

◎ 研究論文

회전하는 제어원주가 설치된 원주후류의 유동장에 관한 연구

부정숙* · 류병남** · 심정훈**

A Study on the Wake Flow behind a Circular Cylinder with a Spinning Control Cylinder

J. S. Boo · B. N. Ryu · J. H. Shim

Key words : Spinning Control Cylinder(회전제어원주), Spin Parameter(회전계수), Strouhal Number(스트로할수), Phase Average Method(위상평균법)

Abstract

An experimental study was conducted to investigate the influence of the spinning control cylinder which was set on the surface of a fixed circular cylinder in uniform flow, $Re=1.24 \times 10^4$. The measurements of velocity vectors and pressure distributions are carried out in various spin parameters and angles of spinning control cylinder. The results show that velocity profiles and pressure distributions are different with angles of control cylinder and spin parameters. When the control cylinder angle is 100° , there is more effect in increasing the velocity and the pressure distribution than other cases. In this case, the vortex shedding frequency was increased as increasing spin parameter

1. 서 론

Prandtl에 의해 경계층 개념이 도입된 이래 경계층의 형성에 의한 역효과의 최소화와 경계층의 제어에 관심을 두고 지금까지 여러 실험적인 연구가 행하여지고 있다. 특히 경계층 유동에서의 박리(separation)는 실제적으로 내부 및 외부유동에서 쉽게 일어나는 현상으로 공학적으로 중요한 문제

라고 할 수 있다. 난류유동은 아주 복잡하고, 아직까지 난류의 근본적인 메카니즘은 완전히 이해되지 않고 있으며, 이에 대한 연구보고는 상당한 양이 쏟아져 나오고 있다.

최근의 난류유동에 관한 실험은 점차 복잡한 난류유동장으로 초점이 맞춰지고 있으며, 그 중에서도 유동의 박리는 재순환 영역을 동반하고 있다. 주기적으로 유출되는 와열은 구조물의 진동에 영

* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소(원고접수일 : 2000년 2월)
** 부산대학교 대학원

향을 미치고 있어, 와의 생성 및 억제에 관한 원리를 이해하는 것은 실용적인 문제에 있어서 중요한 의미를 가진다고 볼 수 있다. 실제적으로 다양한 여러 공학적 문제에서 그 응용가치를 보여주고 있는 뚱뚱한 물체(bluff body)에 대한 유체력(fluid force)과 와유출(vortex-shedding)의 제어는 지금까지 상당한 관심의 대상이 되어왔다. 또한 뚱뚱한 물체는 각종 구조물의 일반적인 형태이며, 여기에 작용하는 유체력을 감소시키기 위한 연구는 그 응용에서 중요하다고 볼 수 있다⁽¹⁾.

유동을 제어하기 위한 많은 연구는 지금까지 현재 활발하게 진행되고 있고 제어방법들도 다양하게 개발되고 있다. 일반적으로 뚱뚱한 물체에 작용하는 유동의 제어방법에는 제어영역에 따라 표면 경계층 제어, 박리전단층 제어, 후류 제어 그리고 자유유동제어로 크게 나눌 수 있고, 외부 유체의 공급유무에 따라 능동제어(active control)와 수동제어(passive control)로 크게 나누어진다⁽²⁾.

원주는 일반적으로 여러 공학적인 분야에서 그 실질적인 응용이 기대되고 있으며, 가장 기본적인 유동 장애물로 취급된다. 원주에 관한 연구는 상당한 분량의 연구결과를 보여주고 있으며, 기본적인 현상에 대한 실험결과는 정립되어진 상태이다. 본 연구에서는 원주표면에 회전하는 제어원주를 설치하여 원주표면에서의 경계층을 제어하고자 한다. 이는 원주의 한 쪽 부분에 흡을 파서 작은 원주(이하 '제어원주')를 설치하여 이를 회전시킴과 동시에 설치위치를 원주방향으로 변화시킴으로써, 이미 알고 있는 원주주위 유동에서의 박리점에 대한 사실을 바탕으로 회전원주의 설치위치와 유동현상간의 상호관계를 알고, 최적의 효과를 얻고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 전체길이가 6,375mm이고, 시험구간의 크기는 305mm(폭)×305mm(높이)×3200mm(길이)인 개회로 노즐형의 흡입식 아음속 풍동을 사용하였다. 풍동입구에는 40메쉬의 스크린을 설치하였고, 평균유속 5m/s에서 5mm간격으

로 벽면을 제외한 58point에서 각 지점당 4,096개씩 측정된 데이터를 정리한 결과, 시험구간의 난류강도는 약 2%이었다.

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험모델과 그 좌표계이다. 여기서 X와 Y는 각각 유동방향과 유동에 수직방향을 나타낸다. 제어원주 설치각도는 좌표계의 중심에서 유동의 역방향으로 연장한 선을 기준선으로 하여 회전원주의 중심과 정지원주의 중심을 연결한 선 사이의 사이각을 반시계방향으로 측정하여 ϕ 로 표시하였다. 실험에서 사용한 정지원주는 스테인레스관으로 두께 1.5mm, 직경은 34mm이며, 정지원주에 설치된 제어원주의 직경은 10mm, 정지원주와 제어원주 간격은 1mm로 하였다.

