

Groove에 의한 원주 후류의 유동구조 변화

서성호† · 홍철현* · 부정숙**

(원고접수일 : 2008년 7월 30일, 원고수정일 : 2008년 8월 29일, 심사완료일 : 2008년 9월 5일)

The Variation of the Wake behind a Circular Cylinder Having Arc Grooves

Seong-Ho Seo† · Cheol-Hyun Hong* and Jung-Suk Boo**

Abstract : The measurements of velocity vectors are made in the wake($X/d=8$) of a circular cylinder with arc grooves. The experiments are conducted by changing the groove number, groove depth, Reynolds number(Re) and the angle of the first formed groove. We know that the optimum groove angle is 70 degree and the wake velocity profiles are improved at a few conditions. According to vortex shedding frequency distributions, the key solutions to vary the flow field behind the circular cylinder are 70 degree groove angle and more deeper grooves than 0.2mm depth.

Key words : Grooves(그루브, 홈), Surface roughness(표면 거칠기), Reynolds number(Re , 레이놀즈수), Dimple(딴플), Cavity flow(캐비티 유동), Strouhal number(St , 스트로할수)

1. 서 론

물체 표면의 유동을 제어하여 물체에 작용하는 항력을 저감시키면 유체력에 의한 구조물 파괴 방지는 물론 비행기, 자동차, 선박 등의 효율을 증가시켜 에너지 절감에도 효과가 크기 때문에 물체 주위의 유동장 제어에 관한 응용연구는 유체역학적으로 중요한 연구테마라고 할 수 있다⁽¹⁾. 특히 외부 에너지의 공급없이 물체의 기하학적 형상을 변경하거나 부가물을 물체 표면에 설치함으로써 항력 저감이라는 목적을 실현하는 것은 실용적이면서 공학적 측면에서 관심 주제이다. 이러한 수동적 유동

제어기법에는 분리판, 음파여기, 트리핑 와이어, 나선형 와이어, 다공성 덮개 등이 있다. 김 등⁽²⁾은 원주에 음파를 적용하여 주파수와 슬릿 위치의 최적값을 알아냈고, Igarashi⁽³⁾는 트리핑 와이어에 의한 원주의 항력감소 메커니즘을 밝힌 바 있다. Price⁽⁴⁾는 다공성 덮개가 원주의 와에 의한 진동을 감소시키는 효과가 있음을 알아냈다. 하지만 나선형 와이어는 항력을 증가시키고, 다공성 덮개도 천이영역 이후에는 별다른 효과가 없는 것으로 보고되고 있다.

일반적으로 천이영역($Re \sim 3 \times 10^5$) 이전에서는 매끄러운 구(球)보다 표면이 거친 구의 항력계수가

† 교신저자(한국과학기술정보연구원, KISTI, E-mail:shseo@kisti.re.kr, Tel: 051)831-2498)

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 기계공학부

낮게 나타난다. 이는 표면 거칠기(sand-grain)가 층류 경계층을 난류 경계층으로 변환시켜 유동 박리를 지연시키기 때문인 것으로 알려져 있다. 하지만 천이영역 이후에서는 거칠기가 있는 구의 항력계수가 급상승하는 현상을 보이고 있다. 이와는 다르게 담플이 있는 골프공의 경우 천이영역 이후에서도 일정한 항력계수를 유지하고 있어 표면 거칠기와는 다른 양상을 보이고 있다. 이는 담플의 크기가 표면 거칠기보다 상대적으로 훨씬 크고 담플 내에서의 캐비티 유동(cavity flow)으로 인해 담플을 지나는 유동은 흐름양상을 크게 변하게 하지 않으면서 표면 경계층을 교란하고 운동에너지를 혼입시켜 유동의 박리를 지연시키는 것으로 알려져 있다.

