

## O-ring 을 이용한 원주의 항력감소에 관한 실험적 연구

임희창\* · 이상준†

(2003년 2월 28일 접수, 2003년 5월 31일 심사완료)

### Drag Reduction of a Circular Cylinder With O-rings

Hee Chang Lim and Sang Joon Lee

**Key Words :** O-ring(오링), Wind Tunnel(풍동), Drag Reduction(항력감소), Circular Cylinder(원주), Flow Control(유동제어), Flow Visualization(유동가시화)

#### Abstract

The flow around a circular cylinder was controlled by attaching O-rings to reduce drag force acting on the cylinder. Four experimental models were tested in this study; one smooth cylinder of diameter  $D$  ( $D=60mm$ ) and three cylinders fitted with O-rings of diameters  $d=0.0167D$ ,  $0.05D$  and  $0.067D$  with pitches of  $PPD=2D$ ,  $1D$ ,  $0.5D$  and  $0.25D$ . The drag force, mean velocity and turbulence intensity profiles in the near wake behind the cylinders were measured for Reynolds numbers based on the cylinder diameter in the range of  $Re_D=7.8 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^5$ . At  $Re_D=1.2 \times 10^5$ , the cylinder fitted with O-rings of  $d=0.0167D$  in a pitch interval of  $0.25D$  shows the maximum drag reduction of about 5.4%, compared that with the smooth cylinder. The drag reduction effect of O-rings of  $d=0.067D$  is not so high. For O-ring circulars, as the Reynolds number increases, the peak location of turbulence intensity shifts downstream and the peak magnitude is decreased. Flow field around the cylinders was visualized using a smoke-wire technique to see the flow structure qualitatively. The size of vortices and vortex formation region formed behind the O-ring cylinders are smaller, compared with the smooth cylinder.

#### 1. 서론

물체에 걸리는 유체저항을 감소시켜 에너지를 절감시키고자 하는 연구는 오래전부터 많은 관심을 받아왔다. 물체에 작용하는 유체저항을 감소시키기 위해서는 그 물체 주위의 유동을 정확하게 예측하고 제어할 수 있어야 한다. 최근 들어 난류 전단유동 내에 존재하는 응집구조 (coherent structure)를 제어하여 유체 저항을 감소시키고자 하는 논문들이 발표되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 이와 같은 유동

제어 연구는 공학적 응용뿐만 아니라 학문적으로도 중요한 가치가 있으며 아직도 수행되어야 할 연구들이 많이 남아 있다.

Bandyopadhyay<sup>(3)</sup>는 유동방향의 표면 리블렛과 외층(outer-layer) 장치들(devices) 주위의 평균유동 특성을 파악하고 여러가지 형상의 표면이 항력감소에 미치는 영향에 대해서 연구하였다.

Roshko<sup>(4)</sup>는 원주 후방에 분리판 (splitter plate)을 부착하여 원주 주위에서 발생하는 와류출(vortex shedding)의 억제에 대해 연구하였다. 그는 원주와 분리판의 간격(gap)이 커짐에 따라 와류출이 크게 억제됨을 확인하고, 와류출 억제에 분리판의 간격이 길이에 비해 크게 영향을 미치는 것을 밝혔다. Strykowski and Streenivasan<sup>(5)</sup>는 작은 제어봉(control rod)을 원주 전단층 내에 설치하고 근접후류에 미치는 영향에 대해서 연구하였다.

\* 회원, School of Eng. Sci. Southampton Univ. UK.

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

Naudascher and Rockwell<sup>(6)</sup>은 원주에 작용하는 항력과 구조적인 진동을 제어하기 위하여 원주 표면에 나선형 꼬인 와이어나 엇갈린 와이어 등을 부착하여 원주 주위의 유동특성을 연구하였다. Weaver<sup>(7)</sup>는 레이더 안테나의 원주형태의 지지대에 의해 유발되는 구조적 진동을 제어하기 위하여 표면 돌출물(surface protrusion)을 사용하였다. 그는 지름이  $0.094D$  의 와이어를 나선형으로 직경  $D$  의 원주 둘레에 감았을 때 가장 효과적인 피치(pitch)가  $12D$  임을 확인하였다. Nebres and Batill<sup>(8)</sup>은 I-형 열선 프로브를 사용하여 네 개의 와이어로 나선형으로 감은 원주 후류의 시간 평균화된 유동을 분석하였다.

Zdravokovich<sup>(9)</sup>는 원주 후방에 발생하는 와유출을 제어하는 가장 효과적인 방법으로 와형성 길이를 바꾸는 것으로 판단하고, 원주표면에 돌출물들을 설치하였다. 이러한 돌출물들은 박리선(separation line)을 교란시키고 표면 유동의 방향을 변화시켜서 후류구조를 바꾸었다. Lee and Kim<sup>(10)</sup> 그리고 권기정 등<sup>(11)</sup>의 논문에서는 지름이  $D=40mm$  인 원주에 나선형으로 3 개의 가는 와이어( $d=0.075D$ )를 피치가  $5D$  와  $10D$  가 되도록 감아서 이들이 후류구조의 변화에 미치는 영향을 파악하였다. 그들은 표면 돌출물이 와형성 영역을 늘리고, 와유출 주기와 와형성 폭을 감소시킴을 밝혔다.

