

주기적으로 회전진동하는 원주 후류의 공진특성

이정엽* · 이상준†

Lock-on Characteristics of Wake behind a Rotationally Oscillating Circular Cylinder

Jung Yeop Lee and Sang Joon Lee

Abstract

Lock-on characteristics of the flow around a circular cylinder performing a rotationally oscillation with a relatively high forcing frequency have been investigated experimentally using flow visualization and hot-wire measurements. Dominant parameters are Reynolds number (Re), amplitude of oscillation (Θ_A), and frequency ratio $F_R = f_f / f_n$, where f_f is the forcing frequency and f_n is the natural frequency of vortex shedding. Experiments were carried out under the conditions of $Re = 4.14 \times 10^3$, $\pi/15 \leq \Theta_A \leq \pi/3$, and $F_R = 1.0$. The effects of this active control technique on the lock-on flow regime of the cylinder wake were evaluated through wake velocity measurements and spectral analysis of hot-wire signals. The rotary oscillation modified the flow structure of near wake significantly. The lock-on phenomenon was found to occur in the range of frequency encompassing the natural vortex shedding frequency. In addition, when the amplitude of oscillation is less than a certain value, the lock-on phenomenon was occurred only at $F_R = 1.0$. The lock-on range expanded and vortex formation length decreased as the amplitude of oscillation increases. The rotary oscillation generated small-scale vortex structure just near the cylinder surface.

Key Words : Lock-on Regime(공진영역), Forcing Frequency(가진 주파수), Threshold Amplitude(문턱 각변위), Vortex Shedding(와유출), Vortex Formation Length(와형성길이)

1. 서론

원주 주위 흐름의 유동구조에 대한 연구는 오래 전부터 많이 연구되어 왔다. 일반적으로 레이놀즈 수(Re)가 40이상이 되면 원주 후방에서 주기적인 와유출(vortex shedding)이 발생하고, 이것이 소음과 진동의 원인이 되기도 한다⁽¹⁾.

균일 유동 속에 놓여있는 원주에 주기적인 회전 진동을 가하게 되면 후류의 유동구조가 바뀌게 되고, 후류영역은 원주의 회전주파수와 같은 주파수로 와가 유출되는 공진영역(lock-on regime)과 원주

의 회전주파수와 다른 주파수로 와가 유출되는 비공진영역(non lock-on regime)으로 구분된다. 각각의 영역에서 와유출 특성이 다르고 이는 원주 후류의 유동구조를 바꾸는 원인이 된다. Tokumaru⁽²⁾는 $Re=15000$ 조건에서 주기적인 회전가진에 따라 후류의 유동구조가 4가지 다른 유동모드를 나타냄을 보였고, 간접측정을 통해 80%의 항력감소 효과가 있음을 밝혔다. Mahfouz⁽³⁾는 $40 \leq Re \leq 200$, $0 \leq F_R \leq 2$ 조건에서 회전가진에 의한 유동구조의 변화 및 원주의 각변위가 공진영역의 범위에 미치는 영향과 임계 각변위(threshold amplitude)를 연구하였다.

유체 속에 놓여있는 물체와 주위 유체 사이에 강한 상호작용이 발생하는 공진영역에서는 다양한 유동특성이 나타나는데, 본 연구에서는 주파수 비(F_R)를 1.0으로 고정시킨 공진조건에서 원주의 각변위(Θ_A) 변화가 공진영역의 후류유동에 미치는

† 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

영향을 실험적으로 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 풍동 및 실험모델

본 실험은 시험부 크기가 $6.75^L \times 0.72^W \times 0.6^H m^3$ 인 저난류 아음속 풍동에서 수행하였다. 풍동 시험부 내부에 설치한 원주 후방에 2차원 유동을 형성시키기 위하여 풍동 시험부 너비를 최대한 사용하였으며, 원주 모델을 지지하고 풍동 벽면을 따라 성장하는 경계층 효과를 최소화하기 위해 원주 모델의 양부분에 날카로운 모서리를 가진 사각 끝판(end-plate)을 설치하였다. 끝판의 크기와 형상은 Stansby⁽⁴⁾의 결과를 참조하였다. 원주의 직경은 $D=30mm$ 이며, 자유흐름 속도는 $U_\infty = 2m/s$ 이고, 원주 직경에 기준한 레이놀즈 수는 약 4140이다. 원주 모델은 회전부위 길이가 $400mm(L/D=13.3)$ 인 아크릴 파이프로 만들었다. Graham⁽⁵⁾은 원주의 무차원 길이 L/D 가 3.8보다 크면 와유출 특성이 무한히 긴 원주와 유사하다고 하였다. 원주 직경에 기초한 레이놀즈 수가 4140일 때 자연발생 와유출 주파수(f_n)는 대략 15Hz이고, 주파수 비(F_R)가 1.0이 되도록 가진장치를 이용하여 원주 모델을 15Hz로 회전진동 시켰다. 실험시 원주의 각변위(θ_A)는 $2^\circ \sim 60^\circ$ 로 변화시켰다.

