

O-ring 을 이용한 원주의 저항감소에 관한 실험적 연구

임희창* · 이상준†

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(저항감소), 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 ($D=60\text{mm}$) and three cylinders fitted with O-rings of diameters $d=0.0167D$, $0.05D$ and $0.067D$ with pitches of $PPD=1D$, $0.5D$ and $0.25D$. The drag force, mean velocity and turbulent 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 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. 서 론

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.^(1,2) 이와 같은 유동 제어 연구는 공학적 응용뿐만 아니라 학문적으로

도 중요한 가치가 있으며 아직도 수행되어야 할 연구들이 많이 남아 있다.

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

Naudascher and Rockwell⁽⁴⁾은 원주에 작용하는 항력과 구조적인 진동을 제어하기 위하여 원주 표면에 나선형 꼬인 와이어나 엇갈린 와이어 등을 부착하여 원주 주위의 유동특성을 연구하였다. Weaver⁽⁵⁾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⁽⁶⁾은 I-형

* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계산업공학부

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

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

열선 프로우브를 사용하여 네 개의 와이어로 나선형으로 감은 원주 후류의 시간 평균화된 유동을 분석하였다.

Lee and Kim⁽⁷⁾은 지름이 $D=40\text{mm}$ 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 응용측면에서 볼 때, O-ring 에 의한 항력감소효과를 확인하고 그들이 어떻게 와구조를 제어하는지를 밝히는 것 또한 중요하다 할 수 있다. 이러한 연구는 향후 저항감소의 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 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 풍동 및 실험모델

본 연구는 시험부 단면이 $0.6\text{m}^H \times 0.72\text{m}^W \times 6.0\text{m}^L$ 이고 난류강도가 0.08% 이하인 저난류 아음속 풍동에서 수행되었다. 풍동 시험부 내부에 설치한 원주 후방에 가급적 2 차원 유동을 형성시키기 위하여 풍동 시험부 너비를 최대한 사용하였다. 원주의 직경은 $D=60\text{mm}$ 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 길이는 $600\text{mm}(L/D=10)$ 로 테프론 파이프를 만들어졌다. Graham⁽⁸⁾은 원주의 무차원 길이 L/D 가 3.8 보다 클 경우 와유출 특성이 무한히 긴 원주의 유동특성과 유사하다고하였다. 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 원주둘레에 설치된 모델($d=0.0167D$, $0.05D$ and $0.067D$)을 이용하여 실험을 수행하였다. O-ring 설치시 각각의 O-ring 에 대하여 3 가지 피치를($PPD=1D$, $0.5D$ 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⁽⁹⁾의 보정식을 적용하여 속도와 항력계수를 보정하였다. 또한 풍동 벽면을 따라 성장하는 경계층 효과를 최소화하기 위해서 원주 모델의 양끝에 $300 \times 300\text{mm}^2$ 의 사각 끝판(end-plate)을 설치하였다. 끝판의 형상과 크기는 Stansby⁽¹⁰⁾의 결과를 참조하여 선정하였다.

2.2 후류유동 및 항력측정

원주 후류의 유속은 TSI 사의 IFA100 정온형 열선유속계를 사용하여 측정하였다. 후류의 속도분포측정에는 X-형 열선 프로우브(probe), 그리고 와유출 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 $0.1D$ 간격으로 측정하였다. 열선 프로우브는 0.1mm 이하의 정밀도를 가지는 3 차원 이송장치를 이용하여 원하는 위치로 이송시켰다. 한 지점에서 초당 1,000 개의 비율로 샘플링하여 16,384 개의 데이터를 취득하였는데, 노이

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

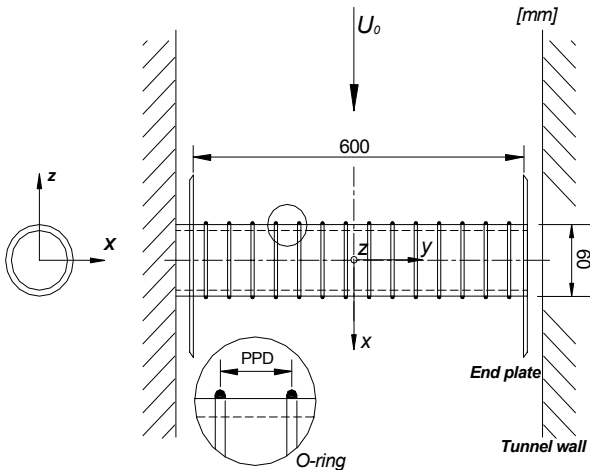


Fig. 1 Schematic diagram of test cylinders and coordinate system (unit:mm)

