

< 논문 >

주기적으로 회전진동하는 원주 후류의 유동구조에 관한 실험적 연구

이 정 업* · 이 상 준†

(2005년 8월 16일 접수, 2006년 3월 4일 심사완료)

Experimental Study on Flow Structure of Wake Behind a Rotationally Oscillating Circular Cylinder

Jung Yeop Lee and Sang Joon Lee

Key Words : Lock-on Regime(공진영역), Forcing Frequency(가진 주파수), Drag Reduction(항력감소), Cylinder Wake(원주 후류), Rotational Oscillation(회전진동), Flow Control(유동제어)

Abstract

The flow around a circular cylinder which oscillates rotationally with a relatively high forcing frequency has been investigated experimentally using flow visualization and hot-wire measurements. Dominant parameters are Reynolds number (Re), oscillation amplitude (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 $Re=4.14 \times 10^3$, $\theta_A=\pi/6$, and $0 \leq F_R \leq 2$. The effect of frequency ratio F_R on the flow structure of wake was evaluated by measuring wake velocity profile and spectral analysis of hot-wire signal. Depending on the frequency ratio F_R , the cylinder wake has 5 different flow regimes. The vortex formation length and vortex shedding frequency are changed significantly before and after the lock-on regime. The drag coefficient was reduced under the condition of $F_R < 1.0$ and the maximum drag reduction is about 33% at $F_R=0.8$. However, the drag is increased as F_R increases beyond $F_R=1.0$. This active flow control method can be effective in aerodynamic applications, if the forcing parameters are selected optimally.

기호설명

- C_D : 항력계수
- d : 원주 직경
- f_f : 가진 주파수
- f_n : 자연발생 와유출 주파수
- f_s : 와유출 주파수
- f_{vc} : 와병합 주파수
- F_R : 주파수 비($=f_f/f_n$)
- Re : 레이놀즈 수($=U_\infty d/\nu$)
- S_f : 원주의 무차원 회전주파수($=f_f d/U_\infty$)
- u : 주유동 방향 평균속도

- u' : 주유동 방향 변동속도성분
- U_∞ : 자유흐름속도
- ν : 동점성계수
- θ_A : 각진폭

1. 서론

원주 및 뿔뚱한 물체(bluff body) 주위 유동은 그동안 많은 관심을 받아왔다.⁽¹⁻⁵⁾ 원주는 뿔뚱한 물체의 대표적 형상으로써, 다양한 분야에 응용되고 있다. 이에 따라 원주 주위 유동의 제어에 대한 연구가 오래 전부터 이루어져 왔다. 특히 물체에 걸리는 저항을 저감시키고자 하는 유동제어 연구는 여러 연구자들에게 많은 관심을 받아왔으며, 공학적인 관점에서 큰 의미가 있다. 유동제어를 통해 항력감소 효과를 얻기 위해서는 그 물체 주

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과
 † 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : sjlee@postech.ac.kr
 TEL : (054)279-2169 FAX : (054)279-3199

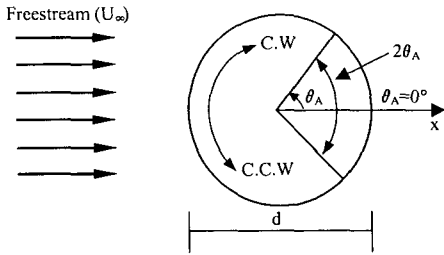


Fig. 1 Schematics of rotationally oscillating motion of a circular cylinder

위 유동을 정확하게 예측하고 효과적으로 제어할 수 있어야 한다. 최근 들어 난류전단유동 내에 존재하는 응집구조(coherent structure)를 제어하는 방법과,^(6,7) 물체 표면에 미세한 표면 거칠기를 생성시켜 유체저항을 감소시키고자 하는 연구들이 시도되고 있다.⁽⁸⁾

능동제어기법의 일종인 주기적인 회전진동을 가하는 방법⁽⁹⁻¹⁶⁾은 수동제어기법과는 달리 외부로부터 공급되는 에너지를 이용하여 물체에 일정한 형태의 운동을 전달함으로써 물체 주위의 유동을 제어하게 된다. 이때 원주에 가해지는 가진(forcing) 조건에 따라서 원주 후류는 공진영역(lock-on regime), 천이영역(transition regime), 비공진영역(non lock-on regime)으로 구분되는 유동특성을 보이게 된다. 각각의 영역에서 와유출 주파수(f_n), 와형성 영역의 길이, 평균속도 및 응집구조가 다르게 나타나며, 이러한 유동구조의 변화를 이용하여 항력 감소 효과를 얻을 수 있다. 원주의 회전진동운동에 대한 개략도를 Fig. 1에 표시하였다.

Taneda⁽⁹⁾는 $30 \leq Re \leq 300$, $0 \leq S_r (=fd/U_\infty) \leq 55$ 의 범위에서 주기적인 회전진동을 가하면 매우 높은 회전속도와 주파수 조건에서 원주 후방의 박리기포가 사라지며, 이때의 가진 주파수는 각진폭(θ_A)의 크기에 반비례함을 유동가시화를 통해 관찰하였다.

