

Navier-Stokes 식을 이용한 회전 진동하는 2차원 원형 실린더 주위 유동 해석

이 명 국,¹ 김 재 수^{*2}

NUMERICAL ANALYSIS OF THE FLOW AROUND A ROTARY OSCILLATING CIRCULAR CYLINDER USING UNSTEADY TWO DIMENSIONAL NAVIER-STOKES EQUATION

M.K. Lee¹ and J.S. Kim^{*2}

Although the geometry of circular cylinder is simple, the flow is complicate because of the flow separation and vortex shedding. In spite of many numerical and experimental researches, the flow around a circular cylinder has not been clarified even now. It has been known that the unsteady vortex shedding from a circular cylinder can vibrate and damage a structure. Lock-on phenomenon is very important in the flow around an oscillating circular cylinder. The lock-on phenomenon is that when the oscillation frequency of the circular cylinder is at or near the frequency of vortex shedding from a stationary cylinder, the vortex shedding synchronizes with the cylinder motion. This phenomenon can be recognized by the spectral analysis of the lift coefficient history. At the lock-on region the vortex is shedding by the modulated frequency to the body frequency. However, the vortex is shedding by the mixed frequencies of natural shedding and forced body frequency in the region of non-lock-on. In this paper, it was analyzed the relation between the frequency of rotary oscillating circular cylinder and the vortex shedding frequency.

Key Words : 회전진동하는 원형 실린더(Rotary Oscillating Circular Cylinder), 비정상유동(Unsteady Flow), OHOC 기법(Optimized High Order Compact Scheme), 와홀림 주파수(Vortex Shedding Frequency), 락온 및 비락온(Lock-on and non Lock-on)

1. 서 론

원형 실린더를 이용한 구조물은 기하학적 단순 형상으로 인해 다양하게 활용되어지고 있다. 그러나 원형 실린더 주위의 유동 흐름은 매우 복잡하여 아직도 많은 부분에서 정확하게 밝혀지지 않고 있다. 실린더에서 주기적으로 발생하는 와류는 실린더에 구조적 진동과 공력소음을 발생시킨다. 이러한 와류를 제어하기 위하여 많은 방법들이 적용되어지고 있다.

본 연구에서는 실린더에 회전 진동을 가하여 발생하는 와

류 및 공력소음의 특성을 분석하고자 한다. 진동하는 실린더에서 발생하는 락온(Lock-on) 현상은 실린더의 움직임과 와홀림이 일치하는 형상이다. 락온 현상은 실린더 고유의 와홀림 주파수와 실린더의 가진 주파수가 일치할 때 발생하는 현상으로, 실린더 후류영역에서 측정된 속도 변화 또는 양력계수의 변화를 측정하여 확인할 수 있다. 락온이 발생되었을 때는 주파수 스펙트럼에서 한 개의 피크만 나타나지만, 락온이 발생되지 않았을 때는 실린더 고유의 와홀림 주파수와 가진 주파수가 함께 나타나는 맥놀이 현상을 볼 수 있다.

진동하는 실린더 주위의 유동흐름은 수치적, 실험적으로 많은 연구가 되어왔다. Koopman[1]은 저 레이놀즈 수에서 발생하는 락온현상을 풍동실험을 통하여 연구하였고, 가시화 기법을 사용하여 가로방향 와류 간격을 관찰하였다. Gerrand[2]는 고정된 뭉뚱한 동체에서 발생하는 와홀림 구조와 이들의

접수일: 2011년 4월 27일, 수정일: 2011년 8월 17일,

게재확정일: 2011년 8월 18일.

1 정회원, 조선대학교 대학원 항공우주공학과

2 종신회원, 조선대학교 공과대학 항공우주공학과

* Corresponding author, E-mail: jskim@chosun.ac.kr

다양한 패턴에 대해 연구하였다. Griffin & Ramberg[3]는 와홀림 주파수의 1.3~2.5배의 가진 주파수 범위에서 락온영역에 대해 연구하였다. Williamson & Roshko[4]는 실린더가 진동하면서 발생하는 후류의 와홀림의 유형에 대하여 연구하였다. 이들은 유동 조건에 따라 S, 2S, P, 2P, P+S, 및 2P+2S 유형으로 영역을 구분하였다. Hall & Griffin[5]은 고정된 실린더에 유동방향으로 진동하는 유체를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 그들은 진폭과 락온영역의 관계를 확인하였고 각 영역에서의 주파수 성분을 분석하였다. Filler et al.[6]은 레이놀즈 수 250~1200의 물에서 회전 진동하는 원형실린더 주위의 현상에 대해 실험하였다. 백승진[7]은 회전 진동하는 원형실린더를 수치적으로 연구하였고 순환제어(feedback control) 기법을 이용하여 와홀림의 감소를 시도하였다. Ingham & Tang[8]은 상대적으로 작은 무차원 속도($\alpha < 3$)로 회전하는 실린더 ($Re < 47$) 주위의 흐름을 수치적으로 연구했다. Tang & Ingham[9]는 $Re = 50$ 및 100에 대해 실험하였다.