그런데 원주의 표면에 와이어를 나선형으로 붙이거나 이를 기계적 가공한다는 것은 상당한 노력을 필요로 한다. 반면에 우리 주위에서 쉽게 구할 수 있는 O-ring 은 값싸고, 쉽게 원주에 붙일 수 있기 때문에 표면 돌출물로서 적용하는 데 효과적이라 할 수 있다. 공학적인 응용 측면에서 볼 때, O-ring 에 의한 항력감소 효과를 확인하고 그들이 어떻게 와구조를 제어하는지를 밝히는 것 또한 중요하다 할 수 있다. 이러한 연구는 향후 항력감소의 물리적 메커니즘을 밝히고 돌출물 형상을 최적화하는 방향으로 연구되어질 것이다.

본 연구에서는 O-ring 부착이 물체의 항력감소에 미치는 효과를 조사하기 위하여 지름이  $60mm$  인 원주에 여러가지 직경의 O-ring 에 대하여 O-ring 사이의 피치를 바꾸어 가면서 공기저항 변화를 해석하고, 원주 주위유동 및 난류특성 변화를 실험적으로 연구하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 풍동 및 실험모델

본 연구는 시험부 단면이  $0.6m^H \times 0.72m^W \times 6.0m^L$  이고 난류강도가 0.08% 이하인 최대 풍속 약  $40m/s$  의 저난류 아음속 풍동에서 수행되었다. 풍동 시험부 내부에 설치한 원주 후방에 가압적 2 차원 유동을 형성시키기 위하여 풍동 시험부 너비를 최대한 사용하였다. 원주의 직경은  $D=60mm$  이며, 자유흐름 속도는 최소  $2m/s$  에서 최대  $34m/s$  까지 변화시켰고, 이 속도에 기준한 Re 수는 약  $8,000 \sim 120,000$  이다. 본 연구에서는 O-ring 의 지름과 피치(PPD : Peak-to-Peak Distance)를 변화시켰다.

원주 모델은 길이가  $600mm(L/D=10)$ 로 테프론 파이프를 만들어졌다. Graham<sup>(12)</sup>은 원주의 무차원 길이  $L/D$  가 3.8 보다 클 경우 와유출 특성이 무한히 긴 원주의 유동특성과 유사하다고 하였다. 풍동 내부에 설치된 O-ring 원주의 개략도 및 좌표계를 Fig.1 에 나타내었으며, O-ring 들의 크기 및 형상에 대한 사양을 Table 1 에 나타내었다. 한 개의 매끈한 원주와 세 개의 다른 O-ring 이 원주 둘레에 설치된 모델( $d=0.0167D$ ,  $0.05D$  and  $0.067D$ )을 이용하여 실험을 수행하였다. O-ring 설치시 각각의 O-ring 에 대하여 4 가지 피치를(PPD= $2D$ ,  $1D$ ,  $0.5D$  and  $0.25D$ )로 원주에 부착하였다.

원주는 풍동의 시험부 중앙에 수평으로 설치하였으며, 원주에 기인한 폐쇄율(blockage ratio)은 8% 이하였다. 이러한 폐쇄율과 벽면 교란 효과를 보정하기 위하여, 본 연구에서는 Allen and Vincenti<sup>(13)</sup>의 보정식을 적용하여 속도와 항력계수를 보정하

Table 1 Specifications of O-ring attached on the cylinder surface

Model	O-ring diameter ( $d$ , mm)	Cylinder ( $D$ , mm)	Diameter ratio $d/D$	Area of O-ring [ $mm^2$ ]	Total occupied area of O-rings for $PPD=0.25D$ [ $mm^2$ ]
1	-	60	-	-	
2	1	60	0.0167	0.785	61.23
3	3	60	0.05	7.07	551
4	4	60	0.067	12.57	980

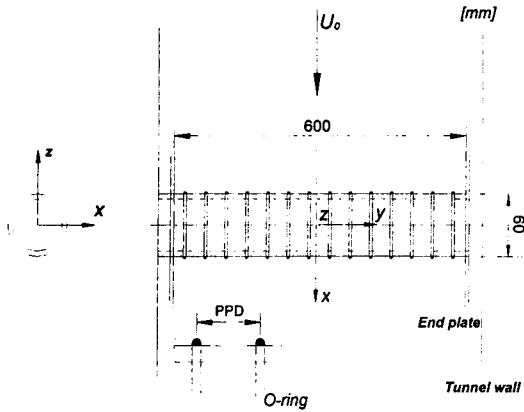


Fig. 1 Schematic diagram of the test cylinder and coordinate system (unit: mm)

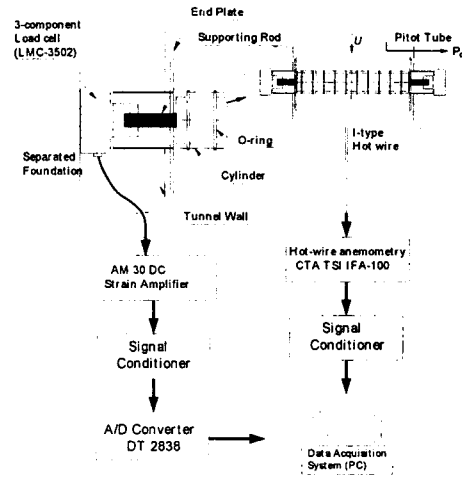
였다. 또한 풍동 벽면을 따라 성장하는 경계층 효과를 최소화하기 위해서 원주 모델의 양끝에 300×300mm<sup>2</sup>의 사각 끝판(end-plate)을 설치하였다. 끝판의 형상과 크기는 Stansby<sup>(14)</sup>의 결과를 참조하여 선정하였다.

