Proceedings of
The Second National Congress on Fluids Engineering
August 22-24, 2002, Muju, Korea

진동 유동장에서 원형 실린더의 lock-on 해석

김원태*·성재용**·유정열***

Lock-on states of a circular cylinder in the oscillatory flow

Wontae Kim*, Jaeyong Sung** and Jung Yul Yoo***

Key Words *: lock-on, natural shedding(자연 쉐딩), oscillatory flow(진동 유동), Time-resolved PIV(고속 PIV), recirculation region(재순환 영역), vortex formation region(와 형성 영역)*

Abstract

Vortex lock-on or resonance in the flow behind a circular cylinder is visualized by a time-resolved PIV when a single frequency oscillation is superimposed on the mean incident velocity. Measurements are made of the Kármán vortices in the wake-transition regime at the Reynolds number 360. Basically, natural shedding state is observed to compare with lock-on state. Wake motion by the change of the shedding frequency of lock-on state is investigated. When lock-on occurs, the vortex shedding frequency is found to be half the oscillation frequency as expected from previous experiments. The physical flow phenomena of natural shedding and lock-on states are analyzed with physical parameters of recirculation and vortex formation region. Consequently, it is found that the change of wake bubble plays an important role in the flow at the lock-on state. Vortex formation region is also actively changed like recirculation region as the lock-on occurs. Therefore, it is deduced that the recirculation region is closely related with the vortex formation region.

1. 서 론

지금까지 실린더 후류 유동에 관하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히, 유동의 특이성을 지닌 'lock-on' 상태에 대해서도 Amstrong et al.[1], Barbi et al.[2], Griffin and Hall[3], Hall and Griffin[4] 등 많은 연구자들에 의해 관심의 대상이 되어왔다. 하지만, 이 결과들의 대부분은 열선 실험 측정 장치를 이용하여 영역 데이터를 제시하지 못하는 한계를 지녀왔다. 최근에는 CFD 결과들이나 PIV를 이용한 결과들이 몇몇 제시되고 있지만, CFD 결과는 증명할 만한 실험 자료의 부족으로 인한 한계를 지니며, PIV를 이용한 결과들의 대부분은 물리적으로 의미있는 값을 제시하지 못하는 실정이다. 그리하여 본 연구에서는 고속 PIV[5] 시스템을 이용하여 시간적, 공간적 문제를 해결한 2차원 해석을 통하여 보다 정확한 유동 해석을 수행하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

고속 PIV 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다. 레이저는 Ar-ion 5W 연속 레이저를 사용하였으며, 카메라는 초당 2000장까지 측정 가능하고, 480 X 420 픽셀 해상도의 고속카메라를 이용하였다. 수동의 시험부의 크기는 150 mm X 100 mm이고 실린더의 지름은 5 mm이다. 진동 유동장을 생성시키기 위해 실린더 하류에 3개의 셔터가 설치되었다.

* 서울대학교 대학원, dddsc3@snu.ac.kr
** (주)LG전자 연구소, jysung70@lge.com
*** 서울대학교 기계항공공학부, jyyoo@plaza.snu.ac.kr

2.2 실험 방법

실험은 $Re=360$에서 수행되었다. 온도는 $20\pm2℃$로 조절되었으며, 평균 유속은 $U=0.0724\ m/s$가 적용되었다. 관찰 영역은 $x-y$ 평면에서 $0<x<4.2D$, $-2D<y<2D$의 범위로 하였다. 진동 유동을 발생시키는 셔터에 의한 평균 유속의 변화를 평균 유속의 1% 이내로 최소화 시켰다. 진동 유동에 의한 주파수 성분에서 bihamonic 성분이 fundamental 성분의 진폭의 30% 이내가 되도록 하였으며, 무차원화된 진동 유동 진폭의 크기, $2\Delta u/\omega D$ 는 0.026~0.225로 lock-on이 일어나기 위해 필요한 한계조건인 0.01보다 모두 크게 나와 lock-on 생성에 지장

