

주기적으로 회전진동하는 원주 후류의 Dynamic PIV 속도장 측정

이정엽* · 이상준†

Dynamic PIV Measurements of Wake behind a Rotationally Oscillating Circular Cylinder

Jung Yeop Lee and Sang Joon Lee

Abstract

The temporal evolution of wake behind a circular cylinder oscillating rotationally with a relatively high forcing frequency has been investigated experimentally using a dynamic PIV technique. Experiments were carried out with varying the frequency ratio $F_R (=f_f/f_n)$ in the range from 0.0 (stationary) to 1.6 at oscillation amplitude of $\theta_A=30^\circ$ and Reynolds number of $Re=4.14 \times 10^3$. Depending on the forcing condition (F_R), the flow was divided into three regimes; non-lock-on ($F_R=0.4$), transition ($F_R=0.8, 1.6$) and lock-on regimes ($F_R=1.0$) with markedly different flow structure in the near-wake region behind the cylinder. When the frequency ratio was less than 1.0 ($F_R \leq 1.0$), the rotational oscillatory motion of the cylinder decreased the length of the vortex formation region and enhanced the mutual interaction between large-scale vortices across the wake centerline. The entrainment of ambient fluid seemed to play an important role in controlling the near-wake flow and shear-layer instability. However, the flow characteristics changed markedly beyond the lock-on flow regime ($F_R=1.0$) due to high-frequency forcing. At $F_R=1.6$, the mutual interactions between the vortices shed from both sides of the cylinder were not so strong. Thereby, the flow entrainment and momentum transfer into the wake center region were reduced. In addition, the size of the large-scale vortices decreased since the lateral extent of the wake was suppressed.

Key Words : Dynamic PIV(다이내믹 PIV), Rotational oscillation(회전진동), Flow control(유동제어)

1. 서론

최근 들어, 레이저 및 광학관련 기술의 발달로 인해 디지털 방식으로 높은 시·공간 분해능을 갖는 입자영상을 취득하는 것이 가능해졌으며, 이로 인해 시간에 따라 변화하는 복잡한 난류 유동의 시간에 따른 변화과정(evolution process)을 밝혀 난류 유동에 대한 이해를 향상시키는 연구가 많이 진행되고 있다⁽¹⁾. 고속카메라와 고속레이저를 이용하여 시간에 따라 변화하는 유동의 변화를 연속적으로 측정하여 유동구조의 시·공간적 변화를 측정하는 속도장 측정기법을 dynamic PIV 라고 한다.

† 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

이 측정기법은 공간상의 상관관계만을 고려하는 일반적인 PIV의 시간 분해능에 대한 한계를 극복하여 시간에 따른 변화를 측정 및 분석하여 시간상의 상관관계도 알 수 있게 해준다.

본 연구에서는 이 dynamic PIV 기법을 이용하여 시간에 따라 변화하는 불안정한 유동특성을 보이는 원주 후류에서의 와(vortex)유출 특성 및 주기적으로 회전진동하는 원주 후류의 유동특성을 살펴보고자 한다. 원주에 주기적인 회전진동을 가하는 것은 능동제어기법의 일종으로 현재까지 여러 연구자들에 의해 연구가 수행되어왔다. Shiels 와 Leonard⁽²⁾는 레이놀즈 수 $150 \leq Re \leq 15,000$ 범위에서 회전가진에 따른 항력감소 효과를 연구하였다. Tokumaru⁽³⁾는 $Re=15,000$ 조건에서 주기적인 회전진동이 후류의 유동구조에 영향을 미쳐 4가지 다른 유동모드를 가짐을 보였다. 하지만 실험적 연구결과는 아직 부족한 실정이며, 회전진동하는 원