2.2 후류유동 및 항력측정

원주 후류의 유속은 TSI사의 IFA100 정온형 열선 유속계를 사용하여 측정하였다. 후류의 속도분포 측정에는 X-형 열선 프로우브(probe), 그리고 와류출 주파수 측정에는 I-형 열선 프로우브를 사용하였다. 열선 프로우브로부터 나오는 전압신호는 12bit A/D 변환기를 거쳐 DMA 방식으로 컴퓨터에 입력된 후, 통계 처리하여 원하는 속도정보를 얻었다.

후류의 평균속도 및 난류강도분포는  $x/D=4$  단면에서  $y/D=-3\sim 3$  까지 0.1D의 간격으로 측정하였다. 열선 프로우브는 정밀도가 0.1mm 이하인 3차원 이송장치를 이용하여 원하는 위치로 이송시켰다. 한 지점에서 초당 1,000개의 비율로 샘플링하여 16,384개의 데이터를 얻었는데, 노이즈 제거를 위해 속도 신호를 800Hz의 저역필터를 거치게 했다. 또한 실험 중 풍동시험부 내부의 공기온도를 ±0.5℃로 일정하게 유지시켜 온도에 따른 열선보정을 따로 하지 않아도 되게 하였다.

원주 후류는 주기적인 와류출로 인해 조직적인 응집구조를 가지는데, 난류전단유동에서 이러한 응집구조는 난류의 성장 및 확산에 기여하고, 외부유체의 유입에 중요한 역할을 하게 된다. 따라서, 원주 근접 후류에 존재하는 큰 규모의 유동구조를 밝히는 것은 후류특성의 분석에 있어 매우 중요하다. 이러한 응집구조의 와류출 주파수분석하기 위하여  $x/D=1$ ,  $y/D=0.5$ 인 지점에 설치한 I-형



(a) Drag measurement (b) Velocity measurement

Fig. 2 Schematic diagram of the drag and velocity measurement system

열선 프로우브로부터 나오는 속도신호를 스펙트럼 분석하였다.

원주에 걸리는 항력은 3분력계(Nishio LMC 3502)를 이용하여 측정하였다. 원주에 걸리는 항력만을 측정하기 위해 3분력계와 원주 지지대를 풍동 바깥에 설치하여 유동의 영향을 받지 않게 하였다. 3분력계에서 나오는 전압신호는 DC strain amplifier (DSA-100)로 증폭한 후, PC로 연결되어진 자료획득장치(DT 2838)를 통해서 A/D로 변환시켜 시간 평균화된 값을 구하였다. 항력계수( $C_D$ )는 물체에 걸리는 항력  $D$ 와 공기밀도  $\rho$ , 자유흐름속도  $U_0$ , 그리고 물체의 단면적  $A$ 로 다음과 같이 무차원화시켜 구하였다.

$$C_D = \frac{D}{\rho U_0^2 A/2} \tag{1}$$

일반적으로 물체에 작용하는 항력은 물체 전후방에 형성되는 압력차에 의한 형상저항(form drag)과 물체표면의 전단응력에 기인한 마찰저항(friction drag)으로 이루어진다. 형상저항과 마찰저항의 상대적인 크기는 물체의 형상, 특히 두께에 따라서 크게 달라지는데, 원주의 경우 압력저항이 지배적인 것으로 알려져 있다.

2.3 유동가시화

O-ring 원주 주위의 정성적인 유동특성을 관찰하기 위하여 연선법(smoke-wire method)을 사용하여 원주 주위유동을 가시화하였다. 파란관 오일을 묻힌 직경 0.1mm의 니크롬선에 일정한 전압을 가해 연소로 생성된 연기를 이용하여 가시화하는

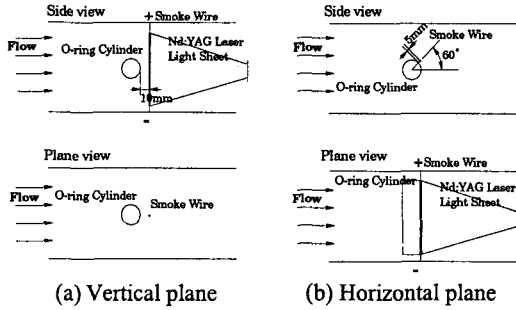


Fig. 3 Installation of a smoke wire for flow visualization

연선법은 4m/s 이상의 속도에서는 유맥선(streakline)이 깨어지기 때문에 적용하기 어렵다.