Shiels와 Leonard⁽¹⁴⁾는 레이놀즈 수 $150 \leq Re \leq 15,000$ 범위에서 회전가진에 따른 항력감소 효과를 연구하였는데, 경계층에서 발생하는 다중 와도(multipole vorticity) 구조에 의해 박리가 지연되어 항력이 감소하며 높은 레이놀즈 수($Re \geq 3,000$) 조건에서 회전진동의 영향이 보다 효과적으로 나타남을 밝혔다. Filler 등⁽¹⁵⁾은 레이놀즈 수 $250 \leq Re \leq 1200$ 조건에서 작은 각진폭으로 회전진동하는 원주 주위 박리 전단층의 응답특성을 연구하였는데, 공진 조건에서 큰 속도변동이 발생하였다.

기존의 연구들은 대부분 낮은 유속과 낮은 가진 주파수 조건에서 수행되었다. 가진 주파수가 유동에 미치는 영향을 관찰하기 위해서는 높은 가진 주

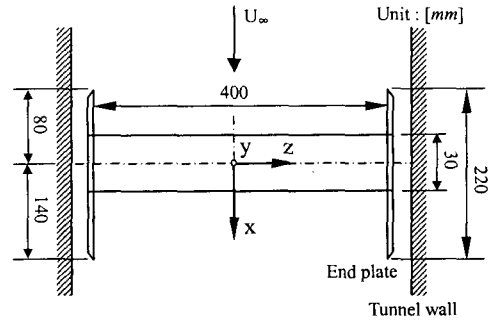


Fig. 2 Schematic diagram of test cylinder and coordinate system (unit : mm)

파수 조건이 보다 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 가진 주파수 조건하에서 유동특성 변화를 살펴보기 위해 원주를 높은 주파수로 회전진동시킬 수 있는 가진장치를 제작하여 가진 조건에 따른 항력의 변화를 해석하고, 원주 후류의 유동구조 및 난류특성 변화를 실험적으로 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 구성

2.1 실험 모델과 실험조건

본 실험은 시험부 크기가 $6.75^L \times 0.72^W \times 0.6^H m^3$ 이고 유속 $10m/s$ 에서 난류강도가 0.08% 이하인 폐쇄형 저난류 아음속 풍동에서 수행하였다.

원주 모델은 직경이 $d=30mm$ 이며, 종횡비가 $l/d=13.3(l=400mm)$ 인 아크릴 파이프를 만들었다. 자유흐름속도는 $U_\infty=2m/s$ 이고, 원주 직경에 기준한 레이놀즈 수는 약 $4,140$ 이다. 원주 모델의 형상 및 좌표계를 Fig. 2에 나타내었는데, 주유동 방향을 x축, 주유동에 수직인 방향을 y축, 원주 폭방향을 z축으로 정의하였다.

풍동 시험부 내부에 설치한 원주 모델을 지지하고 풍동 벽면을 따라 발달하는 경계층 효과를 최소화하기 위해 원주 모델의 양쪽 끝부분에 날카로운 모서리를 가진 사각 끝판(end-plate)을 설치하였다.⁽¹⁷⁾ 원주와 끝판 설치에 기인한 막힘비(blockage ratio)는 약 4.8% 정도이다.

본 실험조건에서 자연발생 와유출 주파수(f_n)는 대략 $15Hz$ 인데, 막힘 효과(blockage effect)를 고려한 자유흐름속도에 기초한 Strouhal 수는 $Sr=0.214$ 이다. 가진 주파수(f_f)와 자연발생 와유출 주파수(f_n)의 비($F_R=f_f/f_n$)를 나타내는 주파수 비(frequency ratio)가 최대 $F_R=2.0$ 이상이 되도록 하기 위해 각진폭 히스테리시스 없이 $30Hz$ 이상의 높은 가진 주파수를 구현할 수 있는 가진장치⁽¹⁶⁾를 제작하여 원주 모델과 연결하였다. 실험시 원주의 각진폭(θ_A)은 30° 로 고정시켰다.

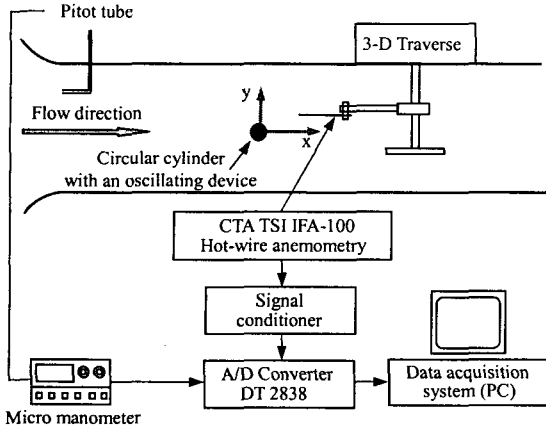


Fig. 3 Wind tunnel test section and wake measurement system

2.2 후류 계측 및 항력계산

원주 후류의 속도분포와 와유출 주파수 측정에는 정온형 열선풍속계(TSI IFA-100)와 I-형 열선 프로우브(DANTEC 55P11)를 사용하였다. 열선 프로우브로부터 나오는 전압신호를 12bit A/D 변환기(DT2838)를 거쳐 컴퓨터에 디지털 값으로 입력한 후, 통계 처리하여 원하는 속도정보를 얻었다. 풍동 내부에 설치된 원주 및 속도측정 시스템의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 후류의 평균속도 및 난류강도 분포는 원주 하류 $x/d=4$ 단면의 $-3 \leq y/d \leq 3$ 구간에서 $0.1d$ 간격으로 측정하였다. 각각의 측정위치에서 초당 4,000개의 비율로 샘플링하여 16,384개의 속도 데이터를 얻었는데, 노이즈 제거를 위해 속도신호를 800Hz 의 저역필터를 거치게 하였다.