Bearman 등⁽⁵⁾은 담플을 원주 표면에 설치하여 레이놀즈수 $2 \times 10^4 \leq Re \leq 3 \times 10^5$ 범위에서 항력계수와 스트로할수를 측정하였으며, 항력계수의 변화가 구에서와 비슷한 양상을 나타내고 있음을 확인하였다. Ro⁽⁶⁾는 정방형 담플에 의해 원주의 항력을 28% 감소시켰다. 담플 대신 홈(groove)을 설치하는 경우도 있는데, 이는 담플내의 3차원 유동과 홈 내부의 2차원 유동이라는 차이점이 있지만 실험결과를 정성적인 면에서 상호 참고가 가능하고, 홈 자체의 유동제어 효과도 있다고 알려져 있다. 홈에 의한 유동제어 연구는 항력감소를 위한 홈의 최적조건을 찾는데 초점이 맞추어져 있다. Kimura⁽⁷⁾는 원주 표면에 하나의 원형 홈을 설치하고 그 위치가 80°에서 최대의 항력감소 효과가 있음을 밝혔다. Aoki⁽⁸⁾는 홈의 깊이가 원주의 항력과 유동장 변화에 미치는 영향을 살펴보았으며, Robarge⁽⁹⁾는 NACA 0015에 하나의 원형 홈을 설치하여 실험한 결과, 최적의 홈 깊이는 경계층 두께의 0.6에서 1.0의 범위이며, 홈의 폭 대비 깊이의 비는 0.1에서 0.15가 최적값임을 밝힌 바 있다. 이상의 연구들은 유체력에 대한 조사에 치중되어 있고, 홈 개수와 위치에 따른 와유출 구조 변화 및 후류의 유동특성에 대한 연구가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 원주 표면에 홈의 개수와 위치를 변화시켜가면서 후류유동장의 변화와 와유출 현상을 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 풍동을 이용하여 수행하였으며, 풍동은 개회로형 흡입식 아음속 풍동으로 측정부의 크기는 305mm× 305mm(가로×세로)이다. 실험구간의 난류강도는 약 1%로 균일유동을 유지하도록 하였다. 후류 유동장 측정에는 정온형 열선풍속계(TSI, model IFA300)와 X형 열선(Kanomax, model 7336)을 사용하였으며, 열선풍속계에서 나오는 전압신호는 5kHz의 저역통과 필터를 거쳐 A/D변환기를 통해 PC로 저장하였다. 자료의 추출 간격을 100μs(10kHz)로 하여 측정지점당 40,960개의 데이터를 획득하여 통계 처리하였다. X형 열선 프로브의 이송은 정밀도가 0.01mm인 자동이송장치를 사용하였다.

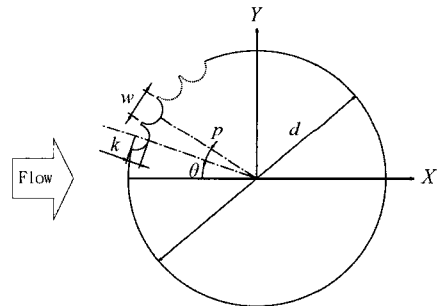


Fig. 1 Shape of the cylinder with arc grooves

Table 1 Models in the experiment

Model	Groove number	Groove depth(mm)	k/d ($\times 10^{-3}$)
#1	smooth	0	0
#2	2	1.0	25
#3	2	0.2	5
#4	3	1.0	25
#5	3	0.2	5
#6	4	1.0	25
#7	4	0.2	5

본 실험에 사용한 홈이 형성된 원주와 좌표계는 Fig. 1에 나타내었다. X축을 기준으로 원주표면에

서 유동과 만나는 첫번째 홈까지의 각을 받음각(θ)으로 정의하였다. 본 실험에서는 홈 개수(n), 받음각(θ), 홈의 깊이(k), Reynolds number를 주요변수로 설정하여 각각의 후류유동장을 측정하였다. 실험에 사용한 모델은 매끈한 원주를 포함하여 총 7가지이며 Table 1에 나타내었다. 원주표면에 형성한 홈의 갯수는 2개, 3개, 4개의 3가지 경우이고, 각각의 홈 깊이는 1mm, 0.2mm이며 이를 원주직경 대비 표면거칠기(k/d)로 나타내면 각각 25×10^{-3} , 5×10^{-3} 이다. 홈간 피치는 11° 로 고정하였다. 실험에서 사용한 원주의 직경은 40mm이며, 홈의 폭은 3.2mm로 원주 직경 대비 8%이다.

