용하였다. 첫번째 단계로, 속도는 대류-확산항을 풀어 ' n ' 시간 레벨에서 중간 시간 레벨인 ' * ' 로 진행된다. 여기서 대류항은 3 차의 Adams-Bashforth scheme 을, 확산항은 Crank-Nicolson scheme 을 사용하였다.

압력에 관해서 Poisson 방정식을 풀어서, ' $n+1$ ' 시간 레벨에서의 압력 p^{n+1} 을 얻는다. 마지막 단계로 압력보정 방정식과 질량 보존 방정식을 만족하는 ' $n+1$ ' 시간 레벨에서의 최종적인 속도 \vec{u}^{n+1} 를 구한다.

$$\int_{CV} \frac{\bar{u}^{n+1} - \bar{u}^*}{\Delta t} dV = - \int_{CV} \nabla p^{n+1} dV \quad (3)$$

$$\int_{CS} (\nabla p^{n+1}) \cdot \hat{n} dS = \frac{1}{\Delta t} \int_{CS} (\bar{u}^* \cdot \hat{n}) dS \quad (4)$$

$$\bar{u}^{n+1} = \bar{u}^* - \Delta t (\nabla p^{n+1}) \quad (5)$$

2.3 운동량 부가(momentum forcing)와 질량 원천(mass source)

식 (3)에서 \bar{u}^* 를 구하기 위해서 운동량 부가 \bar{f} 를 먼저 구하고, \bar{f} 는 속도 \bar{u}^n 가 물체 표면에서 점착조건을 만족하도록 결정해야 한다. \bar{f} 은 격자가 물체 표면과 일치할 경우에는, 운동량 부가를 가하는 점에서 얻고자 하는 속도는 0 이지만, 일치하지 않는 경우에는 2 차 정확도의 일차(Linear)와 쌍일차(Bilinear) 내삽 과정으로 구한다. 내삽의 과정에서 물체 표면에 인접하는 유체의 속도는 식(2)에서 운동량 부가 $\bar{f}=0$ 으로 두고 구한다.

질량 원천은 식(1)을 이산화 하여, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q^{n+1} = \frac{1}{\Delta x \Delta y} (-u^* \Delta y - v^* \Delta x) \quad (6)$$

여기서 $\Delta x, \Delta y$ 는 x, y 방향의 격자 간격이다. 이상의 가상경계법에 대한 보다 자세한 내용은 Kim and Choi.(2001)을 참조 할 수 있다.

2.4 경계조건

Fig. 1 에는 수치 계산에 사용된 경계조건들, 계산영역 및 좌표계를 나타내었다. 입구 조건으로 속도 $u = U_\infty = 1, v = 0$ 로 일정하다고 가정하였다. 출구조건으로 $\frac{\partial u}{\partial t} + C \frac{\partial u}{\partial x} = 0$ 의 대류경계조건을 사용하였으며, 여기서 convective velocity 인 C 는 출구평균속도를 사용하였다. 측면(far-field) 경계조건으로 $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0$ 의 Neumann 조건을 부가하였다.

전 계산 영역에 걸쳐 $480 \times 361(x \times y)$ 의 격자를 사용하였으며, Fig.2 에서 볼 수 있듯이 실린더 주위에 $200 \times 200(x \times y)$ 의 균일한 격자를 분포시켰다.

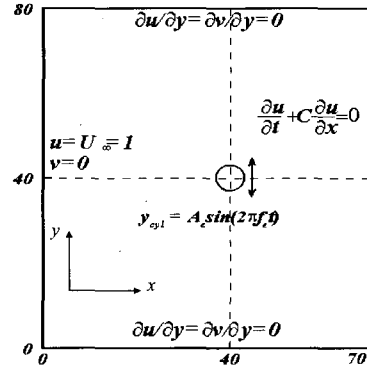


Fig.1 Schematic diagram for computational domain and coordinate system.

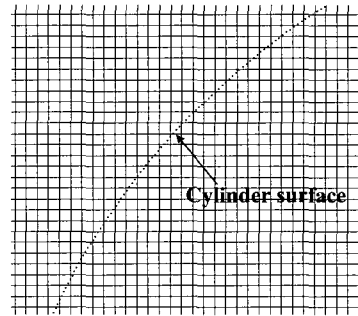


Fig. 2 Grid distribution near the cylinder. Where, $200 \times 200(x \times y)$ grid points are uniformly distributed.

