

# Riblet 홈을 가진 원주의 저항감소에 관한 연구

임희창\* · 이상준\*\*

## An Experimental Study on Drag Reduction of Grooved Cylinders

Hee-Chang Lim and Sang-Joon Lee

**Key Words:** riblet(리블렛), drag reduction(저항 감소), grooved cylinder(홈을 가진 실린더), flow control(유동 제어)

### Abstract

An experimental investigation has been carried out for two circular cylinders having different groove configurations(U and V-shape). The results were compared with those for the smooth circular cylinder. The drag force, mean velocity and turbulent intensity profiles of wake behind the cylinders were measured with varying the Reynolds number  $Re=8000\sim 14,000$  based on the cylinder diameter. As a results, the U-groove circular cylinder was found to be most effective riblet shape with reducing the drag up to 21%. As the Reynolds number increases, the vortex shedding frequency of the grooved cylinders becomes a little larger, compared to the smooth cylinder. The flow visualization using the smoke-wire technique was also carried out to see the flow structure qualitatively.

### 1. 서론

지난 수십 년 동안 물체 주위의 유체저항을 감소시켜 에너지를 절감시키고자 하는 많은 연구가 있어왔다. 1970년대의 오일 쇼크 이후, 미국 NASA Langley 연구소에서는, 항공기의 익형(airfoil)과 원주(circular cylinder)형상의 동체에 생성되는 공기역학적 저항, 특히 난류 유동에서의 마찰저항을 줄이기 위한 연구를 수행하였다. 이와 같은 운송체에 작용하는 저항을 감소시키기 위해서는 그 운송체 주위에서 발생하는 난류유동의 특성을 정확하게 예측하고 제어할 수 있어야 한다. 특히, 최근 들어 난류 전단유동 내에 존재

하는 응집구조(coherent structure)를 제어하여 유체 저항을 감소시키는 논문이 발표되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 따라서, 이런 유체 저항감소 기술은 공학적 혹은 산업적 응용측면에서 뿐만 아니라 학문적으로도 매우 중요한 연구주제가 되고 있다.

난류유동을 제어하는 방법으로는 크게 수동제어(passive control)와 능동제어(active control) 기법으로 나눌 수 있다<sup>(3)</sup>. 1990년 이후 활발하게 연구되고 있는 능동적 유동제어는 유체의 흡입(suction)이나 분출(blowing), 온도조절에 의한 유체점도 변화, 진동이나 회전, 그리고 음향여기(acoustic excitation) 등과 같이 시간에 따라 계속적으로 혹은 간헐적으로 외부로부터 부가적인 에너지를 유동장에 공급함으로써 유동구조를 제어하는 방법이다. 이에 반해서 수동제어는 외부 에너지의 공급없이 geometry를 변경시키거나 부착물을 장착하여 주로 물체 표면 주위 유동을 제어하는 방법이다. 수동제어기법의 대표적인 것으로 물체 표면에 유동방향의 홈(groove)을 파는, 일명

\* 포항공과대학교 대학원 환경공학부

\*\* 정희원, 포항공과대학교 기계공학과

리블렛(riblet)이 있다.

NASA Langley Research Center의 Walsh<sup>(4,5)</sup>는 리블렛 형상을 가진 평판의 저항감소를 체계적으로 연구하였다. 그녀는 다양한 종류의 리블렛 형상에 대하여 정밀하게 항력을 측정하여, 대칭적인 V형태와 U형태를 가지는 리블렛 형상에 대해서 최고 8%의 저항 감소를 얻었다. 반면에 실제 운항조건에서는 1~2% 저항감소가 보고되고 있다<sup>(6)</sup>. 이러한 저항 감소의 원인에 대해서 Bacher & Smith<sup>(7)</sup>는 유동가시화를 통해서 리블렛 정점(tip) 부분에서 형성된 2차 와류(vortices)가 주 유동방향의 와류를 약화시키고, 횡방향의 낮은 속도 유동이 줄무늬 구조(streaky structure) 형성을 억제시킨다고 보았다. 한편, Choi<sup>(8)</sup>는 매끈한 평판과 리블렛 표면에 대해 풍동 실험을 수행하여, 리블렛에 의한 유동방향 와류의 횡방향 이동 억제, 다시 말해서, 벽면 근처에서 발생하는 버스트(burst)에 의한 와쌍(vortex pair)을 억제하는 것이 난류 저항감소의 주 메커니즘으로 보았다.