2.2 후류유동측정 및 항력계산

후류의 속도분포와 와유출주파수 측정에는 TSI사의 IFA-100 정온형 열선풍속계와 I-형 열선 프로우브를 사용하였다. 후류의 평균속도 및 난류강도 분포는 $x/D=4$ 단면의 $-3 \leq y/D \leq 3$ 구간에서 0.1D 간격으로 측정하였고, 파워 스펙트럼 밀도분포는 원주 후방 $x/D=2, 10$, $y/D=0.5, 1$ 지점에서 측정하였

다. 열선 프로우브는 정밀도가 0.1mm 이하인 3차원 이송장치를 이용하여 원하는 위치로 이동시켰다. 각각의 측정위치에서 초당 4000개의 비율로 샘플링하여 16,384개의 속도 데이터를 얻었는데, 노이즈 제거를 위해 속도신호를 800Hz의 저역필터를 거치게 하였다. 원주 후류에 존재하는 큰 규모(large-scale) 유동의 와유출주파수를 분석하기 위하여 I-형 열선 프로우브로부터 나오는 속도신호를 스펙트럼 분석하였다. 풍동 내부에 설치된 원주 및 열선풍속계의 개략도와 좌표계를 Fig. 1에 나타내었는데, 주유동 방향을 x축, 주유동에 수직인 방향을 y축으로 하였고 원주 폭 방향을 z축으로 정의하였다.

열선유속계로 측정된 속도는 Maskell⁽⁶⁾의 막힘비 결과를 참조하여 보정하였고, 높은 주파수의 회전진동에 기인해 직접 측정하기 어려운 항력의 경우 Tokumaru⁽²⁾의 결과를 이용하여 항력계수(C_D)를 계산하고 정지상태의 원주가 가지는 항력계수(C_{D0})값으로 정규화하였다.

2.3 유동가시화

주기적으로 회전하는 원주 주위 유동의 정성적인 특성을 조사하기 위하여 연선법(smoke-wire method)을 사용하여 원주 주위 유동을 가시화하였다. 직경 0.1mm인 니크롬 와이어에 Safex oil을 바르고 여기에 DC 전원공급기로 전기를 공급하면 연기가 발생한다. 측정하고자 하는 유동단면을 Nd:Yag 레이저로 만든 평면광(laser sheet)으로 조사하여 순간적인 유동영상을 디지털 카메라(Nikon D-100)로 촬영하였다. 레이저와 DC 전원공급기를 동기시켜 깨끗한 유동영상을 얻도록 하였다. 레이저의 노출시간은 약 7ns이며, 에너지 레벨은 펄스당 55mJ이다.

3. 결과 및 토의

3.1 스펙트럼 분석

주기적인 와유출 주파수는 원주 후방에서 측정된 파워 스펙트럼 밀도(PSD, power spectral density) 분포에서 정점(peak) 위치를 파악함으로써 알 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 가진주파수(f_g)와 와유출주파수(f_s)가 같아지는 공진현상은 $F_R=1.0$ 의 경우 모든 각변위(θ_A)에서 발생하고, 공진영역의 범위가 각변위(θ_A)에 따라 변화한다. 각변위가 증가할수록 공진영역이 커지는 연구결과는 Mahfouz⁽³⁾의 계산결과와 잘 일치한다. 그러나 공진영역 범위의 증가양상은 선형형태가 아니라 $F_R=1.0$ 을 기준으로 지그재그 형태로 변한다는 사실을 알 수 있다.

