

〈 논문 〉

## 주기적으로 회전진동하는 원주 후류의 공진특성에 관한 연구

이 상 준<sup>†</sup> · 이 정 엽<sup>\*</sup>

(2005년 1월 12일 접수, 2005년 7월 8일 심사완료)

### Lock-on Characteristics of Wake Behind a Rotationally Oscillating Circular Cylinder

Sang Joon Lee and Jung Yeop Lee

**Key Words :** Lock-on Regime(공진영역), Forcing Frequency(가진 주파수), Drag Reduction(항력감소), Threshold Amplitude(임계 각진폭), Rotational Oscillation(회전진동)

#### Abstract

Lock-on characteristics of flow around a circular cylinder oscillating rotationally with a relatively high forcing frequency have been investigated experimentally. Dominant governing parameters are Reynolds number ( $Re$ ), angular amplitude of oscillation ( $\theta_A$ ), and frequency ratio  $F_R=f_f/f_n$ , where  $f_f$  is a forcing frequency and  $f_n$  is a natural frequency of vortex shedding. Experiments were carried out under the conditions of  $Re=4.14 \times 10^3$ ,  $\pi/90 \leq \theta_A \leq \pi/3$ , and  $F_R=1.0$ . The effect of this active flow control technique on the lock-on flow characteristics of the cylinder wake was evaluated with wake velocity measurements and spectral analysis of hot-wire signals. The rotational oscillation modifies the flow structure of near wake significantly. The lock-on phenomenon always occurs at  $F_R=1.0$ , regardless of the angular amplitude  $\theta_A$ . In addition, when the angular amplitude is less than a certain value, the lock-on characteristics appear only at  $F_R=1.0$ . The range of lock-on phenomena expands and vortex formation length is decreased, as the angular amplitude increases. The rotational oscillation creates a small-scale vortex structure in the region just near the cylinder surface. At  $\theta_A=60^\circ$ , the drag coefficient was reduced about 43.7% at maximum.

#### 기호설명

$f_s$  : 와유출 주파수  
 $f_f$  : 가진 주파수  
 $f_n$  : 자연발생 와유출 주파수  
 $F_R$  : 주파수 비 ( $=f_f/f_n$ )  
 $\theta_A$  : 각진폭  
 $\theta_t$  : 임계 각진폭  
 $d$  : 원주 직경  
 $C_D$  : 항력계수  
 $\nu$  : 동점성 계수

$u$  : 주유동 방향 평균속도  
 $U_\infty$  : 자유흐름속도  
 $Re$  : 레이놀즈 수 ( $=U_\infty d/\nu$ )  
 $\bar{u}'$  : 주유동 방향 속도 변동성분

#### 1. 서론

원주 주위 흐름의 유동구조에 대한 연구는 유체역학에서 다루는 가장 기본적인 문제의 하나로 많은 과학자와 공학자들에 의해서 연구가 이루어져 오고 있다.<sup>(1-5)</sup> 경계층(boundary layer), 자유 전단층(free shear layer), 후류(wake)로 구성된 원주 주위 유동은 레이놀즈 수( $Re$ )에 따라 다양한 유동특성을 나타낸다. 레이놀즈 수가 49 이상이 되면 원주 후방에서 주기적인 와유출(vortex shedding)이 발생하고, 와(vortex)의 형성 및 와구조(vortex

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2169 FAX : (054)279-3199

\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

structure)의 발달형태는 물체 후류의 유동구조에 큰 영향을 미치게 된다. 와유출 특성은 유동구조 및 유동특성을 결정짓는 주요 요인이며, 소음, 진동뿐 아니라 공력특성에도 크게 영향을 미친다.<sup>(1)</sup> 그리고 운송체의 에너지 절약과 관련한 공학적인 관점에서 원주에 걸리는 항력을 감소시키기 위해 지난 수십년간 다양한 유동제어 방법들이 연구되어 왔다.

물체 주위 유동구조를 변화시키는 유동제어 방법은 외부로부터의 에너지 공급 여부에 따라 크게 수동제어기법(passive control method)과 능동제어기법(active control method) 두 가지로 나누어진다. 원주에 주기적인 회전진동을 가하는 방법<sup>(6-12)</sup>은 능동제어기법에 속하며 항력감소에 효과적인 것으로 알려져 있다.

균일한 유동 속에 놓여있는 원주에 주기적인 회전진동을 가하게 되면 후류의 유동구조가 바뀌게 되고, 후류는 원주의 가진 주파수( $f$ )와 같은 주파수로 와가 유출되는 공진영역(lock-on regime)과 원주의 가진 주파수와 상관없이 자연발생 와유출 주파수( $f_n$ )와 유사한 주파수로 와가 유출되는 비공진영역(non lock-on regime)으로 구분된다. 각 영역의 상대적 크기와 유동구조의 변화에 따라 양력과 항력특성이 변화하게 되고, 이 같은 공력특성을 이용하여 특정 유동조건에서 항력감소 효과를 얻을 수 있다.