최근에는 실용적 관점에서 리블렛을 평판이 아닌 항공기의 익형이나 원주에 적용하기 시작하였다. Achenbach<sup>(9)</sup>, Guven<sup>(10)</sup>은 원주의 표면조도가 유동에 미치는 효과를 연구하였다. 그들은 표면 조도는 층류에서 난류로 경계층 천이를 촉진시킬 뿐만 아니라 임계 Re수 이상의 유동으로 성장시킬 수 있다고 밝혔다. Leung<sup>(11,12)</sup>은 원주 표면에 V형 리블렛을 유동방향으로 가공하여 압력분포와 Strouhal 수를 측정하여 매끈한 원주와 비교하였고, 열선 유속계를 사용해서 표면 경계층도 측정하였다. 그들은 리블렛 원주에 생성된 경계층은 매끈하거나 거친 실린더에서 생성된 것과는 완전히 다르다고 지적하고 있다.

이상에서 보는 바와 같이 지금까지 수행된 리블렛을 이용한 저항감소 연구들을 통해 리블렛이 저항감소를 위한 성공적인 수동제어 기법임이 밝혀졌다. 그러나, 저항감소의 물리적 메커니즘은 아직 명확하게 밝혀지지 않았고, 최적화 연구는 현재까지도 진행중이다.

본 연구에서는 리블렛으로 인한 저항감소 효과를 파악하기 위하여 지름이 60mm인 원주에 3mm 간격의 V형과 U형 홈을 표면에 가공하여 리블렛 형상변화에 따른 공기저항 변화를 해석하고, 주위 유동 및 난류특성의 변화를 연구하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 풍동 및 실험모델

본 연구는 측정 시험부 단면이 0.6m×0.72m이고 난류강도가 0.08%이하인 POSTECH의 저난류 아음속 풍동에서 수행되었다. 풍동 시험부 내부에 설치한 원주 모델은 2차원 유동을 만들어 주기 위해서 길이는 풍동 시험부 너비 600mm (L/D=10)를 최대한 사용하였으며 날카로운 모서리를 가진 끝판(end plate)을 원주 양끝에 설치하였다<sup>(13)</sup>. 원주의 직경 D는 60mm이며 자유흐름 속도는 최소 2m/s에서 최대 36 m/s까지 변화시켰고, 이 속도에 기준한 Re수는 약 8,000 ~ 140,000이다. Fig.1은 풍동시험부의 개략도를 나타내고 있다.

본 연구에서 채택한 리블렛은 여러 가지 리블렛 형상 중에서 Walsh<sup>(5)</sup>에 의해 최고 8%까지 저항 감소를 얻었던 V형과 U형 홈(groove)을 채택하였다. 실험에 사용된 원주 모델은 지름 D=60mm인 테프론 파이프를 NC선반으로 가공하여 매끄러운 표면과 V형 및 U형 리블렛 홈을 가진 모델을 제작하였다. 이웃한 리블렛 홈 사이의 간격은 3mm로 가공된 리블렛 원주의 개략도를 Fig.2에 나타내었다.

### 2.2 후류 유동장 및 항력측정

원주 후류의 속도측정에는 TSI사의 IFA100 정온형 열선 유속계를 사용하였다. 열선 프로브브(probe)는 I-형과 X-형 프로브를 사용하였고, 후류 속도측정에 X형을, 그리고 와유출 주파수를

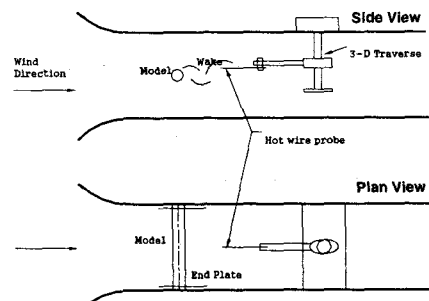


Fig.1 Wind tunnel test section and experimental setup

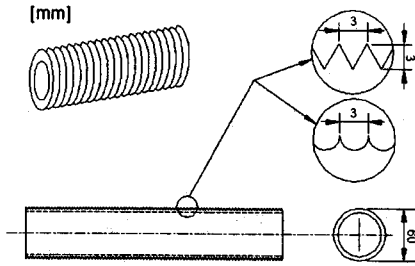


Fig.2 Schematic diagram of riblet grooved cylinders(unit:mm)

얻기 위해 I-형 프로우브를 사용하였다. 열선 프로우브에서 나오는 전압신호는 12bit A/D변환기(IFA200)를 거쳐 DMA방식으로 컴퓨터에 입력된 후 통계 처리하여 원하는 속도정보를 얻었다.

