

균일류의 회전원주 제어에 의한 유동 및 공력 제어효과에 관한 연구

부정숙* · 양종필** · 신영근*** · 김창수****

(1997년 7월 15일 접수)

Control Effects of the Flow and the Aerodynamic Force Around the Downstream Cylinder by a Spinning Upstream Cylinder in Uniform Flow

J. S. Boo, J. P. Yang, Y. G. Shin and C. S. Kim

Key Words : Spinning Circular Cylinder(회전원주), Aerodynamic Force(공력), Spin Rate(회전계수), Strouhal Number(스트로울 수), Pressure Distributions(압력분포), Flow Patterns(유동형태)

Abstract

The aerodynamic forces and wake structure of the non-rotating downstream circular cylinder, of which the uniform freestream flow is interfered with another spinning upstream cylinder having the same diameter that is located upstream in a line have been investigated experimentally. When the spin rate of the downstream cylinder defined as the ratio of tangential surface velocity of the spinning cylinder to the freestream velocity increases gradually from zero to 1.4, the change of surface pressure distribution, aerodynamic forces of the non-rotating downstream cylinder were measured in case of several distance ratios of 1.5, 3.0, and 4.5 defined as the ratio of distance between the centers of two cylinders to the diameter. The wake flow patterns behind the cylinder were also investigated in each case. From the present experiments, it has been found that the spin rate significantly influences the aerodynamic forces and near-wake flow phenomena of the downstream cylinder in such a way that the drag increases as the spin rate and distance ratio increase and the wake width increases as the distance ratio increases.

기 호 설 명

C_D : 항력계수 (drag coefficient), $C_D = (1/2) \int_0^{2\pi} C_p \cos \phi d\phi$	C_p	: 압력계수 (pressure coefficient), $C_p = (P - P_\infty) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$
C_L : 양력계수 (lift coefficient), $C_L = -(1/2) \int_0^{2\pi} C_p \sin \phi d\phi$	d	: 원주직경 (diameter of circular cylinder)
	f	: 와류출 주파수 (vortex shedding frequency)
	L	: 두 원주의 중심축간의 거리
	P	: 원주표면의 평균정압
	P_o	: 자유흐름의 평균정압
	R_o	: 원주반경 (radius of circular cylinder)

*회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

**부산대학교 기계기술연구소

***현대자동차(울산)

****부산대학교 대학원

- Re : 레이놀즈 수(Reynolds number = $U_0 d / \nu$)
- S : 회전계수(spin rate, $S = R_0 \omega_0 / U_0$)
- St : 스트로울 수(Strouhal number = fd / U_0)
- U_0 : 자유흐름속도(freestream velocity)
- U, V : X, Y 방향 순간유동속도(instantaneous velocity)
- u, v : X, Y 방향 속도변동(velocity fluctuation), $u = U - \bar{U}$, $v = V - \bar{V}$
- u', v' : X, Y 방향 r.m.s
- X, Y, Z : 직교 좌표계
- ρ : 공기밀도
- ϕ : 원주주위의 각도
- ω_0 : 원주의 회전각속도

1. 서 론

동일 직경비를 가지는 두 개의 정지원주를 자유 흐름 방향으로 일정 간격을 두고 일렬(in line)로 설치(이하 '직렬')한 경우는 관군(tube banks)의 가장 기본적인 배열 형태로서 열전달과 관련하여 지금까지 수많은 연구가 수행되어 왔다.

Zdravkovich,⁽¹⁾ Igarashi^(2~4) 그리고 Okajima⁽⁵⁾ 등은 동일 직경비뿐만 아니라 다른 직경비에 대하여 실린더 사이의 간격과 레이놀즈 수(Reynolds number)를 변화시켜 가면서 주위 유동과 열전달 특성을 연구한 바 있다. 그 결과 원주직경(d)과 두 원주 중심축사이의 거리(L)와의 비, 즉 $L/d = 3.5 \sim 3.8$ 인 범위를 유동특성에 불연속적인 변화가 나타나는 임계 간격(critical spacing)임을 밝힌 바 있으며, 이는 레이놀즈 수와도 밀접한 관계가 있음을 규명하였다.

또한 King과 Jones⁽⁶⁾는 와유출(vortex shedding)과 관련하여 L/d 의 변화가 원주의 진동에 미치는 영향에 관하여 연구하였으며, Arie 등⁽⁷⁾은 L/d 의 변화가 원주표면의 변동압력에 미치는 영향을 조사한 바 있다. 특히 Arie 등은 $L/d = 7.0$ 까지는 상류쪽 원주(upstream cylinder)보다 하류쪽 원주(downstream cylinder)가 항력과 양력의 변동성분이 훨씬 크다는 사실과 두 원주에 대한 항력의 변동성분은 L/d 에 큰 영향을 받지 않지만 양력성분은 강하게 영향을 받으며 단일 원주(single cylinder)의 경우에 비하여 약 2.8배정도 높다는 결과를 밝힌 바 있다. 이들 결과로부터 동일 직경의 두 원주에서 레이놀즈 수가 일정할 경우 두 원주의 L/d