Tokumaru<sup>(6)</sup>는  $Re=15,000$  조건에서 주기적인 회전진동이 후류의 유동구조에 영향을 미쳐 4가지 다른 유동모드를 가지며 간접 측정을 통해 공진영역에서 80%의 항력감소 효과를 가짐을 밝혔다.

Choi 등<sup>(7)</sup>은 층류 유동조건에서 회전진동하는 원주의 항력감소와, 유동장의 시간 및 공간적 변화를 수치모사를 통해 연구하였으며, 유동조건에 따라 Tokumaru<sup>(6)</sup>와 유사한 유동모드를 가지며, 가진 주파수가 클 경우 근접 후류에서 와 병합(vortex coalescence) 현상이 발생함을 보였다.

Baek 등<sup>(8)</sup>은 비정상 박리유동(separated flow)을 제어하기 위해 원주를 주기적으로 회전진동시켰으며, 시간에 따른 양력계수 측정을 통해 제어변수에 따라 변화하는 와형성(vortex formation) 패턴과 와유출의 위상변화 특성을 알 수 있음을 밝혔다.

Mahfouz<sup>(9)</sup>는  $40 \leq Re \leq 200$ ,  $0 \leq F_R \leq 2$  조건하에서 회전진동에 의한 유동구조의 변화 및 원주의 각진폭이 공진영역의 범위에 미치는 영향과 함께  $F_R=1.0$  조건에서만 공진이 발생하기 시작하는 임계 각진폭(threshold amplitude)에 대해 연구하였다. 여기서  $F_R$ 은 가진 주파수를 자연발생 와유출 주파수로 나눈 주파수 비(frequency ratio,  $F_R=f_f/f_n$ )를 나타낸다.

유체 속에 놓여있는 물체와 주위 유체 사이에

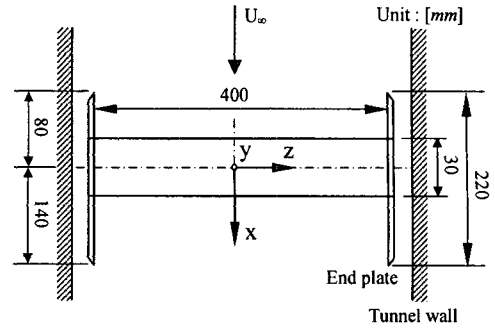


Fig. 1 Schematic diagram of test cylinder and coordinate system (unit : mm)

상호작용이 크게 발생하는 공진영역에서는 다양한 유동특성이 나타난다. 본 연구에서는 주파수 비( $F_R$ )를 1.0으로 고정시킨 공진조건에서 주기적으로 회전진동하는 원주의 각진폭( $\theta_A$ ) 변화가 공진영역의 후류유동에 미치는 영향을 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.

풍동 시험부 내부에 설치한 원주 모델을 지지하고 풍동 벽면을 따라 발달하는 경계층 효과를 최소화 하기 위해 원주 모델의 양부분에 날카로운 모서리를 가진 사각 끝판(end-plate)을 설치하였다. 끝판의 형상과 크기는 Stansby<sup>(13)</sup>의 결과를 참조하여 결정하였다. 원주의 원활한 회전진동을 위하여 사각 끝판과 원주를 볼베어링으로 연결하였다.

원주의 직경은  $d=30mm$ 이며, 자유흐름속도는  $U_\infty=2m/s$ 이고, 원주 직경에 기준한 레이놀즈 수는 약 4,140이다. 원주 모델은 회전부위의 길이( $l$ )가  $400mm$  ( $l/d=13.3$ )인 아크릴 파이프로 만들어 졌다. Graham<sup>(14)</sup>은 사각 끝판을 설치한 경우 원주의 무차원 길이  $l/d$ 가 3.8보다 크면 와유출 특성이 무한히 긴 원주와 유사하다고 하였다. 원주와 끝판 설치에 따른 막힘비(blockage ratio)는 약 4.8% 정도에 이에 따른 자유흐름속도의 유속보정은 하지 않았다. 원주 모델의 형상 및 좌표계를 Fig. 1에 나타내었는데 주유동 방향을  $x$ 축, 주유동에 수직한 방향을  $y$ 축, 원주 폭방향을  $z$ 축으로 정의하였다.

본 실험조건에서 자연발생 와유출 주파수( $f_n$ )는 대략  $15Hz$ 인데, 막힘 효과(blockage effect)를 고려한 자유흐름속도에 기초한 Strouhal 수는  $St=0.214$ 이다. 공진 조건인 주파수 비  $F_R=1.0$ 이 되도록

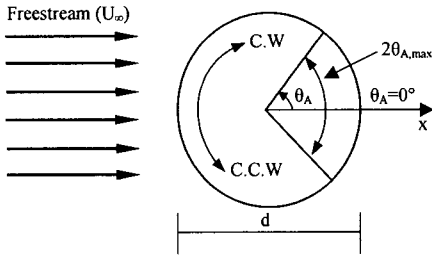


Fig. 2 Schematics of rotationally oscillating motion of a circular cylinder

15Hz의 높은 가진 주파수를 구현할 수 있는 가진장치를 제작하여 원주 모델과 연결하였다. 그리고 각진폭 변화의 영향을 알아보기 위해 실험시 원주의 각진폭( $\theta_A$ )을  $0^\circ \sim 60^\circ$ 로 변화시켰다.