본 논문에서는 2차원 비정상 압축성 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 회전 진동하는 원형실린더 주위의 유동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 공간 차분법으로는 OHOC 기법 (Optimized High-Order Compact Scheme)이 사용되었고, 시간 차분법으로는 4차 Runge-Kutta 기법이 사용되었다. 또한 고차-고해상도 기법에서 발생하는 수치적 불안정성을 유발하는 비선형 불연속파를 해결하기 위하여 Kim & Lee[11]가 제안한 인공감쇠모형을 사용하였다. 또한 장시간의 계산 시간을 요구하는 고해상도 수치기법의 계산을 위하여 병렬처리 방법 중 OpenMP 방법을 이용하여 계산 속도를 증가시켰다.

2. 지배방정식과 수치기법

2.1 지배방정식

수치해석 기법의 효율성을 위해 지배방정식을 직교좌표계에서 일반 곡선좌표계로 변환하여 사용하였다. 일반좌표계로 변환된 2차원 비정상 압축성 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다. 무차원 기준변수는 자유유동속도, 자유유동 밀도 및 실린더 직경이다.

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} = \frac{\partial \hat{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}_v}{\partial \eta} \quad (1)$$

t, ξ, η : 일반좌표계

\hat{Q} : 유량함수 벡터

\hat{E}, \hat{F} : 각 방향의 비점성 유량벡터

\hat{E}_v, \hat{F}_v : 각 방향의 점성유량벡터

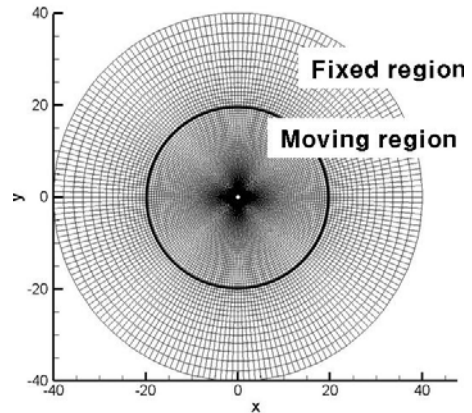


Fig. 1 Computational grids around a circular cylinder

2.2 수치기법

시간에 대해서 고차, 고해상도의 높은 정확도를 유지하기 위하여 4차 정밀도의 Runge-Kutta 방법을 사용하였다. 공간에 대하여는 4차의 정밀도를 가지기 위하여 고차, 고해상도 수치기법인 OHOC(Optimized High-Order Compact)기법을 사용하였다. 수치 미분 유한차분식은 식(2)와 같은 7 격자점을 이용하며, 이때 내재항의 계수는 α, β 이고, 우변의 계수는 a_n 이라 하면, 내재적 방법에 의한 미분항 계산은 $\alpha \neq 0, \beta = 0$ 이거나 $\alpha \neq 0, \beta \neq 0$ 로 주변의 여러 점을 고려하는 삼각(Tri-diagonal) 또는 오각(Penta-diagonal)행렬을 이용하여, 각 점들의 미분값을 구한다. 중앙차분법만을 이용하면 전단오차(Truncation Error)와 위상오차(Phase Error)를 갖게 되는데, 이러한 오차를 최소화하기 위해서 푸리에 분석(Fourier Analysis)를 통하여 α, β, a 계수값을 구한 Kim & Lee[10]가 제안한 계수를 사용하였다.

$$\beta f'_{i-2} + \alpha f'_{i-1} + f'_i + \alpha f'_{i+1} + \beta f'_{i+2} = \frac{1}{h} \sum_{n=1}^3 a_n (f_{i+n} - f_{i-n}) \quad (2)$$

OHOC 기법은 공간에 대해서 높은 해상도를 얻을 수 있으나, 전방차분법(Upwind Scheme)처럼 파의 전파특성을 정확히 모사하지 못함으로 인해, 수치 안정성에 큰 영향을 주는 소산오차와 확산오차가 발생한다. 본 논문에서는 Kim & Lee.[11]가 제안한 2차 및 4차항을 보완하는 적응비선형인공감쇠모형(Adaptive nonlinear artificial dissipation model)을 사용하여 이러한 오차를 줄이고 해의 안정성을 높였다.