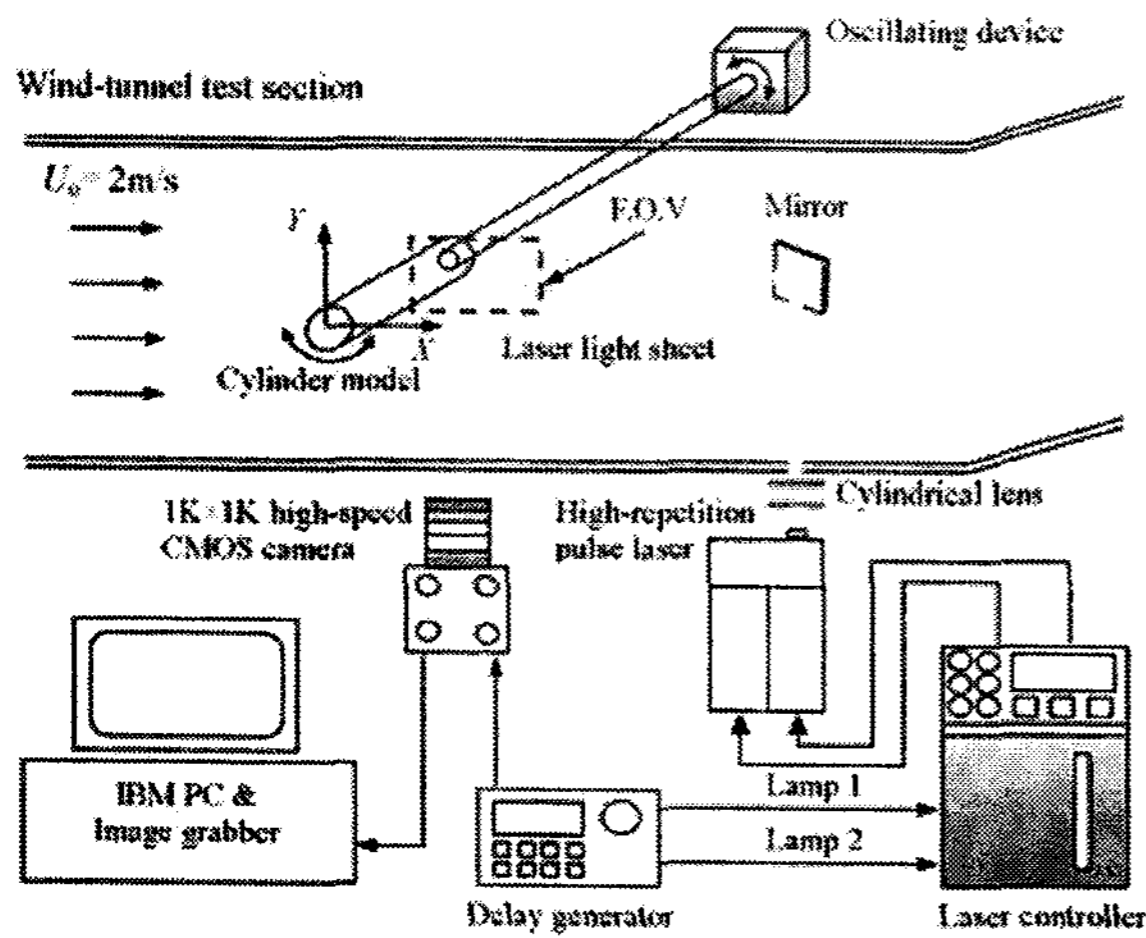


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

주 후류의 유동특성을 정확히 이해하고 그 제어효과를 보다 명시적으로 알기 위해서는 원주 후류 유동장의 변화를 시간에 따라 명시적으로 분석하고 그 영향을 예측하는 것이 필요하다.

2. 실험장치 및 구성

본 실험은 시험부 크기가 $6.75^L \times 0.72^W \times 0.6^H \text{m}^3$ 인 폐쇄형 아음속 풍동에서 수행하였다. 원주 모델은 직경이 $D=30\text{mm}$ 이며, 종횡비가 $l/D=13.3$ ($l=400\text{mm}$) 인 아크릴 파이프로 만들었다. 자유흐름속도는 $U_o=2\text{m/s}$ 이고, 원주 직경에 기준한 레이놀즈 수는 약 4,140이다. 본 실험조건에서 자연발생 와류출 주파수(f_n)는 대략 15Hz인데, 각진폭 히스테리시스 없이 $F_R=1.6$ 이상의 높은 가진 주파수를 안정적으로 구현할 수 있는 가진장치를 제작하여 원주 모델과 연결하였다. 실험시 원주의 각진폭(θ_A)은 30° 로 고정시켰다.