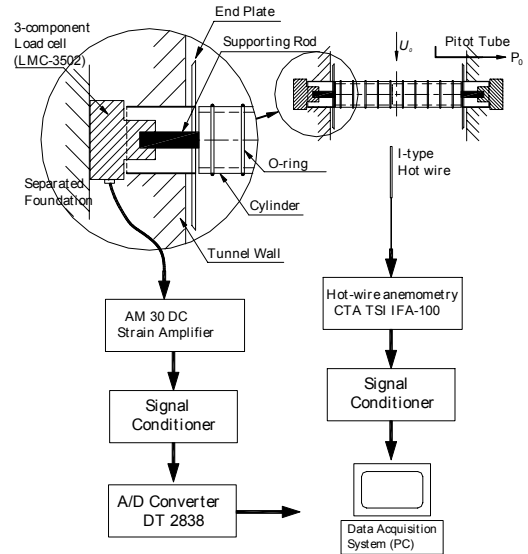
즈 제거를 위해 속도 신호를 800Hz 의 저역필터를 거치게 했다. 또한 실험 중 풍동시험부 내부의 공기온도를 ±0.5℃로 일정하게 유지시켜 온도에 따른 열선보정을 따로 하지 않아도 되게 하였다.

원주 후류는 주기적인 와유출로 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 와유출 주파수분석하기 위하여 x/D=1, y/D=0.5 인 지점에 설치한 I-형 열선 프로브로부터 나오는 속도신호를 스펙트럼 분석하였다.

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

$$C_D = \frac{D}{\rho U_0^2 A/2} \quad (1)$$

일반적으로 물체에 작용하는 항력은 물체 전후방에 형성되는 압력차에 의한 형상저항(form drag) 과 물체표면의 전단응력에 기인한 마찰저항(friction drag)으로 이루어진다. 형상저항과 마찰저



(a) Drag measurement (b) Velocity measurement

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

항의 상대적인 크기는 물체의 형상, 특히 두께에 따라서 크게 달라지는데, 원주의 경우 압력저항이 지배적인 것으로 알려져 있다.

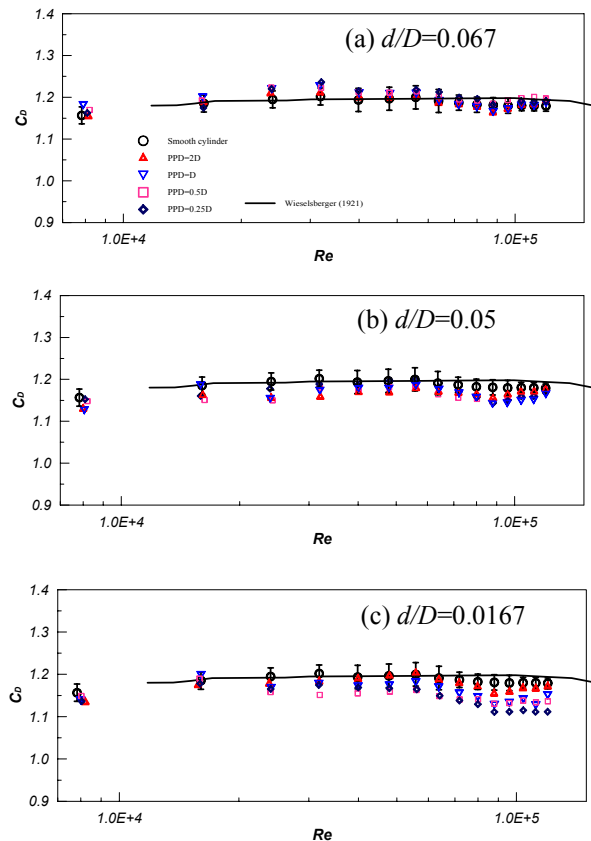


Fig. 3 Variations of drag coefficient with respect to Reynolds number

3. 결과 및 토의

3.1 항력

Fig. 3 은 본 연구에서 다룬 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⁽¹¹⁾의 결과를 굵은 실선으로 나타내었다. 실험 데이터 각각에 표시된 세로줄은 95%의 신뢰범위를 가지고 추정된 오차범위를 나타낸다.