2.2 가진장치

원주를 15Hz 이상의 높은 주파수로 주기적으로 회전진동시켜 원주 후류 유동을 제어하기 위해 각진폭 히스테리시스 없이 원주를 회전진동시킬 수 있는 가진장치를 제작하였다. 가진장치는 교류(AC) 서보모터에 의해 구동되며, 모터의 회전운동을 회전진동으로 바꾸어 원주에 운동을 전달하기 위해 유니버설 조인트(universal joint)와 4절 링크(four-bar link)를 조합한 형태로 구성되어있다. 이 가진장치는 각진폭과 가진 주파수 제어가 가능하다. 각진폭의 경우  $0^\circ \sim 10^\circ$  사이는  $2^\circ$ 단위로  $10^\circ \sim 60^\circ$  구간은  $5^\circ$ 단위로 조절하는 것이 가능하다. 풍동 내부 유동을 교란시키지 않기 위하여 가진장치를 풍동 외부에 설치하여 커플링을 통해 원주 모델과 연결시켰다.

한 방향으로 회전운동을 하는 모터의 회전각도와 회전진동 하는 원주의 각도 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\theta_c = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta_A \cos(\theta_m + \pi)}{\cos \theta_A} \right) \quad (1)$$

여기서  $\theta_c$ ,  $\theta_m$ 은 각각 원주의 회전 각도( $-\theta_A \leq \theta_c \leq +\theta_A$ )와 모터의 회전 각도( $0 \leq \theta_m \leq 2\pi$ )이며,  $\theta_A$ 는 각진폭을 나타낸다. 원주의 회전진동운동에 대한 개략도를 Fig. 2에 표시하였다.

2.3 후류 계측 및 항력계산

2.3.1 열선풍속계

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

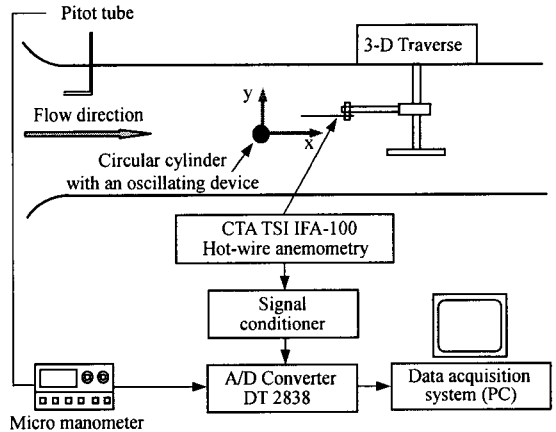


Fig. 3 Wind tunnel test section and wake measurement system

(DT2838)를 거쳐 컴퓨터에 디지털 값으로 입력한 후, 통계처리하여 원하는 속도정보를 얻었다. 후류의 평균속도 및 난류강도 분포는  $x/d=4$  단면의  $-3 \leq y/d \leq 3$  구간에서  $0.1d$  간격으로 측정하였다. 열선 프로우브는 정밀도가  $0.1mm$ 이하인 3차원 이송장치를 이용하여 원하는 위치로 이동시켰다. 각각의 측정위치에서 초당 4,000개의 비율로 샘플링하여 16,384개의 속도 데이터를 얻었는데, 노이즈 제거를 위해 속도신호를 800Hz의 저역필터를 거치게 하였다. 풍동 내부에 설치된 원주 및 열선풍속계의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다.

원주 후류는 주기적인 와유출에 기인하여 조직적인 응집구조를 가지는데, 난류전단유동에서 이러한 응집구조는 난류의 성장 및 확산에 기여하고, 외부 유체의 유입에 중요한 역할을 하게 된다. 따라서, 원주 후류에 존재하는 큰 규모의 유동구조를 밝히는 것은 후류 연구에 있어 중요하다. 이러한 응집구조의 와유출 주파수를 분석하기 위하여 근접 후류 위치( $x/d=2, y/d=0.5$ )에서 I-형 열선 프로우브로부터 나오는 속도신호를 주파수 분석하였다.

2.3.2 항력계산

일반적으로 원주와 같은 물체에 작용하는 항력은 물체 전후방에 형성되는 압력차에 의한 형상저항(form drag)과 물체 표면의 전단응력에 기인한 마찰저항(friction drag)으로 이루어진다. 전체 항력을 구하기 위해 원주에 걸리는 힘을 직접 측정하는 것이 가장 좋다. 그러나 본 연구의 경우 원주가 높은 주파수로 회전진동하기 때문에 항력을 직접 측정하기 어렵다. 따라서 후류에서 측정한 평균속도 분포로부터 항력계수를 구하기 위해 Dimotakis<sup>(6)</sup>가 제안한 공식을 이용하여 항력계수( $C_D$ )를 계산하였다. 이 공식은 속도분포를 측정한

근접 후류의 압력과 상류의 압력차이에 의한 영향도 고려하고 있다. 그리고 회전진동 하지 않는 정지상태의 원주가 가지는 항력계수( $C_{Do}$ ) 값과 비교함으로써 공력특성을 분석하였다.