원주 후류의 속도장 측정을 위한 dynamic PIV 시스템은 고속 레이저, 고속 CMOS 카메라, 영상 획득장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어져 있으며, 레이저와 CMOS 카메라는 동기장치를 통하여 동기시킴으로써 깨끗한 입자영상을 획득할 수 있었다. 본 연구에서는 시간에 따른 후류 유동의 변화를 관찰하기 위해 $1\text{k} \times 1\text{k}$ pixels 해상도의 입자영상을 1kfps로 약 2초간 획득하여 1,024장의 속도벡터를 얻었다. 추적입자(tracer particle)로는 평균직경 $2\sim 3\mu\text{m}$ 의 olive-oil 입자가 사용되었다. 측정 단면의 크기는 $7 \times 7\text{cm}^2$ 이고 한번에 2프레임씩 쌍(pair)으로 입자영상을 취득하였다. 속도벡터의 추출은 FFT에 기초한 상호상관(cross-correlation) 방식의 PIV 알고리즘을 적용하여 속도장을 추출하였다. 미소조사구간의 크기는 32×32 pixels이며

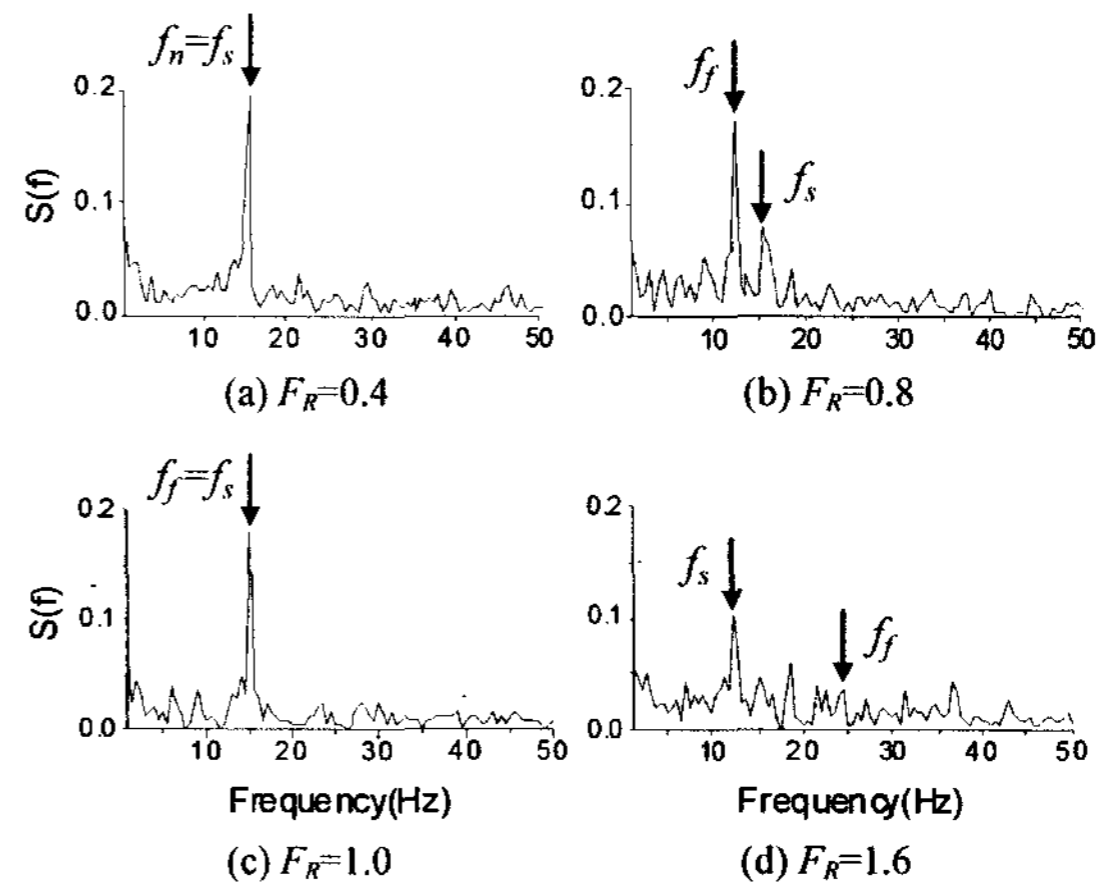


Fig. 2 Comparison of PSD distributions at $\theta_A=30^\circ$.