원주 후류에서 발생하는 주기적인 와유출에 기인한 응집구조의 와유출 주파수를 분석하기 위하여 근접 후류($x/d=2, y/d=0.5$), 원점 후류($x/d=10, y/d=1.0$) 위치에서 I-형 열선 프로우브로부터 나오는 속도신호를 주파수 분석하였다.

원주가 주기적인 회전진동을 하기 때문에 항력을 직접 측정하기 어려워 원주 후류에서 측정된 속도분포로부터 Dimotakis⁽¹⁸⁾가 제안한 다음과 같은 공식을 이용하여 항력계수(C_D)를 계산하였다.

$$C_D = \frac{2h/d}{(1-\delta^*/h)^2} \left[\int_0^1 \frac{u}{U_o} \left(1 - \frac{u}{U_o} \right) d\eta - \frac{1}{2} \left(\frac{\delta^*}{h} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, h, η, U_o, δ^* 는 각각 측정 영역의 수직거리, 무차원 수직위치(y/h), 후류 바깥쪽 자유흐름속도, 후류의 변위두께(displacement thickness)를 나타낸다. 속도분포를 측정된 근접 후류의 압력과 상류의 압

력차이에 의한 영향도 식 (1)은 고려하고 있다. 계산된 항력계수는 회전진동하지 않는 정지상태의 원주가 가지는 항력계수(C_{D0}) 값과 비교하여 나타내었다.

2.3 유동가시화

주기적으로 회전하는 원주 주위 흐름의 정성적인 유동특성을 조사하기 위하여 연선법(smoke-wire method)을 사용하여 원주 주위 유동을 가시화하였다. 직경 0.1mm 인 니크롬 와이어에 Safex oil을 바르고, DC 전원공급기로 전기를 공급하면 연선이 발생한다. 측정하고자 하는 유동단면을 Nd:Yag 레이저로 만든 평면광(laser sheet)으로 조사하여 순간적인 정지영상을 디지털 카메라(Nikon D-100)로 촬영하였다. 레이저와 DC 전원공급기를 동기시켜 카메라 노출시간 사이에 광원을 조사함으로써 깨끗한 유동영상을 얻었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주파수 특성

원주 후방 $x/d=2, 10, y/d=0.5, 1$ 위치에서 측정된 속도신호의 파워 스펙트럼 밀도(PSD, Power Spectral Density) 분포를 Fig. 4에 나타내었다. PSD 분포에서 정점(peak)은 주기적으로 유출되는 와구조가 존재함을 나타내는데, 회전진동에 따른 와유출 주파수(f_s) 변화로 인해 후류는 5가지의 다른 유동모드를 가지며, 공진영역(lock-on regime)을 전후로 하여 유동특성에 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 4(a), (b)를 보면 주파수 비 $F_R \leq 0.6$ 조건에서는 와유출 주파수가 지배적으로 나타나는 저 주파수(low-frequency) 비공진영역으로 분류할 수 있다. 주파수 비가 $F_R=0.4$ 보다 커지게 되면 가진 주파수의 영향이 나타나기 시작하여 PSD 분포에 가진 주파수가 바로 관찰된다. $F_R=0.8$ 의 경우[Fig. 4(c)] 가진 주파수에 의한 정점이 와유출 주파수와 함께 크게 나타나는 저 주파수 천이영역으로 분류할 수 있다.

Fig. 4(d), (e)는 와유출 주파수가 가진 주파수와 일치하는 조건에서 하나의 정점이 관찰되는 공진 영역에 해당하며, 원주의 회전진동 운동과 원주 주위 유체 흐름이 동기화(synchronization) 되었음을 나타낸다.⁽¹⁶⁾

Fig. 4(f)의 $F_R=1.6$ 조건에서는 또 다시 와유출 주파수와 가진 주파수에서 정점이 나타나고 있다. 비록 자연발생 와유출 주파수(f_n) 혹은 이와 유사