Table 1 Numerical and experimental values of $St, \bar{C}_D, C_{L, r.m.s}$ at $Re=185$

Re=185	\bar{C}_D	$C_{L, r.m.s}$	St
Present	1.301	0.401	0.193
Guilmineau (2002)	1.287	0.443	0.195
Lu & Dalton(1996)	1.31	0.422	0.195
Gu et al.(1994)	1.28	—	0.19

3. 결과 및 고찰

횡단 진동하는 실린더 주위의 유동을 특징짓는 두 가지 변수들인 진동 주파수 및 횡단 운동은 다음과 같이 정의되어 진다.

$$f_r = f_e / f_o \quad (7)$$

$$y_{cyl} = A_e \cos(2\pi f_e t) \quad (8)$$

여기서 정지상태 실린더의 흘림 주파수(고유 흘림 주파수, f_o)에 대한 횡단(가진)하는 진동 주파수(f_e)의 비(f_r)는 0.8 에서부터 1.2 까지 변화시켰고, 실린더의 직경에 대한 변동 진폭(A_e/D)은 0.2 로 고정하였다. 식(7)에서 알 수 있듯이 f_e 값을 얻기 위해서는 먼저 정지상태의 원형 실린더의 f_e (즉, St (Strouhal 수))가 필요하다.

따라서, 이와 더불어, 이차원 정지상태의 원형 실린더에 대해 가상경계법을 적용하여 얻은 본 연구의 결과 값들을 기존 수치 및 실험 결과들과 비교를 통하여 현재의 수치적 방법론의 타당성을 검증하고자 한다. Table.1 에서 보여주는 양력과 항력에 관한 값들은 유동이 완전히 발달하여 정상상태에 도달한 후 평균 조작을 통해 얻어진 통계 값들이다. 또한, St (Strouhal 수)는 위의 흘림으로 일어나는 시간에 따른 양력 계수의 변화로부터 측정된 값이다. $Re=185$ 에서는 본 연구에서 얻은 \bar{C}_D (평균 항력 계수), $C_{L\ r.m.s}$ (양력계수의 RMS(Root Mean Square) 값) 및 St 값들은 기존의 수치 및 실험 결과 값들과 약 0.3%~4%의 오차 범위 내에서 잘 일치함을 Table. 1 에서 알 수 있다.

Fig. 3 은 서로 다른 주파수 비들에서 항력과 양력 계수들의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 와 흘림 주파수가 실린더 진동 주파수와 동기화(synchronization) 되는 현상으로 정의하는 Lock-in 현상을 주파수 비가 '1' 이하에서($f_r \leq 1$) 관찰 할 수가 있다(Fig. 3(a)-(c)). 즉, Lock-in 영역에서는 양력 및 항력 계수들은 공진(resonance)에 의한 진폭의 크기만 달리 할 뿐 정지한 실린더와 같은 시간에 따른 주기적인 변화 양상을 보인