정지원주와 제어원주는 시험구간 입구에서 900mm 지점에 설치하였다. 제어원주는 Fig. 2에

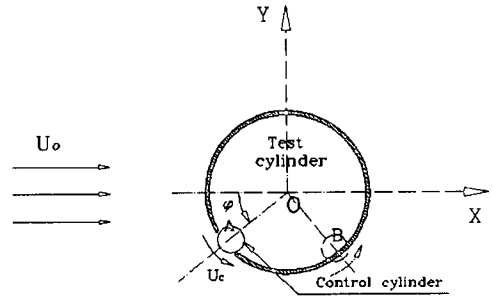


Fig. 1 Fixed circular cylinder with the control cylinder

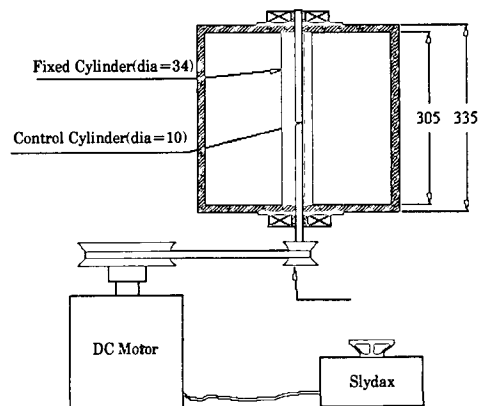


Fig. 2 Schematic diagram of a test section

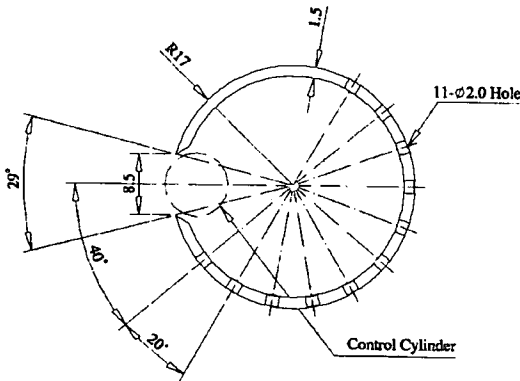


Fig. 3 Pressure holes on fixed circular cylinder

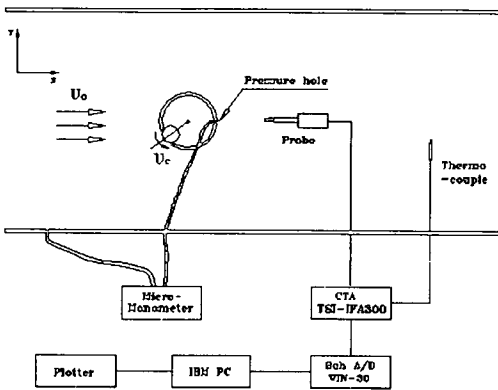


Fig. 4 Measuring and data processing system

나타낸 것처럼 풍동 양벽면에 상하로 베어링을 이용하여 고정하였고, 아래쪽에서 가변속 DC모터로부터 벨트를 통해 동력이 전달된다. 제어원주의 회전수는 슬라이더의 전압을 변화시켜 DC모터의 전압을 조정함으로써 적절히 제어되며, 회전변동률($\Delta n/n$, n : 모델의 회전수)은 약 5% 이내이다.

정지원주는 속이 비어 있는 스테인레스관으로써 압력을 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 표면에 직경 2.0mm의 정압공을 20° 간격으로 11개를 뚫어 외경 1.8mm, 내경 0.8mm의 동관을 심어 제어원주의 설치각도 ϕ 의 변화시에도 평균압력의 측정이 가능하도록 하였다. 원주뒷면의 평균압력 측정시에 정지원주의 하부구간 $90^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ 은 제어원주가 설치될 경우 압력측정을 할 수 없으므로 정지원주 상부구간 $180^\circ \leq \phi \leq 280^\circ$ 에서의 평균압력만을 측정(Fig. 5의 A구간)하여 각각의 경우에 대해

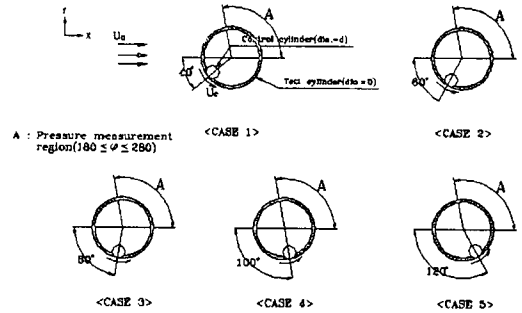


Fig. 5 Various experimental conditions

서 압력감소효과를 비교하였다.

자유흐름속도, U_0 는 5.5m/s이었으며 이때 정지원주의 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수는 약 1.24×10^4 이다. 압력측정실험은 제어원주의 설치각도 별로 회전계수를 적절히 변화시켜 가면서 정지원주 후면의 배압을 미세압력계(Furness Controls Limited, model FCO12)를 사용하여 평균치를 측정하였다. 후류의 유동측정에는 정온형 열선풍속계(TSI, model IFA 300)와 X형 열선(Kanomax, model 0252R-T5)이 사용되었다. 각각의 회전계수에 대한 후류유동장의 변화를 관찰하기 위해 $X/D=5.0$, $Y/D=-3.0 \sim 3.0$ 범위에서 난류신호를 측정하였고 위상평균기법을 수행하여 대규모 조직적인 와의 구조를 파악하였다. 열선의 교정은 look-up table 기법을 이용하였으며 데이터의 추출간격은 100 μ s(10kHz), 측정점당 4,096개씩 20회의 앙상블(ensemble)을 취하였다. 이상의 측정시스템도는 Fig. 4와 같다.

한편 정지원주의 길이를 기준으로 한 종횡비(aspect ratio)는 9.0이고, 폐쇄비(blockage ratio)는 11.1%로 유동성질이 단지 X, Y의 2차원에만 지배적으로 취급되므로 본 연구에서는 이의 영향을 무시하였다.

본 실험에서의 실험변수는 제어원주의 설치각도 ϕ 와 회전계수 S(회전에 의한 제어원주의 표면속도와 자유유동속도의 비= U_c/U_0)이다. Fig. 5은 실험범위를 개략적으로 나타내고 있다. 제어원주의 설치각도는 40°, 60°, 80°, 100°, 120°로 하였고, 이때의 평균압력 측정구간을 A로 나타내었다. 제어원주의 회전계수 S는 0.0, 1.0, 2.0, 3.0까지 4

가지의 변화를 주었으며 제어원주의 최대 회전수는 S=3.0일 때 31,500rpm이다. 이상의 실험조건

을 표 1에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

표 1 실험조건

실험 조건	
속도	자유유동속도 : 5.5m/s, Re=1.24 × 10 ⁴
원주	정지원주직경 : 34mm 제어원주직경 : 10mm
폐쇄비	11.1%
후류측정위치	X/D=5.0 Y/D = -3.0~3.0(0.2D간격 31point)
각도	40°, 60°, 80°, 100°, 120°
회전계수	S=0.0, 1.0, 2.0, 3.0
측정조건	Sampling Frequency : 10kHz Data Number : 4,096개 Ensemble Number : 20회

3.1 후류유동장

Fig. 6은 정지원주의 중심을 기준으로 X/D=5.0, -3.0 ≤ Y/D ≤ 3.0의 영역에서 Y방향으로 0.2D씩 이송하면서 측정한 시간평균 속도분포를 각각의 회전계수(S)별로 제어원주의 설치각도에 대해서 나타낸 것이다. Fig. 6 (a)의 회전계수 S=0.0인 경우에 대해 살펴보면 제어원주가 설치된 위치에 따라서 시간평균 속도분포에 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 뒤에 언급할 정지원주 후면의 압력측정 결과 Fig. 17 (a)에서도 차이를 보이는데