후류의 평균속도 및 난류강도 측정은  $X/D=4$ 와 6지점에서  $Y/D=-3\sim 3$ 까지 0.1D 간격으로 측정하였다. 열선 프로우브는 오차가 0.1mm이하의 정밀도를 가지는 3차원 이송장치에 장착하여 원하는 위치로 이송시켰다. 데이터는 한 지점에서 초당 1,000개의 비율로 샘플링하여 10,240개의 데이터를 취득했고, 신호의 잡음과 오차를 방지하기 위해 800Hz의 저역필터를 거치게 했다. 또한 실험 중 풍동시험부 내부의 공기온도를  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지시켜 온도에 따른 보정을 따로 하지 않아도 되게 하였다<sup>(14)</sup>.

원주 후류는 주기적인 와류출로 인해 조직적인 응집구조를 가지는데, 난류 전단유동에서는 이러한 응집구조가 난류유동의 성장 및 확산에 기여하고, 외부유체의 유입에 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 원주 근접 후류에 존재하는 큰 규모

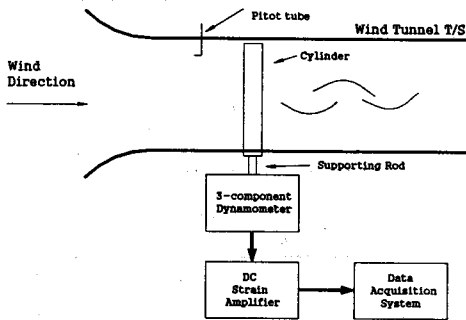


Fig.3 Schematic diagram of drag force measurement system

의 응집구조를 밝히는 것이 매우 중요하다. 이러한 난류 응집구조 중 와류출 주파수의 변화를 보기 위해 I-probe를  $X/D=2$ ,  $Y/D=0.5$ 인 지점에 설치하여 측정된 속도신호를 스펙트럼 분석하였다.

원주에 걸리는 항력은 Fig.3에서 보는 바와 같이 3분력계(3-component dynamometer, Nishio LMC 3502)를 이용하여 측정하였다. 원주에 걸리는 항력만을 측정하기 위해 실린더와 3분력계를 연결하는 지지대를 풍동 밖에 설치하여 유동의 영향을 받지 않게 하였다. 3분력계에서 나오는 전압신호는 DC strain amplifier(DSA-100)를 이용하여 증폭하였고, IBM PC로 연결되어진 자료 획득장치(DT Vee 2830)를 이용하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 시간평균화된 값을 구하였다. 원주에 걸리는 저항력을 측정하기에 앞서서 저울 추를 사용하여 3분력계를 보정(calibration)하였다.

### 2.3 유동가시화

리블렛 표면을 가지는 원주를 지나는 유동의 정성적인 특성을 관찰하기 위하여 0.1mm 직경의 니크롬선에 파라핀 오일을 묻혀서 일정한 전압으로 연소시켜 생성된 연기(smoke)로 가시화하는, 연선법(smoke-wire method)을 사용하였다. 연선법은 4m/s 속도 이상의 자유 흐름 속도(free stream velocity)에서는 연기의 유적선(streakline)이 깨어지기 때문에 사용하기 어렵다. 본 실험에서는 연선을 원주 전방에 설치하여 앞쪽에서 생성된 연기를 원주 후방으로 확산되게 만들었다. 원주 후방에서의 조명장치로는 Nd:YAG 레이저를 사용하였고 이미지 획득장치로는 Nikon 카메라를 사용하여 레이저와 동기시켜서 깨끗한 이미지를 얻도록 하였다. 실험동안 사용된 자유흐름속도를 2m/s로 고정시켰고, 리블렛 및 매끈한 면을 가지는 원주 후류의 유동구조를 가시화하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 항력