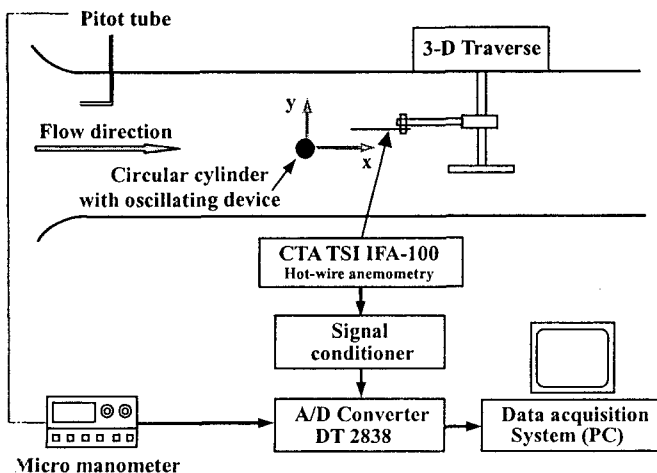


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up.

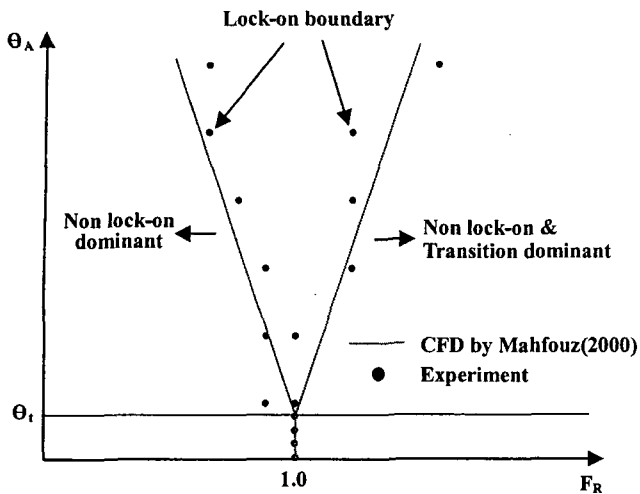


Fig. 2 Variation of lock-on range with respect to angular amplitude

Mahfouz⁽³⁾에 따르면 $F_R=1.0$ 에서만 공진현상이 발생하기 시작하는 각변위를 나타내는 임계 각변위(threshold amplitude, θ_t)가 존재한다는 사실은 이미 알려졌지만 아직까지 정확한 값이 밝혀진적은 없다고 한다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 각변위가 $\theta_t=8^\circ$ 보다 작은 조건에서 임계 각변위를 정확히 찾을 수 있었다.

또한 주파수 분석결과 왼쪽 공진영역(lock-on boundary) 외부에서는 비공진영역(non lock-on regime)이 주로 관찰되고, 오른쪽 공진영역 외부에서는 천이영역(transition regime)과 비공진영역 둘다 관찰되었다.

3.2 후류 유동특성

Fig. 3은 $x/D=4$ 하류 위치 단면에서 자유흐름속도 $U_\infty=2\text{m/s}$ ($Re_D=4140$)인 조건에서 측정한 원주 후류의 주유동 방향 평균속도 및 난류강도 분포를 나타낸 것이다. 여기서 수직방향 거리를 나타내는 세로축은 원주직경(D)으로 무차원시켰다. 점성의 영향으로 주유동방향 속도성분의 감쇄는 $y/D=\pm 1.3$ 이내의 원주 후류 중심에서 주로 나타나며, 후류 중심축($y=0$)에서 가장 큰 값을 가진다. 그리고 각변위(θ_A) 변화에 따라 평균속도와 난류강도가 후류 중앙부위에서 큰 차이를 보여주고 있다. 이것은 각변위 변화에 의해서 공진영역의 유동구조가 크게 변화하고 있음을 나타낸다.

정지상태 원주(0°)의 경우와 비교하여 후류 중심영역에서 각변위 10° 조건에서 주유동방향 속도 감쇄는 약 30%정도 감소한다. 각변위가 증가할수록 속도감쇄는 증가하여 정지된 원주의 경우에 비해 보다 큰 속도감쇄를 보이게 된다. 그러나 각변위가 보다 더 증가하게 되면 속도감쇄는 다시 감소하기 시작하는데 $\theta_A=60^\circ$ 의 경우 매우 큰 감소를 보여주고 있다. 이것으로부터 같은 공진영역이라도 각변위에 따라 다른 유동특성이 나타남을 알

수 있다.