가 유동형태에 가장 큰 영향을 미치는 함수임을 확인할 수 있으며, 상류쪽 원주로부터 박리된 전단층이 하류쪽 원주의 유체력에 영향을 미치는 직접적인 작용 인자가 됨을 알 수가 있다. 그러나 이상의 연구들은 대부분 L/d 와 레이놀즈 수만의 함수로 유동특성 변화를 조사한 것으로서 하류쪽 원주에 작용하는 유체력 평가에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

한편, 회전하는 원주(spinning cylinder)의 경우 마그너스 효과(Magnus effect)와 원주주위에서의 순환으로 후류유동은 비대칭성을 이루게 되고 와유출 구조가 변하게 되어 정지원주의 경우와는 달리 복잡한 현상이 나타나게 된다. 이와 관련하여 Diaz⁽⁸⁾와 Taniguchi⁽⁹⁾ 등은 원주의 회전속도 변화가 원주로부터 유출되는 와열의 생성 및 붕괴에 영향을 미치는 직접적인 인자임을 밝힌 바 있다. 부정속 등^(10,11)도 회전원주 주위의 열전달과 유동특성 변화를 해석 및 실험적으로 조사한 바 있으며, 표면상에 부착물을 설치하여 부착물의 주기적인 교란 주파수와 와유출 주파수와의 관계를 규명함으로써 후류 유동의 주기성을 능동적으로 제어할 수 있음을 규명한 바 있다. 따라서 이와 같은 회전원주의 유동특성을 적절히 이용하여 뭉툭한 물체(bluff body)의 유체력을 제어할 수 있는 가능성을 모색하는 것은 산업적·공학적으로 매우 중요할 뿐 아니라 그 응용면에서도 중요한 문제라 하겠다.

이상의 연구동향을 종합하면 정지된 두 개의 원주이거나 단일 회전원주의 경우에 대한 연구들이다. 그러나 유동방향에 직렬로 설치된 상류쪽 원주의 회전에 의한 자유유동을 제어함으로써 정지된 하류쪽 원주의 유동특성과 원주표면의 압력분포에 미치는 영향을 조사한 연구는 지금까지 알려진 바 없다.

본 연구에서는 하류쪽 원주표면에 작용하는 공력을 제어할 목적으로 동일 직경비를 가지는 두 개의 원주를 직렬로 설치하여 두 원주 중심에 대한 간격비와 상류쪽 원주의 회전속도를 적절히 변화시킴으로써 이들 인자들의 상관관계와 하류쪽 원주 주위의 유동특성과 압력분포에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 구체적으로 일정 레이놀즈 수는 1.32×10^4 이고, 두 원주의 간격비, L/d 는 1.5, 3.0 및 4.5, 그리고 상류쪽 원주의 자유흐름 속도(U_0)와 원주의 상대 속도비를 나타내는 회전계수(spin rate, $S = R_0 \omega_0 / U_0$), S 는 0~1.4 범위 내에

서 나타나는 와류출 특성변화와 하류쪽 원주의 시간평균 항력과 양력 및 후류의 유동특성 변화를 정온형 열선풍속계(C.T.A.)와 미세압력계(micro-manometer) 등을 사용하여 풍동(wind tunnel)에서 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 풍동은 전체길이가 4,950 mm이고, 시험구간의 크기는 305 mm(폭)×305 mm(높이)×2430 mm(길이)인 개회로 노즐형의 흡입식 아음속 풍동이다. 풍동의 입구와 시험구간의 입구에는 각각 25메쉬와 60메쉬의 스크린을 설치하여 시험구간의 난류강도가 약 1.0%의 균일유동이 되도록 하였다.

Fig. 1은 본 실험에 사용한 실험모델과 그 좌표계이다. 여기서 X와 Y는 각각 유동방향과 유동에 수직방향을 나타낸다. 실험에서 사용한 두 원주의 직경은 모두 25 mm이며, 자유흐름 방향에 수직되게 Z방향으로 나란히 설치하였다. 이 중 상류쪽

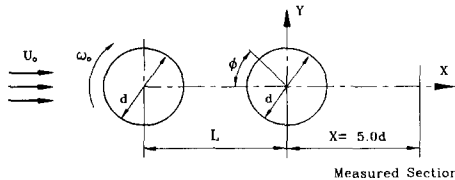


Fig. 1 Schematic diagram of model and coordinate system.

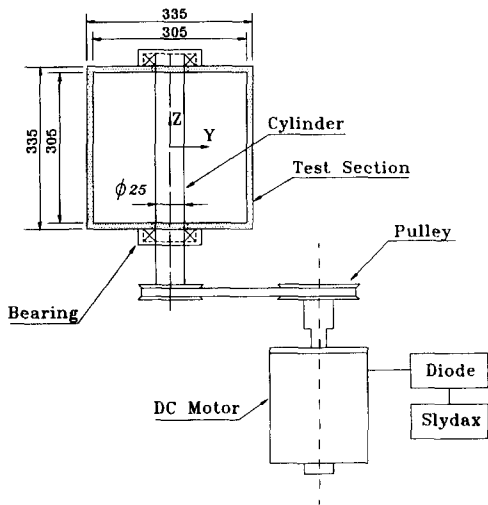


Fig. 2 Experimental apparatus of spinning cylinder.