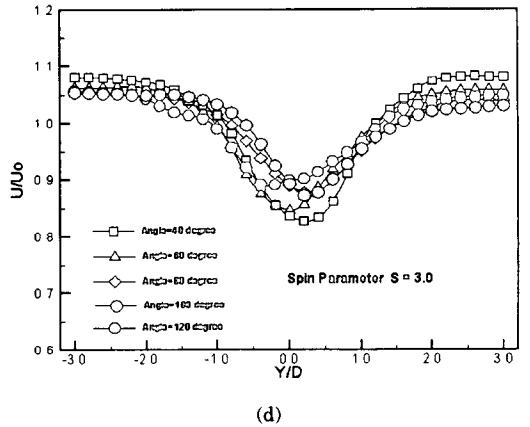
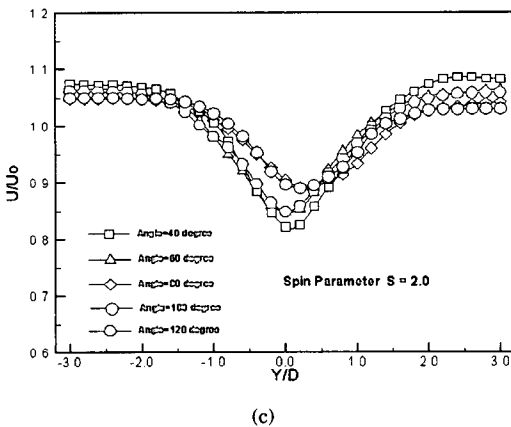
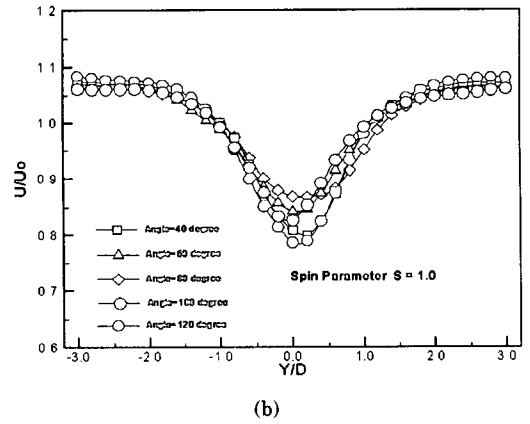
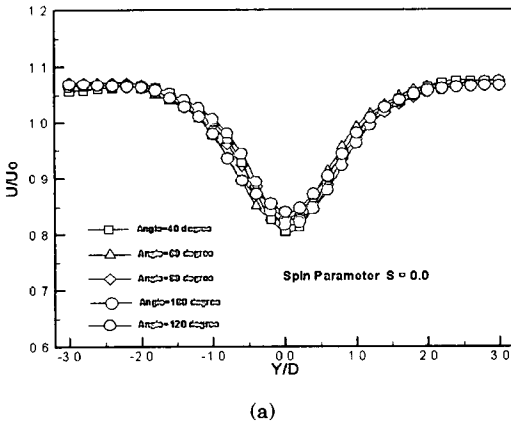


Fig. 6 Comparison of the time mean velocity, U/U₀ for angles of control cylinder

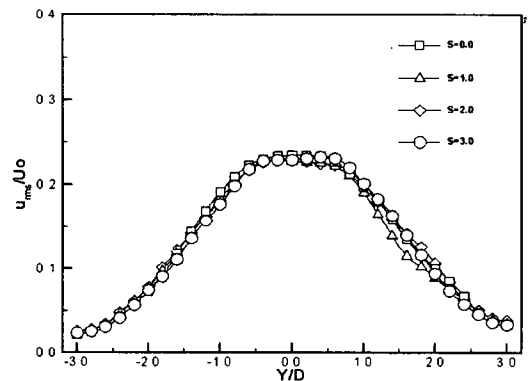
정지원주와 제어원주사이의 틈새영향으로 제어원주 설치위치에 따라 후류 및 원주표면의 압력분포에 차이가 발생한 것이다. (b)의 $S=1.0$ 인 경우 최대속도 결손을 보이는 중심부근에서 $\phi=80^\circ$ 인 경우에 가장 큰 속도회복을 보이고 있으며, $-3.0 \leq Y/D \leq 1.5$, $1.5 \leq Y/D \leq 3.0$ 영역에서는 $\phi=100^\circ$ 인 경우가 $U/U_0 = 1$ 에 가장 가까이 접근하고 있다. 전구간($-3.0 \leq Y/D \leq 3.0$)의 속도분포를 비교해 볼 때, $\phi=100^\circ$ 인 경우 속도결손영역의 속도회복효과가 가장 큼을 알 수 있다. 이후 회전계수를 2.0, 3.0으로 증가시키면 $\phi=80^\circ$, 100° 인 경우에서 속도회복이 크고, 최대 속도결손을 보이는 지점이 제어원주가 설치되지 않은 상부측으로 이동됨을 알 수 있다. 이와같이 회전계수의 증가에도 불구하고 속도회복효과에 차이를 보이는 것은 제어원주를 회전시킴으로써 정지원주 표면을 따라 진행되는 유체에 제어원주가 접선방향으로 운동량을 전달하게 되는데, 이때 유체를 가속시키는 접선 방향이 제어원주 설치각도마다 다르므로 인해 후류의 시간평균 속도분포에 차이가 발생한 것으로 추측된다. 제어원주 설치각도 ϕ 가 90° 보다 작을 경우(Fig. 1의 A위치)에는 제어원주 설치지점의 접선의 기울기가 음(-)이 되어 X축에서 벗어나는 방향으로 유체가 가속되고, ϕ 가 90° 보다 클 경우(Fig. 1의 B위치)에는 제어원주 설치지점의 접선의 기울기가 양(+)이 됨으로 X축에 가까이 접근하는 방향으로 유체가 가속되기 때문에 후류폭을 효과적으로 감소시킬 수 있다. $\phi=80^\circ$ 인 경우의 속도회복 효과가 $\phi=40^\circ$, 60° 인 경우보다 큰 것은 제어원주의 폭이 약 29° (Fig. 3 참조)가 되므로 실제 정지원주 표면에 노출된 제어원주는 $65.5^\circ \leq \phi \leq 94.5^\circ$ 구간에서 회전하고 있기 때문에 발생한 결과로 추측된다.

그리고 $\phi=100^\circ$ 일 경우, $S=2.0$ 이상에서 $S=0.0, 1.0$ 일 때보다 속도회복이 크게 나타났는데 이는 박철⁽¹¹⁾이 '단일원주의 회전시에 회전계수 S 가 1.2보다 작을 경우에는 회전의 영향은 적어 후류 구조는 정지원주의 경우와 거의 같다'는 주장과 관련이 있는 것으로 생각된다. $\phi=120^\circ$, $S=3.0$ 일 경우에서 속도분포 형상이 심하게 일그러짐을 발견할 수 있는데 Diaz⁽¹²⁾의 실험결과와 비교해 볼

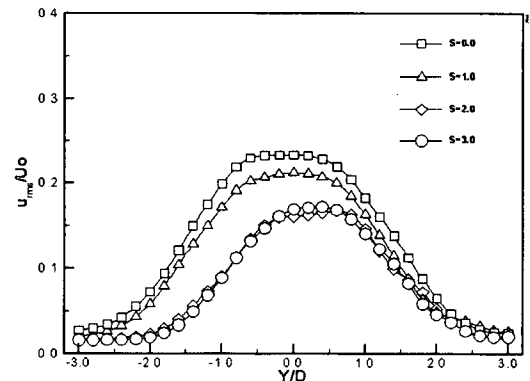
때 회전계수의 증가로 인한 후류에서의 불규칙성분의 증가때문으로 추측된다.