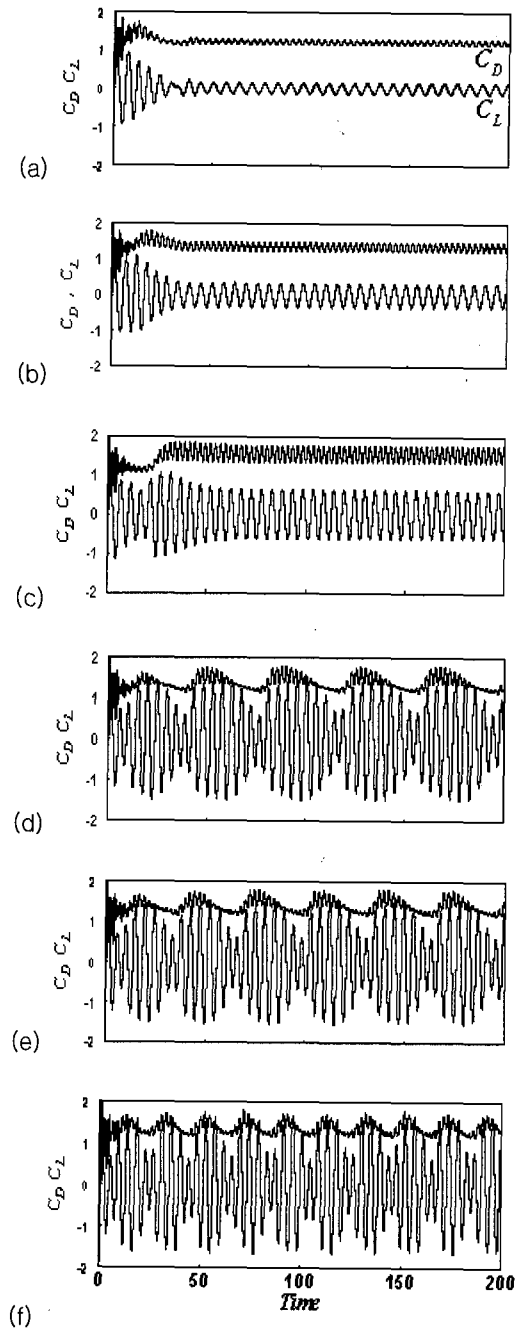


Fig. 3 Time histories of drag and lift coefficients at $Re=185$ and $A_e/D=0.2$ for values of f_r equal to : (a)0.80; (b)0.90; (c)1.00; (d)1.10; (e)1.12; (f)1.20

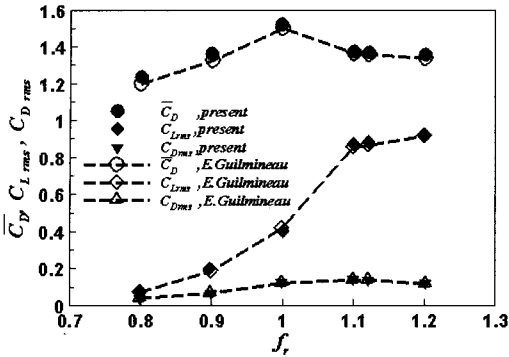


Fig. 4 Variations of the time averaged drag (\bar{C}_D) and RMS drag and lift fluctuation coefficients ($C_{D,r.m.s}$ and $C_{L,r.m.s}$) with respect to $f_r = f_e / f_o$.

보인다. Lock-in 영역을 지나면, 즉 주파수 비가 임계 주파수비 ($f_{r,c} = 1$)보다 커지면 주파수 비에 따라 서로 다른 규칙적인 맥놀이 (beat phenomenon) 현상을 보이는 것을 Fig. 3(d)-(f)에서 확인 할 수가 있다.

Fig. 4는 주파수비에 따른 시간 평균된 항력계수 (\bar{C}_D), 항력과 양력 계수의 강도들 ($C_{D,r.m.s}$, $C_{L,r.m.s}$)를 나타내고 있다. 항력계수는 주파수 비가 증가할수록 증가하다가 임계 주파수비 ($f_{r,c} = 1$)에서 최대값에 도달한 후 감소하는 것을 볼 수가 있다.

하지만, 양력 계수의 RMS 값은 항력계수와 달리 주파수비가 증가 할수록 계속해서 증가하는 것을 확인 할 수가 있다. 특히, 주파수 비가 임계 주파수 비보다 커지면서 급격히 증가한다. 이는 이후 순간 유동장에서 설명되어질 $f_r = 1.1$ 이상에서 볼텍스 위치가 바뀌는 현상(vortex switching), 즉 볼텍스 roll-up에 기인한다.

항력 계수의 RMS 값은 Lock-in 영역 내에서는 주파수 비가 증가할수록 매우 서서히 증가하다가 임계 주파수 비 ($f_{r,c} = 1$) 이상에서는 큰 변화가 없음을 볼 수가 있다. 본 연구의 결과값들, \bar{C}_D , $C_{D,r.m.s}$ 은 $C_{L,r.m.s}$ 은 Guilmineau and Queutey (2002)의 수치 계산결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5에서는 서로 다른 주파수 비들에서의 실