원주는 시험구간 입구에서 900 mm 지점에 위치한 표면이 매끈한 알루미늄 봉으로써 풍동 양벽에 상하로 베어링에 의해 고정되어 있고, 아래쪽 끝이 타이밍 벨트(timing belt)로 가변속 DC 모터에 연결되어 있다(Fig. 2 참조). 따라서 원주의 회전수는 슬라이더스의 전압을 변화시켜 DC 모터의 전압을 조정함으로써 적절히 제어되며, 회전변동율($\Delta n/n$, n : 모델의 회전수)은 약 0.5% 이내이다. 또한 하류쪽 원주는 속이 비어 있는 아크릴 재질의 관으로 원주의 중앙표면에 직경 0.8 mm의 정압공을 뚫고 원관을 자유흐름 방향에 대하여 임의 각도(ϕ)로 회전시켜 가면서 표면에서의 평균압력을 측정하였다.

실험하는 동안 자유흐름속도, U_0 는 8.0 m/s로 일정하게 유지하였고 이때 원주직경을 기준으로 한 레이놀즈 수는 약 1.32×10^4 이다. 실험은 먼저 L/d의 변화에 대하여 S를 적절히 변화시켜 가면서 하류쪽 원주표면의 평균압력을 미세압력계(Furness Controls Limited, model FCO12)와 A/D 보드(8-channel, WIN-30)를 사용하여 측정하였으며, 자료의 추출간격은 $1000\mu s$ (1 kHz)로 측정점당 40,960개의 자료를 획득하였다. 또한 정온형 열선 풍속계(TSI, model IFA 300)와 X형 열선(Kanomax, model 0252R-T5)을 사용하여 회전계수의 변화에 따른 와류출 특성과 하류쪽 원주의 중심축에서 $X/d=5.0$ 의 위치에서 후류유동장의 변화를 측정하였다. 이 때 열선교정은 근접후류 측정이 용이하도록 look-up table 기법을 이용하여 검출 가능한 유입각의 폭을 약 10° 가량 넓혔으며, 자료의 추출간격은 $100\mu s$ (10 kHz)로 측정점당 61,440개의 자료가 통계처리를 위해 사용되었다. 이상의

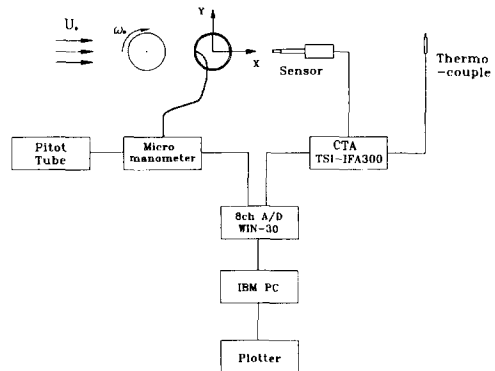


Fig. 3 Schematic diagram of measuring and data processing system.

압력과 속도자료의 획득 및 열선 프로브의 이송은 모두 PC로 온라인 처리되거나 조정되며, 추출된 자료의 분석은 오프라인 프로그램에 의해서 일괄 처리되도록 하였다. 이상의 측정시스템의 개략도는 Fig. 3과 같다.

한편 원주의 직경을 기준으로 한 종횡비(aspect ratio)는 12.2이고, 폐쇄비(blockage ratio)는 8.2%로 각각 작은 값은 아니지만 유동성질이 단지 X, Y의 2차원에만 지배적으로 취급되므로 본 연구에서는 이것들에 의한 영향이 중요한 연구의 목적이 아니기 때문에 측정자료를 보정하지는 않았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평균압력분포와 공력특성

Fig. 4(a)~(d)는 $L/d=1.5, 3.0$ 및 4.5 의 경우에 대하여 하류쪽 원주주위의 평균정압분포(C_p)를 S 의 변화에 따라 나타낸 것으로, 회전하지 않은 정지된 단일 원주(single cylinder)의 결과와 같이 표시하였다. 일반적으로 단일 원주 주위의 압력분

포는 레이놀즈 수, 자유흐름 난류강도, 폐쇄비, 형상비, 원주직경 등에 따라 복잡하게 변화하기 때문에 정량적인 비교가 곤란하지만 본 실험의 결과는 이전의 실험결과^(2~6)와 그 분포형태가 매우 잘 일치하고 있으며, 전형적인 층류 박리(laminar separation)임을 알 수 있다. 그러나 두 원주를 직렬로 설치한 상태에서의 상류쪽 원주 압력분포와는 다소의 차이가 있으리라 예상된다.