Fig. 6 (b)~(d)의 회전계수 1.0~3.0의 구간에서 $\phi=100^\circ$ 인 경우가 가장 속도회복률이 양호한 것을 알 수 있는데 이는 $\phi=100^\circ$ 인 경우에서 이의 접선방향으로의 유체가속이 후류폭을 감소시키는데 효과가 큼을 의미하는 것이다.

Fig. 7은 제어원주의 설치각도별로 회전계수 변화에 대한 u-속도성분의 난류강도를 나타낸 것이다. 전체적으로 단일원주의 중심에서 발견되는 쌍봉구조의 난류강도분포는 발견할 수 없었으며, 중심부근이 평편하게 분포되어 있다. Fig. 7 (a)의 $\phi=40^\circ$ 경우 회전계수 증가에도 불구하고 난류강도의 감소 및 난류폭의 감소가 미미하였으며 $\phi=100^\circ$ 인 (b)의 경우에는 회전계수를 증가시킬 수



(a) $\phi=40^\circ$



(b) $\phi=100^\circ$

Fig. 7 Comparison of the streamwise turbulent intensity for spin parameters(S)

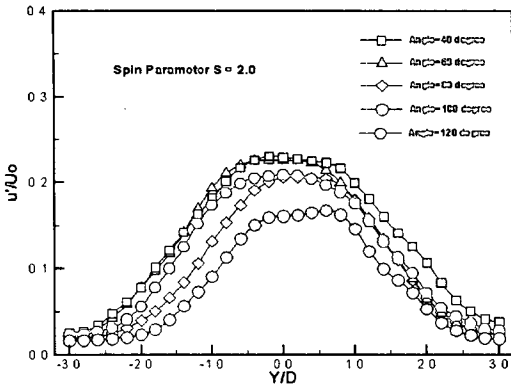


Fig. 8 Comparison of the streamwise turbulent intensity for angles of control cylinder

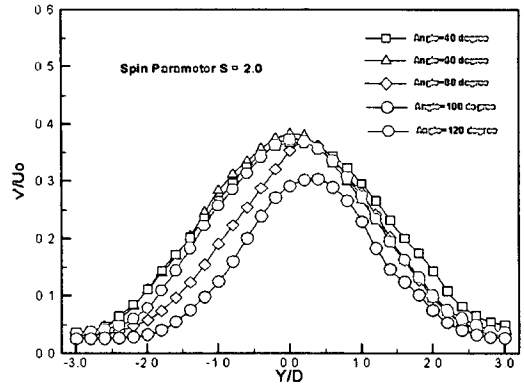
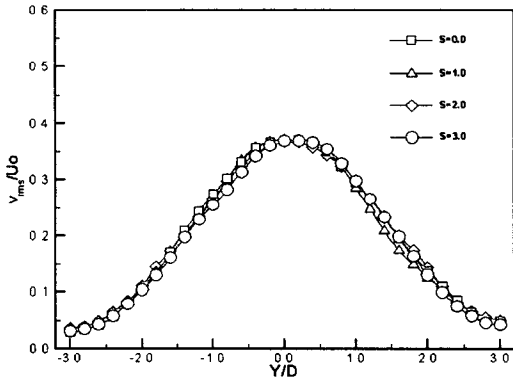
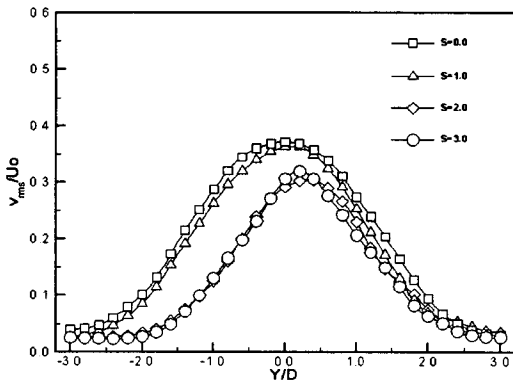


Fig. 10 Comparison of the lateral turbulent intensity for angles of control cylinder



(a) $\phi = 40^\circ$



(b) $\phi = 100^\circ$

Fig. 9 Comparison of the lateral turbulent intensity for spin parameters(S)

룩 난류강도의 감소가 크게 나타났다. Fig. 7 (b)에서 $S=2.0$, $S=3.0$ 의 경우 난류강도분포가 유사하

며 난류강도값의 최대치를 보이는 지점이 Fig. 6의 시간평균 속도분포에서 확인된 것처럼 제어원주가 설치되어있지 않은 상부측으로 이동되었다.

Fig. 8에는 회전계수 $S=2.0$ 일 경우 제어원주 설치각도별 난류강도 분포를 나타내었다. $\phi=100^\circ$ 의 경우 난류강도 및 난류폭이 다른 경우에 비해서 상당히 감소하였음을 알 수 있다.

Fig. 9에는 v -속도성분의 난류강도분포를 나타낸 것으로 $\phi=40^\circ$ 인 경우의 v -속도성분의 난류강도감소는 크지 않았고 제어원주 설치각도가 100° 인 경우, 회전계수 $S=2.0$ 이상에서 난류강도의 감소가 컸다. Fig. 10에는 v -속도성분의 난류강도를 회전계수 $S=2.0$ 에 대해 제어원주 설치 각도별로 나타낸 것으로 $\phi=100^\circ$ 인 경우에 난류강도감소가 가장 큼을 알 수 있다.