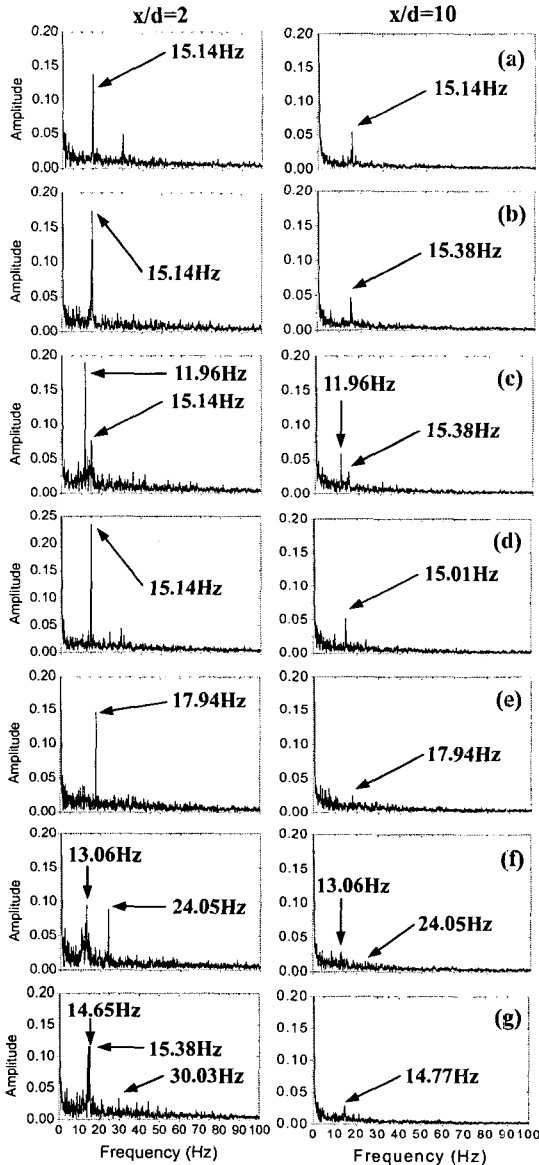


Fig. 4 Comparison of PSD distributions at $\theta_A=30^\circ$. (a) $F_R=0.0$, (b) $F_R=0.4$, (c) $F_R=0.8$, (d) $F_R=1.0$, (e) $F_R=1.2$, (f) $F_R=1.6$, (g) $F_R=2.0$

한 주파수대역에서 정점이 관찰되는 않지만, 이 영역에서 관찰되는 고유의 와유출 주파수와 가진 주파수가 함께 나타나기 때문에 이 영역을 고 주파수(high-frequency) 천이영역으로 분류할 수 있다. 고 주파수 천이영역의 초기에는 공진영역에서의 동기화가 와해되면서 낮은 와유출 주파수가 관찰되고 있다. 고 주파수 천이영역에 대한 보다 자세한 주파수 분석결과를 Fig. 5에 나타내었다.

주파수 비(F_R)가 2.0보다 큰 경우는 고 주파수 비공진영역으로 분류된다. Fig. 4(g)에서 볼 수 있듯

Table 1 Classification of flow regime with respect to F_R

Frequency Ratio(F_R)	Flow Regime
$0 \leq F_R \leq 0.6$	Low-freq. non-lock-on regime
$0.6 < F_R < 0.9$	Low-freq. transition regime
$0.9 \leq F_R \leq 1.2$	Lock-on regime
$1.2 < F_R < 2.0$	High-freq. transition regime
$F_R \geq 2.0$	High-freq. non-lock-on regime

이 $F_R=2.0$ 의 경우 근접 후류($x/d=2$)와 원점 후류($x/d=10$) 위치에서 구한 PSD 분포에 큰 차이가 있다. 이것은 가진에 따른 와 병합(vortex coalescence) 현상에 기인하는 것으로 판단되어진다. 근접 후류($x/d=2$)에서는 3개의 정점이 나타나는데, 첫째는 고 주파수 천이영역에서부터 회복되는 와유출 주파수(f_s), 다음은 와 병합에 의한 주파수(f_{vc}), 셋째는 가진 주파수(f)에 해당하는데 다른 2가지 주파수에 비해 정점의 크기가 매우 작다. 반면에 원점 후류 위치에서는 가진에 의한 정점은 보이지 않고 하나의 정점만 존재하며, 자연발생 와유출 주파수(f_n)와 유사한 주파수대역에서 와유출이 발생하였다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 $F_R=2.0$ 을 고 주파수 비공진영역으로 분류하였다.

높은 F_R 조건에서 발생하는 와 병합 현상은 Choi 등⁽¹¹⁾ 및 Ongoren과 Rockwell⁽¹⁹⁾의 연구에서도 관찰된 바가 있다. 이상의 주파수 분석을 통해 주파수 비(F_R)에 따른 유동패턴 변화를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

Fig. 5는 고 주파수 천이영역에서의 와유출 특성을 보여주고 있다. 고 주파수 천이영역의 초기에는 공진영역에서의 동기화가 와해되면서 자연발생 와유출 주파수보다 낮은 와유출 주파수(f_s)가 관찰되었다. 그리고 F_R 이 증가함에 따라 와유출 주파수도 따라서 증가하며 결국 자연발생 와유출 주파수로 수렴하게 된다. 이러한 와유출 특성의 변화는 다음과 같은 비 동기화(non-synchronization)에 기인하는 것으로 생각되어진다. 완벽한 동기가 되기 위해서는 주파수와 위상(phase)이 정확히 동기되어야 한다. 이와 관련하여 먼저, 공진영역에서 천이영역으로 가면서 원주 주위의 유체는 원주의 빠른 회전진동에 크게 영향을 받게 된다. 그리고 원주 주위를 흘러가는 유체 흐름과 원주 자체의 회전진동은 더 이상 동기된 모드를 유지하지 못한다. 이것은 서로 다른 2개의 주파수에서 정점(peak)이 관찰되는 Fig. 5로부터 확인할 수 있다.