50% 중첩하였다. 또한 후류 유동변화에 대한 정성적 정보를 획득하기 위해 유동 가시화도 수행하였는데, CMOS 카메라의 각각의 프레임에 펄스 레이저를 여러 번 조사 함으로써 순간적으로 정지된 유동의 streak를 얻을 수 있었다. 풍동에 장치된 원주 모델의 형상, 좌표계 및 dynamic PIV 시스템에 대한 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다.

3. 실험결과 및 고찰

원주 후방 $X/D=2.0$, $Y/D=0.5$ 위치의 U -속도 성분의 파워 스펙트럼 밀도(PSD)를 Fig. 2에 나타내었다. PSD 분포에서 정점(peak)은 주기적으로 유출되는 와구조가 존재함을 나타내는데, 회전진동에 의해 후류 유동을 결정짓는 와류출 특성이 크게 변화함을 알 수 있다. 속도장 측정시 1kfps로 입자영상을 획득하였으므로 500Hz로 샘플링 한 것과 같다.

$F_R=0.4$ (Fig. 2(a))의 경우, 가진이 되고 있지만 와류출의 주파수 특성은 가진이 되지 않은 때와 같은 비공진(non lock-on) 특성($f_n=f_s$)을 보여줄 수 있다. 주파수 비가 증가하여 $F_R=0.8$ 이 되면 가진에 의한 영향이 증가하여 가진 주파수(f)에 의한 정점이 와류출 주파수(f_s)와 함께 나타나는 저주파수 천이영역(transition regime)이 된다. $F_R=1.0$ 에서는 원주 주위 유체가 원주의 회전진동과 동기(synchronization)되어 와류출 주파수가 가진 주파수와 일치하는 조건에서 하나의 정점이 관찰되는 공진(lock-on)상태가 된다. $F_R=1.6$ 이 되면 다시 와류출 주파수와 가진 주파수 각각에서 정점이 나타나는 고 주파수 천이영역 상태가 되고, 이때 $f_s \approx f/2$ 의 상관관계를 가진다.