2.3 격자계 및 경계조건

격자계는 Fig. 1와 같은 O-형 격자계를 사용하였고, 몇 중

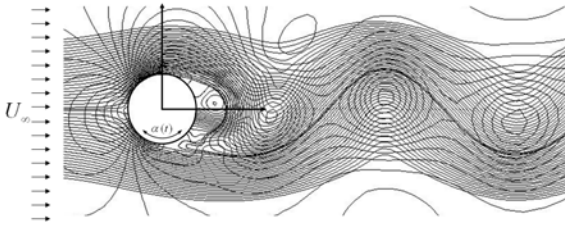


Fig. 2 Contour of pressure and stream line

류의 격자계를 시험 계산하여 충분히 격자 수렴성을 보인 격자 개수로 201×131를 선정하여 사용하였다. 전체 계산 영역은 실린더 중심으로부터 직경 D의 40배로 설정하였다. Fig. 2와 같이 실린더는 회전각 α 를 가지고 $-\theta_{max} \leq \alpha \leq \theta_{max}$ 까지 회전하도록 하였다. 회전각 α 는 시간에 대해 회전 진동 주파수와 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\alpha = \theta_{max} \sin(2\pi f_c t) \quad (3)$$

아음속에서 음향파가 전파해 가면서 경계면에 도달했을 때, 물리적인 반사파와 수치적으로 발생하는 비 물리적인 반사파가 발생한다. 물리적인 반사파는 긴 파장을 가지고 있어 경계면을 지날 때 섭동이 발생할지라도 수치안정성에 큰 영향을 주지 않지만, 비 물리적인 반사파는 짧은 파장을 가지고 있고 경계면에서 수치적 미분의 영향으로 인해 불필요한 파동이 발행하게 되고 수치적 에러를 발생시키게 된다. 본 연구에서는 경계면에서 발생하는 비 물리적인 반사를 억제하기 위해 J.W.Kim등[12]이 제안한 입류, 출류 조건 및 벽면조건에 특성치 경계조건을 적용하였다. 와류와 같은 격변하는 유동이 벽면을 빠져나가게 되면, 특성치 경계조건만으로 비 물리적인 반사파를 억제하기 어렵다. 따라서, 이러한 반사파가 계산영역에 영향을 미치지 않고 최소화되기 위해서는 비 물리적인 도메인이 필요하다. 본 논문에서는 Sandberg& Sandham[13]이 연구한 락형상 특성치 (Zonal characteristic) 경계조건을 적용하였다.

2.4 병렬처리기법

고차·고해상도 수치기법을 사용하는 공력해석에서는 많은 격자와 장시간의 계산이 필요하다. 최근 컴퓨터의 발전으로 CPU의 계산 능력과 메모리가 과거에 비해 크게 증가하였지만, CPU의 효율적인 사용을 위해서는 병렬처리 기법이 사용되어야 한다. 특히 본 논문에서와 같이 고차의 공간 차분화를 수행하기 위해서는 반드시 코드의 병렬화가 필요하다. 최근 사용되는 병렬처리 기법으로는 분산 메모리를 시스템에서 사

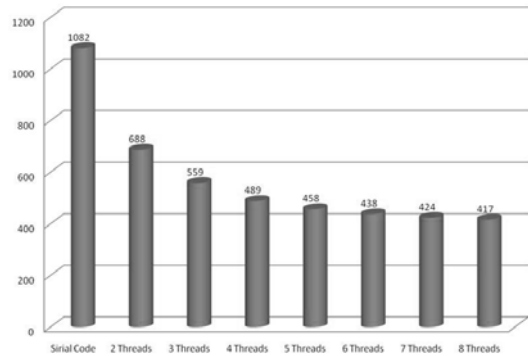


Fig. 3 OpenMP using calculated time(itr=100)

용할 수 있는 MPI(Message Passing Interface)와 공유메모리를 이용하여 상대적으로 쉽게 프로그램을 작성 할 수 있는 OpenMP, 이 두 가지 기법의 장점을 결합시킨 하이브리드 병렬처리 기법(Cluster OpenMP)이 있다.

본 연구에 사용된 공간 차분법은 오각(Penta-Diagonal) 행렬을 풀어야하므로 프로세스 간의 자료전달을 위해서는 각 프로세스마다 정보를 받아야한다. 이로 인한 통신량의 급격한 증가는 통신 부하를 가져오게 되고, 이는 전체적인 계산속도가 감소하게 되는 결과를 가져 오게 된다. 따라서 본 연구에서는 메모리를 공유하는 OpenMP 병렬기법을 사용하였다.