3.2 와유출 주파수

제어원주의 회전계수 S 의 변화에 따른 와유출 특성을 살펴보기위해서 $X/D=5.0$, $-2.0 \leq Y/D \leq 2.0$ 에서 측정된 v -속도성분에 대하여 주파수분석을 하였으며 Fig. 11에 $\phi=100^\circ$ 인 경우에 대해서 나타내었다. Fig. 11에서 각각의 Y/D 별 그래프는 각 지점에서 측정된 데이터(4,096개 \times 20회)를 주파수 변환하여 앙상블 평균을 취한 것이다. 회전계수별로 거의 일정한 탁월주파수를 가지고 있었고 회전계수가 증가하면서 전체적으로 탁월주파수 영역의 에너지값이 감소하여 $Y/D = \pm 2.0$ 에서부터

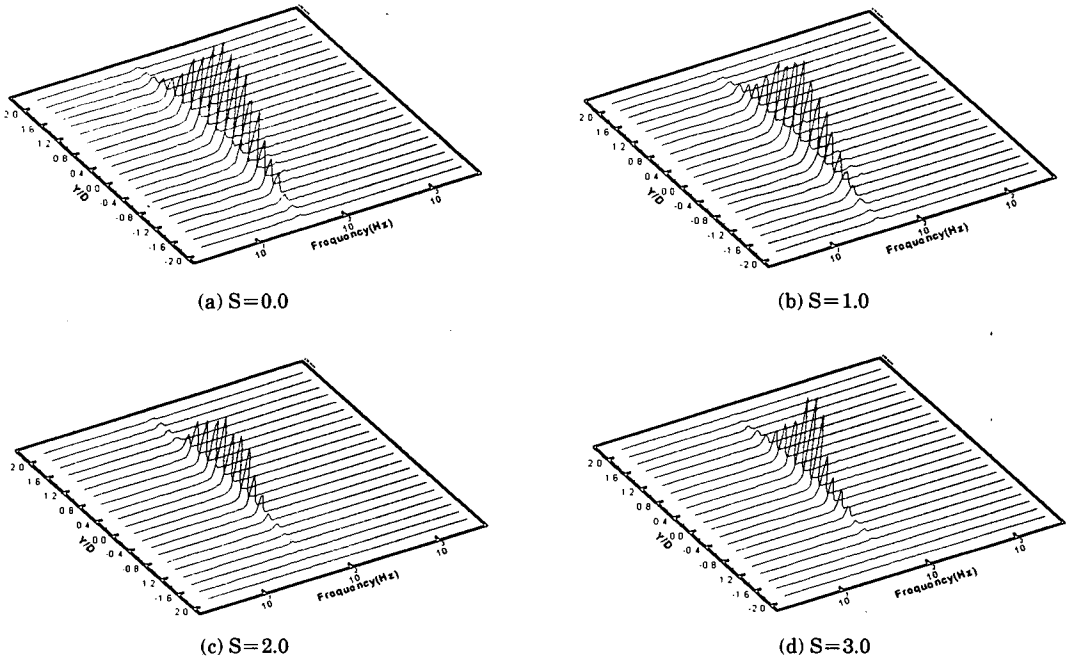


Fig. 11 Power spectrum of lateral velocity at $X/D=5.0$ for spin parameters(S) of control cylinder, $\phi=100^\circ$

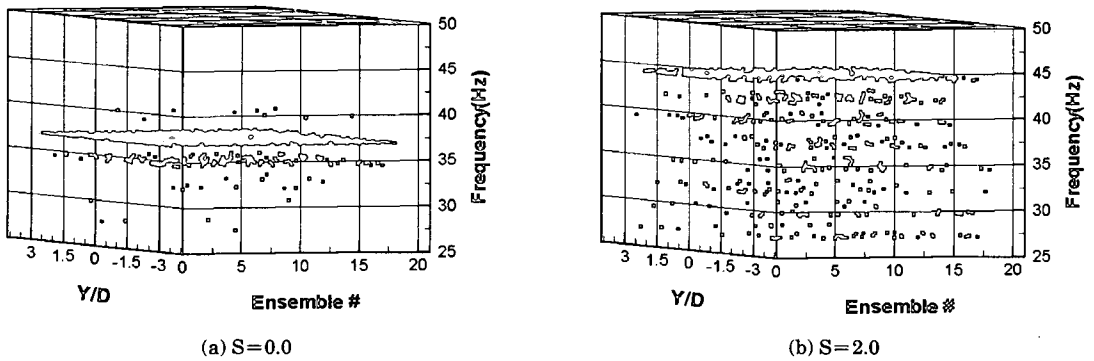


Fig. 12 Variation of the vortex shedding frequency(lateral velocity component) for ensemble numbers, $X/D=5.0$, $\phi=100^\circ$

원주중심으로 평활화되는 영역이 점차 넓어지고 있음을 알 수 있다. 회전계수 $S=2.0$ 이상에서는 제어원주가 설치되어 있는 $-2.0 \leq Y/D \leq 0.0$ 영역에서 파워스펙트럼의 극대치 감소가 두드러짐을 알 수 있다. 이것은 제어원주의 회전에 의해 와류출의 주기성이 점점 희박해짐을 의미한다. 하지만 탁월주파수 영역의 파워스펙트럼 값이 상대적으로 많이 감소했을 뿐 주기성이 완전히 없어진 것은 아니었

다. 회전계수가 증가될수록 각 지점에서 와류출 주파수가 일정하지 않고 변동이 심해지는데 20회의 앙상블 평균을 취함으로써 평활화된 것이다.

Fig. 11의 와류출 특성을 좀 더 자세히 고찰하기 위해서 $\phi=100^\circ$ 에 대해 회전계수별로 각각의 측정지점($-3.0 \leq Y/D \leq 3.0$)에서 획득된 앙상블 20회에 대한 탁월주파수 분포와 이의 에너지 분포를 Fig. 12, Fig. 13에 나타내었다. Fig. 12에서 $S=$

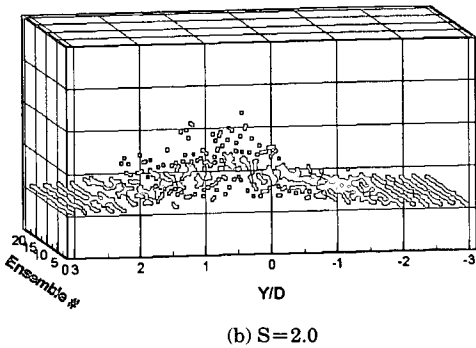
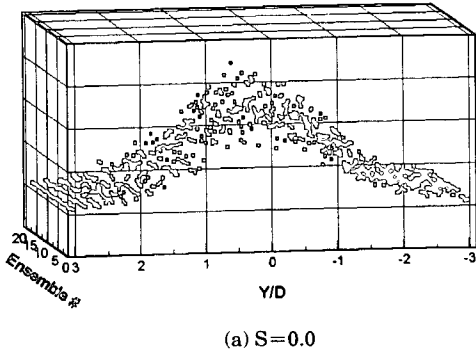


Fig. 13 Variation of power spectrum energy of the vortex shedding frequency, $X/D=5.0$, $\phi=160^\circ$

0.0일 때 각 지점에서의 탁월주파수가 특정구역 (36.6Hz)에 밀집되어 분포하지만 $S=2.0$ 일 때에는 넓은 주파수대역에서 분포하고 있으며, 이때의 탁월주파수는 26.9~43.9Hz 범위에서 고르게 분포하고 있어 회전계수의 증가시 와유출이 불안정해짐을 알 수 있다. 이는 박철⁽¹¹⁾, Diaz등⁽¹²⁾의 단일 원주의 회전실험에서 '회전계수가 1.0을 넘으면 칼만와열에 의한 정현파상의 속도변동이 점차 붕괴되어 불규칙한 성분의 상대적 증가가 나타나고, 회전계수가 2.0을 넘으면 후류에 규칙성있는 변동은 존재하지 않는다'고 주장한 것과 관계가 깊은 것으로 생각된다. 본 연구에서는 회전하는 제어원주가 정지원주의 일부분에만 노출되어 칼만와열의 붕괴가 회전계수의 증가에 따라 크지 않지만 회전계수의 증가와 더불어 와유출의 불안정이 더욱 뚜렷해지는 과정을 확인할 수 있었다.