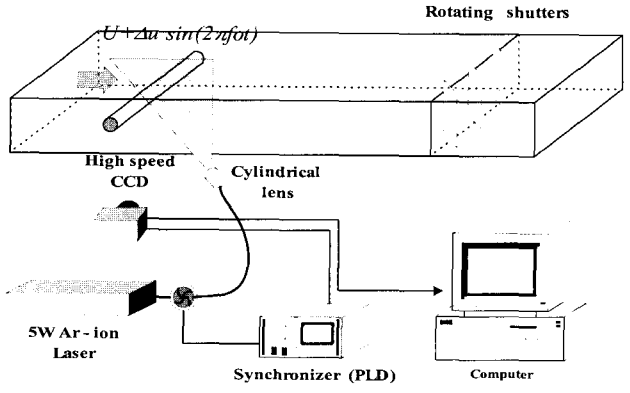

Fig. 1. Experimental setup

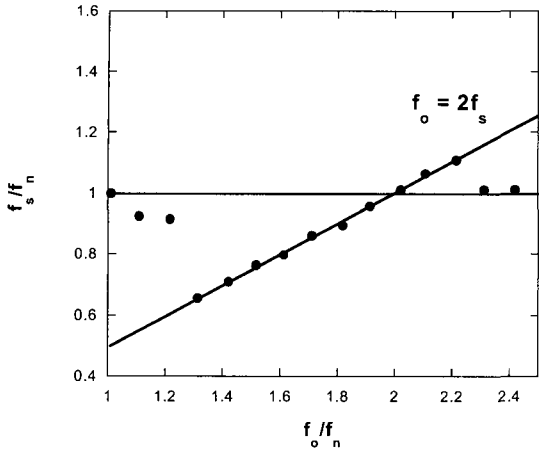

Fig. 2. Frequency response of vortex shedding

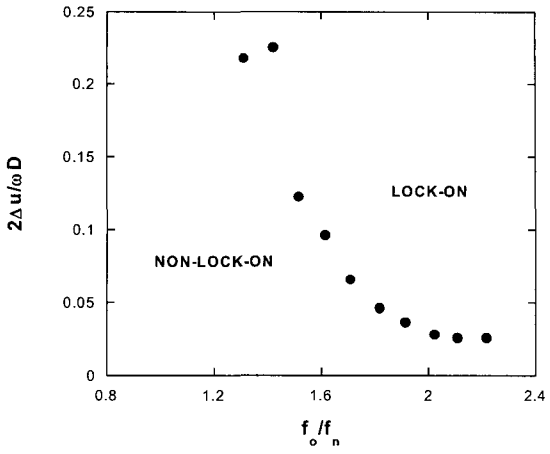

Fig. 3. Limits of the lock-on regime

이 없음을 확인하였다.

실험에 사용된 PIV 기법은 연속레이저와 고속카메라로 구성된 고속 PIV 기법을 사용하였으며, 프레임 샘플링율 = $250Hz$ 이고, 8 X 8 픽셀 상관영역에 FFT를 적용한 점진적 상호 상관 알고리즘을 사용하였다. 따라서 벡터 샘플링율 = $125Hz$ 이다. 진동 주파수와 쉐딩 주파수를 구하기 위해 한 점에서의 시간에 대한 4096개의 데이타를 이용하였고, 1024개의 연속된 데이터 4세트(4096개)를 평균하여 속도장을 구하였다. PIV 실험에 사용된 입자는 10㎛ Hollow glass particle이다.

3. 실험 결과

3.1 lock-on 형성

진동 주파수(f_o)는 실린더에서 먼 상류에서 추출된 신호를 FFT로 처리하여 구한 값이고, 쉐딩 주파수(f_s)는 $(x/D, y/D) = (0.5, 1.5)$ 에서 추출된 신호를 FFT로 구한 것이다.

Fig. 2는 f_o/f_n 에 대한 f_s/f_n 변화를 나타낸 것이다. 이것은 자연 쉐딩 주파수로 무차원화 시킨 값이다. 두개의 무차원 변수사이의 관계를 고찰하면, 가진된 진동 주파수에 의해 쉐딩 주파수가 제어되는 현상을 알 수 있다. 특히 lock-on이 이루어질 때 $f_o = 2f_s$와 같은 관계식이 성립하는 것을 확인할 수 있다. lock-on이 일어나는 영역은 $1.3 < f_o/f_n < 2.2$이며, lock-on이 일어나기 시작하는 f_o/f_n 이전에는 급격한 쉐딩 주파수의 변화가 있음을 알 수 있다. lock-on이 끝나는 f_o/f_n 이후에도 같은 결과를 보인다. lock-on이 일어나지 않는 상황에서는 자연 쉐딩 주파수를 유지한다.