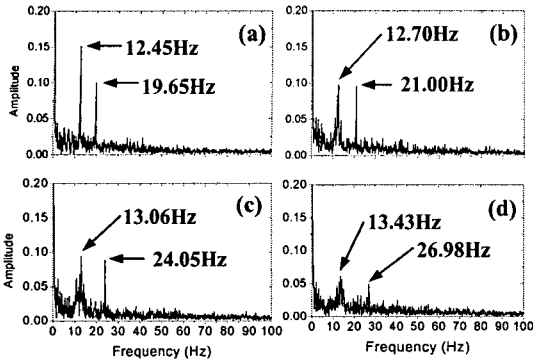


Fig. 5 Variation of vortex shedding frequency in the high frequency transition regime at $x/d=2$.
(a) $F_R=1.3$, (b) $F_R=1.4$, (c) $F_R=1.6$, (d) $F_R=1.8$

이때 유체는 자체의 운동량과 회전진동하는 원주로부터 전달받은 운동량 두 가지를 가지게 되는데, 회전진동하는 원주로부터 유동 자체의 운동량보다 큰 운동량을 전달받게 된다. 이에 따라 회전진동에 의한 와유출 모드가 지배적으로 나타나게 된다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 더 이상 동기된 상태를 유지하지 못하고 주파수 비가 증가할수록 유체 유동과 원주의 회전진동 사이의 상관관계는 점차 약해지게 된다. 또한 유체 유동의 많은 부분이 원주의 회전진동에 의한 와유출 모드로 집중되어 있기 때문에, 원래의 자연발생 와유출 주파수(f_n) 혹은 이와 유사한 주파수로 와유출이 발생되지 못하고 이보다 낮은 주파수로 와유출이 발생되어 Fig. 5와 같은 결과가 나타난 것으로 보인다. 주파수 비(F_R)가 증가할수록 이와 같은 비 동기화 현상은 더욱 커지게 되고 유체 유동과 원주의 회전진동 사이의 상관관계는 더 약해져서 와유출 주파수가 자연발생 와유출 주파수로 수렴하게 되는 것으로 생각 되어진다.

다음으로, 원주의 회전진동과 와유출의 위상이 같은 공진영역을 지나 천이영역으로 나아가면서 원주의 회전진동과 와유출 사이에는 위상차가 발생하게 되고, 기존의 연구에서 발표된 것과 같은 180° 의 위상차(π -change)가 발생하게 된다.^(12,15) 이 같은 위상차의 발생도 유체 유동과 원주의 회전진동 사이의 상관관계가 약화되어 나타나는 것으로 생각 되어진다.

이와 같은 비 동기화의 영향으로 유체 유동과 원주의 회전진동 사이의 상관관계가 감소하여 자연발생 와유출 주파수보다 낮은 주파수에서 와유출이 발생하고, 고 주파수 천이영역을 지나면서 (F_R 증가) 점차 자연발생 와유출 주파수로 수렴하는 것으로 판단 되어진다.

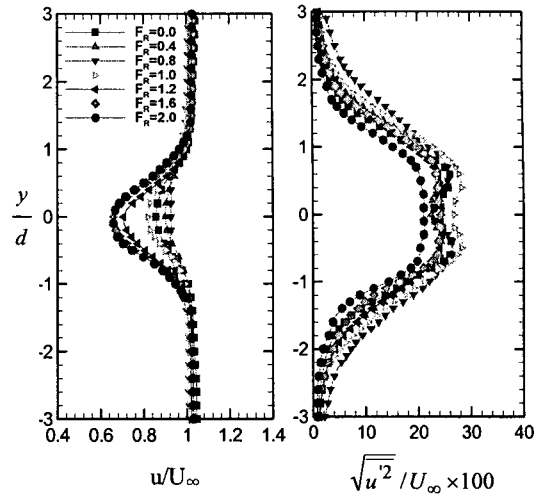


Fig. 6 Streamwise mean velocity and turbulence intensity profiles at $x/d=4$ for $Re=4.14 \times 10^3$, $0 \leq F_R \leq 2.0$ and $\theta_A=30^\circ$

3.2 후류 유동특성

Fig. 6은 원주 하류 $x/d=4$ 위치 단면에서 자유흐름 속도 $U_\infty=2m/s$ ($Re=4,140$), 각진폭 $\theta_A=30^\circ$ 조건에서 F_R 을 변화시키면서 측정된 원주 후류의 주유동 방향 평균속도 및 난류강도 분포를 나타낸 것이다. 평균속도는 Maskell⁽²⁰⁾의 결과를 이용하여 막힘 효과를 보정하였다.

공진영역 이전 F_R 조건에서는 F_R 이 증가함에 따라 후류 중심영역에서 주유동 방향 속도감쇄가 줄어들면서 평균속도가 점차 균일한 분포형태로 변화하고, 난류강도 분포는 평균속도 구배가 최대인 지점 부근에서 최대값을 가지는 이중 정점(double peak)형태를 갖는다. 여기서 속도감쇄가 줄어든 것은 가진의 영향으로 후류 중심영역에서의 손실을 회복하기에 충분한 운동량이 와형성 영역내부로 전달되었다는 것을 의미한다. 특히, $F_R=0.8$ 조건에서 가장 큰 속도회복을 보여주는데, 평균속도는 후류 중심영역에서 균일한 분포형태를 가지며, 후류 폭의 증가로 인해 난류강도는 자유흐름영역에서 증가하고 있다.