주파수 비가 $F_R=0.4$, 1.0인 경우의 원주 후류의

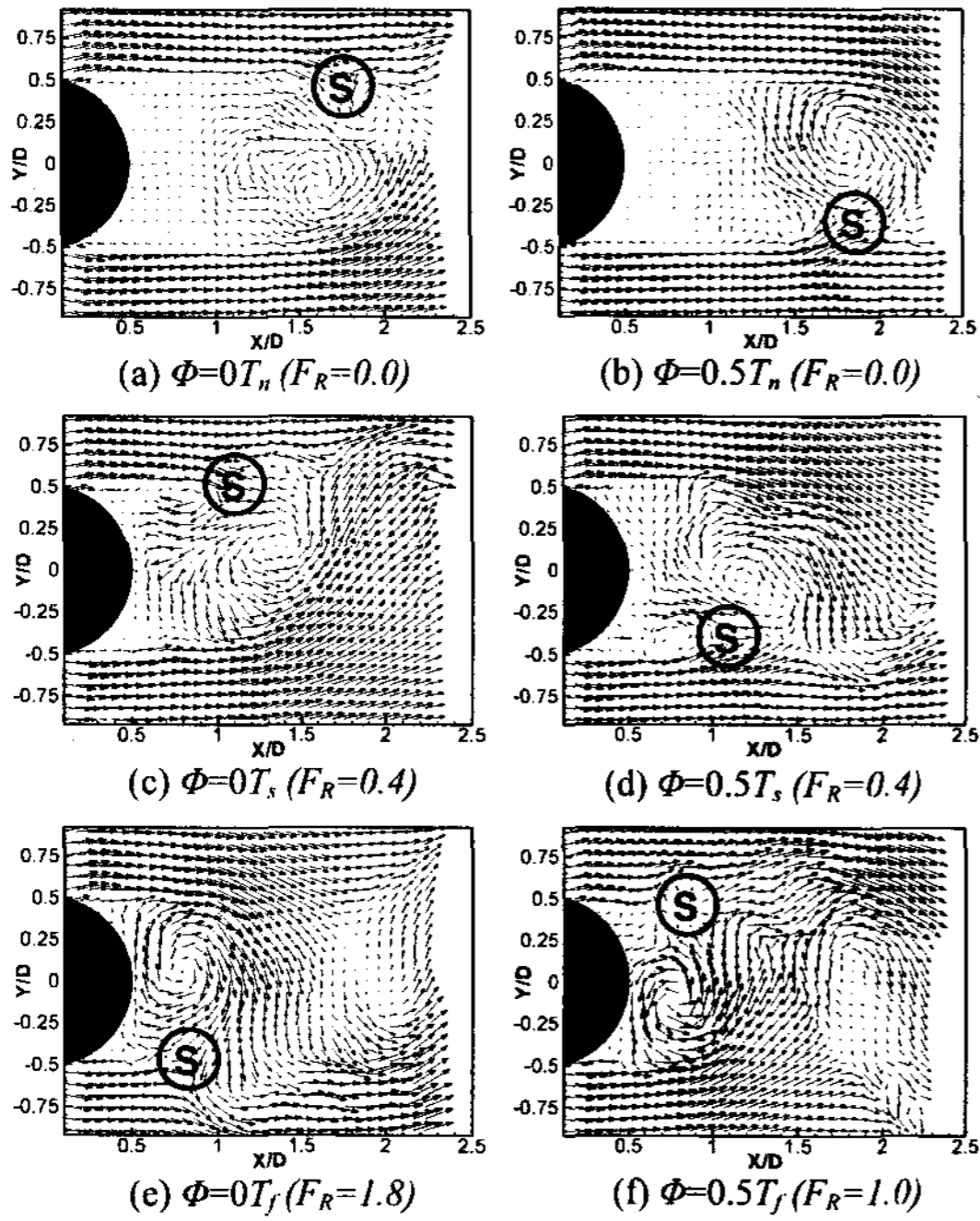


Fig. 3 Instantaneous velocity vector fields at periods $0T$ and $0.5T$ for $F_R=0.0$, $F_R=0.4$, $F_R=1.0$.

순간 속도장을 정지된 원주 후류와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 주기 $0T$ 는 시계방향으로 회전하는 순간, $0.5T$ 는 반시계방향으로 회전하는 순간을 의미한다. 주파수 비가 $F_R=0.0$ 인 경우에는 원주 상부의 전단층(shear-layer)에서 와(vortex)가 발달하기 시작하는 순간을 $0T$ 로 정하였다. Fig. 2의 PSD 분포에서와 마찬가지로 F_R 값에 따라 후류는 크게 다른 유동구조를 보여주고 있다.

$F_R=0.4$ 조건에서는 가진과 상관없이 자연발생 와유출 주파수(f_m)로 와가 유출되는데, $F_R=0.4$ 이므로 원주가 1주기 회전진동 하는 동안 2.5주기의 와유출이 발생하게 된다. 그리고 $F_R=1.0$ 조건에서는 원주의 운동과 와유출이 동기되어짐에 따라 $0T$ 에서는 원주 상부에서 생성된 와가 하류로 유출되고, $0.5T$ 에서는 원주 하부에서 와가 유출되는 뚜렷한 주기성이 관찰되었다. 그리고 주파수 비가 증가할수록 원주 회전방향으로의 가속과 감속이 빨라져 하류로 유출되는 와의 roll-up 현상이 원주와 가까운 위치에서 발생하게 되며 와형성 영역의 길이도 짧아지게 된다. 또한 후류의 saddle point(S) 주위에서는 하류로 발달해가는 와에 와도(vorticity) 공급이 억제되는데, Fig. 3에 표시한 것처럼 F_R 값이 커질수록 saddle point 위치가 원주쪽으로 이동하게 된다. 이상의 결과를 통해 원주 부근에서 와가 빠르게 발달되고, 충분히 발달되어진 큰 규모의 와가 하류로 나아감을 알 수 있다. $F_R=0.4$, 1.0 의 경우 Fig. 2에서 관찰된 주파수 특성