Fig. 3은 무차원화된 진동 유동 진폭의 크기, $2Au/\omega D$를 f_o/f_n에 의해 나타낸 것이다. 일반적으로 lock-on은 $2Au/\omega D$, 무차원화 된 가진 진폭에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, Fig. 3에 도시되어 있는 것과 같이 특정영역에 대해서만 나타나는 것으로 알려져 있다. 예를 들어, 만약 $f_o/f_n = 1.6$정도로 가진 된다고 가정하면, $2Au/\omega D$가 0.1이 될 때까지 lock-on이 일어나지 않다가 이보다 더 높은 가진 진폭을 가지게 되면 lock-on이 일어나게 되는 것이다. 물론 non-lock-on과 lock-on과의 명확한 경계는 아직 밝혀진 바 없다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 대략적인 경계를 유추할 수 있다. 이것은 Griffin and Hall[3]의 결과와 아주 유사한 결과이다. 이로부터 lock-on이 일어날 수 있는 조건이 만족되었음을 알 수 있다.

3.2 재순환 영역

재순환 영역(recirculation region)은 Fig. 4 (Balachandar et al.[6])에서 보는 바와 같이 그 모양에 의해 후류 버블(wake bubble)이라고도 부른다. 이 후류 버블은 후류 유동에 있어 중요한 가치를 지닌다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 실린더 후류에서 나타나는 힘의 평형을 결정짓는 중요한 잣대가 되기 때문이다. 후류 버블에는 4개의 중요한 힘이 작용한다. 이것은 실린더에 작용하는 압력과 이에 상응하여 후류 버블에 작용되는 수직 응력, 그리고 후류버블의 상단과 하단에 작용되는 전단 응력이다. 이와 같은 4개의 힘이 작용되어 평형을 이루는 위치 R과 실린

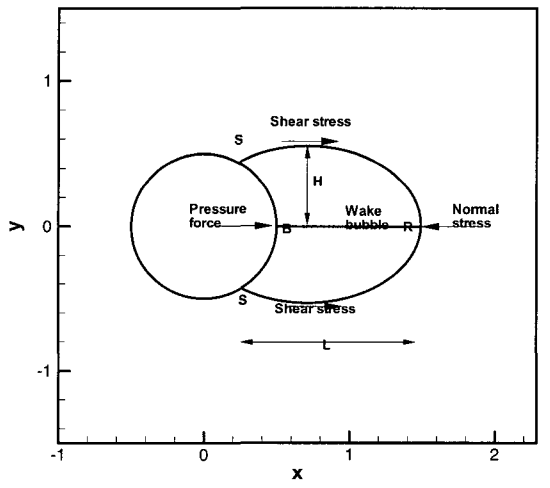

Fig. 4. Schematic showing the force balance on the mean separation bubble in the wake of a circular cylinder

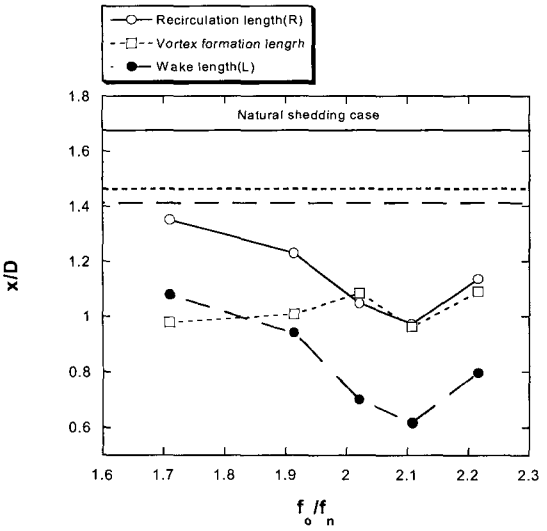

Fig. 5. The changes of recirculation length (R), vortex formation length, wake length (L) at the lock-on state

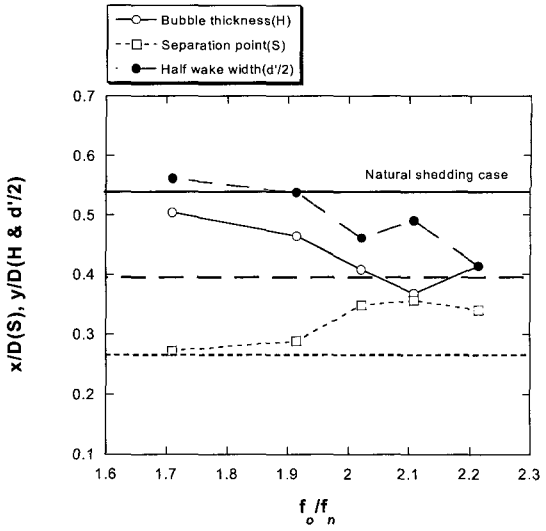

Fig. 6. The changes of wake bubble thickness (H), separation point (S) and half wake width (d'/2) at the lock-on state