후류의 배제두께(displacement thickness,  $\delta^*$ )와 항력계수 계산식은 다음과 같다.

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

$$C_D = \frac{2hd}{(1-\delta^*/h)^2} \left[ \int_0^1 \frac{u}{U_o} \left( 1 - \frac{u}{U_o} \right) d\eta - \frac{1}{2} \left( \frac{\delta^*}{h} \right)^2 \right] \quad (3)$$

여기서,  $h$ ,  $\eta$ ,  $U_o$ 는 각각 측정 영역의 수직거리, 무차원 수직위치( $y/h$ ), 후류 바깥쪽 자유흐름속도를 나타낸다.

### 2.4 유동가시화

회전진동하는 원주 주위 유동을 연선법(smoke-wire method)을 사용하여 가시화하였다.

직경이 0.1mm인 니크롬 와이어로 된 연선을 원주 전방 90mm 위치에 모델과 수직으로 설치하였다. 연선에 Safex 액을 고르게 바르고 여기에 직류(DC) 전원공급기로 전기를 공급하면 흰색의 연기가 발생한다. Nd:Yag 펄스레이저와 렌즈들을 사용하여 만든 얇은 평면광(laser light sheet)으로 측정하고자 하는 유동단면을 조사하여 연기의 유맥선(streakline)을 디지털 카메라(Nikon D100)로 촬영하였다. 이때 깨끗한 유동영상을 얻기 위해 동기장치(delay generator)를 이용하여 레이저와 전원공급기를 동기시켰다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 주파수 분석

원주 후방  $x/d=2$ ,  $y/d=0.5$  지점에서 측정한 주파수 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 정점(peak)은 주기적으로 유출되는 와류구조가 존재함을 나타내는데, 정지된 원주의 와유출 주파수가 15Hz임을 알 수 있다.

Fig. 4(b)-(h)를 살펴보면 주파수 비  $F_R=1.0$ 으로 가진했을 때 각진폭에 상관없이 가진 주파수와 동일한 주파수인 15Hz로 와가 유출됨을 알 수 있다. 이를 통해  $F_R=1.0$  조건에서는 모든 각진폭에서 가진 주파수와 와유출 주파수( $f_s$ )가 일치하는 공진현상이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 5는 각각의 각진폭에서 주파수 비를 변화시키면서 측정한 공진영역 경계를 Mahfouz<sup>(9)</sup>의 계

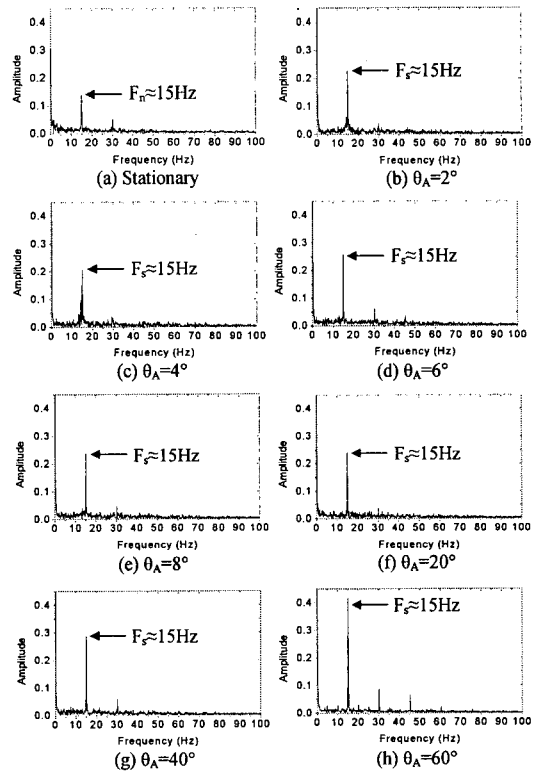


Fig. 4 Lock-on regime frequency analysis with respect to  $\theta_A$

산 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 각각의 주파수 비 조건에서 측정한 전압신호를 주파수 분석하여 와유출 주파수와 가진 주파수가 같게 되는 공진영역의 양 끝단에 해당하는 주파수 비를 공진영역의 경계로 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이  $F_R=1.0$  조건에서는 각진폭 변화에 상관없이 모두 공진영역에 해당함을 알 수 있다.

각진폭이 커질수록 공진영역의 범위가 증가한다는 사실을 Fig. 5로부터 확인할 수 있다. 이는 각진폭이 커질수록 원주의 회전진동운동과 주위 유체 사이의 동기화(synchronization)가 보다 넓은 유동조건에서 지속됨을 의미한다. 각진폭 증가에 따른 공진영역의 범위가 증가한다는 사실은 회전진동에 대한 Baek 등<sup>(8)</sup>의 계산결과 및 수직방향으로 선형 진동하는 실험결과에서도 확인된 바가 있다.<sup>(15,16)</sup> 그러나 공진영역의 범위가 Mahfouz<sup>(9)</sup>의 수치해석 결과처럼 선형적인 형태로 증가하는 것이 아니라 본 연구에서는  $F_R=1.0$ 을 기준으로 범위가 지그재그 형태로 증가하는 것으로 나타났다.