원주 주위의 박리특성 및 유동특성 변화를 주로 관찰하기 위하여 본 실험에서는 Fig. 3 과 같이 연선을 원주 표면 부근에 설치하였다. Nd:YAG 레이저를 광원으로 사용하고 Nikon 카메라를 레이저와 동기시켜 깨끗한 유동영상을 얻도록 하였다. 자유흐름속도는 2m/s ( $Re_D=8,300$ )로 고정시켜서 원주 주위의 유동을 가시화하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 항력

Fig. 4 는 본 연구에서 사용한 다양한 형태의 O-ring 원주의  $Re$  수에 따른 항력계수 변화를 보여주고 있다. 그림에서 가로축은 자유흐름속도에 기초한  $Re$  수를, 세로축은 유효단면적을 사용하여 무차원시킨 항력계수를 나타낸다. 그리고 기존 결과와의 비교를 위하여 매끈한 2 차원 원주를 가지고 실험을 수행한 Wieselsberger<sup>(15)</sup>의 결과를 굵은 실선으로 나타내었다. 실험 데이터 각각에 표시된 세로줄은 95%의 신뢰범위를 가지고 추정된 오차 범위를 나타낸다.

Fig. 4 를 보면 매끈한 원주의 항력값은  $C_D=1.2$ 로 거의 일정한 값을 가지고 있다. 이러한 결과는  $10^4 < Re_D < 10^5$  범위에서 Wieselsberger 의 측정결과와도 잘 일치하고 있다. 이것으로부터 본 연구에서 사용한 매끈한 원주의 경우 긴 2 차원 원주의 항력결과를 잘 나타내 주고 있는 것을 확인하였다.

상대적으로 큰 직경의 O-ring  $d=4mm(0.067D)$ 을 장착했을 때,  $Re$  수 변화에 따른 항력계수의 변화는 측정된 영역 내에서 매끈한 원주의 결과와 거의 차이가 나지 않고 있다.  $Re$  수가  $Re_D=6 \times 10^4$ 보다 큰 경우에도 O-ring 원주의 항력계수는 매끈한 원주에 비해 그리 많은 차이를 보이지 않는다.

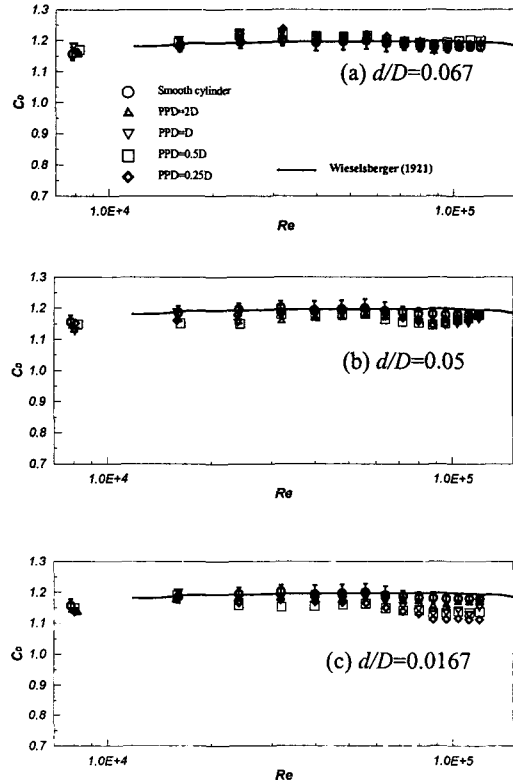


Fig. 4 Variations of drag coefficient with respect to Reynolds number

보다 작은 O-ring 을 부착시킴 경우 항력감소 효과는 높은  $Re$  수 (Figs. 4(b),(c)) 영역에서 크게 나타나고 있다. 그러나,  $Re_D=4 \times 10^4$  보다 작은  $Re$  수 영역에서는 O-ring 원주의 항력계수가 매끈한 원주와 유사한 경로를 보여주고 있다.  $Re$  수가  $6 \times 10^4$ 보다 커짐에 따라, O-ring 원주의 항력계수는 피치를 좁힐수록 크게 감소하고 있다.

직경이  $d=0.0167D$  인 O-ring 을 피치  $PPD=0.25D$ 로 설치한 경우,  $Re$  수  $8.8 \times 10^4$ 에서 매끈한 원주에 비해 최대 3.4%의 항력감소를 나타내고 있다. 결과는 항력계수가 O-ring 의 직경뿐만 아니라 인접한 O-ring 사이의 피치에도 크게 영향을 받는다는 사실을 확인시켜주는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 직경이  $d=0.0167D$  인 O-ring 을 원주에 부착시킨 경우에 대해서 유동구조의 변화를 연구하였다.

#### 3.2 후류 유동특성

Fig. 5 는 하류 위치단면  $x/D=4$  에서 자유흐름 속도  $U_o=8m/s$  ( $Re_D=32,000$ )인 조건에서 측정된 원주 후류의 주유동방향 평균속도 및 난류강도분포를

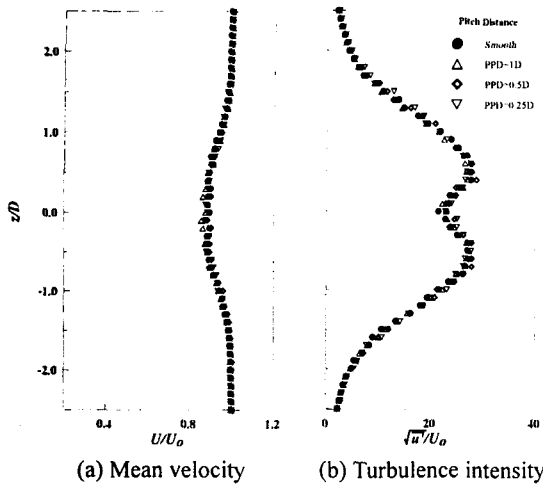


Fig. 5 Streamwise mean velocity and turbulence intensity profiles at  $x/D=4$  for  $U_0=8m/s$

나타낸 것이다. 여기서 수직방향 거리를 나타내는 세로축은 원주직경  $D$ 로 무차원시켰다. 주유동방향 평균속도에 대한 측정오차는 최대 1.3% 이하로 평가되었다.