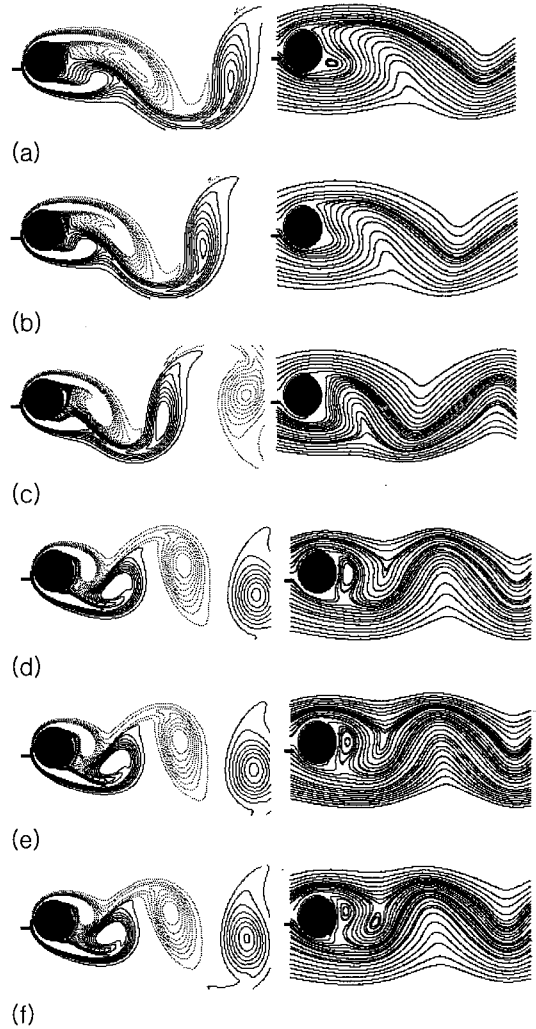


Fig. 5 Instantaneous vorticity contours(Left) and streamlines(Right) for values of f_r equal to : (a)0.80; (b)0.90; (c)1.00; (d)1.10; (e)1.12; (f)1.20 . In all frames, the location of the cylinder is at its extreme upper position. Solid line and dashed line of vorticity contours represent the positive and negative values, respectively.

린더 주위의 순간 와도 등고선과 대응하는 유선들을 보여주고 있다. 여기서 모든 그림은 실린더가 최상위점에 위치해 있을 때이다.

Lock-in 영역에 해당하는 주파수 비가 $0.8 \leq f_r \leq 1$ 에서는 실린더 상부에서 유동의 말림에 의한 와의 흘림(vortex shedding)이 진행된다. 따라서, 와도 등고선과 유선들이 비슷한 패턴을 형성함을 Fig. 5(a)–(c)에서 볼 수가 있다. 하지만, 주파수 비가 1 까지 증가 할수록 상부의 와의 길이가 짧아지면 후류에서 와들 간의 간격이 줄어든다.

주파수 비를 1.1로 높이면, 실린더 하부에서 유동이 회전하면 말려 올라가 와의 흘림(vortex shedding)이 진행됨을 Fig. 5(d)에서 볼 수가 있다. 또한, 주파수 비가 증가하면서 짧아진 실린더 상부의 와는 하부의 강한 와에 의해 일부 떨어져 나가고, 남은 상부의 와는 실린더 표면에 감겨져 올라가는 roll-up (vortex switching) 현상이 일어남을 확인할 수가 있다.

위의 설명되어진, vortex switching 현상에 의해서 Fig. 4에서 양력 계수의 RMS 값이 $f_r = 1.1$ 에서 급격히 증가한다고 예상할 수가 있다.

주파수 비 1.1에서부터 와의 흘림의 패턴이 바뀐 후에는 주파수 비를 1.2까지 높여도 계속 같은 패턴이 유지됨을 Fig. 5(d)–(f)을 통해 확인할 수가 있다. 특히, Guilmineau and P. Queutey(2002)와 Lu and Dalton(1996)이 수치해석 결과들에서 보여준 vortex switching 현상에 기인한 두 개의 saddle points를 Fig. 5(d)–(f)의 유선들에서 매우 잘 확인할 수가 있다.