2.2 실험방법

본 실험의 자유유동속도는 5m/s, 15m/s로 이에 대응하는 레이놀즈수(Re)는 각각 1.32×10^4 , 3.96×10^4 이다. Fig.1에서 보는 바와 같이 홈의 각도는 X좌표상에서 가장 가까운 첫 번째 홈의 중심을 기준으로 받음각을 50° , 70° , 80° , 90° 로 변화시켜가면서 후류유동장을 측정하였다.

후류 유동장은 원주 중심을 기준으로 $X=8d$ 지점에서 $Y=+3d \sim -3d$ 범위로 1mm 간격으로 25 지점에서 속도를 측정하였으며, 앞에서 언급했듯이 측정 지점당 40,960개의 자료가 통계처리를 위해 획득되었고, 데이터획득 및 열선 프로브의 이송은 모두 PC로 온라인 처리되거나 조정되며, 추출된 자료의 분석은 오프라인 프로그램에 의해서 일괄 처리되도록 하였다. 열선의 교정은 Look-up table 기법을 이용하였다. 이상 측정시스템의 개략도는 Fig. 2와 같다.

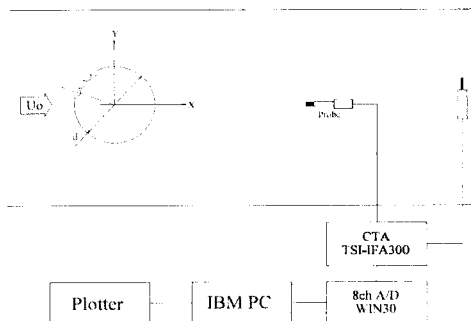


Fig. 2 Diagram of measuring and data processing

한편 원주 직경을 기준으로 한 폐쇄비(blockage ratio)는 8.2%로 작은 값은 아니지만 유동성질이 단지 X, Y의 2차원에만 지배적으로 취급되고, 이러한 영향이 본 연구의 중요한 연구목적이 아니기 때문에 측정자료를 보정하지는 않았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시간평균 유동장

본 절에서는 홈이 형성된 원주의 중심으로부터 $X/d=8$, $-3.0 \leq Y/d \leq 3.0$ 의 영역에서 X형 열선으로 측정된 시간평균 속도분포를 홈의 개수별로 살펴해보았다. 각 모델의 속도분포를 비교하기 위하여 $Y/d=3.0$ 지점의 최대속도를 이용하여 무차원화하였다.

홈이 2개 형성된 원주의 후류에 대한 u 속도성분의 시간평균 분포에서는 매끈한 원주(smooth cylinder)에 비해 전체적으로 최대 속도결손 부분이 다소 회복되는 경향을 나타내고 있으나, 후류폭의 감소는 작게 나타나고 있다. 하지만 Fig.3에서처럼 $Re=3.96 \times 10^4$ 이고 홈의 깊이(k)가 1mm의 경우 홈의 받음각이 70° 일 때는 후류중심선상의 속도결손의 개선과 후류 중심선의 이동이 나타나고 있다.

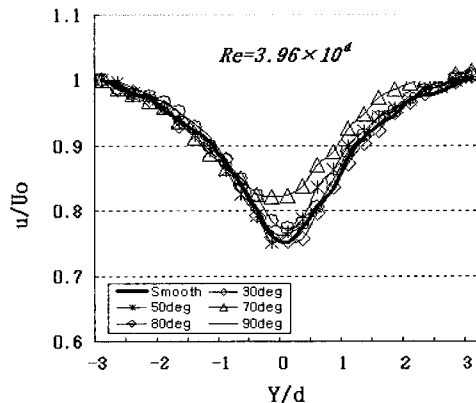


Fig. 3 Streamwise velocity profile($n=2$, $k=1\text{mm}$)

홈이 3개 형성된 원주의 후류에 대한 u 속도성분의 시간평균 속도분포에서는 k 가 0.2mm인 경우

에는 매끈한 원주와 비슷한 양상을 보이고 있으나, $k=1\text{mm}$ 인 경우에는 속도가 낮은 $Re=1.32 \times 10^4$ 에서 후류중심선상의 속도회복이 크게 나타나고 있으며, $Re=3.96 \times 10^4$ 인 경우에 홈 개수가 2인 경우와 비슷하게 후류중심선상의 속도결손의 개선과 후류 중심선의 이동이 나타나고 있다. 이와 같은 경향은 홈 개수가 4개인 경우에도 비슷하게 적용되고 있다.