여기서보면 점성력의 영향으로 주유동방향 속도감쇄가 후류 중심인  $y=\pm 1D$  이내 구간에 주로 나타남을 알 수 있다. 또한, 난류강도분포는 이중정점(double peaks) 형태로 후류영역과 자유흐름부분이 구분되어진다.  $Re_D=32,000$  조건에서 매끈한 원주와 O-ring 원주 후류의 평균속도와 난류강도분포는 거의 차이를 보이지 않고 있다.

Fig. 6 은 같은 하류 위치단면  $x/D=4$  에서 자유흐름속도를  $U_0=16m/s(Re_D=64,000)$ 로 증가시킨 상태에서 측정한 평균속도 및 난류강도분포를 나타내고 있다. 유속이  $8m/s$  인 조건에서는 매끈한 원주와 O-ring 원주 후류가 큰 차이를 보이지 않았으나, 유속이  $16m/s$  인 조건에서는 평균속도와 난류강도가 후류 중앙부분에서 크게 차이를 보여주고 있다. 이것은 O-ring 원주의 경우 표면에 설치된 O-ring 의 존재로 유동구조가 크게 변화하고 있음을 나타낸다.

O-ring 원주의 경우, 매끈한 원주에 비해 후류 중심영역에서 평균속도의 감쇄가 상대적으로 크게 나타났으며, 난류강도 또한 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나, 자유흐름영역에서는 유속이 증가하고 난류강도는 감소하고 있다. 특히, O-ring 원주의 경우 와형성영역의 폭이 약 14% 정도 감소한 것은 나선형의 표면돌출물을 원주에 부착하여 실험했던 Lee and Kim<sup>(10)</sup>의 경우와 유사한 유동특성을 보여준다. 이것은 표면 돌출물에 의해서 와류 생성이 억제되어 주유동방향의 평균유속이 와

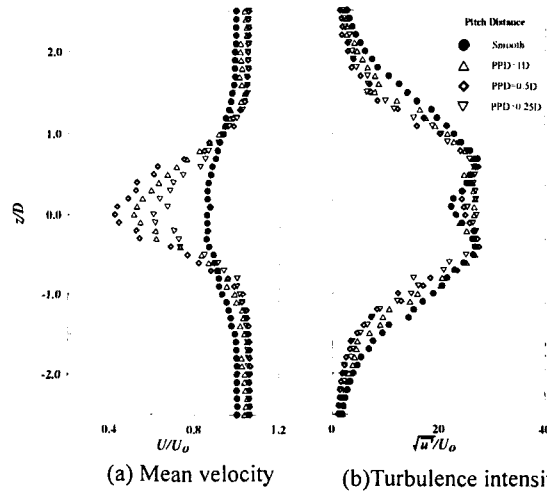


Fig. 6 Streamwise mean velocity and turbulence intensity profiles at  $x/D=4$  for  $U_0=16m/s$

형성영역에서 감소하고 난류강도 또한 균일한 분포형태를 가진다는 것을 나타낸다. O-ring 원주의 와형성영역에서 관찰된 큰 속도손실은 자유흐름으로부터 와형성 영역으로의 운동량 전달이 크게 억제되어 나타나며 같은 이유로 후류 중심영역에서 난류의 섭동이 거의 일정한 것으로 보인다.

O-ring 원주의 경우 자유흐름 영역에서 매끈한 원주에 비해 높은 속도값을 가지는 것은 원주에 작용하는 항력이 감소되었다는 것을 의미한다. 와의 생성이 억제되고 큰 규모에서 작은 에디(eddy)로 변화한다면, 자유흐름의 일부만 후류영역 내부로 유입되게 되는 것이다. 결과적으로 자유흐름으로부터 와형성영역으로의 운동량 전달이 속도손실을 회복하기에는 불충분하여 이러한 경향을 보인다고 유추할 수 있다.

3.3 와형성영역

I-형 열선프로브를 원주 후류의 중심축을 따라 이동시키면서 와형성영역의 크기를 측정하였다. 와형성영역은 원주 상하부에서 유출하는 주기적인 와의 영향을 받기 때문에 변동 속도성분을 측정함으로써 쉽게 구할 수 있다.