난류강도 분포는 속도구배가 최대인 지정 부근에서 최대값을 가지는 전형적인 이중 정점(double peak)형태를 보여주고 있다. 각변위가 증가할수록 난류강도 역시 증가하며, 모든 각변위에서 정지된 원주의 경우보다 큰 난류강도 값을 가지는 것으로 나타났다.

각변위 60° 조건에서 난류강도 분포는 이중정점의 형태를 보이고 있으나 평균속도 분포는 원주 후류 중심축을 기준하여 대칭적인 구조가 아니라 한쪽으로 치우쳐진 분포형태를 가진다. 이것은 큰 각변위로 인해서 후류의 유동구조가 불안정해진 결과라고 생각되어진다.

Fig. 4는 I-형 열선 프로우브를 원주 후류의 중심축을 따라 이동시키면서 측정한 난류강도 분포를 보여주고 있다. 정지상태 원주(0°)의 경우 유동이 하류로 나아감에 따라 난류강도는 증가하다가 약 $x/D=2.85$ 위치에서 정점에 도달한 후 단조롭게 감소하고 있다. 각변위가 증가함에 따라 정점의 위

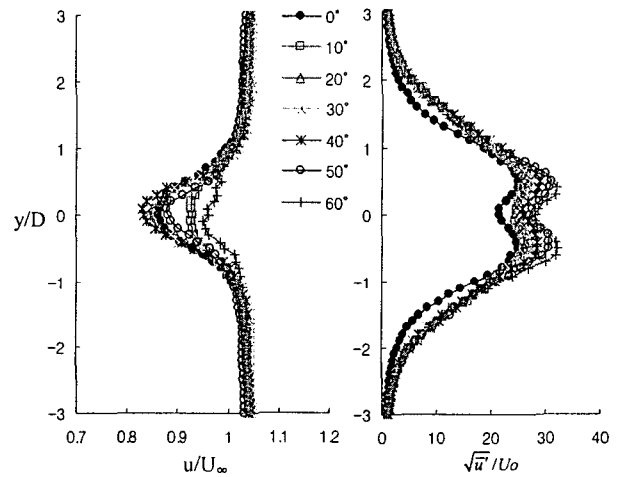


Fig. 3 Streamwise mean velocity and turbulence intensity profiles at $x/D=4$ for $Re=4.14 \times 10^3$, $\pi/15 \leq \theta_A \leq \pi/3$, $F_R=1.0$

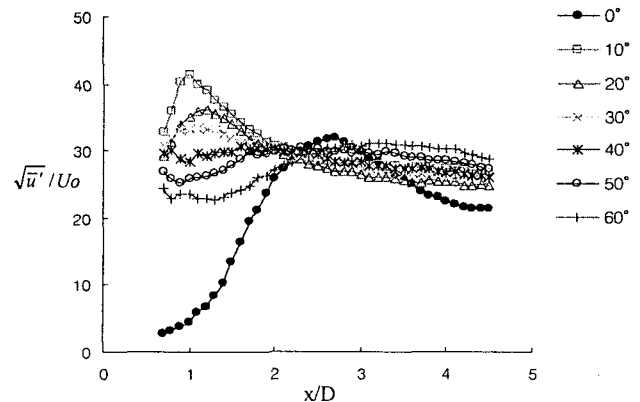


Fig. 4 Turbulence intensity distributions along the wake center line

치는 원주 방향으로 이동하며 각변위가 $\theta_A=40^\circ$ 보다 크게되면 정점이 관찰되지 않고 거의 일정한 값을 가지는 경향을 보여준다. 그리고 $2 \leq x/D \leq 3$ 의 근접후류 구간을 제외한 영역에서 가진이 있는 경우에 큰 난류강도값을 가진다. 이것으로부터 정지된 원주에 비해 공진영역에서는 각변위가 증가할수록 와형성영역의 길이가 감소하며, 원주 후류의 속도변동성분을 증가시키는 역할을 한다는 사실을 알 수 있다.