Fig. 3의 시간에 따른 양력과 항력 계수의 변화를 통해 예상할 수가 있듯이, 주파수 비가 $f_r > 1$ 에서는 맥놀이(beat phenomenon) 현상을 보이므로 최상위점에서의 순간 유동장이 다를 것으로 예상된다. 따라서, 대표적으로 Fig. 3(d)에서 보여준 $f_r = 1.1$ 에서의 시간에 따른 양력과 항력 계수의 한 주기 동안에 실린더가 최상위점에 왔을 때 순간 유선들을 관찰하고자 한다. Fig. 6은 $f_r = 1.1$ 에서의 시간에 따른 양력과 항력 계수의 변화를 한 주기 동안만 확대하여 보여주고, 이 주기 동안 실린더가 최상위점에 왔을 때 순간 유선들을 보여준다. 실린더 하부에서 형성되어진 와가 실린더의 표면으로 접근하면서 상부쪽으로 말려 올라가므로

뒤쪽에 반대방향으로 회전하는 와가 실린더 상부에서 형성되어 아래쪽으로 내려오고 실린더 표면을 따라 상부로 이동한 와는 떨어져 나가는 유동 패턴을 Fig. 6의 한 주기동안 실린더가 최상위점에서 있을때의 유선들의 형상으로부터 알 수가 있다. 특히, Fig.6(f)와 (g)에서 와도가 집중됨을 의미하는 두 개의 saddle points를 명확히 관찰할 수가 있다.

Fig.7은 서로 다른 주파수 비에서 실린더가 최상위점에 있을 때 순간 벽 와도들 보여주고 있다. 여기서, θ 는 전방 정체점으로 부터 시계방향으로 증가하는 각도이다.

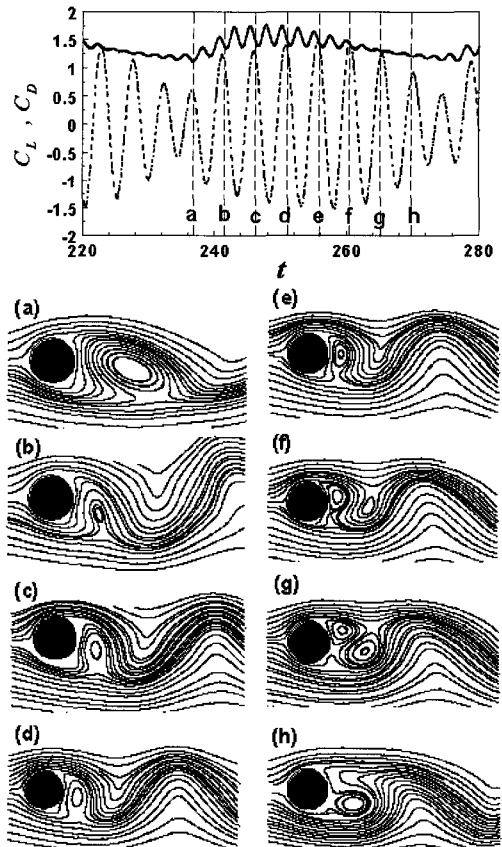


Fig. 6 Time sequence of eight streamlines at the extreme upper position during one period for $f_r = 1.1$.

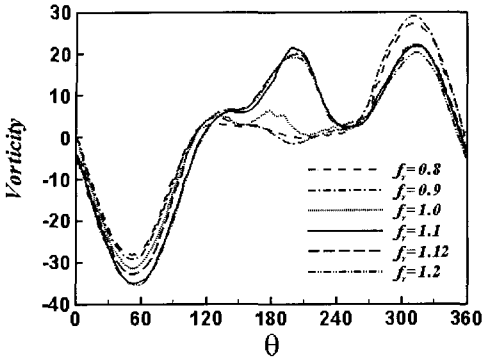


Fig. 7 Instantaneous wall vorticity along the cylinder surface at the extreme upper position for different values of f_r .

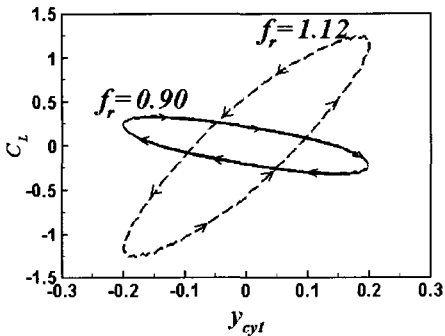


Fig. 8 Limit cycles of C_L Vs. displacement y_{cyl} at $f_r = 0.90$ (E positive) and 1.12 (E negative)

주파수비가 증가함에 따라 Fig. 5에서 확인한 바와 같이 상부 와도의 길이가 짧아짐과 동시에 음의 와도 강도가 증가됨의 Fig. 7의 0에서 150도 구간에서 관찰할 수가 있다. 또한 $f_r > 1$ 에서는 150~250° 구간에서 vortex switching에 생성된 와에 의해서 양의 와도의 값을 가짐을 관찰할 수가 있다.