Fig. 7 은 원주 후류의 중심축을 따라 측정된 주유동방향 평균속도분포를 보여주고 있다. 속도신호는 와유출 주파수로 band-pass 필터링을 사용하였다. 매끈한 원주의 경우 후류 중심축을 따라 하류로 나아감에 따라 속도값이 점차 증가하면서 특정값으로 접근하는 경향을 보여주고 있다. 그리고 평균유속은 Re 수가 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 가진다. Fig. 7(b)는 매끈한 원주의 경우에 비교하여 O-ring 의 피치간격 변화에 따른 주유동방향 평균속도의 차이  $\Delta U$ 를 나타낸 것이

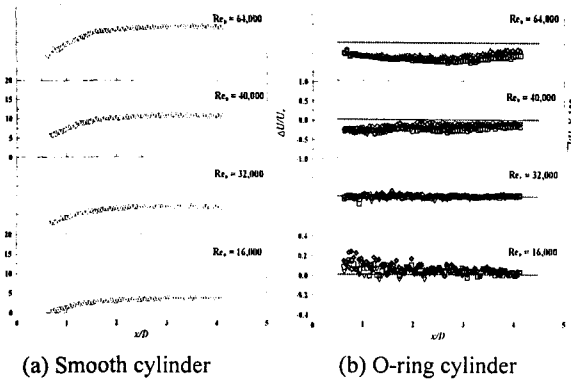


Fig. 7 Mean streamwise velocity distributions measured along the wake centerline (○, Smooth; ▽, PPD=1D; □, PPD=0.5D; ◇, PPD=0.25D)

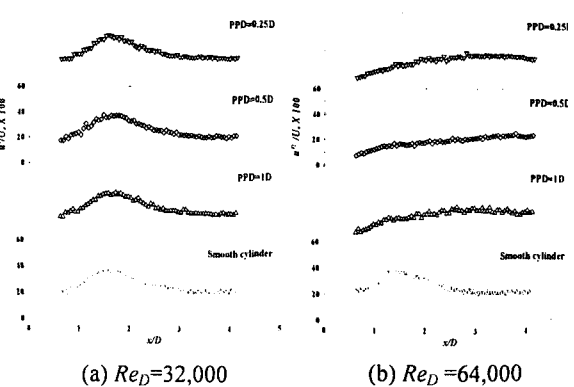


Fig. 8 Turbulence intensity distributions along the wake centerline at  $Re_D=32,000$  and  $64,000$

다.  $Re$  수가  $1.6 \times 10^4$  인 경우, 평균유속은 매끈한 원주와 거의 비슷한 경향을 보여주고 있다. 보다 높은  $Re$  영역에서 평균유속은 매끈한 원주에 비해 O-ring 원주가 낮은 값을 가지며, 이러한 속도차이는  $Re$  수 증가에 따라 점차 커지는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 8 은 후류의 중심축을 따라 측정된 난류강도분포를 보여주고 있다. 매끈한 원주의 경우 유동이 하류로 나아감에 따라, 난류강도는 증가하다가 약  $x/D=1.6$  위치에서 정점에 도달한 후 단조롭게 감소하고 있다. 난류강도분포에서 정점의 위치는  $Re$  수가 증가함에 따라 원주방향으로 약간 이동하고 있다.  $Re_D=32,000$  조건에서는 O-ring 원주들이 매끈한 원주와 거의 동일한 위치에서 난류강도가 극부 최대값을 가지고 있다. 또한,  $Re$  수를 증가시키에 따라 난류강도는  $x/D=1\sim 2$  영역에서 감소하고 있다. 예를 들어,  $x/D=1.4$  위치에서는 O-ring 원주의 경우 난류강도값이 매끈한 원주에 비해 절반정도의 크기를 가진다. 그러나 보다 하류로 나아갈수록 난류강도는 모든 경우에 대해 거의 일정한 값을 가지는 경향을 보여준다. 이러한 결과는 원주에 부착한 O-ring 이 원주 후류의 속도변동성분을 감소시키고 이 와형성영역의 길이를 증가시키는 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

와형성영역의 길이를 구하기 위해 5 차 다항식을 이용하여 난류강도분포의 정점의 위치를 구하였다.

Fig. 9 는  $Re$  수와 PPD 변화에 따른 와형성영역 길이의 변화를 나타낸 것이다. 매끈한 원주의 경우 와형성영역의 길이는  $Re_D=4.0 \times 10^4$  까지 선형적으로 감소하다가 그 이후 거의 일정한 값 ( $x/D=1.45$ )을 가진다.

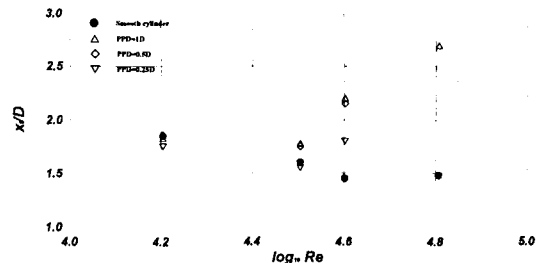


Fig. 9 Length of vortex formation region

O-ring 원주의 경우,  $Re_D=16,000$  조건에서 난류강도의 정점은  $x/D=1.8$  에서 나타나고 있다.  $Re$  수가 32,000 로 커짐에 따라 와형성영역의 길이는 점차 감소하고 있다.  $Re$  수가 40,000 이상으로 증가하게 되면 난류강도의 최대값은 크게 증가하며 와형성영역의 길이도 하류방향으로 길어진다. 이러한 현상은 앞에서 언급했던 와형성 억제와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되어진다.