F_R 이 더욱 증가하여 공진영역을 지나면 평균속도는 다시 가진이 없는 경우와 유사한 분포형태를 가지게 되며, 속도감쇄는 F_R 증가에 따라서 커지는 것으로 나타났다. 후류 폭 역시 F_R 이 증가함에 따라 커지게 되며, 난류강도 분포도 이중 정점의 형태에서 균일한 분포형태로 바뀌게 된다. 공진영역 이후 F_R 조건에서 나타나는 이러한 결과는 높은 주파수의 가진에 의한 박리축진에 기인한 것으로 보인다. 회전진동은 박리 전단층의 불안정성(instability)을 증대시켜 와유출 주파수를 변화시키고 와 병합을 유발하

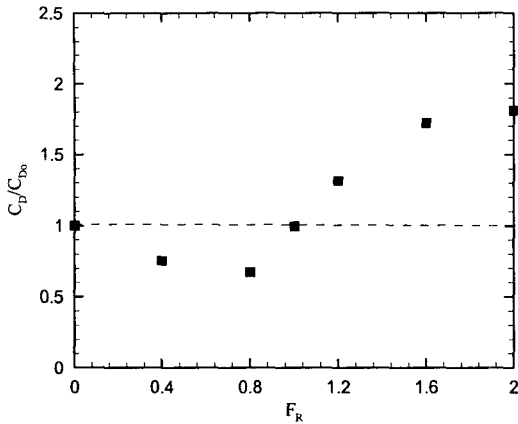


Fig. 7 Variation of drag coefficient ratio

게 된다.⁽¹⁹⁾ 이때 높은 주파수의 회전진동은 원주 표면에서 박리를 촉진시켜 자유흐름으로부터의 유체 유입이 감소하게 된다. 이에 따라 후류의 주유동 방향 속도성분은 보다 감소하게 되고, 후류의 속도변동성분은 균일해지게 된다. 뒤에서 설명할 Fig. 9의 가시화 결과에서도 이를 확인할 수 있다.

3.3 항력

Fig. 7은 후류에서 측정된 평균속도 분포를 식 (1)에 적용하여 계산한 항력계수의 비(C_D/C_{D0})를 나타낸다. 항력계수 결과를 보면 공진영역 이전에는 항력감소가 발생하고, 공진영역 이후에는 오히려 항력이 증가함을 알 수 있다. 저 주파수 비공진영역인 $F_R=0.4$ 에서는 항력이 약 24.75% 감소하는 효과를 보이고, 저 주파수 천이영역인 $F_R=0.8$ 조건에서는 약 32.82%의 최대 항력감소 효과를 가지는 것으로 나타났다. $F_R \geq 1.0$ 의 주파수 비 조건에서 항력계수는 점차 증가하기 시작하여 고 주파수 비공진영역인 $F_R=2.0$ 에서 약 80.90%의 항력증가 효과를 보였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 공진영역 이전의 가진조건에서는 자유흐름으로부터 충분한 운동량이 전달되어 속도감쇄가 줄어들어 항력이 감소하고, 공진영역 이후의 가진조건에서는 박리가 촉진되어 자유흐름으로부터 와형성 영역으로 전달되는 운동량이 속도손실을 회복하기에 불충분하여 속도감쇄가 증가하고 이에 따라 항력이 증가하는 것으로 판단되어진다. 이를 통해 공진영역 이전의 영역에 해당하는 조건($F_R < 1.0$)으로 원주를 회전진동시켜야 항력감소 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.4 와형성 영역

Fig. 8은 원주 상하부에서 교대로 유출되는 주기적인 와가 원주 후류 중심부에 미치는 영향을 분

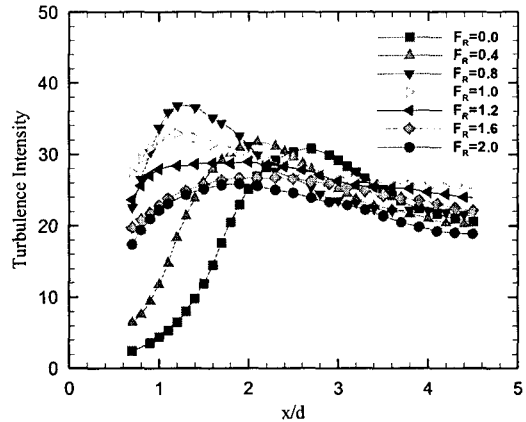


Fig. 8 Mean streamwise turbulence intensity distributions measured along the wake centerline ($y/d=0, 0.7 \leq x/d \leq 4.5$)

Table 2 Length of vortex formation region (x/d)

F_R	0.0	0.4	0.8	1.0	1.2	1.6	2.0
x/d	2.85	2.06	1.31	1.08	•	•	•

석하기 위하여 원주 후류의 중심축을 따라 측정된 주유동 방향 난류강도 분포를 보여주고 있다.