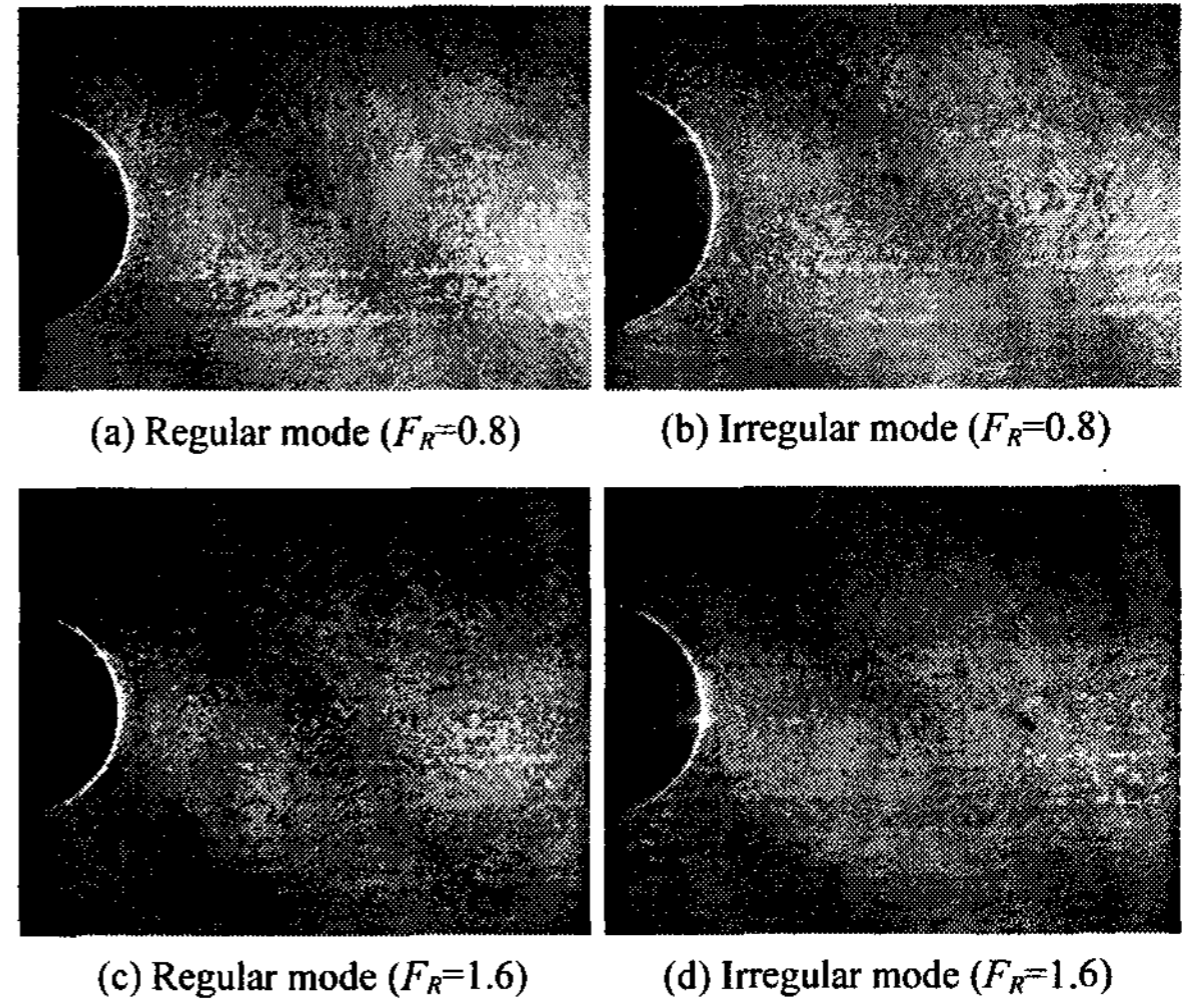


Fig. 4 Two vortex shedding modes in the transition regime at $F_R = 0.8$ and $F_R = 1.6$.

은 정지된 원주의 경우와 유사하지만, 후류유동의 패턴은 매우 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 유동구조의 변화는 주기적인 회전 가진에 의한 것으로 판단되어지며, 유체유입의 영향은 Fig. 5의 가시화 결과를 통해 보다 자세히 논의될 것이다.