### 3.4 스펙트럼분석

원주 후방  $x/D=1$ ,  $y/D=0.5$  지점에서 측정된 파워 스펙트럼밀도 (PSD, Power Spectral Density) 분포를 Fig. 10 에 나타내었다. PSD 분포에서 정점은 주기적으로 유출하는 와류구조가 존재함을 나타내고 있다. Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이, 매끈한 원주는 각각의  $Re$  수에 대해 뚜렷한 정점을 가지고 있으며 와유출주파수는  $Re$  수 증가에 따라 증가하고 있다.

그러나, 높은  $Re$  수 영역에서 O-ring 원주는 높은  $Re$  수에서 완전히 다른 분포를 보여주고 있다. 그리고,  $Re$  수  $3.2 \times 10^4$  까지 매끈한 원주와 거의 유사한 와유출주파수 특성을 나타내고 있다.  $Re$  수가 증가함에 따라 PSD 분포에서 지배적인 와유출주파수가 사라지는 경향을 보여주고 있다. O-ring 원

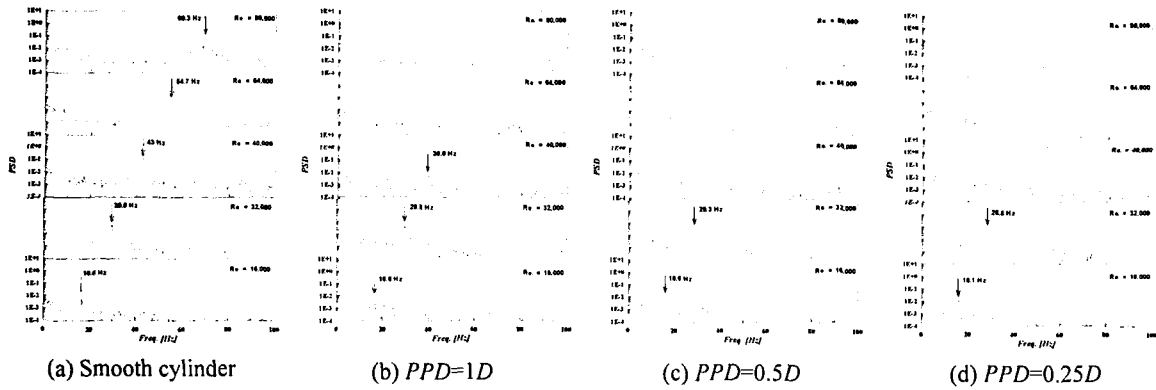


Fig. 10 Comparison of power spectral density distribution measured at the location of  $x/D=1, y/D=0.5$

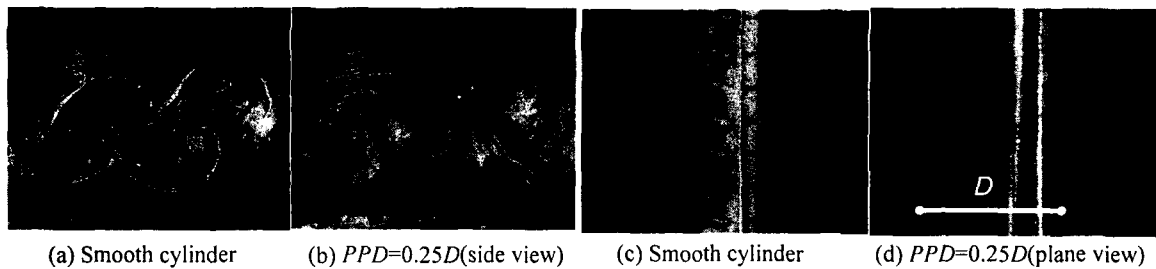


Fig. 11 Visualized flow using a smoke-wire method

주의 경우 보다 낮은 Re 수에서 PPD 감소에 따라 감소하고 있다. 이러한 결과는 원주에 부착된 O-ring 이 원주로부터 유출되는 와를 효과적으로 감소시키고 와형성영역의 길이를 증가시키는데 기인한 것으로 판단되어진다.

3.5 유동가시화

O-ring 원주 주위의 유동구조를 파악하기 위하여 연선법을 이용한 유동가시화를 수행하였다.

Fig. 11 은 Re 수가 12,500 인 조건에서 매끈한 원주와 O-ring 원주 ( $PPD=0.25D, d=0.0167D$ ) 근접후류의 수직면과 수평면 내부 유동을 가시화한 결과를 보여주고 있다. 수직면에서의 유동구조를 살펴보면 매끈한 원주로부터 생성된 큰 스케일의 와가 O-ring 원주의 경우에 비해 보다 규칙적이고 뚜렷하게 나타나고 있다. O-ring 원주의 경우, 와가 확산되면서 퍼지는 경향을 보여주며 와류폭이 약간 작아짐을 알 수 있다. 이것은 O-ring 의 설치에 의해 원주후류의 와형성 폭이 줄어든 것으로 판단되어진다. 이러한 가시화 결과는 평균유속과 PSD 분포를 포함한 본 연구의 다른 결과들을 뒷받침하고 있다.

Fig. 11(c)~(d)는 원주후류 수평단면에서의 유동구조를 가시화한 결과이다. Fig. 11(d)는 O-ring 표면에 의해 교란되어진 유동구조의 폭방향 변화를 뚜렷이 보여주고 있다. 이에 비해, 매끈한 원주의 경우 원주표면 가까이에서 특이한 유동구조를 찾아볼 수 없다.