본 연구에서는 OpenMP 방법을 이용하여 처리속도와 효율성을 검토해보았다. Fig. 3에서는 OpenMP 방법으로 100번의 계산을 수행 했을 경우 계산 시간을 보여주고 있다. 스레드(Thread) 수가 증가 할수록 계산 시간은 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 시간의 감소폭은 스레드 수가 2개 이상일 경우 눈에 띄게 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 많은 양의 메모리를 각 스레드가 동시에 공유함으로써 발생하는 간섭의 영향이라고 생각된다. 이러한 결과를 토대로 스레드가 2개일 때 발휘하는 성능이 성능감소가 최소이면서 계산시간을 효율적으로 감소시키는 것을 볼 수 있다.

3. 결과 및 토의

3.1 스트롤 수

수치 계산 결과를 검증하기 위해 고정된 실린더의 고유 와 흘림 특성을 계산하였다. 유동은 고정 및 진동 실린더 주위 유동 모두 마하수 0.3이고, 레이놀즈수 $Re = 1000$ 인 층류 유동조건에 대해 계산하였다. 스트롤 수는 유동의 특성을 보여주는 무차원수 중 하나로 해석대상의 형상과 레이놀즈 수에 따라 다르게 나타난다. 와흘림 주파수(f_s)와 스트롤 수의 관계 $St_t = f_s D / U_\infty$ 로 표현된다. 후류 영역에서 측정된 값들은

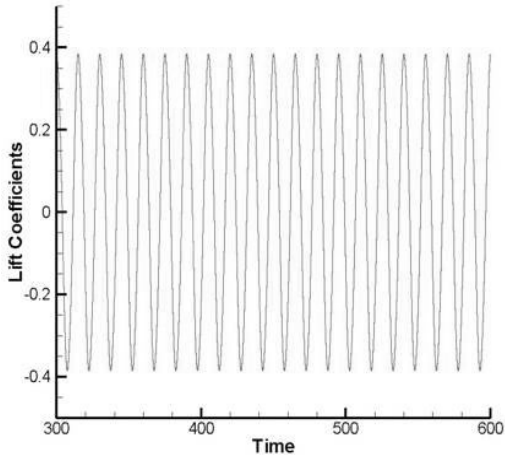


Fig. 4 Time histories of lift coefficient

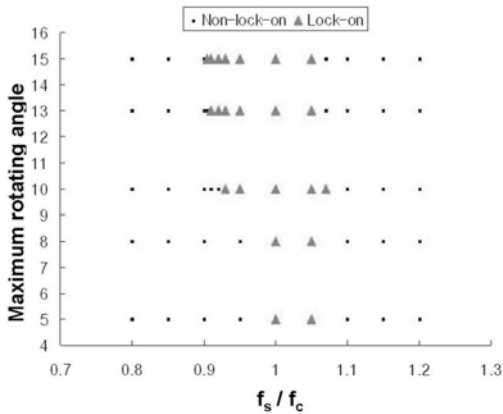


Fig. 5 Lock-on region

후류에서 발생하는 다양하고 복잡한 유동 현상에 의해 다른 주파수 성분을 가질 수 있기 때문에 본 논문에서는 Fig. 4의 양력 계수를 이용하여 주파수를 계산하였다. 본 연구에서 계산된 고정실린더 두위의 스트롤 수는 0.222로 Williamson[14]의 실험결과 0.213247과 매우 일치한다.

3.2 락온(Lock-on)과 비 락온(Non-lock-on)

락온 현상은 실린더의 진동 주파수가 칼만(Karman) 와홀림 주파수와 같거나 비슷한 경우에 나타난다. 따라서 본 연구에서는 칼만 와홀림 주파수(f_s)를 중심으로 실린더의 가진 주파수(f_c)를 선정하였고 실린더의 최대 회전각을 변화시키면서 락온이 일어나는 영역을 확인하고, 락온 상태와 비 락온 상태의 유동 현상에 대해 비교하고 분석하였다.