Blackburn and Henderson(1999)은 $Re = 500$ 에서 진동하는 실린더의 변위와 양력 간의 위상차이로 부터 유체와 실린더간의 기계적인 에너지의 전달 경로를 연구하였다. 실린더 변위와 양력 간의 위상차이는 유체로부터 실린더에 가해지는 기계적 에너지는 Green's theorem을 사용하여

아래의 무차원 식으로 정의될 수가 있다 (Blackburn and Henderson 1999).

$$E = \frac{1}{2} \oint (C_l d\alpha + \alpha dC_l) \tag{9}$$

여기서, α 는 실린더의 진동 변위를 나타낸다. 따라서, 에너지(E)가 양의 부호를 가지면 유체로부터 실린더에 일이 행해짐으로 의미하고, 음의 부호는 반대로 실린더에서 유체로 일이 행해짐을 의미한다.

Fig. 8은 평균 양력과 진동 변위와의 위상 선도를 보여준다. 식(9)의 정의로부터 시계방향의 양의 에너지 전달은 유체에서 실린더로 에너지가 전달됨을 의미한다. 따라서 주파수비가 낮은 경우 $f_r = 0.90$ 일 때는 양의 에너지 전달로 유체에서 실린더로 에너지가 전달됨을 알 수가 있다. 진동수비가 커지면 반 시계방향의 음의 에너지 전달이 일어나서 실린더에서 유체로 에너지가 전달된다. 즉, 진동수 비가 작을 때에는 유체가 지배적인 에너지를 가지고 있기에 실린더 주위의 유동은 정지해 있는 실린더 주위의 유동장과 거의 같은 패턴을 보임을 위의 순간 유동장과 항력 및 양력의 시간에 따른 변화로부터 확인 할 수가 있었다. 하지만, 진동수 비가 임계진동수 비보다 커지면 실린더의 진동에너지가 유체로 전달되어 유동에 미치는 영향이 증가하여 정지상태의 유동 패턴과 다른 vortex switching 현상을 유발하게 된다.

Fig. 9은 서로 다른 주파수 비에서 실린더가 최상위점에 있을 때, 순간 압력 계수의 변화를 보여주고 있다. 볼텍스 흘림에 의해 우세한 와도의 위치가 바뀔 때, 즉 θ 가 90°인 지점에서 가장 크며, 이때 압력계수가 가장 낮다. 또한 주파수 비가 1.00에서 1.10로 변할 때, 압력계수의 감소가 가장 크게 변화하였다.

4. 결론

운동량 부가와 질량원천 개념을 도입한 가상경계법을 사용하여, 진동하는 실린더 주위의 유동장을 수치해석하였다.

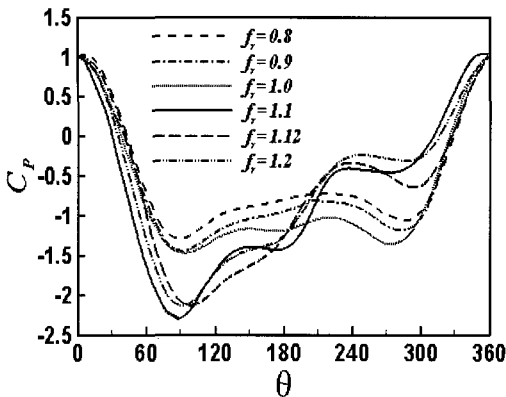


Fig. 9 Pressure coefficient along the cylinder surface at the extreme upper position for different values of f_r .

주파수 비가 '1' 이하에서 고유 흘림 주파수가 실린더 진동 주파수와 동기화(synchronization) 되는 Lock-in 현상을 보였다. 주파수 비가 임계 주파수비($f_{r,c}=1$)보다 커지면 맥놀이(beat phenomenon) 현상이 일어남을 관찰하였다.