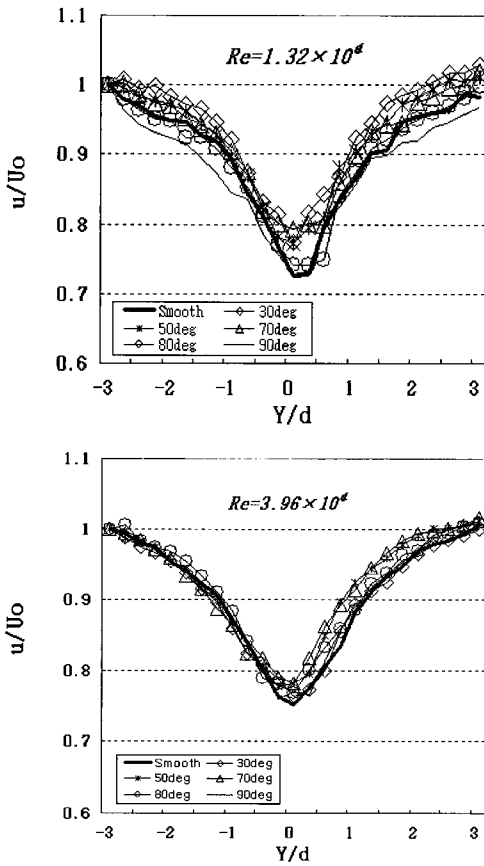


Fig. 4 Streamwise velocity profile($n=3$, $k=1\text{mm}$)

이상을 요약하며, 매끈한 원주와 비교했을 때, k 가 0.2mm 인 경우 1mm 인 경우에 비해 원주 후류의 시간평균 유동장에 큰 영향을 미치지 못하고 있으며, k 가 1mm 인 경우에 있어서도 받음각이 70° 인 경우가 후류 유동장의 변화에 가장 큰 영향을 미치고 있다. 이는 박리점 직전에 설치된 홈 내에서 와류가 활발히 생성되고 경계층 유동과 운동량

이 활발히 교환됨으로써 박리가 지연되고 이로 인해 후류 폭 감소와 속도회복이 이루어졌다고 판단된다. 또한 하류로 갈수록 계속되는 홈에 의해서 와류생성이 이어질 때 유동제어효과가 나타난다고 볼 수 있다. 홈 깊이가 0.2mm 인 경우 와류 형성에 필요한 홈 깊이의 조건을 벗어나 그 효과가 미미한 것으로 보인다. 이는 Kimura와 Robarge의 실험결과와도 최적조건 범위에서도 대체로 일치하고 있다. Fig.5에 표시한 후류 중심선상의 속도결손량 비교에서도 나타나듯이 받음각이 70deg 에서 속도결손량이 낮게 나타나고 있다.

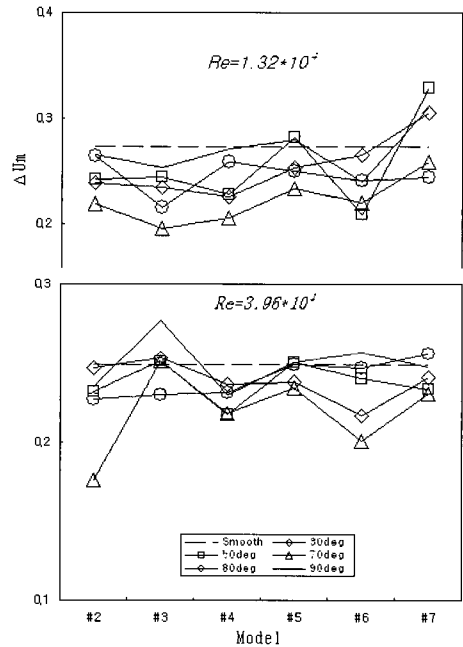


Fig. 5 Velocity defects at center line of wake

3.2 난류강도

시간평균 속도장에서 살펴보았듯이, 후류속도장의 속도분포는 Reynolds number가 가장 큰 3.96×10^4 에서 매끈한 원주와 비교했을 때 많은 변화를 나타냈고, 이 때 홈 개수와 홈 깊이에 따라 변화폭이 큰 특이구간이 있음을 알 수 있다. 본 절에서도 $Re=3.96 \times 10^4$ 구간에서 매끈한 원주와 비교하면서 u , v 난류강도를 홈 개수와 깊이 그리고 홈의 받음각(θ)에 따른 변화정도를 살펴보았다.