그리고 각각의 탁월주파수가 가지는 에너지값

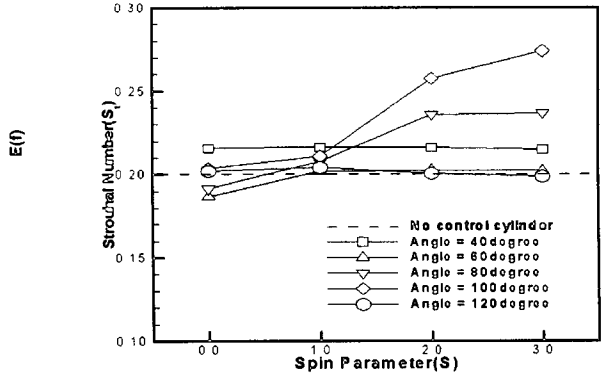


Fig. 14 Variation of Strouhal Number for a circular cylinder with control cylinder

은 Fig. 13에서 볼 수 있듯이 회전계수의 증가에 따라 상대적으로 감소함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 12, Fig. 13을 종합하여 볼 때 회전계수가 증가할수록 유동이 불안정해져서 와유출이 불안정해지고 이에 해당하는 주파수대역의 에너지 값이 감소함을 알 수 있었다. Igarashi⁽⁶⁾의 트리핑 와이어가 설치된 원주에 대한 연구에서는 스트로할 수가 증가할수록 항력계수가 감소함을 보였는데, 본 연구에서도 와유출의 불안정성과 이의 에너지값의 감소는 뒤에 언급될 배압분포 결과(Fig. 17)와 연관지어 볼 때 항력감소와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다.

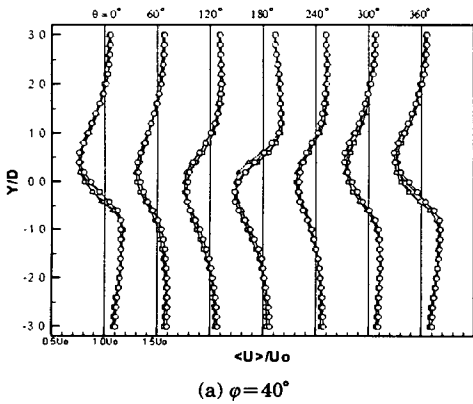
Fig. 14는 제어원주의 설치각도에 따른 회전계수별 스트로할 수(Strouhal Number, St)를 나타낸 것이다. 여기에 사용된 와유출 주파수는 각 지점에서 얻어진 데이터(4,096개 \times 20회)를 주파수 변환하여 앙상블 평균한 값을 사용하였으며 제어원주의 설치각도에 따라 와유출 특성이 다름을 알 수 있다. 회전계수 변화에 대해 제어원주의 설치각도 ϕ 가 40° , 60° , 120° 에서의 St 는 큰 변화가 없으나 80° , 100° 에서는 회전계수의 증가에 따라 St 가 증가되어 $S=3.0$ 일 때 각각의 스트로할 수 $St=0.237$, 0.274 이었다. 이러한 결과들을 시간평균 속도분포결과와 비교해보면 회전계수의 증가시 후류폭의 감소효과가 큰 제어원주 설치각도는 $\phi=80^\circ$, 100° , 120° 이었는데, $\phi=120^\circ$ 에서는 회전계수의 증가시 St 의 증가가 나타나지 않았다. $\phi=120^\circ$ 인 경우 탁월주파수 분포는 Fig. 12의 $\phi=$

100°인 경우와 유사하였고 Fig. 13처럼 회전계수의 증가에 따라 탁월주파수의 에너지값 감소는 나타나지 않았다. 그런데 제어원주 설치각도가 120°인 경우에는 Fig. 6에서 살펴보았듯이 $\phi=40^\circ$, 60°에 비해 후류폭의 감소가 있었고 Fig. 17의 Cp 분포에서도 높은 압력회복이 있었으나 St에는 큰 변화가 없는 것으로 보아 평균된 와유출 주파수를 이용하여 계산된 St보다는 와유출의 불안정성이 후류폭 및 항력감소에 더욱 영향력을 미치는 것으로 생각된다.

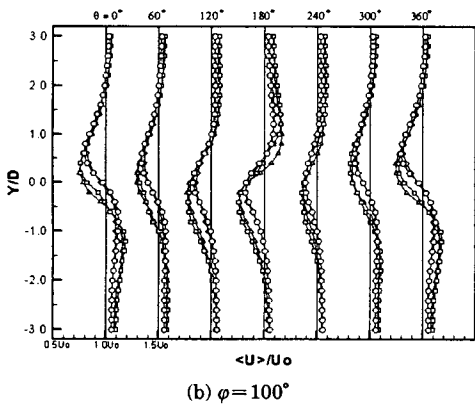
3.3 위상평균에 의한 후류구조 특성

Fig. 15는 위상평균에 의해 얻어진 $\langle U \rangle$ 성분을 위상별 Y-방향분포를 나타낸 것이다. Fig. 15 (a)는 $\phi=40^\circ$ 인 경우에 대해서 회전계수 $S=0.0\sim$

3.0의 $\langle U \rangle$ 분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 후류중심선($Y/D=0.0$)에 대해 위상차 180° 주기로 선대칭된 분포가 나타나고 있으며 회전계수의 증가에 따라 $\langle U \rangle$ 성분의 분포에 큰 변화를 보이지 않는다. 위상 $\theta=0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ 의 분포에서 최대치에서 감소하면서 U_0 선과 만나는 지점 부근이 와중심이 위치하는 곳으로 추정되는데, 회전계수의 증가에 대해 이 지점의 Y축으로의 위치이동은 거의 없으며, 회전계수 $S=3.0$ 일 경우 약간의 위치이동이 있다. Fig. 15 (b)의 경우는 $\phi=100^\circ$ 의 경우를 나타낸 것이다. 회전계수 $S=2.0$ 일 경우 $\langle U \rangle$ 성분의 진동폭 감소가 크고 $S=3.0$ 일 경우의 분포와 유사하다. 이러한 진동폭의 감소는 그 지점의 속도회복을 의미한다. 와중심이 있는 것으로 추정되는 위상 $\theta=0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ 의 $\langle U \rangle$ 분포선과 U_0 선이 만나는 지점을 관찰하면 $S=2.0, 3.0$ 인 경우