Fig. 3 을 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 다룬 매끈한 원주의 경우 긴 2 차원 원주의 항력 결과를 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.

보다 작은 O-ring 을 부착시킴 경우 항력감소 효과는 높은 Re 수 (Figs. 3(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 6×10^4

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 8.8×10^4 에서 매끈한 원주에 비해 최대 3.4%의 항력감소를 나타내고 있다. 결과는 항력계수가 O-ring 의 직경뿐만이 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.4 는 하류 위치단면 $x/D=4$ 에서 자유흐름속도 $U_0=8m/s$ ($Re_D=32,000$)인 조건에서 측정된 원주 후류의 주유동방향 평균속도 및 난류강도분포를 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.5 는 같은 하류 위치단면 $x/D=4$ 에서 자유흐름속도를 $U_0=16m/s$ ($Re_D=64,000$)로 증가시킨 상태에서 측정된 평균속도 및 난류강도분포를 나타내고 있다. 유속이 $8m/s$ 인 조건에서는 매끈한 원주

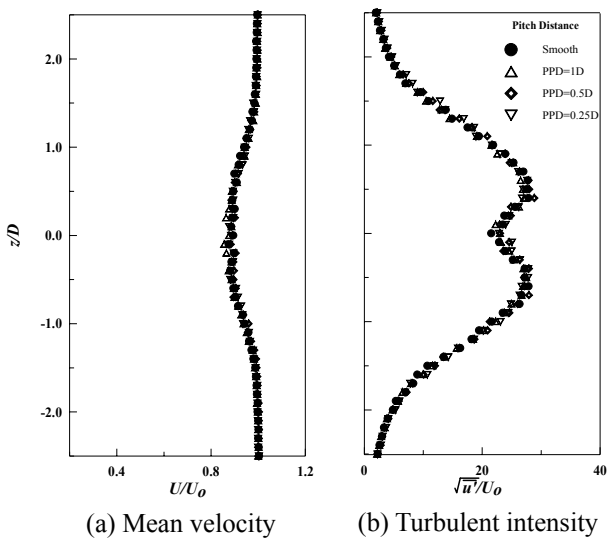


Fig. 4 Streamwise mean velocity and turbulence intensity profiles at $x/D=4$ for $U_0=8m/s$

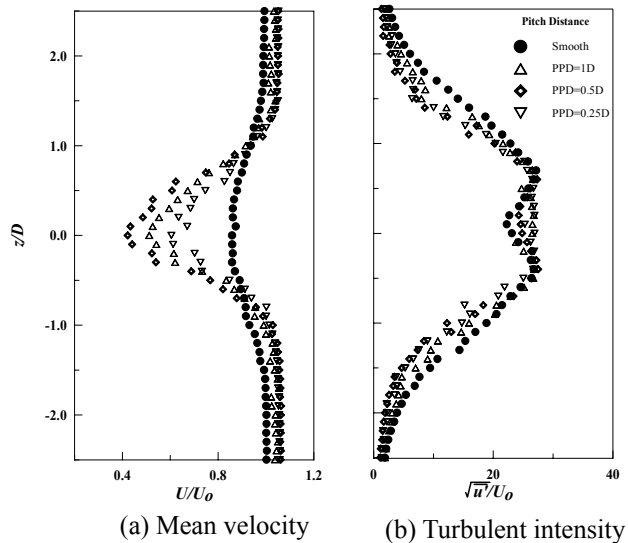


Fig. 5 Streamwise mean velocity and turbulence intensity profiles at $x/D=4$ for $U_0=16 m/s$