3.3 항력

Fig. 5는 $F_R=1.0$ 의 조건에서 각변위 변화에 따른 항력계수의 변화를 보여주고 있다. 이 결과로부터 공진영역에서도 $\theta_A=30^\circ$ 를 전·후로하여 각변위를 변화시킴으로써 선택적으로 항력감소의 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 각변위 $\theta_A=60^\circ$ 에서 약 43.7%의 큰 항력감소 효과가 나타났다. Tokumaru⁽²⁾역시 공진영역에서 큰 항력감소 효과를

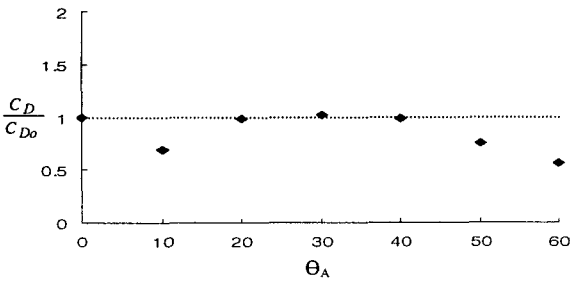


Fig. 5 Variation of drag coefficient with respect to θ_A

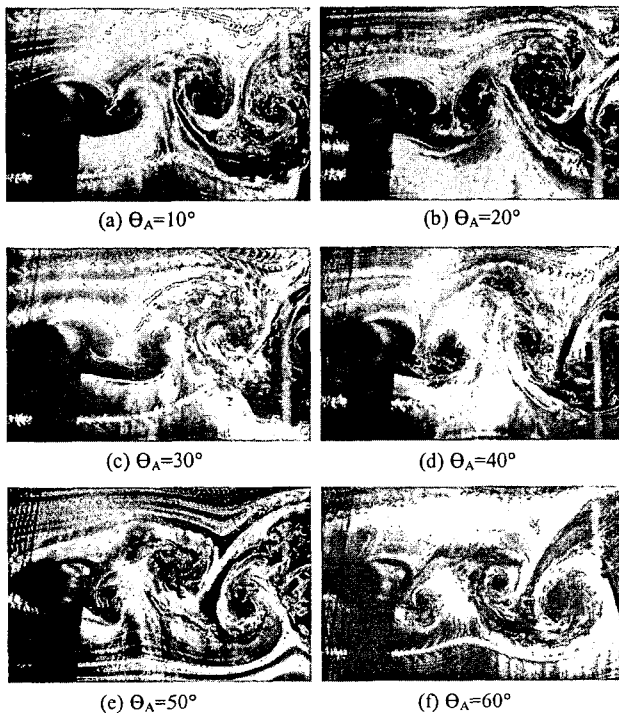


Fig. 6 Visualized wake flow using a smoke-wire method in the streamwise vertical plane.

얻을 수 있음을 밝혔다.

3.4 유동가시화

Fig. 6은 원주 후류유동을 가시화한 결과를 보여주고 있다. Fig. 4 결과로부터 유추할 수 있듯이 와형성영역이 크게 줄어들음을 확인할 수 있고, 각변위가 증가함에 따라 와형성영역 내부로 유입되는 연선이 많아지며 원주 가까이에서 큰 와구조(vortex structure)가 발생함을 관찰할 수 있었다. 특히, 큰 각변위($50^\circ, 60^\circ$)에서는 원주 표면을 따라서 유입된 연선이 와형성영역 내부에서 작은 크기의 와구조를 형성함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 각변위 변화가 공진상태의 원주 후류유동에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 각변위의 증가는 공진영역의 범위를 증가시키고, 와형성영역 길이를 감소시키며, 와형성영역 내부로의 유체 유입을 증가시켜 원주표면 근처에서 작은 크기의 와구조를 형성하였다. 그리고 $F_R=1.0$ 에서만 공진이 일어나기 시작하는 임계 각변위($\theta_i=8^\circ$)를 실험적으로 확인하였으며, 각변위의 변화는 후류유동을 변화시켜 특정조건에서 항력감소의 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Williamson, C.H.K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 477-539.
- Tokumaru, P.T. and Dimotakis, P.E., 1991 "Rotary Oscillation Control of a Cylinder Wake," *J. Fluid Mech.*, Vol. 224, pp. 77-90.
- Mahfouz, F.M. and Badr. H. M., 2000, "Flow Structure in the Wake of a Rotationally Oscillating Cylinder," *Transactions of the ASME*, Vol. 122, pp. 290-301.
- Stansby, P.K., 1974, "The Effects of End Plates on the Base Pressure Coefficient of a Circular Cylinder," *Aeronautical Journal*, Vol. 78, pp. 36-37.
- Graham, J.M.R., 1969, "The Effect of End-Plates on the Two-Dimensionality of a Vortex Wake," *Aero. Quart.*, Vol. 20, August, pp. 237-247.
- Maskell, E.C.A., 1965, "Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel," *Aero. Res. Coun. R&M 3400*.