Fig.4는 리블렛 형상에 따라 원주의 항력계수가 어떻게 변화하는지를 나타내고 있다. 그림에서 가로축은 자유흐름 속도에 기초한  $Re$ 수를, 세로축은 원주에 걸리는 항력계수를 나타내고 있다. 그림에 보이는 점선은  $Re$ 수가 10,000이상인 유동에서 2차원 원주 모델이 가지는 항력계수의 일반

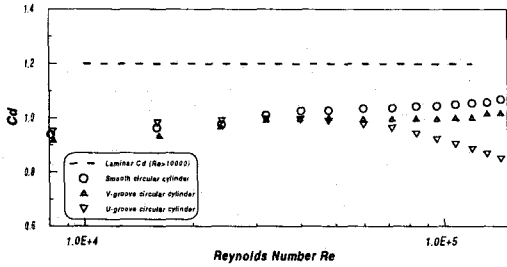


Fig.4 Variation of drag coefficient with Reynolds number

화된 값( $Cd=1.2$ )을 나타낸다<sup>(15)</sup>. 본 연구에서 다른 매끈한 원주가 일반적인 2차원 원주의 항력계수 값 1.2 보다 작게 나타나는 것은 원주의 종횡비가  $L/D=10$  정도로 충분히 길지 않아 3차원 효과에 의한 후회(bypass) 유동에 기인한 것으로 판단되어진다.

V형과 U형 리블렛 원주에 대한 결과를 매끈한 원주와 비교하여 보면  $Re$ 수가 증가함에 따라 항력은  $Re$ 수 약 40,000정도까지는 서로 비슷한 값을 가지다가  $Re$ 수가 보다 증가하면 큰 차이를 보이기 시작한다. 여기서, 매끈한 원주의 경우에는 다른 형상의 원주에 비해서  $Re$ 수에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 반면에 U형 리블렛 원주는 있어서는 다른 원주에 비해 큰 저항 감소를 보이고 있다. Walsh<sup>(5)</sup>에 따르면 U형 리블렛 경우가 다른 형상에 비해 우수한 저항 감소효과를 가지며 깊은 골의 곡률과 날카로운 끝을 가지는 리블렛을 저항 감소를 위한 최적의 형상으로 생각하였다. 본 연구에서도 이와 마찬가지로 U형 리블렛 형상이 저항 감소에 우수한 성능을 보여주는 것으로 판단된다. 실험결과에서 얻어진 항력 계수는  $Re$ 수 약 140,000에서 V형 리블렛 원주의 경우 5%, U형 리블렛의 경우 최고 21%정도의 저항감소를 얻었다.

### 3.2 시간평균 후류 속도장

Fig.5는  $X/D=4$ 와 6인 하류 위치단면에서 자유 흐름속도를  $U_0=20m/s$ 로 고정된 상태에서 원주 후류의 주유동 방향 평균속도 및 난류강도의 측정 결과를 나타내고 있다. 그림에서 가로축은 자유 흐름의 속도로 세로축은 측정 원주직경  $D$ 로 무차원시켜서 나타내었다.

유속이 10m/s인 조건에서는 매끈한 원주와 U형 리블렛 원주 후류의 평균속도와 난류강도분포에

서는 큰 차이를 보이지 않았으나, 유속이 20m/s인 조건에서는 평균속도와 난류강도가 후류 중심 부분에서 다소 큰 차이를 보여주고 있다. 즉 U형 리블렛 원주의 경우 평균속도의 감쇄가 작으며, 난류강도도 감소하였다. 이것은 U형 리블렛 원주가 매끈한 원주에 비해 표면 리블렛 형상으로 인하여 저항이 감소함에 따라 유동구조가 변화하고 있음을 나타낸다.