Fig. 4(a)는 상류쪽 원주가 회전하지 않는 경우에 L/d 변화에 따른 하류쪽 원주표면의 압력분포 측정결과이다. $L/d=1.5$ 와 3.0 의 경우에 원주 전면 0° 부근에서 매우 낮은 압력을 나타내며, 이는 후면 180° 부근의 압력보다도 낮은 값을 보이고 있다. 특히 $L/d=3.0$ 의 경우 60° 와 300° 부근에서 최대값을 가지는 피크(peak)가 형성되는데 바로 이 부근에서 상류쪽 원주로부터 박리된 전단층이 재부착되고 있음을 알 수 있다. 또한 원주의 상하면 압력분포가 대체로 대칭적 형태를 보이며, 단일 원주의 180° 부근 압력과 직렬의 경우 하류쪽 원주의 0° 부근의 압력과 비슷한 크기를 가지는 것으로 나타났다. 이것은 상류쪽 원주로부터 박리된 전단층이

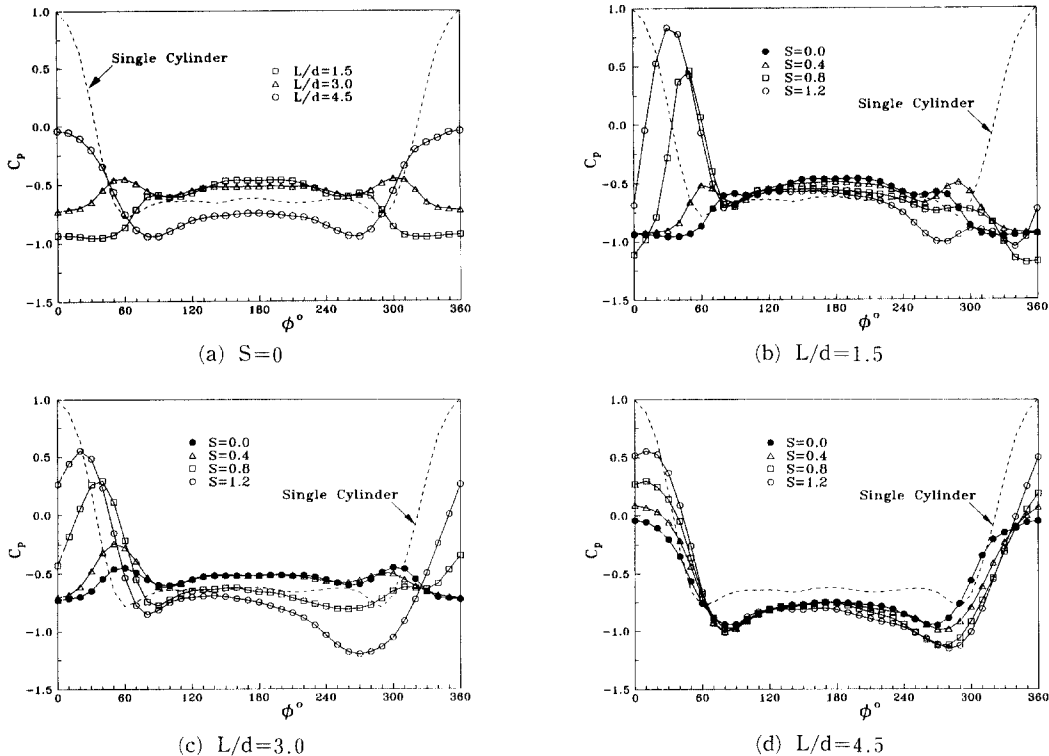


Fig. 4 Pressure distributions around downstream cylinder for spin rates(S) of upstream cylinder.

하류쪽 원주표면에 재부착되면서 두 원주 사이에 준정적와(quasi-stationary vortices)가 형성되기 때문에 해석된다. 이와 관련하여 이미 Igarashi⁽³⁾는 $L/d=1.1, 1.6, 2.3$ 및 3.1 에서 유동특성이 급변하며, 특히 $L/d=3.5$ 까지 범위 내에서 두 원주 사이에 준정적와가 형성됨을 규명하고 이를 임계 간격(critical spacing)이라 한 바 있다.

그러나 $L/d=1.5$ 의 경우는 90° 와 270° 부근에서 약간의 피크가 형성되고 있으나, 재부착한다고는 볼 수 없으며 단지 상류쪽 원주로부터 박리된 전단층의 내부유동의 일부가 이 부근에 부착되기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 $Re=1.32 \times 10^4$ 인 정도인 본 실험의 경우 $L/d=1.85$ 이상일 때 재부착이 일어난다는 종래의 연구결과⁽³⁾와 잘 일치되고 있다. 원주 후면의 압력분포는 약 -0.5 부근에서 거의 편평한 형태로 단일 원주의 경우에 비해 다소 크게 나타나고 있는데, 이는 단일 원주에 비해 하류쪽 원주 후면의 와 형성위치가 상류쪽 원주의 전단층의 영향에 의해 후류중심으로 근접되기 때문으로 보인다.

또한 $L/d=4.5$ 인 경우는 최대값이 0° 부근에서 나타나고 그 크기도 간격비가 작은 경우와는 반대로 180° 부근의 압력보다 훨씬 큰 값을 가지며, 그 분포형태도 단일 원주의 경우와 유사함을 알 수 있다. 이는 상류쪽 원주의 영향을 거의 받지 않는 유동속에 하류쪽 원주가 놓여 있기 때문에 최대압력의 위치는 하류쪽 원주주위 유동의 정체점(stagnation point) 위치와 같게 되기 때문이다. 즉 간격비의 증가로 인해 상류쪽 원주에서 박리된 전단층이 하류쪽 원주의 전면 부근 앞쪽에서 권입(rolling up)하여 박리와(separation vortex)를 형성하고 있음을 암시하는 것이다. 그 결과 후류쪽이 증가되면서 와 형성 거리가 길어지기 때문에 후면 부근의 압력회복도 다소 낮아진 것으로 볼 수 있다.