$f_s/f_c = 1$ 인 경우를 중심으로 진폭이 증가함에 따라 락온

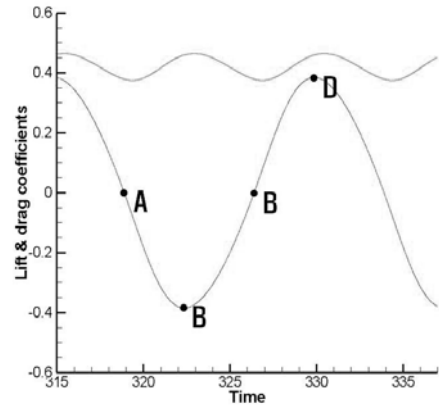


Fig.6(a) Time history of lift coefficient for the case of fixed cylinder(solid line with ABCD: lift coefficient, solid line: drag coefficient)

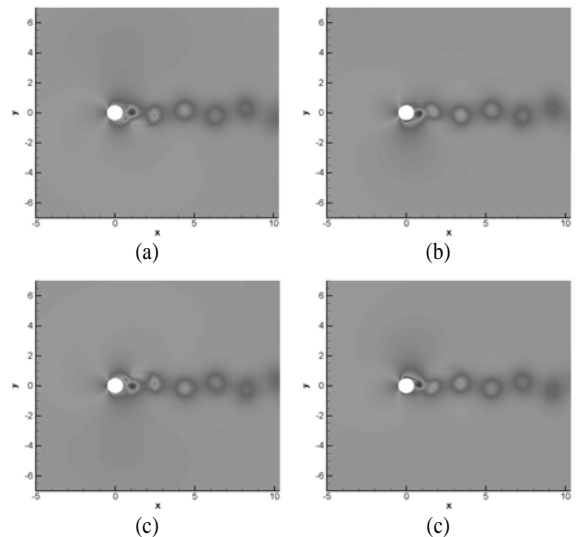


Fig. 6(b) Vortex shedding around a fixed cylinder during one period

영역이 증가되는 것을 Fig. 5와 같이 확인 할 수 있다. 이러한 이유는 진폭이 커짐에 따라 실린더의 회전이 유체의 흐름에 더 큰 영향을 주게 되기 때문이다. 그러나 진폭의 증가폭에 비하여 락온의 증가폭은 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 특정 주파수비 이상에서는 더 이상 락온 영역이 증가하지 않게 될 것으로 예상된다. 즉, 진폭을 계속 증가하여도 락온 영역의 증가 효과는 크지 않은 것이다. 또한 일정한 진폭 이하에서는 $f_s/f_c = 1$ 일 때만 락온 현상이 일어나게 된다.

3.3 와홀림 특성

실린더의 가진 조건에 따라 와홀림의 생성에 미치는 물리

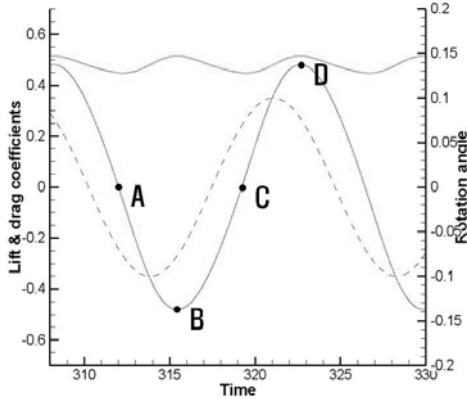


Fig.7(a) Time history of lift coefficient for the case of lock-on ($f_s/f_c = 1.05, \theta_{max} = 15^\circ$, dotted line : angle of attack, solid line with ABCD: lift coefficient, solid line: drag coefficient)

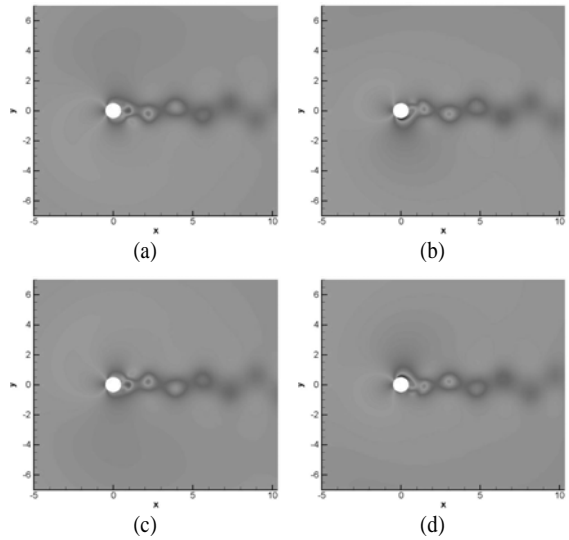


Fig. 7(b) Vortex shedding around lock-on cylinder during one period

적 영향력을 관찰하기 위해 고정된 실린더와 락온 및 비 락온 상태 실린더에서 발생하는 와홀림에 대해 관찰하였다. 실린더 고유의 와홀림 주파수와 가진 주파수가 같을 경우 락온 현상이 발생하게 되고, 이때 와홀림은 실린더의 움직임과 일치하여 발생하게 된다. 그러나 락온 현상이 발생하지 않았을 경우, 앞에서 설명한 내용과 같이 가진 주파수와 자연 칼만 와홀림 주파수를 가지기 때문에 복잡한 형태의 와류가 발생하게 된다.