O-ring 원주 후방 근접후류의 와들은 매끈한 원주에 비해 활발하고 평균적으로 크기는 작다. 특히, O-ring 원주의 경우 폭방향으로 빠르고 느린 유동에 기인하여 형성된 V 형상의 유동구조가 반복적으로 나타나고 있다. 이에 따라 O-ring 의 존재로 인하여 2 차 와들의 생성이 억제되고, 보다 작은 스케일로 깨어지게 된다고 판단되어진다. 이러한 결과들로부터 원주표면에 장착한 O-ring 들은 경계층의 천이위치를 효과적으로 제어함으로써 원주 근접 후류영역의 유동구조를 변화시킨다는 사실을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 O-ring 원주의 유동구조와 항력 변화를 실험적으로 해석하였다. 자유흐름속도는

최소 2m/s 에서 최대 34m/s 까지 변화시켰는데, 원주직경에 기초한 Re 수는  $Re_D=7,800\sim 120,000$  이었다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 직경  $d=0.0167D$  인 O-ring 을 피치  $PPD=0.25D$  로 원주에 부착한 경우 Re 수 120,000 조건에서 매끈한 원주에 비해 약 5.4% 항력을 감소시켰다. 그러나,  $d=0.067D$  보다 큰 직경을 가지는 O-ring 을 사용한 경우 항력감소효과는 크지 않았다.

(2) O-ring 원주의 경우, Re 수 증가에 따라 근접후류의 난류강도는 감소하고 정점 위치가 후방으로 이동하였다. 그러나, Re 수가 32,000 보다 커지게 되면 정점은 사라진다.

(3) 매끈한 원주에 비해 O-ring 원주 후방에 형성된 와형성영역은 그 길이가 길어지나 와류폭은 감소하였다. Re 수를 증가시키고 O-ring 직경과 PPD 를 감소시킴에 따라 이러한 효과는 증가하였다.

(4) O-ring 원주의 와유출주파수는  $Re_D=32,000$  까지는 거의 비슷한 경향을 가지다가 Re 수가 보다 더 커지게 되면 와유출주파수는 증가하며 매우 높은 Re 수 조건에서는 특정주파수가 거의 사라진다.

(5) 매끈한 원주 표면부근의 유동구조는 폭방향으로 거의 변화가 없다. 반면에, O-ring 원주의 후방에 형성된 와는 크기가 작으며 폭방향으로 V 형상의 반복적인 유동구조를 가진다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) Cantwell, B. J., 1981, "Organized Motion in Turbulent Flow," *Annual Rev. Fluid Mech.*, 13, pp. 457~515.
- (2) Robinson, S. K., 1991, "Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer," *Annual Rev. Fluid Mech.*, 23, pp. 601~639.
- (3) Bandyopadhyay, P. R., 1986, "Review - Mean Flow in Turbulent Boundary Layers Disturbed to Alter Skin Friction," *J. of Fluids Eng.*, Vol. 108, pp. 127~140.
- (4) Roshko, A., "On the Drag and Shedding Frequency of Two-Dimensional Bluff Bodies," National Advisory Committee for Aeronautics, NACA TN 3169.
- (5) Strykowski, P. J. and Sreenivasan, K. R., 1990, "On the Formation and Suppression of Vortex 'Shedding' at Low Reynolds Numbers," *J Fluid Mech.*, Vol 218, pp. 71~107.
- (6) Naudascher, E. and Rockwell, D., 1994, "Flow-Induced Vibrations: An Engineering Guide," Rotterdam, A. A. Balkema Press.
- (7) Weaver, W., 1961, "Wind-Induced Vibration in Antenna Members," *J. Eng. Mech. Div.*, Vol. 87, pp. 141~165.
- (8) Nebres, J. V., Batill, S. M., 1992, "Flow about Cylinders with Helical Surface Protrusions," 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, AIAA Paper 92-0540.
- (9) Zdravkovich, 1981, "Review and Classification of Various Aerodynamics and Hydrodynamic Means for Suppressing Vortex Shedding," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 7, pp. 145~189.
- (10) Lee, S. J., Kim, H. B., 1997, "The Effect of Surface Protrusions on the Near Wake of a Circular Cylinder," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.69, pp. 351~361.
- (11) Kwon, K. J., Kim, H. B. and Lee, S. J., 1996, "Flow Characteristics of Near Wake behind a Circular Cylinder with Helical Surface Protrusions," *Trans. Of the KSME B*, Vol.20(8), pp. 2601~2610.
- (12) 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.
- (13) Allen, H. J. and Vincenti, W. G., 1944, "Wall Interference in A Two-Dimensional Flow and Wind Tunnel with Consideration of the Effect of Compressibility," NACA, Wash., Rep. 782.
- (14) Stansby, P. K., 1974, "The Effect of Endplates on the Base Pressure Coefficient of a Circular Cylinder," *Aeronautical J.*, Vol. 78, pp. 36~37.
- (15) Wieselsberger, C., "Neuere Feststellungen Uber die Gesetze des Flussigkeits - und Luftwiderstands," *Phys. Z.* Vol. 22, 321-8.