Fig.6에 u , v 방향 난류강도의 rms(root mean square)값을 자유유동속도로 무차원화하였다. u 방향 난류강도는 전체적으로 $Y/d=0$ 을 기준으로 그래프의 중심축이 $-$ 방향으로 이동되어 있고, 최소값도 $Y=+3d$ 와 $-3d$ 에서 차이를 보이고 있다. 또한 홈 개수별로 난류강도가 큰 감소를 보이는 groove 깊이가 존재하며, 이때 groove의 받음각 (θ)은 70° 및 50° 임을 알 수 있다. v 방향 난류강도도 u 방향 난류강도와 비슷한 조건에서 변화를 나타내고 있으며, $Y=\pm 3$ 지점에서 값의 차이를 보이고 있다. 이러한 u , v 난류강도가 매끈한 원주의 경우에 대해 큰 변화가 일어나는 조건으로는 받음각이 70° 인 경우, Reynolds number가 가장 낮은 1.32×10^4 에서는 groove 개수가 가장 적은 2개이며, groove 깊이는 가장 깊은 25×10^{-3} 이다. 반대로 Reynolds number가 가장 큰 3.96×10^4 에서는 groove 개수가 가장 많은 4개이다. 또한 이러한 경향은 이미 살펴보았듯이 시간평균 속도분포에도 적용된다고 보인다.

3.3 와류출 특성

Fig.7은 $Re=3.96 \times 10^4$, 받음각은 70° 를 기준으로 groove 개수와 깊이에 따라 $Y=3d$ 지점에서의 순간속도성분 v 의 자기상관계수를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 특정 조건에서 조직적인 유동의 영향이 후류폭의 감소와 함께 자유유동과의 경계면에서 다소 약해지는 경향을 보이고 있다. 앞서 언급하였듯이 그 중에서 홈이 2개이면서 $k=1\text{mm}$ 의 경우, 자기상관계수 그래프의 사인파형이 많이 무너진 모습을 보이고 있다. 나머지 조건들도 매끈한 원주의 경우에 비해 다소 주기적인 파형의 형태가 사라지는 것이 보이지만 여전히 사인파형의 자기상관계수가 나타나고 있다.

Fig.8은 $Y=1.5d$ 에서 측정된 v 성분 속도 신호를 스펙트럼분석을 수행한 후 선명한 극대치를 보이는 와류출 주파수를 구하고, 이를 각각의 경우별로 Strouhal number의 분포현황을 나타낸 것이다. 홈의 영향을 고려한 Reynolds number에 따른 Strouhal number는 Reynolds number가