뚜렷한 주기성과 규칙적인 와유출 특성으로 인해 PSD 분포상에 하나의 정점이 관찰되는 경우 ($F_R=0.0, 0.4, 1.0$)와 달리 천이영역(transition regime, $F_R=0.8, 1.6$)에서는 매우 불안정한 후류 유동이 관찰된다. 천이영역에 속하는 $F_R=0.8, 1.6$ 조건에서는 Fig. 4에 보인 바와 같이 규칙적인 와유출(regular vortex shedding)과 불규칙한 와유출(irregular vortex shedding)의 두 가지 후류 형태가 모두 관찰된다. 이 경우 하나의 유동구조가 규칙적으로 반복되지 않기 때문에 규칙적인 와유출과 불규칙한 와유출 사이에서 유동모드가 간헐적으로 변하면서 후류 유동은 더욱 더 복잡해지고 예측하기 힘들게 된다. 이 중 불규칙한 와유출 모드는 주로 회전진동과 유체 흐름 사이의 서로 다른 주기성과 원주 상·하에서 전단층이 동시에 발달하는 특이한 유동특성에 기인하여 발생하며, 유체유입이 안정화됨에 따라 와형성 및 와유출 역시 점차 규칙적으로 변해가면서 다시 규칙적인 와유출 모드로 돌아가게 된다. 이러한 과정이 반복되면서 2가지의 모드가 뚜렷이 나타나게 된다. 이와 같이 $F_R=0.8, 1.6$ 에서는 두 가지 와유출 형태가 함께 존재하기 때문에 Figs. 2(b), (d)처럼 두 개의 주파수에서 정점이 나타나게 되고, 이에 따라 천이영역으로 분류될 수 있다. 하지만, $F_R=0.8$ 조건에서도 와형성 영역의 길이는 정지된 원주보다 짧고 유체유입 역시 활발히 일어나고 있어 $F_R \leq 1.0$ 의 조건에 속하는 다른

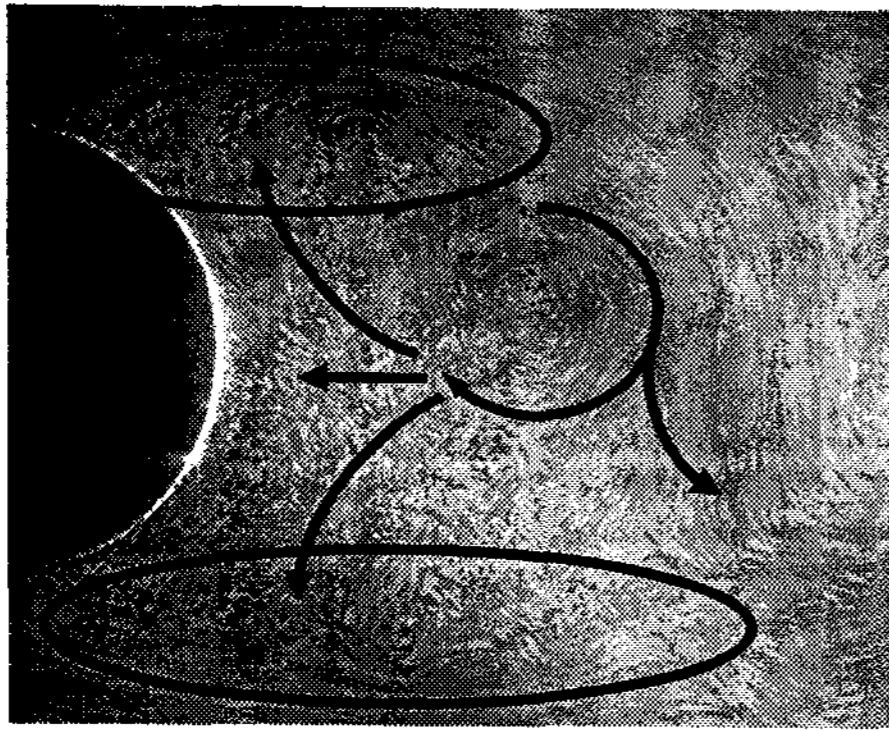


Fig. 5 Entrainment of ambient fluid into the shear-layer and secondary vortices at $F_R=0.4$.

실험조건에서 관찰된 결과와 유사한 정도 발견되어진다.