Fig. 6(a)와(b)에서는 고정된 실린더에서 한주기동안의 양력 계수변화와 이에 따른 와류의 변화를 보여주고 있다. 고정된 실린더에서 와홀림은 일정한 주기로 발생하게 된다. (A) 시점에서는 실린더 윗면에서 발생한 와류가 실린더 표면에서 완전히 분리되어 양력계수가 0이 되었다. 이때 실린더의 뒷면에 압력이 낮아지면서 항력은 최저가 된다. (A)~(B) 시점에서는 실린더 아랫면에서의 유속이 빨라지게 되고, 와류가 발달하면서 양력계수가 낮아지게 되고, (B) 시점에서는 와류가 실린더 아랫면을 감싸게 되면서 압력이 전체적으로 낮아지고 양력계수는 최저가 된다. (B)~(C) 시점에서는 와류가 실린더 표면으로부터 분리되기 시작하면서 양력이 다시 증가한다. (C) 시점에서는 (A) 시점과 비슷하게 와류가 실린더 표면에서 완전히 분리되었고, 이때의 양력계수는 0이 되고 항력계수는 최저가 되었다. (C)~(D) 시점에서는 (A)~(B)와 같이 실린더 윗면의 유속이 빨라지면서 와류가 발달하게 되고, (D) 시점에서 실린더 윗면 전체의 압력이 낮아지면서 양력계수가 최대가 되었다. 고정된 실린더에서는 가진에 의한 주파수 간섭이 없어 이와 같이 일정한 주기를 가지는 패턴의 와홀림이 계속 발생하게 된다.

Fig. 7(a)와 (b)에서는 $f_s/f_c = 1.05$ 조건의 락온 실린더에

서 양력계수의 한 주기 동안에 발생하는 와류를 관찰하였다. 락온 상태에서는 실린더의 회전과 와홀림의 발생이 일치하여 나타나기 때문에 고정된 실린더와 같이 와홀림이 일정한 주기로 발생하게 된다. (A) 시점에서는 고정된 실린더와 같이 실린더 윗면에서 발생되었던 와류가 실린더 표면에서 완전히 분리되면서 양력계수가 0이 되고, 이때 실린더 뒷면의 압력이 낮아지게 되어 항력계수는 최저가 된다. (A)~(B) 시점에서는 실린더 아랫면에서의 유속이 빨라지게 되고, 와류가 발달하면서 양력계수가 낮아진다. 고정된 실린더와는 다르게 한번 발생한 와류는 실린더의 회전 방향이 바뀌게 되면서 실린더 아랫면에서 유지된다. 이로 인하여 (B) 시점에서 실린더의 최저 양력계수는 고정된 실린더보다 낮아지게 된다. (B)~(C) 시점에서는 와류가 실린더 표면으로부터 분리되기 시작하면서 양력이 다시 증가한다. (C) 시점에서는 (A) 시점과 같이 실린더 아랫면에서 발생되었던 와류가 실린더 표면에서 완전히 분리되었고, 이때의 양력계수는 0이 되고 항력계수는 최저가 되었다. (C)~(D) 시점에서는 실린더 윗면의 유속이 빨라지면서 와류가 발달하게 된다. 또한 실린더의 회전 방향이 바뀌면서 와류는 실린더 윗면에 유지되게 되고 (D) 시점에서의 최대 양력계수는 고정된 실린더에 비해 높아지게 된다. (D) 시점 이후에는 와류가 실린더에서 분리되면서 양력이 낮아지게 되고, 다시 (A) 시점과 같은 상태가 된다. 락온 상태의 실린더는 가진에 의한 와홀림이 일정하게 발생하게 되고, 양력계수의 진폭이 커지게 된다. 이러한 원인은 고정된 실린더에 비해 와류가 실린더의 중심선에서 더욱 떨어진 지점에서 분리되기 때문이다. 이 결과 양력계수의 진폭은 커지는 반면에 항력계

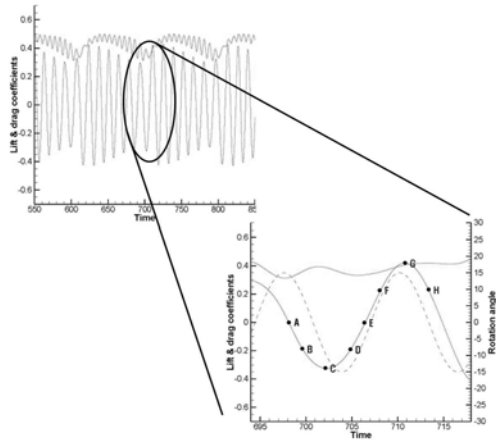


Fig.8(a) Time history of lift coefficient for the case of non-lock-on ($f_s/f_c = 1.05, \theta_{max} = 15^\circ$) dotted line : angle of attack, solid line with ABCD: lift coefficient, solid line: drag coefficient

수의 진폭은 고정된 실린더에 비해 작아지게 된다.