더의 정점 B와의 거리를 재순환 길이(recirculation length)라고 한다. 이 값은 일반적으로 둔체(bluff body)에서 발생하는 후류를 연구할 때 물리적인 현상의 척도로 나타내는 값이기 하다. 그리고 박리점(separation point, S)에서 R까지의 거리, L은 후류 버블 길이이다. 그리고 H는 후류 버블 두께라고 할 수 있다.

이와 같이 후류 버블에서 중요시되는 박리점 위치, 후류 버블 두께, 후류 버블 길이, 재순환 길이를 통하여 lock-on이 자연 쉐딩의 경우와 물리적으로 어떤 차이를 보이고 있는지를 살펴보고자 한다.

우선, 가진된 진동 유동의 진폭크기, 실린더 후류의 쉐딩 진폭의 크기가 비슷한 다섯가지 lock-on의 경우(f_o/f_n=1.71, 1.91, 2.02, 2.11, 2.22)에 대해 자연 쉐딩과 비교하기로 한다.

Fig. 5는 재순환 길이(R), 와 형성 길이 그리고 후류 버블 길이(L)를 lock-on의 경우와 자연 쉐딩의 경우를 비교하였다. 그림에서 점과 같이 표시된 것은 lock-on의 경우이고 선으로만 수평되게 표현된 것은 자연 쉐딩의 경우이다. 와 형성 길이는 섭동 u_{rms}의 값이 최대가 되는 위치를 의미한다. 그림을 살펴보면, 재순환 길이와 후류 버블 길이가 같은 경향을 나타낸다. 이는 Fig. 4에 나타난 후류 버블 길이의 정의에서 기인한 것으로, 박리점의 변화가 미미하고 그 경향이 재순환 길이의 변화와 비슷한 경향을 나타내기 때문이다. 이는 앞으로 고찰할 Fig. 6에 잘 나타나 있다. 자연 쉐딩 경우와 비교하면 lock-on 상태에서는 재순환 길이나 후류 버블 길이가 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 또한, 알려진 바와 같이 가진 주파수 f_o/f_n이 증가함에 따라 재순환 길이가 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 여기서 특이할 만한 점은 f_o/f_n=2.02에서 가장 짧아질 것으로 예상을 하였지만, 좀 더 높은 f_o/f_n=2.11까지 재순환 길이가 짧아지는 것을 확인할 수가 있었다. 이렇게 재순환 길이가 짧아지다 lock-on이 풀리기 직전인 f_o/f_n=2.22에는 재순환 길이가 다시 늘어난다.

후류 버블과 와 형성의 변화에 대한 관계를 규명하기 위해 와 형성 길이를 비교하였다. 이는 재순환 길이의 변화와 다소 차이를 나타내고 있다. 와 형성 길이만을 생각한다면 lock-on상태의 각 경우에 대해 주된 변화 양상이 보이질 않는다. 단지 자연 쉐딩의 경우와 비교하면 재순환 길이의 경우와 같이 lock-on 상태에서 많이 짧아지는 경향을 가진다. 하지만, 와 형성 길이와 재순환 길이를 같이 비교하면, 자연 쉐딩의 경우, 와 형성 길이는 재순환 길이보다 짧아 와 형성이 재순환 영역에서 일어나는 반면, lock-on의 경우는 와 형성 길이와 재순환 길이가 f_o/f_n이 증가할수록 점점 같아지는 특이한 경향을 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 f_o/f_n=2.02에서는 와 형성 길이가 재순환 길이보다 길어져 와 형성이 재순환 영역 밖에서 일어난다는 것을 확인할 수 있다. 그러다 f_o/f_n=2.02 이후로는 f_o/f_n이 증가할수록 재순환 길이의 경향과 같아지고, f_o/f_n=2.11에서 재순환 길이와 일치하다 점점 그 차이가 벌어진다.