Fig. 4(c)($F_R=1.6$)는 규칙적 와유출이 나타나는 경우에 대한 가시화 사진인데, 회전진동의 2주기 동안은 와유출이 규칙적으로 발생하고 그 후 1주기 동안은 불규칙한 와유출(Fig. 4(d))이 발생하였다. 이로 인해 Fig. 2(d)에서 볼 수 있듯이 와유출 주파수(f_s)가 가진 주파수(f_f)의 절반 정도의 값을 가지며 2개의 정점이 나타나게 되는 것이다. 그리고 높은 가진 주파수로 가해진 유동 교란에 기인하여 원주 상·하부에서 와가 빨리 생성되어 후류 중심축을 가로지르지(crossing) 않고 바로 하류로 나아가게 된다. 이때 유출된 와들 사이의 상호작용이 억제되고, 후류 중심축으로의 유체 유입이 크게 감소하게 된다. 따라서 후류폭의 확장이 억제되어 원주로부터 유출되어진 와의 크기도 작아졌다.

원주 후류에서 주위 유체의 유입은 원주 상·하에서 교대로 유출되는 와들의 상호작용, 전단층의 불안정성(instability), 근접 후류의 유동특성 등에 크게 영향을 미치게 된다⁽⁴⁾. Figs. 4, 5에서 보는 바와 같이 $F_R \leq 1.0$ 조건에서는 근접 후류에서의 활발한 와유출로 인해 $F_R=0.0$ 인 경우보다 더욱더 많은 유체가 외부로부터 유입되며, 유출된 와들 사이의 상호작용도 강하게 나타나고 있다. 특히 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 유입된 유체가 상·하의 난류전단층까지 깊숙이 유입되어 secondary vortices가 형성되며, 전단층의 불안정성에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 주기적으로 회전진동하는 원주 후류의 유동특성을 dynamic PIV 기법을 이용하여 실험적으로 해석하였다. 주파수 비(F_R) 변화에 따라 원주 후류는 비공진 영역($F_R=0.4$), 천이영역

($F_R=0.8, 1.6$), 공진영역($F_R=1.0$)으로 구분되었으며, 각각의 유동영역에서 PSD 결과를 잘 뒷받침 해주는 서로 다른 유동특성을 보였다.

PSD 상에 하나의 정점이 나타나는 경우($F_R=0.0, 0.4, 1.0$) 뚜렷한 주기성을 가지는 와유출이 관찰되었으며, 특히 공진상태의 경우($F_R=1.0$) 원주 주위의 유체가 감속될 때 와가 형성되어 거대와류(large-scale vortex)로 성장하고, 이 거대와류는 유체가 가속될 때 하류로 유출되었다. 천이영역의 경우($F_R=0.8, 1.6$) 규칙적인 와유출 모드와 불규칙적인 와유출 모드가 번갈아 나타나는 매우 불안정한 유동특성을 보였으며, 이로 인해 PSD 상에 f_s, f_f 두 개의 정점이 동시에 나타남을 알 수 있었다.

$F_R \leq 1.0$ 의 경우 회전진동에 의한 전단층의 가속도에 기인하여 와형성 영역의 크기가 감소하고 와유출이 원주 가까운 위치에서 발생하여 근접 후류의 유동특성이 크게 변화하였다. 이때 원주 상·하에서 유출된 와들의 상호작용 및 유체유입이 증가하게 되고, 전단층의 불안정성에 영향을 미쳐 와유출 특성이 주파수 비에 따라 다르게 나타났다. 특히 $F_R \geq 1.6$ 과 같이 주파수 비가 클 경우 회전진동운동과 주위 유체 사이의 상호작용 및 유출된 와들 사이의 영향이 감소함에 따라 후류 폭의 확장이 억제되고 유출되어진 와의 크기도 작아졌다. 본 연구를 통해 주기적인 회전진동 방식의 유동제어는 전단층 불안정성 제어가 주된 메커니즘임을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(No. M10600000276-06J0000-27610).

참 고 문 헌

- 1) Hayami, H. and Aramaki, S., 2005, "Dynamic PIV for Fluid Flow Measurement," 可視化情報, Vol. 25, pp. 20~24.
- 2) Shiels, D. and Leonard, A., 2001, "Investigation of a Drag Reduction on a Circular Cylinder in Rotary Oscillation," J. Fluid Mech., Vol. 431, pp. 297~322.
- 3) Tokumaru, P. T. and Dimotakis, P. E., 1991, "Rotary Oscillation Control of a Cylinder Wake," J. Fluid Mech., Vol. 224, pp. 77~90.
- 4) Gerrard, J. H., 1966, "The Mechanism of the Formation Region of Vortices behind Bluff Bodies," J. Fluid Mech., Vol. 25, pp. 401~413.