한편, 평균압력분포로부터 정확한 박리위치를 파악할 수는 없으나, 종래 연구에 의하면^(3,4) 유막법(oil film method)에 의한 표면 가시화실험과 변동압력분포를 토대로 구한 박리지점이 평균압력분포에서 재부착지점을 나타내는 피크를 중심으로 최소값을 나타내는 지점 부근에 위치한다는 사실이 확인된 바 있다.

다음은 상류쪽 원주의 S 변화에 따른 하류쪽 원주의 압력분포를 자세히 살펴보고자 한다. 먼저 상

류쪽 원주가 회전을 할 경우 유동을 원주의 상하로 갈라놓는 정체점의 위치가 S 의 증가에 따라 원주의 회전 반대 방향으로 점진적으로 옮겨가면서 상하대칭 구조의 유동형태가 점차 비대칭으로 변하게 된다. 이것은 단일원주가 회전할 경우에 어느 크기의 S 를 넘어서면 원주상부측 와가 소멸되면서 재순환영역이 원주하부측에만 존재하게 되며 그 이상 더 커지면 규칙성있는 변동은 완전히 소멸된다^(8,9)는 지금까지의 연구결과와도 일치한다. 이 때 원주상부측 부근은 자유흐름속도의 방향과 회전방향이 일치되는 증속부(+ Y 방향)가 되고, 하부측 부근은 그 반대로 감속부(- Y 방향)가 되어 재순환영역이 S 의 증가에 따라 증속부에서 감속부쪽으로 편향되게 된다. 그러므로 회전원주의 후류에 잠겨 있는 하류쪽의 원주주위의 유동형태는 이와 같은 상류쪽 원주에 의한 유동변화에 큰 영향을 받을 것으로 예상된다.

Fig. 4(b)는 $L/d=1.5$ 일 때 상류쪽 원주를 $S=0, 0.4, 0.8$ 및 1.2 로 각각 변화시킨 경우의 결과로 전체적으로 S 의 증가에 따라 하류쪽 원주 상하면의 압력분포가 대칭구조에서 비대칭구조로 변화되면서 복잡한 형태를 하고 있음을 볼 수 있다.

먼저 $S=0$ 의 경우에는 재부착하지 않는 박리전단층도 S 의 증가에 따라 강하게 재부착됨을 볼 수 있다. 그 경향은 S 가 증가함에 따라 원주 상부측의 압력 피크값은 점차 증가하면서 그 위치는 전면 앞쪽으로 당겨지고, 반대로 하부측의 피크값은 점차 감소하는 형태를 보이고 있다. $S=0.4$ 인 경우 하류쪽 원주상의 각각 60° 와 290° 부근에서 재부착으로 볼 수 있는 약한 피크가 나타나는데, 상부측 60° 지점에서 재부착된 유동은 90° 와 0° 부근에서 박리되는 것으로 보이며 하부측 290° 부근에서 재부착된 유동은 260° 와 0° 부근에서 박리가 예상된다. 또한 $S=0.8$ 인 경우에는 상부측 50° 부근에서 강한 재부착을 볼 수 있으며, 이는 다시 90° 와 350° 부근에서 박리될 것으로 보인다. 그러나 하부측에서는 290° 부근에서 약한 피크가 감지되고 270° 부근이 박리지점으로 예상되나 정확하다고는 볼 수 없다. 강한 회전을 하는 $S=1.2$ 인 경우 30° 부근에서 C_p 는 0.8 정도로 단일 원주의 정체점에 상당하는 값의 크기로 강하게 재부착되어 80° 와 340° 부근에서 박리될 것으로 판단된다. 그러나 하부측은 300° 부근에서 약한 피크가 나타나는데 그 크기로 판단해 볼 때 340° 부근에서 박리된 유동이 다시 이 부근에서

재부착되기 때문으로 보이며, 이는 다시 280°부근에서 박리할 것으로 판단된다. 이와 같이 하부측 영역에서 나타나는 복잡한 변화는 상류쪽 원주의 강한 회전에 의해 두 원주의 좁은 간격에서 생기는 유동변화와 상류쪽 원주로부터 생성된 전단층과의 상호작용에 의한 것으로 생각되어진다.

위의 결과를 놓고 볼 때 S의 증가에 따라 60°에서 40°로 변하는 재부착 지점의 변화에 대해 상부측 박리지점은 S의 변화와 관계없이 90°부근에서 거의 일정하게 일어나지만 하부측 박리지점은 280°~250°범위로 재부착 지점이 변함에 따라 다소 차이가 나타남을 볼 수 있다. 이것은 상류쪽 원주의 회전에 의해 유동의 일부가 하류쪽 원주의 전면 하부측으로 급격히 유입되면서 가속됨에 따라 하부측의 박리위치에 변화가 생긴 것으로 해석된다. 즉 S의 증가에 따라 하부측에서의 박리위치는 원주 전면 앞쪽으로 점점 이동되는 것으로 볼 수 있다.