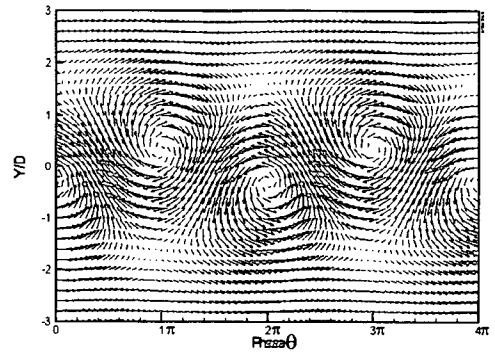


(a) $\phi=40^\circ$

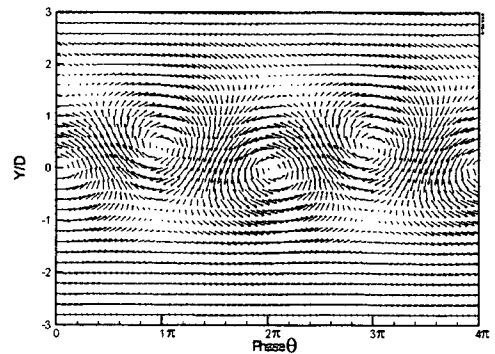


(b) $\phi=100^\circ$

Fig. 15 Distribution of phase averaged velocity, $\langle U \rangle/U_0$, across the flow cross section ($\square : S=0.0, \triangle : S=1.0, \diamond : S=2.0, \circ : S=3.0$)



(a) $S=0.0$



(b) $S=3.0$

Fig. 16 Velocity vector fields $\langle U - U_c \rangle, \langle V \rangle$ of the large scale structure, $\phi=100^\circ$

의 상부(Y방향)로 위치이동이 나타나며 이것은 와 중심의 이동을 의미한다. 후에 언급될 벡터선도 (Fig. 16)와의 비교를 통해서도 관찰할 수 있다.

Fig. 16은 위상평균된 속도를 와이동속도, U_c 로 관찰자가 이동하면서 관찰한 위상평균 속도의 벡터장(velocity field ; $\langle U \rangle - U_c, \langle V \rangle$)을 도시한 것이다. 와이동속도는 후류중심선 상하의 가속부와 감속부에 있는 응집와의 중심속도를 구해 이의 평균값을 취하였다. 이렇게 계산된 와이동속도는 $0.951 \sim 0.976U_0$ 범위였다. 벡터장에서 보면 응집 와 중심주위를 후류중심선 상하에서 각각 서로 반대방향으로 회전하는 응집와를 볼 수 있다. 또한 대규모 응집와의 중심을 확연히 볼 수 있으며, 상하 와중심간의 거리가 회전계수를 증가시키면 제어원주가 설치되어 있는 정지원주 하부측의 와중심이 상부로 이동하면서 서로 가까워지는데 Fig. 16 (b) $S=3.0$ 에서 확인할 수 있다.

3.4 배압분포

Fig. 17은 회전계수별 제어원주의 설치각도에 대한 C_p 분포를 나타낸 것이다. Fig. 17 (a)의 회전계수 $S=0.0$ 인 경우에서 알 수 있듯이 제어원주 설치각도에 따라 각각 다른 C_p 분포를 나타내고 있으며 $\phi=120^\circ$ 인 경우의 C_p 분포가 가장 크고 $\phi=80^\circ$ 인 경우가 가장 낮게 분포한다. 회전계수를 상승시키면 $\phi=100^\circ$ 인 경우의 C_p 분포가 가장 크게 나타나고, $\phi=40^\circ$ 인 경우가 가장 낮은 분포를 보이고 있다. 전체적으로 $\phi=40^\circ, 140^\circ$ 인 경우는 회전계수 증가에 대한 C_p 값의 증가는 미미한 반면, $\phi=80^\circ, 100^\circ, 120^\circ$ 의 경우에는 회전계수의 증가에 따라 C_p 값의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 특히 $\phi=100^\circ$, 회전계수 $S=1.0 \sim 3.0$ 에서 다른 설치각도의 경우에 비해 큰 압력회복효과가 있었다.

이것은 이전의 3.2절에서 고찰하였듯이 회전계

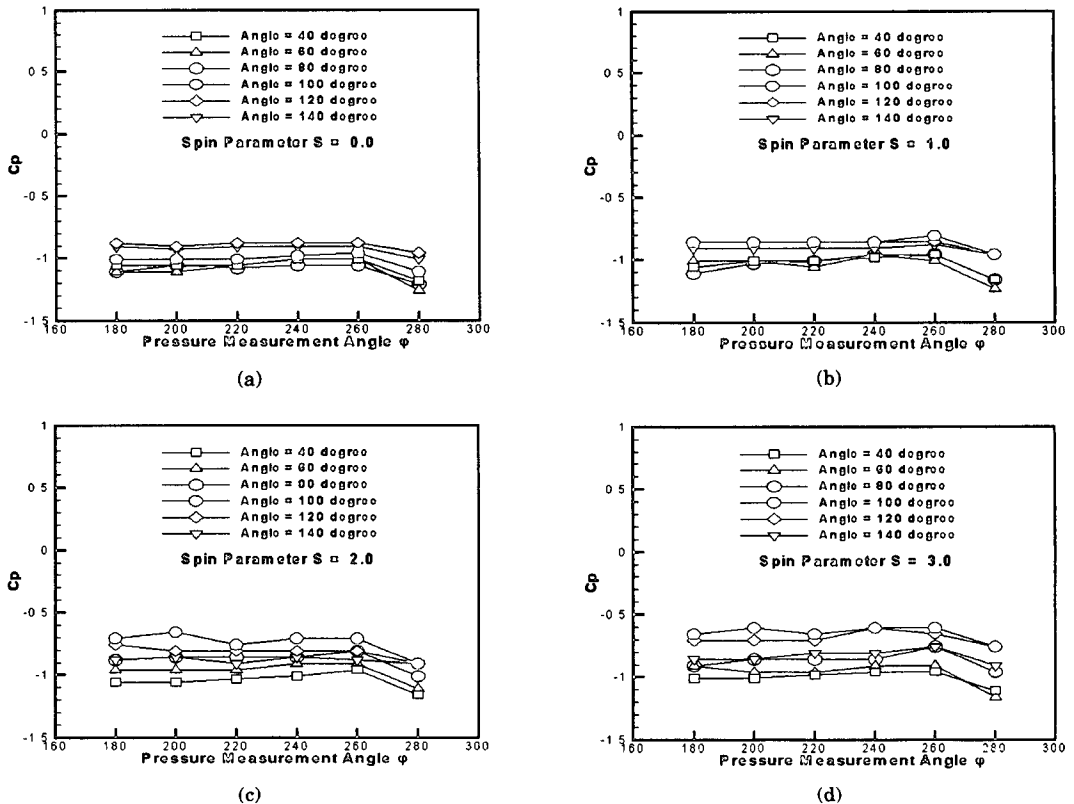


Fig. 17 Pressure distribution on the rear face of the circular cylinder for spin parameters(S) and angles of control cylinder(ϕ)