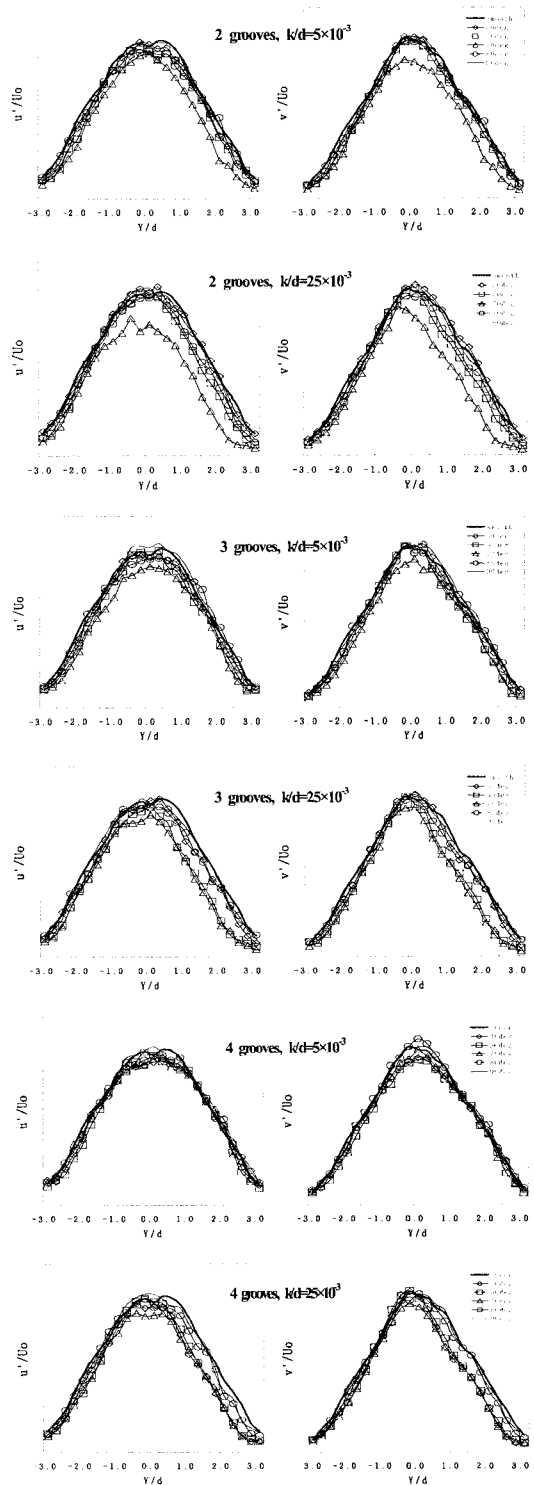


Fig. 6 Comparisons of u , v turbulent intensity

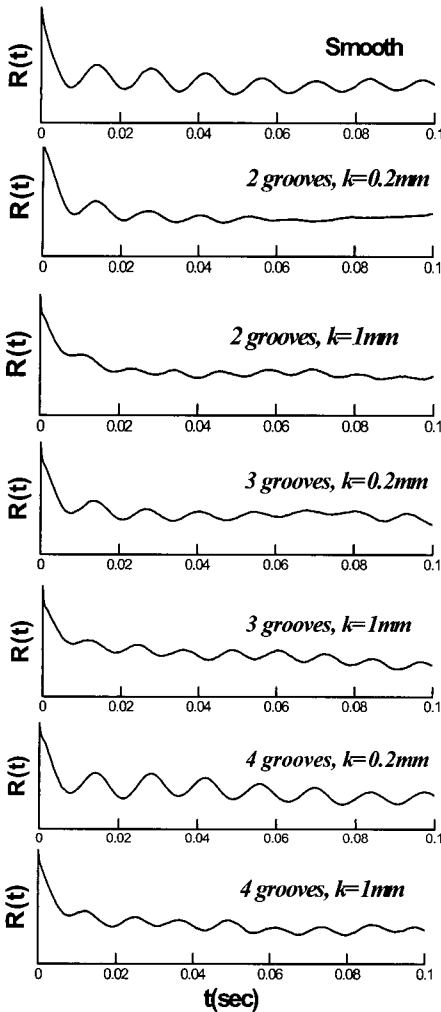


Fig. 7 Autocorrelation of v velocity for $\Theta=70^\circ$

클수록 분포 범위가 넓어지고 있다. Reynolds number가 커질수록 홈이 유동장에 미치는 효과가 다양하게 나타난다고 볼 수 있다. 홈(의 개수에 따라서는 3가지 경우 모두 Strouhal number의 분포범위가 비슷한 양상을 나타내고 있다. 받음각에 대해서는 70° 에서 Strouhal number의 범위가 다양하게 분포하고 있으며, 80° 와 90° 는 상대적으로 Strouhal number에 미치는 영향이 적게 나타나고 있다. 홈 깊이에 대해서는 0.5mm와 1mm에서 Strouhal number가 넓게 분포하고 있으며, 특히 1mm의 경우는 0.5mm보다 고른 분포를 나타내고 있다.