Mahfouz<sup>(9)</sup>에 따르면  $F_R=1.0$  조건에서만 공진현상이 발생하기 시작하는 각진폭을 나타내는 임계

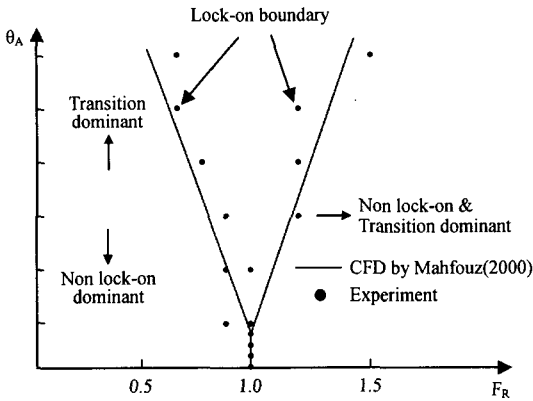


Fig. 5 Variation of lock-on range with respect to frequency ratio  $F_R$  and angular amplitude of oscillation  $\theta_A$

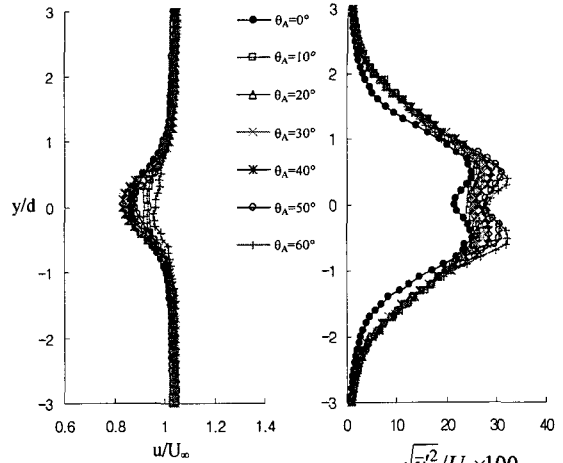


Fig. 6 Streamwise mean velocity and turbulence intensity profiles at  $x/d=4$  for  $Re=4.14 \times 10^3$  and  $F_R=1.0$

각진폭(threshold amplitude,  $\theta$ )의 존재는 이미 알려졌지만,<sup>(16)</sup> 정확한 값이 아직까지 밝혀진 적은 없다고 한다. 수직방향으로 선형 진동을 하는 기존의 실험 및 수치해석 연구에서도 정확한 임계 각진폭을 찾지 못했다.<sup>(15-18)</sup> 그러나 본 연구에서는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이  $F_R=1.0$ 에서만 공진이 발생하기 시작하는  $\theta_f=8^\circ$ 의 임계 각진폭을 가짐을 알 수 있다. 이것은 제어변수의 작은 변화에도 유동특성이 뚜렷하게 변화하는 높은 유속, 높은 가진 주파수에서 본 실험을 수행하였기 때문으로 생각되어진다.

3.2 후류 유동특성

Fig. 6은 원주 후방  $x/d=4$  위치 단면에서  $F_R=1.0$  조건에서 각진폭을 변화시키면서 측정한 원주 후류의 주유동 방향 평균속도 및 난류강도 분포를 나타낸 것이다. 여기서 수직방향 거리를 나타내는 세로축은 원주직경( $d$ )으로 무차원시켰다. 점성의 영향으로 주유동 방향 속도성분의 감쇄는  $y/d=\pm 0.5$  이내의 후류 중심에서 주로 나타나며, 후류 중심축( $y=0$ )에서 가장 큰 값을 가진다. 그리고 각진폭 변화에 따라 평균속도와 난류강도가 후류 중심영역에서 큰 차이를 보여주고 있다.

정지상태의 원주( $\theta_A=0^\circ$ )와 비교하여 각진폭  $\theta_A=10^\circ$  조건에서 주유동 방향 속도감쇄가 약 30% 정도 작은 값을 가졌다. 각진폭이 증가할수록 속도감쇄는 증가하여  $\theta_A=20^\circ-40^\circ$  조건에서는 회전진동 하지 않는 원주의 경우 보다 조금 큰 속도감쇄를 보이게 된다. 그러나 각진폭이 이보다 더 증가하게 되면 속도감쇄는 다시 감소하여  $\theta_A=60^\circ$ 의 경우 매우 큰 감소를 보여주고 있다. 이것으로부터

각진폭 변화에 따라 공진영역의 유동구조가 크게 변화하고 있음을 알 수 있다.