주파수 비 1.1 에서부터 vortex switching 현상에 기인한 와의 집중에 의해 두 개의 saddle points 가 존재한다. 와의 흘림의 패턴이 바뀐 후에는 주파수 비를 1.2 까지 높여도 계속 같은 패턴이 유지됨을 확인할 수가 있었다.

본 연구에서는 복잡한 형상과 움직이는 물체를 해석을 위한 가상경계법의 기반을 구축하였고, 이 기법의 확장을 통해 더욱 복잡한 경계조건을 포함하는 2 차원 및 3 차원 유동의 해석이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터(ASERC)의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 김광수, 서정천, 1998, " 와도를 기저로 한 초기

순간 출발하는 실린더 주위의 점성유동해석," 대한조선학회 논문집, 제 35 권, 제 4 호, pp. 1-10.

- 문진국, 박종천, 전호환, 서성부, 2005, "주기 회전하는 원형 실린더 주위 층류 유동장의 수치 시뮬레이션," 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 4 호, pp 368-378.
- 윤현식, 전호환, 2004, "자기장을 사용한 원형주상체 주위의 유동 제어 및 저항감소," 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 2 호, pp. 70-78.
- Blackburn, H.M. and Henderson, R.D., 1999, " A Study of Two-Dimensional Flow Past an Oscillating Cylinder," JFM, 385, pp. 255-286.
- Braza, M., Chassaing, P. & Minh, H. Ha, 1986, " Numerical Study and Physical Analysis of the Pressure and Velocity Fields in the near Wake of a Circular Cylinder," JFM, 165, pp. 79-130.
- Sherdian, J., Caberry, J., Lin, J.C. and Rockwell, D., 1998, " On the Near-Wake Topology of an Oscillating Cylinder," J. Fluids and Structures 12, pp. 215-220.
- Goldstein D., Handler R. and Sirovich L., 1993, " Modeling a No-Slip Flow Boundary with an External Force Field," J. Comput. Phys. pp. 105, 354.
- Gu, W., Chyu, C. and Rockwell D., 1994, " Timing of Vortex Formation from an Oscillating Cylinder," Phys. Fluids 6(11), pp. 3677-3682.
- Guilmineau, E. and Queutey, P., 2002, " A Numerical Simulation of Vortex Shedding from an Oscillating Circular Cylinder," J. Fluids and Structures 16(6), pp. 773-794.
- Griffin O.M. and Votaw C.W., 1972, " The Vortex Street in the Wake of a Vibrating Cylinder," JFM, 55, pp. 31-48.
- Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001, " An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulations of flow in Complex Geometries," J. Comp. Physics, 171, pp. 132-150.

- Kim, J. and Moin, P., 1985, " Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equation," J. Comp. Phys. 59, pp. 308- 323.
- Koopman, G.H., 1967, " The Vortex Wakes of Vibrating Cylinders at Low Reynolds Numbers," J. Fluid Mech., 28, pp. 501-512.
- Lee, C., 2003, " Stability Characteristics of the Virtual Boundary Method in Three-Dimensional Applications," J. Comp. Phys., 184, pp. 559-591.
- Lu, X.Y. and Dalton, C., 1996, " Calculation of the Timing of Vortex Formation from an Oscillating Cylinder," J. Fluids and Structures 10, pp. 527-541.
- Mittal, R. and Balachandar, S., 1994, " Direct Numerical Simulation of Flow Past Elliptic Cylinders," J. Comp. Phys., 124, pp. 351-367.
- Mohd-Yusof J., " Combined Immersed-Boundary / B-Spline Methods for Simulations of Flow in Complex Geometries," Annual Research Briefs (Center for Turbulence Research, NASA Ames and Stanford University, 1997), p. 317.
- Peskin C.S., 1982, " The Fluid Dynamics of Heart Valves: Experimental, Theoretical, and Computational Methods," Annu. Rev. Fluid Mech. , 14, p. 235.
- Saiki E.M. and Biringen S., 1996, " Numerical Simulation of a Cylinder in Uniform Flow: Application of a Virtual Boundary Method," J. comp. phys.123, pp. 450-465.



< 김 정 후 >



< H.A.Tuan >



< 윤 현 식 >



< 전 호 환 >