Fig. 8(a)와 (b)에서는 비 락온상태의 실린더에서 양력계수의 한 주기 동안 발생하는 와류를 관찰하였다. 비락온 상태에서는 발생하는 와류들은 실린더의 진동에 의해 지연되거나 가속되는 영향을 받지만 실린더의 움직임과는 완벽하게 일치하지 못하게 된다. Fig. 8에서는 양력의 변화가 가장 크게 나타나는 지점의 한 주기를 관찰하여 실린더의 움직임에 의한 와류 발생과정을 살펴보았다.

(A) 시점에서는 고정된 실린더와 락온 상태의 실린더와 같이 와류가 실린더 표면에서 완전히 분리되어 양력계수가 0이 되고, 실린더 뒷면의 압력이 낮아지게 되어 항력계수가 최저가 된다. (B)~(C) 시점에서는 실린더 아래면에서의 유속이 빨라지면서 와류가 발달하고 양력계수가 낮아지게 된다. 이때 실린더의 회전 방향은 와류가 진행되는 방향인 반시계방향으로 와류를 지연시키게 되고, 실린더로부터의 박리가 쉬워져 양력계수가 더 이상 낮아지지 못하게 된다. (D) 지점에서는 와류가 실린더 표면으로부터 분리되기 시작하면서 양력이 다시 증가한다. (E) 시점에서는 와류가 실린더 표면에서 완전히 분리되어 양력계수는 0이 되었다. 이때 실린더의 회전방향이 시계방향이 되어 와류의 박리가 실린더 뒷면에서 지연되면서 항력은 증가되기 시작한다. (F)~(G) 시점에서는 (E) 지점에서 분리된 와류가 여전히 실린더 뒷면에서 멀리 떨어지지 못하여 항력을 증가시키고 있고, 실린더 뒷면에서는 새로운 와류가 형성되면서 양력은 증가하게 된다. (H) 시점에서 역시 실린더 뒷면에 머물러 있는 와류와 실린더 윗면에서 뒷면으로 흘러가는 와류로 인하여 양력은 감소하고 항력은 증가하게 된다.

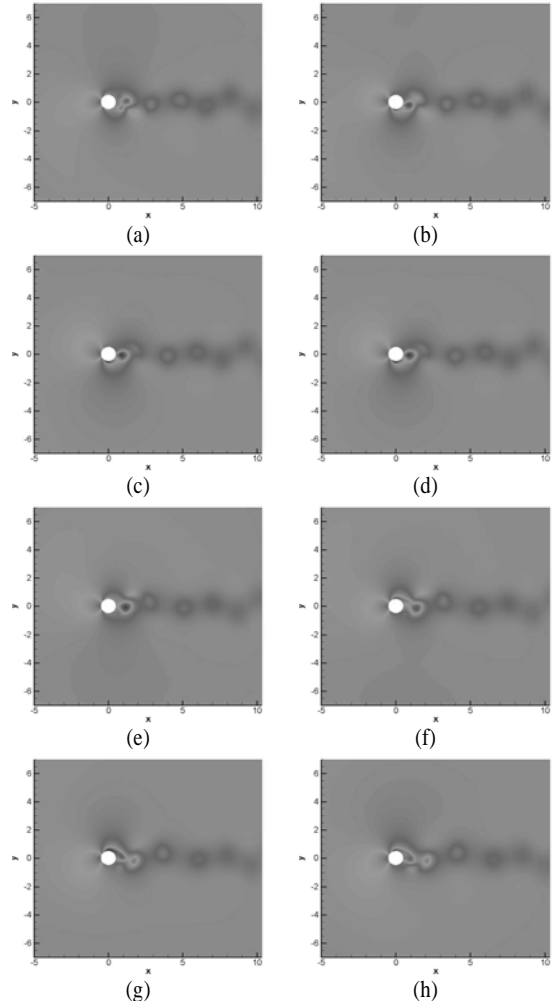


Fig. 8(b) Vortex shedding around non-lock-on cylinder during one period

실린더의 움직임이 와류 박리에 미치는 영향을 보기 위하여 무차원 시간을 비교하였다. 실린더가 반시계방향으로 움직이는 (A)~(C) 간의 시간은 무차원 시간으로 4.323 정도가 되고, 실린더가 시계방향으로 움직이는 (E)~(G) 간의 시간은 무차원 시간으로 3.663 정도가 된다. 이 결과는 락온 상태의 실린더와 같이 회전 진동이 실린더에서 발생하는 와류들과 같이 움직이지는 않지만 큰 영향을 주기 때문이다.