난류강도 분포는 평균속도의 구배가 최대인 지점 부근에서 최대값을 가지는 전형적인 이중 정점(double peak)형태를 보여주고 있다. 각진폭이 증가할수록 난류강도 역시 증가하며, 모든 각진폭에서 정지된 원주 보다 큰 난류강도 값을 가지는 것으로 나타났다. 후류 중심영역뿐 아니라 자유흐름영역에서도 큰 난류강도 값을 가져 공진영역에서는 강한 난류유동이 형성됨을 알 수 있다.

각진폭  $\theta_A=60^\circ$  조건에서 난류강도 분포는 이중 정점의 형태를 가지나 평균속도 분포는 원주 후류 중심축을 기준하여 약간 아래쪽으로 치우쳐진 분포형태를 보여주고 있다. 이것은 큰 각진폭 및 높은 주파수의 회전가진으로 인해 후류의 혼합효과가 증대되고 유동구조가 불안정하게 되어 나타나는 현상으로 생각되며, Fig. 4(h)에서 볼 수 있듯이 낮은 각진폭 조건에서는 나타나지 않는 45Hz의 주파수 특성이 이와 연관된 것으로 보인다.

3.3 항력

후류 평균속도 분포를 운동량 정리<sup>(6)</sup>에 적용하여 계산한 항력계수의 비( $C_D/C_{D0}$ )를 Fig. 7에 나타내었다.  $\theta_A=10^\circ, 50^\circ, 60^\circ$  조건에서는 정지된 원주보다 후류 중심영역에서의 속도감쇄가 적어 낮은 항력 값을 가지고,  $\theta_A=20^\circ-40^\circ$  조건에서는 회전진동 하지 않는 원주와 거의 유사한 항력계수 값을 가짐을 알 수 있다. 각진폭이  $\theta_A=10^\circ$ 인 조건에서  $\theta_A \geq 50^\circ$ 의 경우와 비슷한 항력감소 효과를 보이는 것은 후류의 유동구조가 비슷하고 공진영역과 천

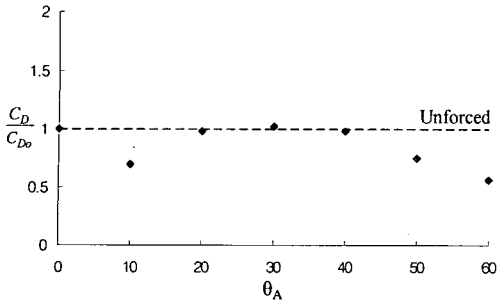


Fig. 7 Variation of drag coefficient with respect to angular amplitude of oscillation  $\theta_A$  at  $Fr=1.0$

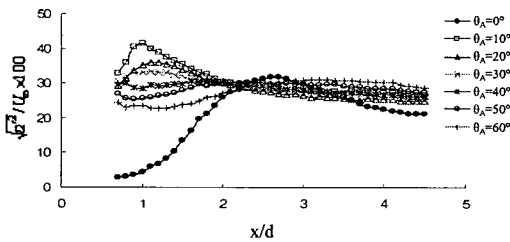


Fig. 8 Mean streamwise turbulence intensity distributions measured along the wake centerline

이영역(transition regime)이 근접해 있기 때문으로 생각 되어진다.

이와 같은 항력계수 결과로부터 공진영역에서  $\theta_A=30^\circ$ 를 전후로 하여 각진폭을 선택적으로 변화 시킴으로써 항력을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 즉,  $\theta_A=20^\circ, 40^\circ$  조건에서 약 2%의 항력감소,  $\theta_A=10^\circ, 50^\circ$  조건에서는 각각 30.42%, 25.47%의 큰 항력감소 효과를 보여주고 있다. 최대 항력감소 효과는 각진폭  $\theta_A=60^\circ$ 에서 약 43.7%로 나타났다. 이러한 항력감소 효과는 원주의 회전운동 운동과 주위 유체사이의 상호작용에 기인하여 전단층의 천이점(transition point)이 변화하여 나타나는 것으로 생각되어진다. 따라서 큰 항력감소를 얻기 위해서는 공진영역에서 각진폭을 가급적 크게 하는 것이 유리하다.

3.4 와형성 영역

원주 모델로부터 후류 중심축을 따라 변동 속도 성분( $\bar{u}'$ )이 최대값을 가지는 위치까지로 정의되는 와형성 영역의 크기는 원주 상하부에서 교대로 유출되는 주기적인 와의 영향을 받기 때문에 변동 속도성분을 측정함으로써 구할 수 있다.<sup>(3,4)</sup>

Fig. 8은 열선 프로우브를 원주 후류의 중심축을 따라 이동시키면서 측정한 주유동 방향 평균 난류강도 분포를 보여주고 있다.  $0^\circ \leq \theta_A \leq 30^\circ$  조건

Table 1 Length of vortex formation region (x/d)

| $\theta_A$ | Stationary | 10°  | 20°  | 30°  | 40° | 50° | 60° |
|------------|------------|------|------|------|-----|-----|-----|
| x/d        | 2.85       | 1.05 | 1.15 | 1.08 | •   | •   | •   |