원주의 후면에 해당하는 90°~270°의 영역에서의 압력은 단일 원주의 경우보다는 다소 큰 값을 보이며, 그 경향은 S의 증가에 따라서 점진적으로 감소하면서 하부측으로 갈수록 더욱 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 그 이유는 S=0인 경우 하류쪽 원주로 인하여 전단층이 편평하게 발달되다가 하류쪽 원주후면 근처에서 급격히 전단층의 권입이 이루어지지만, 앞서 언급한 바와 같이 S가 증가함에 따라 재부착이 강하게 일어나게 되고 박리점의 위치는 상부측에서는 거의 일정하지만 하부측에서는 원주전면 앞쪽으로 이동됨에 따라 하부측으로부터의 전단층의 성장을 보다 지연시킨 결과 압력이 낮아진 것으로 해석된다.

Fig. 4(c)는 L/d=3.0일 때의 결과로 전체적인 압력 분포형태는 L/d=1.5의 경우와 유사하다. 먼저 S=0일 때 피크값은 상부측 60°부근인데 S의 증가에 따라 역시 피크값이 증가하면서 그 위치가 원주 전면 앞쪽으로 점차 옮겨지는 것으로 나타났다. L/d=1.5의 경우와 비교하여 볼 때 회전계수가 비교적 높은 S=0.8과 1.2의 경우 원주사이의 간격비가 증가되었기 때문에 최대값의 크기는 오히려 감소하였지만, 0°부근에서의 크기는 각 경우 모두 증가하였다. S=0.4인 경우 50°부근에 재부착된 유동은 100°와 0°부근에서 박리가 예상되며, 290°부근에서의 재부착은 260°와 0°부근에서 박리할 것으로 생각된다. 그 크기는 S=0의 경우에 비해 50°부근에서는 다소 증가되나 290°부근에서는

거의 같으며, 또한 0°부근의 압력이 단일 원주의 180°부근의 크기와 비슷한 것으로 볼 때 아직 준정적외가 형성되어 있다고 볼 수 있다. 또한 S=0.8일 때 상부측 40°부근에서 재부착이 일어나지만 강한 회전에 의하여 주유동의 속도가 감속하므로 편향되므로 하부측에서는 재부착이 감지되지 않으며, 단지 260°부근에서의 박리를 예상할 수 있을 뿐이다. 더욱 회전이 증가된 S=1.2인 경우 재부착은 20°부근으로 더욱 전면 앞쪽으로 당겨져 나타나고, 하류쪽 원주의 하부측으로 재부착 유동의 급격한 유입으로 인하여 역시 하부측상의 재부착은 발생되지 않고 270°부근에서 보다 뚜렷한 박리를 볼 수가 있다.

한편, 90°~270°의 영역에서는 S의 증가에 따라 압력분포는 점차 감소되며, 강한 회전을 하는 경우에는 L/d=1.5의 경우보다 S의 영향이 훨씬 크게 나타난다. 이것은 높은 S의 경우에는 상부측 재부착 지점이 L/d=1.5 보다 전면 앞쪽에 위치함으로써 하부측으로의 유동의 유입이 훨씬 증가되고 또 하부측에서는 재부착이 되지 않기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 4(d)는 본 실험에서 원주사이의 간격비가 가장 큰 L/d=4.5인 경우의 결과이다. 앞의 두 경우와 비교해 볼 때 압력 분포형태는 거의 단일 원주의 경우와 정성적으로 유사하게 나타났는데, 이는 간격비 증가로 인해 상류쪽 원주의 근접 후류가 하류쪽 원주로부터의 간섭을 거의 받지 않기 때문으로 보인다. 역시 하류쪽 원주 전면에서의 압력은 강한 회전에 의해 전단층의 세기가 증가됨으로써 S의 증가에 따라 단일 원주의 정체점에서의 값 정도로 점차 증가되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 앞의 두 경우와는 달리 재부착이 되지 않기 때문에 박리위치를 판단하기는 어려우나 S의 증가에 따라 상부측 박리위치는 거의 변화가 없지만 하부측 압력분포에는 차이가 나타나는 것으로 봐서 박리위치에는 다소 차이가 있는 것으로 보인다. 또한 상류쪽 원주의 후류속에 잠겨있으므로 전체적으로 전면과 후면에서의 압력이 단일 원주에 비해 낮게 나타나며, 그 결과 항력도 다소 줄어들 것으로 예상된다.