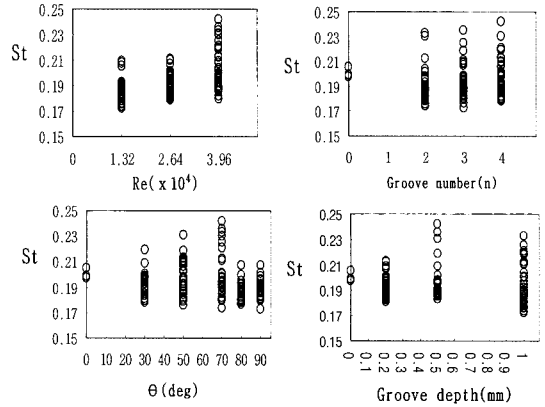


Fig. 8 Strouhal number distributions

4. 결 론

본 실험에서는 원주의 표면에 형성된 홈이 원주 후류유동장에 미치는 영향을 살펴보았다.

(1) 시간평균 속도분포에서는 홈 깊이가 깊은 경우 상대적으로 낮은 Reynolds number에서도 유동장에 변화가 나타나고 있다. 홈의 받음각은 70° 일 때가 후류중심부에서의 속도회복 및 후류폭 감소 등의 효과가 많이 나타나고 있으며, 50° 와 80° 에서도 비슷한 영향이 관찰할 수 있다.

(2) 후류유동장의 난류강도 변화는 시간평균 u 속도장과 비슷한 변화양상을 띠고 있으며, 홈 개수와 깊이에 따라 변화폭이 크게 되는 특이구간이 존재하고 있다.

(3) 받음각 70° , 높은 Reynolds number, 홈 깊이가 1mm에서 Strouhal number가 넓게 분포하고 있으며, 홈 개수에 대해서는 그 변화폭이 비슷하게 나타나고 있다.

참고문헌

[1] Bearman, P.W. and Trueman, D.M., 1972, "An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders", aeronaut.q, Vol. 23, pp.229-237
 [2] Kim, Gyeong-Cheon, Boo, Jung-Sook,

Lee, Sang-Uk, Gu, Myeong-Seop, 1996, "Control of vortex shedding from circular cylinder by acoustic excitation", Transactions of KSME B, Vol. 20, No. 5, pp.1649-1660.

- [3] Igarashi T., 1986, "Effect of Tripping Wires on the Flow around a circular cylinder normal to airstream", Bulletin of JSME, Vol. 29, No. 255, pp.1917-1924
- [4] Price, P., 1956, "Suppression of the Fluid-Induced Vibration of Circular Cylinders.", Proc. ASCE, Journal of Eng. Mech. Div., July 1956, pp.1030-1-1030-21.
- [5] P. W. Bearman and J. K. Harvey, 1993, "Control of circular cylinder flow by the use of dimples", AIAA Journal, Vol. 31 No. 10, pp.1753-1756
- [6] K-D Ro, J-T Park., 2002, "Drag Reduction Characteristics of Cylinder Having Square Dimpled Surface", Journal of KSME, Vol. 26, No. 2, pp.233-239
- [7] Kimura, Takeyoshi; Tsutahara, Michihisa, 1991, "Fluid dynamic effects of grooves on circular cylinder surface", AIAA Journal, Vol. 29, pp.2062-2068
- [8] TAKAYAMA SHINICHI, SHIMADA TAKUYA, AOKI KATSUMI, 2004, "Drag Reduction Mechanism of a Circular Cylinder by Arc Grooves", Transactions of JSME B, Vol. 70, No. 697, pp.2363-2370
- [9] Tyler W. Robarge., Aaron M. Stark., et al., 2004, "Design Considerations for Using Indented Surface Treatments to Control Boundary Layer Separation", 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2004-425

저 자 소 개



서성호(徐成昊)

1971년생, 1997년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1999년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사), 부산대학교 기계공학과(박사과정), 1999년~현재 한국과학기술정보연구원 근무



홍철현(洪徹弦)

1970년생, 1997년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1999년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1999년~2000년 대우정밀(주), 2004년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 2000년~2006년 부산대학교 기계설계전산화인력양성센터, 2006년~현재 부산대학교 기계공학부 NURI BEAM 교수



부정숙(夫禎淑)

1944년생, 1968년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1975년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사), 1986년 경북대학교 기계공학과 졸업(박사), 1972년~현재 부산대학교 기계공학과 교수