에서는 유동이 하류로 나아감에 따라 난류강도는 증가하다가 하류의 특정 위치에서 정점에 도달한 후 단조롭게 감소하는 경향을 보여주고 있다. 가진이 있는 경우 난류강도 분포의 정점 위치는 가진이 없는 경우에 비해 원주 쪽으로 훨씬 가까이에 위치하고 있음을 알 수 있다. 이것은 가진에 의해 박리 전단층(separated shear layer)의 와도(vorticity) 증가로 인해 원주 뒷면 가까이에서 와가 유출되는 것을 의미하며,<sup>(6,10)</sup> 유출된 와의 영향이 후류 중심축까지 강하게 나타나고 있다.  $\theta_A \geq 40^\circ$  조건에서는 후류 중심축을 따라 측정된 난류강도 분포에서 정점이 관찰되지 않고, 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다. 정점이 관찰되지 않는 것은 Fig. 9의 가시화 결과에서 알 수 있듯이 와유출이 원주 표면 아주 가까운 위치에서 발생하기 때문이다. 원주에 가까운  $x/d \leq 2.0$  구간을 살펴보면 가진이 있는 경우 모든 각진폭에서 정지된 원주보다 큰 난류강도 값을 가진다. 이것으로부터 공진조건에서의 원주 가진은 근접 후류에서 난류 섭동을 크게 한다는 사실을 알 수 있다.

와형성 영역의 길이를 구하기 위해 6차 다항식을 이용하여 난류강도 분포로부터 정점의 위치를 구하였다. 각진폭  $\theta_A$ 의 변화에 따른 와형성 영역의 길이 변화를 Table 1에 정리하여 나타내었다.  $10^\circ \leq \theta_A \leq 30^\circ$  조건의 경우 가진이 없는 경우에 비해 와형성 영역의 길이는 매우 크게 감소하였는데,  $\theta_A \geq 40^\circ$ 의 경우 정점이 사라지면서 난류강도 분포로부터 와형성 영역의 길이를 정의하기 어렵게 된다. 이때  $x/d \leq 2.0$  구간에서는 전반적으로 낮은 난류강도 값을 가진다. 이러한 현상은 앞에서 언급 하였던 원주 배면 가까운 영역에서 와구조가 형성되는 것과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되어진다.

3.5 유동가시화

회전진동하는 원주 주위 흐름의 유동구조를 정성적으로 파악하기 위하여 연선법으로 근접 후류 유동을 가시화하였다.

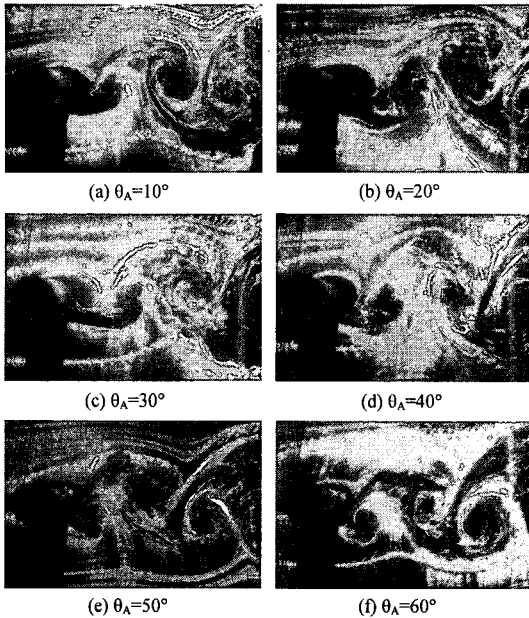


Fig. 9 Visualized flow of wake using a smoke-wire method in the vertical center plane

Fig. 9를 보면 원주와 유체 사이에 상호작용이 크게 나타나는 공진영역에서 각진폭을 증가시키에 따라 박리 전단층의 와도를 증가시켜 규칙적이고 뚜렷한 와를 유출시킴을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8에서 설명한 것처럼 와형성 영역의 길이가 정지된 원주에 비해 아주 짧으며, 각진폭 증가에 따라 와의 크기도 점차 줄어들고 있다.

원주 상하로부터 와유출이 발생하는 곳에는 낮은 압력 값이 분포하게 되어 와유출 주파수와 동일한 주기의 상하진동이 발생하게 된다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 가진 주파수와 동일한 주파수로 와가 규칙적이고 뚜렷하게 유출됨에 따라 양력계수( $C_L$ )의 증가를 예측할 수 있다. 이러한 결과는 회전진동을 이용한 유동제어 기법은 단순한 와유출 억제제가 아니라 박리 전단층의 불안정성을 제어하는 것임을 보여주고 있다. 각진폭이 큰 경우 Fig. 9(e), (f)에는 원주 방향으로 후류의 유체 유입이 증가하여 원주 표면 부근영역에 작은 크기의 와가 형성된다.