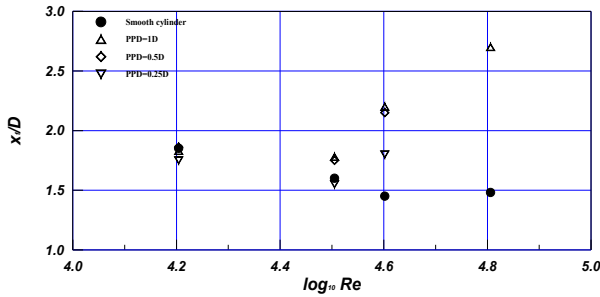


Fig. 6 Length of vortex formation region

와 O-ring 원주 후류가 큰 차이를 보이지 않았으나, 유속이 18m/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 감소가 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⁽⁷⁾의 경우와 유사한 유동특성을 보여준다. 이것은 표면 돌출물에 의해서 와류생성이 억제되어 주유동방향의 평균유속이 와형성영역에서 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 에디로 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.

와형성영역의 길이를 구하기위해 5 차 다항식을 이용하여 난류강도분포의 정점의 위치를 구하였다.

Fig.6 은 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 ($x_f/D=1.45$)을 가진다.

O-ring 원주의 경우, $Re_D=16,000$ 조건에서 난류강도의 정점은 $x_f/D=1.8$ 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.7 에 나타내었다. PSD 분포에서 정점은 주기적으로 유출하는 와류구조가 존재함을 나타내고 있

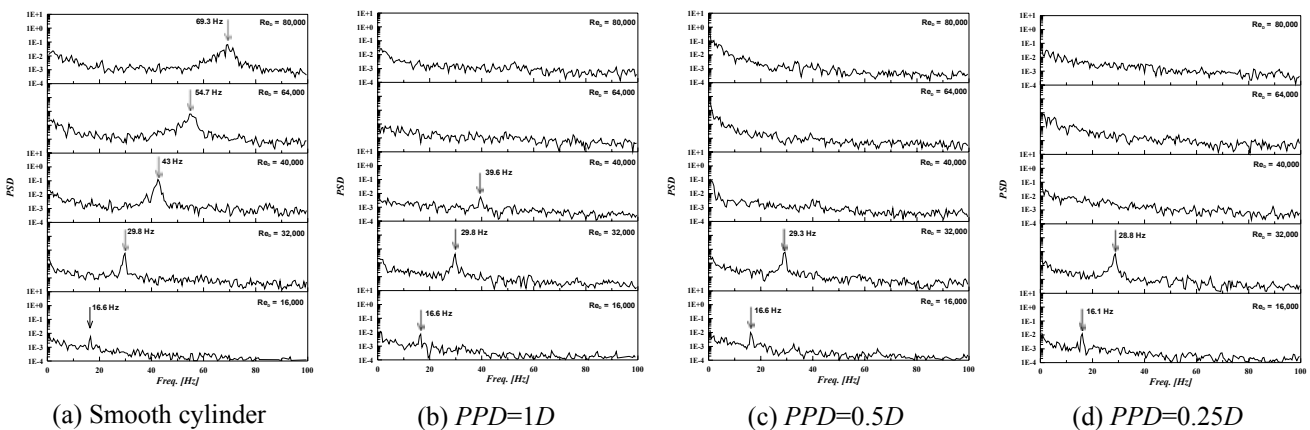


Fig. 7 Comparison of power spectral density distribution measured at the location of $x/D=1, y/D=0.5$

다. Fig.7(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 3.2×10^4 까지 매끈한 원주와 거의 유사한 와유출주파수 특성을 나타내고 있다. Re 수가 증가함에 따라 PSD 분포에서 지배적인 와유출주파수가 사라지는 경향을 보여주고 있다. O-ring 원주의 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.

4. 결 론

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.

후 기

본 연구는 국가지정연구실(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) Naudascher, E. and Rockwell, D., 1994, "Flow-Induced Vibrations: An Engineering Guide," Rotterdam, A. A. Balkema Press.
- (5) Weaver, W., 1961, "Wind-Induced Vibration in Antenna Members," J. Eng. Mech. Div., Vol. 87, pp. 141-165.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Stansby, P. K., 1974, "The Effect of Endplates on the Base Pressure Coefficient of a Circular Cylinder," Aeronautical J., Vol. 78, pp. 36-37.
- (11) Wieselsberger, C., "Neuere Feststellungen Uber die Gesetze des Flussigkeits - und Luftwiderstands," Phys. Z. Vol. 22, 321-8.