### 3.3 와유출 주파수

Fig.6은 매끈한 원주와 U형 리블렛 원주의 와유출에 따른 주파수 특성 변화를 보여주고 있다. Strouhal<sup>(16)</sup>은 1878년에 물체 뒤에 형성되는 주기적인 와유출 연구를 통해 원주의 진동주파수가 유속에 비례하고, 직경에 반비례한다고 밝혔다. 여기서 보면 매끈한 원주의 경우(Fig.6(a)),  $Re$ 수가 증가함에 따라 와유출 주파수도 증가하고 있다. 마찬가지로, U형 리블렛 원주의 와유출 주파수도  $Re$ 수 증가에 따라 고주파수 영역으로 이동하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고,  $Re$ 수 증가에 따른 와유출 주파수의 증가폭이 매끈한 원주에 비해 다소 크게 나타난다. 이것은 리블렛 형상에 의해 폭방향(spanwise) 유동이 억제되고 큰 스케일의 와류가 보다 작은 스케일의 에디(eddy)로 깨어져 와유출 주파수가 증가하는 것으로 판단되어진다.

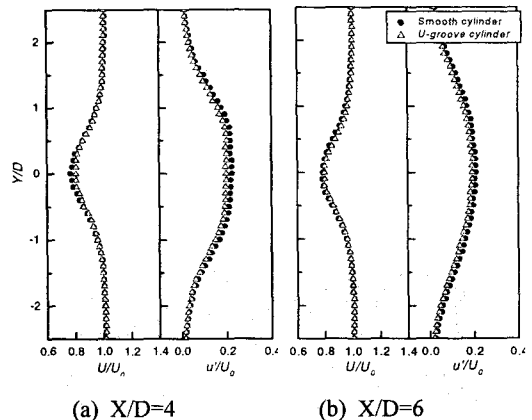
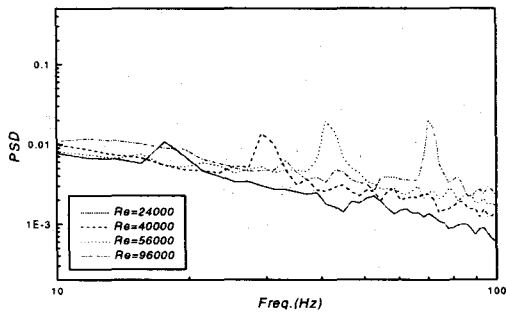
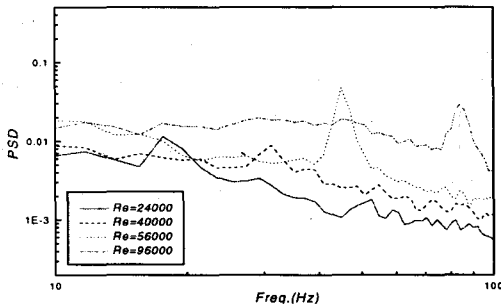


Fig. 5 Streamwise mean velocity and turbulent intensity distributions at  $U_0=20m/s$



(a) Smooth cylinder

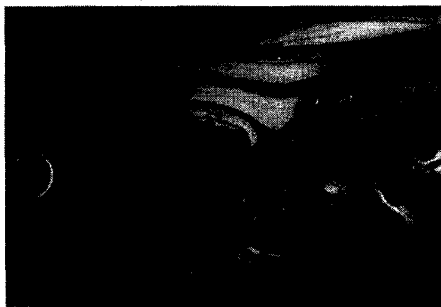


(b) U-grooved circular cylinder

Fig.6 Comparison of power spectral density distribution

### 3.4 유동가시화

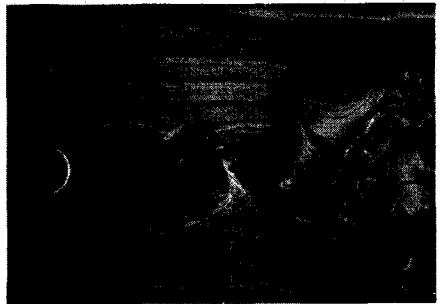
Fig. 7은 자유흐름속도  $U_0=2m/s$ 에서 매끈한, V형 리블렛 그리고 U형 리블렛 형상의 세 가지 원주에 대해서 후류를 가시화한 결과이다. 유동가시화 실험이 다소 저속에서 수행되어졌기 때문에 리블렛 표면을 가지는 원주와 매끈한 원주 사이에 그다지 큰 차이를 보이지는 않는다. 그러나, 후류의 와류구조에서 리블렛 홈을 가진 원주의 경우가 매끈한 원주에 비해 와의 길이가 길어졌고 연기의 유적선이 안정적임을 볼 수 있다.