$0.0 \leq F_R \leq 1.0$ 조건에서는 유동이 하류로 나아감에 따라 난류강도는 증가하다가 하류의 특정 위치에서 정점에 도달한 후 단조롭게 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그리고 난류강도 분포에서 정점 위치는 F_R 이 증가함에 따라 원주쪽으로 이동하고 있다. 이것은 가진에 의해 박리 전단층의 와도(vorticity)가 증가하여 원주 배면 가까이에서 와가 유출되는 것을 나타내며,^(10,14,16) 유출된 와의 영향이 후류 중심축까지 미치는 것을 의미한다.

Shiels와 Leonard⁽¹⁴⁾에 의하면 항력감소 효과는 원주 표면의 다중 와도 구조에 의해 박리가 지연되어 발생한다고 한다. 공진영역 이전 F_R 조건에서 나타나는 항력감소 효과와 유출된 와의 영향이 후류 중심축까지 강하게 나타나는 것은 그들의 결과와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각 되어진다. $F_R=1.2$ 조건에서는 원주에 가까운 위치에서 와유출이 발생하여 난류강도 분포에서 정점이 관찰되지 않는다. 그러나 공진영역 이후 가진 조건에서는 높은 가진 주파수에 의해 박리가 촉진되어 유동구조가 변하는 것에 기인해 원주 상하에서 유출되는 와의 영향이 후류 중심축까지 미치지 못하고 난류강도 분포는 전체 측정구간에서 거의 일정한

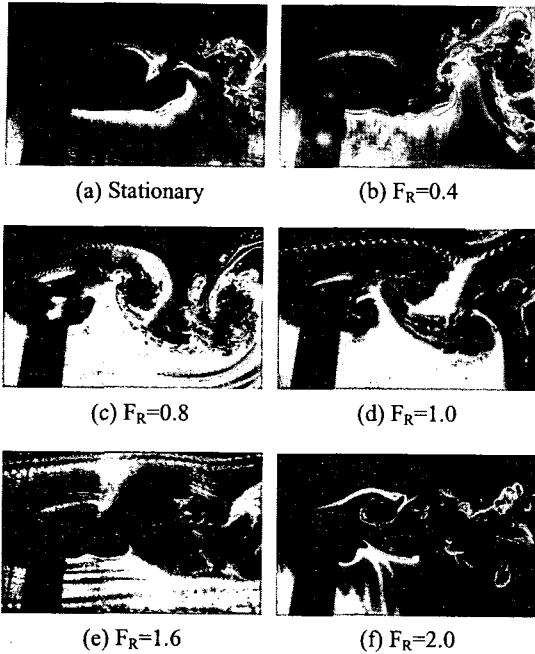


Fig. 9 Visualized flow of wake using a smoke-wire method in the vertical center plane

값을 갖는 것으로 나타났다. 원주에 근접한 $x/d < 2.0$ 구간을 살펴보면, 가진은 근접 후류에 크게 영향을 미치며, 난류 섭동을 크게 함을 알 수 있다.⁽¹⁶⁾

6차 다항식을 이용하여 난류강도 분포로부터 정점의 위치를 구하고 이를 와형성 영역의 길이로 정의하였다. 주파수 비 F_R 의 변화에 따른 와형성 영역의 길이 변화를 Table 2에 정리하여 나타내었다. 와형성 영역의 크기는 F_R 증가에 따라 감소하여 공진영역에서 가장 작은 값을 가진다. 이것은 앞에서 언급하였던 가진에 의한 와유출 특성의 변화 및 박리축진과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단 되어진다.

3.5 유동가시화

Fig. 9는 연선법을 이용하여 원주의 근접 후류를 가시화한 결과를 보여주고 있다. Fig. 9(a)~(d)에서는 앞서 Fig. 8에서 설명한 것처럼 F_R 이 증가할수록 박리 전단층의 와도 증가로 인해 원주 후방 가까운 위치에서 와구조가 형성됨에 따라 와형성 영역이 정지된 원주에 비해 크게 감소함을 확인할 수 있다. F_R 이 증가함에 따라 와의 크기도 감소하고, 보다 규칙적이고 뚜렷한 와유출이 발생하고 있다.

Fig. 9(e), (f)를 보면 높은 주파수로 가진할 경우

에는 박리 축진으로 인해 F_R 이 증가할수록 후류 중심축에서 와의 영향이 감소하여 와형성 영역의 길이를 정의하기가 어렵고, 큰 운동량을 가진 외부유체가 와형성 영역내부로 유입되지 않음을 알 수 있다. 이에 따라 운동량 전달이 속도손실을 회복하기에 불충분하여 항력이 증가한다는 사실을 가시화 사진을 통해서도 확인할 수 있다. 가진의 영향이 주위 유체에 크게 작용하는 높은 F_R 조건에서는 Ongoren과 Rockwell⁽¹⁹⁾의 실험에서도 관찰된 바와 같이 유동구조의 응집성(coherency)이 증가하여 와 병합이 발생하게 된다. F_R 이 클 경우 원주 상하에서 유출되는 와의 크기가 줄어들고 원주의 바로 배면에서 가진의 영향이 크게 나타난다. 이때 유체 사이의 증가된 응집성(coherency)에 의해 여러 개의 와가 병합하여 하나의 와로 유출되어 하류로 나아가게 된다. 이에 따라 Fig. 4(g)에서 볼 수 있듯이 원점 후류에서 하나의 주파수 정점(peak)만 관찰되는 것이다.