Fig. 5는 이상의 평균정압 측정값의 크기를 원주 표면에 정량적으로 직접 그려넣었으므로 각 경우에 대해 서로 비교한 결과를 나타낸 것이다. S의 증가에 따라 상부측 0°~180°영역에의 압력증가량이

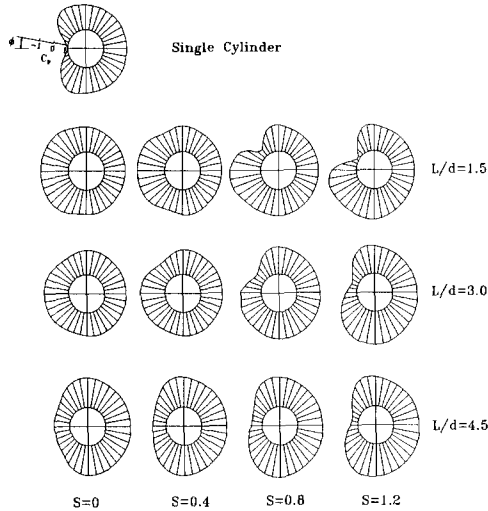


Fig. 5 Comparison of pressure distributions around downstream cylinder.

하부측 180°~360°에서의 압력감소량보다 훨씬 크게 나타나 전체적인 양력증가를 주도할 것으로 판단되며, 그 경향은 L/d가 작을수록 큰 것으로 나타났다. 또한 상류측 원주의 강한 회전에 의해 두 원주사이의 유동형태가 비대칭구조로 변하게 됨으로써 하류측 원주주위의 유동이 크게 영향을 받고 있으며, 이는 L/d와도 밀접한 관계가 있음을 확인할 수가 있다.

Fig. 6은 상류측 원주의 회전계수의 변화에 대한 하류측 원주의 항력계수(C_D) 및 양력계수(C_L)의 분포를 나타낸 것이다. 먼저 S=0인 경우 C_D 는 L/d의 증가에 따라 각각 -0.84, -0.2와 1.03 정도로 이는 Igarashi⁽³⁾의 실험결과($Re=3.5 \times 10^4$) 각각 -0.5, -0.3 그리고 0.55와 비교하여 다소 그 크기에 있어서 차이가 나타났는데, 그 이유는 실험조건이 서로 다르며 또 본 실험의 경우 폐쇄비가 다소 크기 때문인 것으로 판단되지만 그 경향은 일치하고 있다. 여기서 L/d=1.5와 3.0에서 C_D 가 음(-)의 값으로 나타난 것은 앞서 Fig. 4에서 알 수 있듯이 이러한 간격비에서는 후면의 압력이 전면의 압력보다 높기 때문이며, 원주가 추력(thrust)을 받고 있음을 말해주고 있다. 그러나 L/d=4.5의 경우에는 양(+)의 값으로 급격히 변화가 생기는 것으로 볼 때 L/d=3.0과 4.5 사이에 공력특성이 갑자기 변하는, 즉 임계 간격비가 존재하는 것으로 볼 수 있으며, 이 사실 또한 종래 연구결과와도 잘 일치하고 있다.⁽³⁾ 한편, S가 증가

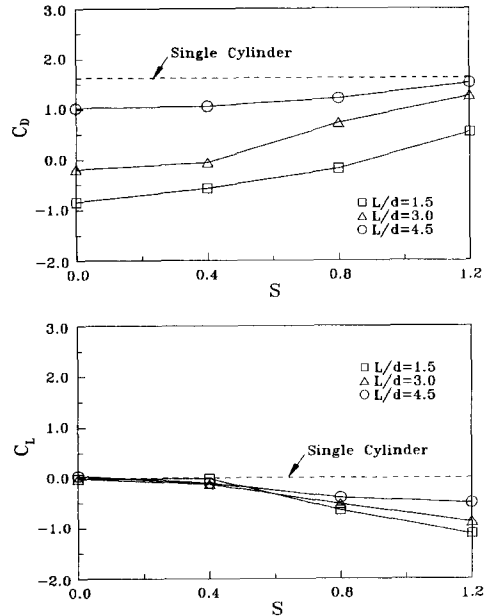


Fig. 6 Drag and lift coefficients of downstream cylinder for spin rates(S) of upstream cylinder.

함에 따라서 C_D 는 L/d에 관계없이 모두 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 L/d=1.5의 경우 $S > 0.8$, L/d=3.0의 경우 $S \geq 0.4$ 정도로 회전이 강하게 일어나면 원주 전면의 상부측에서의 압력이 크게 증가함으로써 원주는 하류쪽으로 힘을 받는 것으로 나타났다. 본 실험범위에서 볼 때 L/d=1.5인 경우 S=0일 때와 비교하여 S=1.2에서는 최대 140%, L/d=3.0인 경우 128% 그리고 L/d=4.5인 경우에는 49%로 각각 S의 증가에 따라 증가하였으며, 그 기울기는 L/d가 클수록 적은 것으로 나타났다.

또한 C_L 의 분포도 S의 증가에 따라 각 경우 모두 비례적으로 증가되고 있는데, 이는 원주의 회전에 의해 야기되는 유동의 비대칭성이 S에 비례하여 증가됨을 의미하고 있다. S=0과 S=1.2를 비교할 때 L/d=1.5인 경우 최대 114%, L/d=3.0인 경우 90% 그리고 L/d=4.5인 경우에는 54% 정도로 양력 역시 L/d가 클수록 S의 영향이 적은 것으로 나타났다.