(a) Smooth cylinder



(b) V-groove cylinder



(c) U-groove cylinder

Fig. 7 Flow visualization of wake behind cylinders

### 4. 결론

본 연구에서는 리블렛으로 인한 저항감소 효과를 파악하기 위하여 V형과 U형 리블렛 원주의 유동구조와 저항변화를 실험적으로 해석하였다. 자유흐름속도는 최소  $2m/s$ 에서 최대  $36m/s$ 까지 변화시켰는데, 이때 원주직경에 기초한 Re수는  $Re=8,000\sim 140,000$  이었다. 원주 주위유동 특성을 파악하기 위하여 열선유속계로 후류 속도를 측정하고 항력계수 측정에는 3분력계를 사용하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. V형과 U형 형상의 리블렛 원주에 작용하는 항력은 Re수가 40,000정도까지는 매끈한 원주와 비슷한 경향을 보이다가 그 이후에는 Re수 증가에 따라 급격한 차이를 보이기 시작한다. Re수 약 140,000에서 V형 리블렛 원주의 경우 5%, U형 리블렛 원주는 최고 21%정도의 저항감소를 얻었다.

2. 유속이 20m/s ( $Re=80,000$ )인 조건에서 주 유동 방향 평균속도와 난류강도가 후류 중심부에서 표면에 리블렛 형상을 가진 원주는 매끈한 원주에 비해 평균속도의 감소가 작게 나타나며, 난류강도도 감소하였다.

3. 원주의 와유출 주파수는  $Re$ 수 증가에 따라 증가하는데, 리블렛 홈이 존재하는 경우가 보다 높은 주파수 영역에서 와유출이 일어났다.

4. 유동가시화 결과, 리블렛 표면형상을 가진 원주가 매끈한 원주에 비해 원주 후류에서 와의 길이가 길고 연기의 유적선이 안정적으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단유체공학연구센터 과제지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Cantwell, B. J., 1981, "Organized motion in turbulent flow," Annual Rev. Fluid Mech, 13, 457.
- (2) Robinson, S. K., 1991, "Coherent motions in the turbulent boundary layer," Annual Rev. Fluid Mech., 23, 601.
- (3) Gad-el-Hak, M., 1996, "Modern developments in flow control," Appl. Mech. Rev., 49, No. 7, 365.
- (4) Walsh, M. J., 1982, "Turbulent boundary layer drag reduction riblets," AIAA paper 82-0169.
- (5) Walsh, M. J., 1983, "Riblets as a viscous drag reduction technique," AIAA Journal, Vol. 21, No. 4, pp. 485-486.
- (6) Robert, J. P., 1992, "Drag reduction: an industrial challenge," Proceedings of Special Course on Skin Friction Drag Reduction, Brussels, AGARD-VKI.
- (7) Bacher, E. V. and Smith, C. R., 1986, "Turbulent boundary layer modification by surface riblets," AIAA Journal, Vol. 24, No. 8, pp. 1382-1385.
- (8) Choi, K. S., 1989, "Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets," J. Fluid Mech., Vol. 208, pp. 417-458.
- (9) Achenbach, E., 1971, "Influence of surface roughness on the crossflow around a circular cylinder," J. Fluid Mech. 46, pp. 321-335.
- (10) Guven, O., Farrell, C., Patel, V. C., 1980, "Surface roughness effects on the mean flow past circular cylinders," J. Fluid Mech. 98, pp. 673-701.
- (11) Leung, Y. C., Ko, N. W., 1987, "Investigation of flow over grooved circular cylinders," Inter. Conf. On Fluid Mech., Beijing, pp. 578-583.
- (12) Leung, Y. C., Ko, N. W., 1991, "Near wall characteristics of flow over grooved circular cylinder", Exp. in Fluids, 10, pp. 322-332.
- (13) Stansby, P. K., 1974, "The effect of endplates on the base pressure coefficient of a circular cylinder", Aeronautical J., 78, pp. 36-37.
- (14) Perry, A.E., 1982, "Hot-wire anemometry," Clarendon Press Oxford
- (15) Tucker, V., and Parrott, G. C., 1970, "Aerodynamics of Gliding Flight of Falcons and Other Birds," J. Exp. Biol., Vol. 52, pp. 345-368
- (16) Strouhal, V., 1878, "Uber eine besondere art der tonerregung," Ann. Physik(Leipzig).