회전진동에 의한 박리 전단층 내부 유체의 와도 변화는 박리 전단층의 불안정성(instability)에 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 주기적인 회전진동은 박리 전단층내부 유체 흐름의 불안정성을 제어하는 유동제어 방식임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 주기적으로 회전진동하는 원주의 주파수 비(F_R) 변화가 원주 후류의 유동구조와 항력감소에 미치는 효과를 실험적으로 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 주파수 비(F_R)의 변화에 따라 원주 후류는 저 주파수 비공진영역, 저 주파수 천이영역, 공진영역, 고 주파수 천이영역, 고 주파수 비공진영역의 5가지 서로 다른 유동모드를 가졌다.

(2) 주기적인 회전진동은 원주 표면에서 발생하는 유동박리와 박리 전단층의 불안정성에 영향을 미쳐 공진영역을 전·후로하여 크게 다른 유동특성을 야기하였다.

(3) 항력감소 효과는 속도감쇄가 적은 $F_R < 1.0$ 조건에서 두드러지게 나타나며 $F_R = 0.8$ 에서 약 33%의 최대 항력감소 효과를 보였다. 그러나 공진영역 이후 구간에서는 속도감쇄가 증가하여 항력이 오히려 증가하였다.

(4) 주파수 비 F_R 이 증가하여 공진영역에서 고 주파수 천이영역으로 바뀌게 되면 높은 주파수의 가진과 비 동기화의 영향으로 와유출 주파수가 불안정하게 변화하게 되어 결국 박리가 축진되고, 와 병합 현상이 나타나며, 후류의 중심영역에서

균일하고 낮은 난류강도 분포를 가진다.

참고문헌

- (1) Williamson, C. H. K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 28, pp. 477~539.
- (2) Bloor, M. S., 1963, "The Transition to Turbulence in the Wake of a Circular Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 19, pp. 290~304.
- (3) Gerrard, J. H., 1966, "The Mechanics of the Formation Region of Vortices behind Bluff Bodies," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 25, pp. 401~413.
- (4) Roshko, A., 1993, "Perspectives on Bluff Body Aerodynamics," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 49, pp. 79~100.
- (5) David, J. and Gharib, M., 2004, "On the Relationship Between the Vortex Formation Process and Cylinder Wake Vortex Patterns," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 519, pp. 161~181.
- (6) Cantwell, B. J., 1981, "Organized Motion in Turbulent Flow," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 13, pp. 457~515.
- (7) Robinson, S. K., 1991, "Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 23, pp. 601~639.
- (8) Lee, S. J., Paik, B. G., Jang, Y. G., Lee, J. Y. and Cho, M. H., 2005, "Reduction of Drag on a Flat Plate Using Surface Treatment Techniques," *2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction*, Busan, Korea, 23-26 May, pp. 439~445.
- (9) Taneda, S., 1978, "Visual Observations of the Flow Past a Circular Cylinder Performing a Rotary Oscillation," *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 45, No. 3, pp. 1038~1043.
- (10) Tokumaru, P. T. and Dimotakis, P. E., 1991, "Rotary Oscillation Control of a Cylinder Wake," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 224, pp. 77~90.
- (11) Choi, S. H., Choi, H. C. and Kang, S. M., 2002, "Characteristics of Flow over a Rotationally Oscillating Cylinder at Low Reynolds Number," *Physics of Fluids*, Vol. 14, No. 8, pp. 2767~2777.
- (12) Baek, S. J. and Sung, H. J., 1998, "Numerical Simulation of the Flow Behind a Rotary Oscillating Circular Cylinder," *Physics of Fluids*, Vol. 10, No. 4, pp. 869~876.
- (13) 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.
- (14) Shiels, D. and Leonard, A., 2001, "Investigation of a Drag Reduction on a Circular Cylinder in Rotary Oscillation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 431, pp. 297~322.
- (15) Filler, J. R., Marston, P. L. and Mih, W. C., 1991, "Response of the Shear Layers Separating from a Circular Cylinder to Small-Amplitude Rotational Oscillations," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 231, pp. 481~499.
- (16) Lee, S. J. and Lee, J. Y., 2005, "Lock-on Characteristics of Wake Behind a Rotationally Oscillating Circular Cylinder," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 8, pp. 895~902.
- (17) 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.
- (18) Dimotakis, P. E., 1978, "Laser-Doppler Velocimetry Momentum Defect Measurement of Cable Drag at Low to Moderate Reynolds Numbers," *NCBC Rep. Contract N62583/77-M-R541*.
- (19) Ongoren, A. and Rockwell, D., 1988, "Flow Structure from an Oscillating Cylinder: Part 1. Mechanisms of Phase Shift and Recovery in the Near Wake," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 191, pp. 197~223.
- (20) Maskell, E. C., 1963, "A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel," *Aero. Res. Coun. R&M 3400*.