4. 결론

본 논문에서는 회전 진동하는 2차원 원형 실린더 주위의 유동을 압축성 비정상 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS)

식을 사용하여 해석하였다. 공간 차분법과 시간 차분법은 고차·고해상도의 정밀도를 갖게 하기 위하여 OHOC 기법과 4차 Runge-Kutta 기법을 사용하였다. 경계조건으로는 특성치 경계조건과 비물리적 계산영역을 이용한 락형상의 특성치 경계조건 적용하여 비 물리적 반사파를 억제하였다. 계산의 효율성을 증가시키기 위하여 병렬처리기법을 적용하였다. 회전 각진폭의 크기와 자유칼만와홀립 주파수와 가진주파수비에 따른 락온 현상의 발생 유무를 분석하였다. $f_s/f_c = 1$ 를 중심으로 진폭이 증가함에 따라 락온 영역이 증가되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 진폭의 증가폭에 비교하여 락온영역의 증가폭은 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 특정 주파수비 이상에서는 진폭을 계속 증가하여도 락온 영역의 증가 효과는 크지 않다는 것을 보여준다. 또한 일정한 진폭 이하에서는 $f_s/f_c = 1$ 일 때만 락온 현상이 일어나게 된다.

후 기

본 연구는 2010학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구 되었습니다.

참고문헌

- [1] 1967, Koopman G.H. , "The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers," *J Fluid Mech*, pp.501-512.
- [2] 1966, Gerrand J.H., "The mechanics of the formation region of the vortices behind bluff bodies," *J Fluid Mech*, pp.401-413.
- [3] 1976, Griffin O.M. and Ramberg S.E., "Vortex shedding from a circular cylinder vibrating inline with an incident uniform flow," *J Fluid Mech*, Vol.75, pp.257-276.
- [4] 1988, Williamson C.H.K. and Roshko A., "Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder," *J Fluids Struct*, Vol.2, pp.355-381.
- [5] 1993, Hall M.S. and Griffin O.M., "Vortex shedding and lock-on in a perturbed flow," *Trans ASME J Fluids Eng*, Vol.115, pp.283-291.
- [6] 1991, Filler J.R., Marston P.L. and Mih W.C., "Response of the shear layers separating from a circular cylinder to small-amplitude rotational oscillations," *J Fluid Mech*, Vol.231, pp.481-499.
- [7] 1998, Baek, S.J. and Sung, H.G., "Numerical simulation of the flow behind a rotary oscillating circular cylinder," *Phys Fluids*, Vol.10, pp.869-876.
- [8] 1990, Ingham D.B. and Tang T. "A numerical investigation into the steady flow past a rotating circular cylinder at low and intermediate Reynolds numbers," *J Comput Phy*, Vol.87, pp.91-107.
- [9] 1991, Tang T. and Ingham D.B., "On steady flow past a rotating circular cylinder at Reynolds numbers 60 and 100," *Comput Fluids*, Vol.19, pp.217-230.
- [10] 1996, Kim, J.W. and Lee, D.J., "Optimized Compact Finite Difference Schemes with maximum Resolution," *AIAA Journal*, Vol.34, No.5, pp.887-893.
- [11] 1999, Kim, J.W. and Lee, D.J., "Adaptive Nonlinear Artificial Dissipation Model for Computational Aeroacoustics," *3rd CAA Workshop on Benchmark Problems*, USA, November.
- [12] 2000, Kim, J.W. and Lee, D.J., "Generalized characteristic boundary condition for computational aeroacoustics," *AIAA Journal*, Vol.38, No.42 pp.47-55.
- [13] 2006, Sandberg R.D. and Sandham N.D., "Nonreflecting Zonal Characteristic Boundary Condition for direct numerical simulation of aerodynamic sound," *AIAA Journal*, 44(2), pp.402.
- [14] 1998, Williamson, C.H.K. and Brown, G.L., "A series in $1/\sqrt{Re}$ to represent the Strouhal - Reynolds number relationship of the cylinder wake," *Journal of Fluids and Structures* 12, pp.1073 - 085.
- [15] 2009, 이상수, 김재수, "고해상도 수치기법의 경계조건에 따른 공력음향 특성에 관한 연구," *한국전산유체공학회지*, 제14권, pp.25-32.