수의 증가는 와유출의 불안정성을 증대시키고 이에 해당되는 주파수 대역의 에너지값을 감소시켰다. 이는 항력감소와 연관되는데 제어원주의 설치각도별로 이러한 불안정성의 증가효과와 에너지값의 감소정도가 다르므로 인해서 발생된 결과로 추정된다. 그리고 $\phi=120^\circ$ 인 경우에는 회전계수 $S=0.0\sim 3.0$ 의 범위에서 고르게 양호한 C_p 분포를 나타내었다. 이상을 정리하면, 회전계수 $S=0.0$ 일 경우에는 $\phi=120^\circ, 140^\circ$ 에서 가장 큰 C_p 분포를 나타내어 제어원주와 같은 돌기물은 그 설치위치가 원주의 후반부($90^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$)에 설치될 경우 항력감소 효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 트립핑 와이어와 같은 돌기물은 원주의 전반부($0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$)에 설치하는 것이 일반적인 것을 감안할 때 이 부분에 대한 좀 더 상세한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

원주표면에서의 경계층제어를 위하여 정지원주 표면에 회전하는 제어원주를 설치하고 $Re=1.24 \times 10^4$, 회전계수 $S=0.0\sim 3.0$, 제어원주 설치각도 $\phi=40^\circ \sim 120^\circ$ 범위에서 속도장과 배압을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정지원주 표면을 따라 유입되는 유체를 가속시키는 방향에 따라 후류속도분포가 다르게 나타나고, 후류폭 감소 및 u, v성분의 난류강도값을 가장 효율적으로 감소시키는 방향으로 유체를 가속시키는 제어원주 설치각도는 100° 이었다.

2. 제어원주 설치각도가 $40^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 인 경우 평균 와유출 주파수를 이용하여 계산된 스트로할 수는 회전계수의 증가에 대해서 거의 변화가 없었고, 제어원주 설치각도가 $80^\circ, 100^\circ$ 인 경우에는 회전계수의 증가에 따라 스트로할 수가 증가하였다.

3. 회전계수의 증가에 따라 와유출 주파수의 불안정성이 증가하고 이의 에너지값이 감소하였으며, 이 현상은 제어원주 설치각도가 100° 인 경우에서 가장 잘 나타났다.

4. 제어원주가 회전하지 않을 때($S=0.0$) 설치각도가 120° 인 경우 가장 높은 C_p 분포를 보였으며 회전계수 $S=1.0$ 이상에서는 제어원주 설치각도가

100° 인 경우에서 가장 양호한 C_p 분포를 보였다.

5. 각각의 실험조건에서 와유출 주파수와 압력계수를 비교해볼 때 와유출의 불안정성이 압력계수와 밀접한 관련이 있으며 회전계수의 증가가 와유출의 불안정성을 심화시키고 압력계수를 상승시키는 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 1998년도 부산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 연구에 도움을 주신 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Bearman, P.W. and Trueman, D.M., "An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinder", *aeronaut.q*, Vol.23 pp.229~237, 1972.
2. Sakamoto H. and Haniu H., "Control of Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder and its Effectiveness", *JSME*, Vol.57 pp.882~890, 1991.
3. H. Sakamoto, K. Tan, N. Takeuchi, H. Haniu, "Suppression of Fluid Forces Acting on a Square by Passive Control", *Transaction of ASME*. Vol.119, pp.506~511, 1997.
4. Kiya M. and Matsumura M., "Turbulence Structure in Intermediate Wake of a Circular Cylinder", *Bulletin of JSME*, Vol.28, No.245, pp.2617~2623, 1985.
5. Igarashi T., "Effect of Tripping Wires on the Flow around a Circular Cylinder Normal to Airstream", *Bulletin of JSME*, Vol.29, No.255, pp.1917~1924, 1986.
6. V.J. Modi and M.S.U.K. Fernando, "Moving Surface Boundary-Layer Control : Studies with Bluff Bodies and Application", *AIAA Journal*, Vol.29, No.9, pp.1400~1406, 1991.
7. Igarashi T., "Effect of Vortex Generators on the Flow around a Circular Cylinder Normal to an Airstream", *Bulletin of JSME*, Vol.28, No.236, pp.274~282, 1985.
8. 부정숙, 이종춘, "가열된 회전원주를 지나는 정상유동 및 열전달해석", *대한기계학회 논문집*, 제17권,

제12호, pp.3135~3147, 1993.

9. 부정숙, 양종필, 이상동, "회전원주에 부착된 돌기형 돌출물이 후류유동에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 한국항공우주학회 논문집, 제23권, 제1호, pp.1~9, 1995.
10. Jung Sook Boo, Kyung chun Kim, Jong Pil Yang and Sang Dong Lee, "Control of vortex shedding from a spinning cylinder by tripping wires", The 3rd JSME-KSME Fluids Engineering Conference, pp.577~582, 1994.
11. 박철, "2차원 회전원주의 후류구조에 대한 연구", 부산대학교 석사학위논문, 1991.
12. Diaz F., Gavalda J., Kawall J. G., Keffer J. F., and Giralt F., "Vortex Shedding from a Spinning Cylinder", Phys. Fluid, Vol. 26, No. 12, pp.3454~3460, 1983.
13. 부정숙, 김창수, 서성호, "정방형주의 전방 모서리에 설치한 회전하는 제어원주가 유동장에 미치는 영향", 한국항공우주학회 논문집, 제27권, 제3호, pp.25~34, 1999.

저자 소개



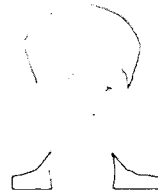
부정숙(夫正淑)

1944년 7월생. 1968년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1975년 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1986년 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1972년~현재 부산대학교 기계공학과 교수.



류병남(柳秉男)

1965년 9월생. 1990년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1992년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1992년~1999년 현대중공업 산업기술연구소 근무. 1999년~현재 부산대학교 대학원 기계공학과 박사과정.



심정원(沈正元)

1972년 4월생. 1996년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1996년~1998년 LG전자 근무. 현재 부산대학교 대학원 기계공학과 석사과정.