Fig. 10은 각진폭  $\theta_A=60^\circ$  조건에서 가시화한 결과를 확대한 그림으로 원주 표면 주위 유동특성을 보여주고 있다. 원주 아랫부분에서 유출된 와의 일부가 원주쪽으로 유입되고(①), 유입된 유체는 반시계 방향으로 회전하는 원주 표면을 따라 전단층 상류까지 깊숙히 이동한다(②). 시계방향으로 회전하는 와도를 갖는 박리 전단층(④)과 원주 표면을 따라 유입되는 유체(②) 사이의 영역에서 작

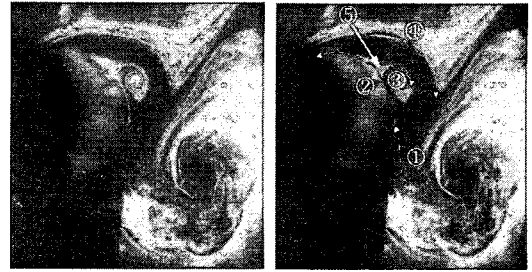


Fig. 10 Generation of small-scale vortex in the shear layer near the cylinder surface at  $\theta_A=60^\circ$

은 크기의 와(③)가 형성된다. 이와 같은 와(③)의 존재는 원주 표면 부근에 와도 이중층(vorticity double layer)이 형성됨을 나타내고, 큰 각진폭으로 회전진동시킬 경우 박리 전단층에서 와도가 크게 증가됨을 알 수 있다. 원주 표면 가까스로 유입된 유체(②)는 박리점(separation point)인 ⑤에서 박리된 이후에도 하류로 흘러가지 않고 원주 표면 가까운 위치에 남아있음을 관찰할 수 있다.

#### 4. 결론

공진영역에서 각진폭( $\theta_A$ ) 변화가 주기적으로 회전진동시킨 원주 후류의 유동구조 변화와 항력감소에 미치는 효과를 실험적으로 해석하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 자연발생 와유출 주파수( $f_n$ )와 동일한 주파수로 가진시키는  $F_R=1.0$  조건에서는 각진폭에 상관없이 공진현상이 발생하고, 각진폭이 증가할수록 공진영역의 범위는 증가하였다.

(2)  $F_R=1.0$  조건에서만 공진이 발생하는 임계 각진폭의 존재를 확인하였으며, 본 실험조건하에서 임계 각진폭  $\theta=8^\circ$  이었다.

(3) 각진폭 변화에 따라 서로 다른 후류 유동특성을 보였으며, 큰 각진폭에서 유동구조가 불안정해졌다. 그리고 공진조건에서의 회전진동은 근접 후류에 큰 영향을 미쳐 와형성 영역의 길이를 크게 감소시킨다. 또한 공진영역에서 후류의 난류강도가 크게 증가하였다.

(4) 공진영역에서 각진폭에 따라 선택적인 항력감소 효과가 나타났는데,  $\theta_A=60^\circ$  조건에서 최대 43.7%의 항력감소가 발생하였다. 각진폭이 클수록 항력이 크게 감소하였다.

(5) 주기적인 회전진동을 이용하면 원주로부터 박리된 전단층의 불안정성(instability)을 효과적으로 제어함으로써 저항을 감소시키는 유동제어 매커니즘을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL) 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Williamson, C. H. K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 477~539.
- (2) Roshko, A., 1954, "On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets," *NACA Rep. 1191*.
- (3) Bloor, M. S., 1963, "The Transition to Turbulence in the Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 290~304.
- (4) Gerrard, J. H., 1966, "The Mechanics of the Formation Region of Vortices Behind Bluff Bodies," *J. Fluid Mech.*, Vol. 25, pp. 401~413.
- (5) Roshko, A., 1993, "Perspectives on Bluff Body Aerodynamics," *J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn.*, Vol. 49, pp. 79~100.
- (6) Tokumaru, P. T. and Dimotakis, P. E., 1991, "Rotary Oscillation Control of a Cylinder Wake," *J. Fluid Mech.*, Vol. 224, pp. 77~90.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Baek, S. J. and Sung, H. J., 1998, "Numerical Simulation of the Flow Behind a Circular Cylinder with a Rotary Oscillation," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 3, pp. 267~279.
- (12) Choi, S. H., Choi, H. C. and Kang, S. M., 2002, "Characteristics of Flow over a Rotationally Oscillating Cylinder," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 26, No. 4, pp. 515~523.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) Ongoren, A. and Rockwell, D., 1988, "Flow Structure from an Oscillating Cylinder : Part 1. Mechanisms of Phase Shift and Recovery in the Near Wake," *J. Fluid Mech.*, Vol. 191, pp. 197~223.
- (16) Koopman, G. H., 1967, "The Vortex Wakes of Vibrating Cylinders at Low Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 501~512.
- (17) Stansby, P. K., 1976, "The Locking-on Vortex Shedding Due to Cross-Stream Vibration of Circular Cylinder in Uniform and Shear Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 74, pp. 641~665.
- (18) Meneghini, J. R. and Bearman, P. W., 1995, "Numerical Simulation of High Amplitude Oscillatory Flow About a Circular Cylinder," *J. Fluids Struct.*, Vol. 9, pp. 435~455.