Fig. 6은 후류 버블 두께(H), 박리점 위치(S) 그리고 후류 폭을 나타내는 d'/2를 나타낸 것이다. 후류 버블의 두께는 재순환 길이과 후류 버블 길이와 같은 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이로써 후류 버블의 물리적인 값들인 R, H, L이 같은 경향을 나타내어 lock-on이 진행될수록 버블의 크기는 균형적으로 작아졌다가 다시 회복하는 성향이 있음을 알 수 있다. 따라서, lock-on의 형성에 후류 버블의 변화가 아주 중요한 역할을 차지한다는 것을 유추할 수 있다.

박리점 위치는 후류 버블의 크기가 작아졌다 커지는 경향에 따라 그 위치가 하류쪽으로 이동하다 다시 회귀하는 경향이 있음을 알 수 있다. 일반적으로 박리점의 위치가 하류로 갈수록 실린더 상류 하류에 작용하는 압력의 차가 작아져 항력이 감소하는 경향이 있음을 잘 알고 있다. 하지만, 다른 연구자들의 결과에 따르면 lock-on의 상태에서는 항력이 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 위의 결과로는 설명할 수 없는 부분이다.

Roshko[7]에 의해 제안된 후류 폭, d'을 후류 버블 두께와 비교하여 보았다. d'은 Fig. 5에서 나타낸 와 형성 길이에서 y축으로 섭동 u_{rms}이 최대가 되는 위치의 폭을 의미한다. 이 값은 와 형성 길이에서 와가 생성되는 위치를 의미하고, 와 형성 길이와 비교하면 뒤집어진 꼴의 경향을 나타낸다. 따라서 후류 버블의 변화와는 다소 다르게, 와가 형성되는 영역은 균형을 이루기 위해 길이와 폭이 서로 반대의 경향성을 나타내었다. 하지만 재순환 길이와 와 형성 길이의 동일한 양상으로 인해 후류 버블과 와 형성 영역은 밀접한 연관성 있음을 확인하였다.

4. 결 론

재순환 영역과 와 형성 영역에 대한 물리적인 양으로 실린더 후류의 자연 쉐딩 상태와 lock-on 상태를 비교 분석하였다. 후류 버블의 물리적인 값들인 R, H, L이 같은 경향을 나타내어 lock-on이 진행될수록 버블의 크기는 균형적으로 작아졌다가 다시 회복하는 성향이 있었다. 따라서, lock-on의 형성에 후류 버블의 변화가 아주 중요한 역할을 차지한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, lock-on 상황에서 와 형성 길이와 $d'/2$를 앞서 나타낸 R, H와 비교해 본 결과 후류 버블은 전체적으로 줄어드는 같은 변화 양상을 가진 반면, 와 형성 영역은 균형적으로 변화하려는 다른 양상의 변화를 보였지만, 후류 버블과 같이 가진 특성에 대해서 능동적으로 변화하는 것을 확인하였다. 따라서 와가 형성되는 영역도 후류 버블과 밀접한 연관성이 있음을 lock-on 해석으로 유추할 수 있었다.

참고문헌

[1] Armstrong, B. J., Barnes, F. H. and Grant, I., A comparison of the structure of the wake behind a circular cylinder in a steady flow with that in a perturbed flow, *Phys. Fluids*, Vol. 30, No. 1 (1987), pp. 19-22.

[2] Barbi, C., Favier, D. P., Maresca, C. A. and Telionis, D. P., Vortex shedding and lock-on of a circular cylinder in oscillatory flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 170 (1986), pp. 527-544.

[3] Griffin, O. M. and Hall, M. S., Review - Vortex shedding lock-on and flow control in bluff body wakes, *ASME J. Fluids Engrg.*, Vol. 113 (1991), pp.526-537.

[4] Hall, M. S. and Griffin, O. M., Vortex shedding and lock-on in a perturbed flow, *ASME J. Fluids Engrg.*, Vol. 115 (1993), pp. 283-291.

[5] Sung, J. and Yoo, J. Y., Three-dimensional phase-averaging of time-resolved PIV measurement data, *Meas. Sci. Tech.*, (2002), to appear.

[6] Balachandar, S., Mittal, R. and Najjar, F. M., Properties of the mean recirculation region in the wakes of two-dimensional bluff bodies, *J. Fluid Mech.*, Vol. 351 (1997), pp. 167-199.

[7] Roshko, A., *NACA. Tech. Note no. 3168* (1954).