Fig. 7은 S의 변화에 따른 표면압력의 최대값이 위치하는 범위를 측정간격에 따른 오차를 감안하여 표시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 재부착이 일어나는 간격비(L/d=1.5, 3.0)의 경우는 S의 증가에 따라 압력 최대값의 위치는 원주 전면 앞쪽으로 단

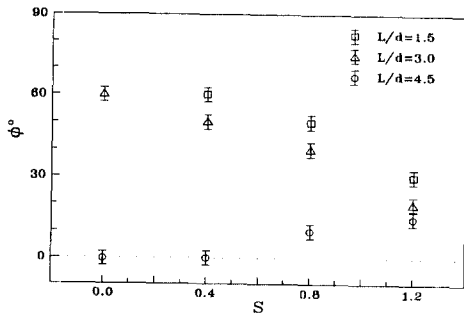


Fig. 7 Positions of maximum pressure coefficient values on downstream cylinder for spin rates (S) of upstream cylinder.

조롭게 접근하고 있으나, 간격비가 가장 큰 $L/d=4.5$ 의 경우는 단일 원주와 같이 전면 0° 부근의 위치에서 강한 회전에 의해 다소 상부측으로 옮겨져 나타나 있다.

3.2 회전계수와 와유출 주파수

S 의 변화에 대한 와유출(vortex shedding) 특성을 살펴보기 위하여 하류쪽 원주의 중심축으로부터 $X/d=2.0$ 와 $Y/d=-0.5$ 지점에서 측정된 와유출 주파수에 의한 스트로울수(Strouhal number, S_t)와 S 와의 관계를 구하여 Fig. 8에 나타내었다. 먼저 단일 원주의 경우에 S 의 증가에 따른 S_t 의 변화는 $S < 1.0$ 에서 증가보다는 $S > 1.0$ 에서는 더 큰 증가를 보이고 있다.⁽¹²⁾ 이는 $S > 1.0$ 인 경우는 증속부 영역에서 원주표면의 주위유속이 원주의 회전속도보다 크게되어 와유출주파수가 증가하고 감속부의 와유출 주파수도 이에 연동하여 같이 증가하는 것에 기인하기 때문으로 보인다. 한편, 본 실험의 경우 전체적인 S_t 의 변화는 단일 원주의 경우와 거의 유사하게 S 의 증가에 따라 증가하는 형태를 보이고 있다. 즉 상류쪽 원주의 회전에 의한 유동특성 변화가 하류쪽 원주의 후류영역까지 그 영향을 강하게 미치고 있음을 의미한다. $S=0$ 인 경우 $L/d=1.5$ 와 3.0 그리고 4.5 에서의 S_t 는 각각 0.177 , 0.146 및 0.177 로 Igarashi⁽³⁾의 0.185 , 0.15 및 0.19 의 경우와 그 크기와 경향 잘 일치하고 있다.

먼저, $L/d=3.0$ 인 경우 상류쪽 원주로부터의 박리된 전단층이 하류쪽 원주에 재부착되어 상류쪽 원주로부터의 와유출이 억제됨으로써 S_t 는 다른 간격비와 비교해서 가장 낮은 값을 보이고 있으며, S 의 증가에 따른 변화도 단일 원주가 회전하는 경

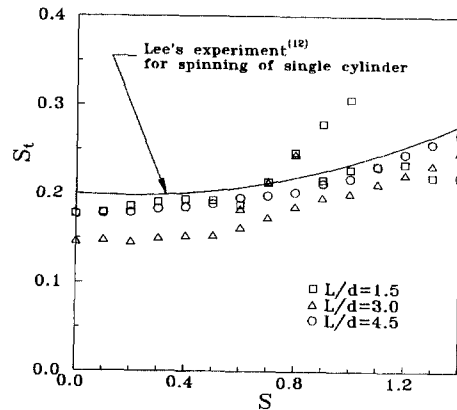


Fig. 8 Comparison of Strouhal number behind downstream cylinder for spin rates(S) of upstream cylinder.

우와 유사하게 나타났다. 또한 $L/d=4.5$ 의 경우도 상류쪽 원주로부터 뚜렷한 와유출이 나타나 단일 원주가 회전하는 경우의 와유출 특성과 거의 같게 된다는 사실을 알 수 있다.

한편, $L/d=1.5$ 의 경우는 $S=0.6$ 까지 S_t 가 거의 일정하다가 그 이상으로 증가함에 따라 급격히 증가하며, 강한 회전영역에서는 다시 감소하는 등 복잡한 형태를 하는 것으로 나타났다. 이와 같은 사실은 앞서 Fig. 4(b)에서 알 수 있듯이 $S=0.4$ 정도에서는 원주 전면의 압력분포가 상하 대칭구조를 하고 있지만, $S=0.8$ 로 증가하면 비대칭 구조로 급격한 변화가 나타나고 있는 사실이 이를 잘 입증하고 있다. 그러나 $0.6 < S < 1.0$ 의 영역에서는 비교적 편평하게 발달하던 전단층이 하류쪽 원주의 비교적 상부측에 재부착하게 되면서 가속되기 때문에 S_t 도 일시적으로 증가한 것으로 보이며, 매우 강한 회전의 영역에서는 재부착은 후류쪽 원주의 거의 전면 앞쪽에서 이루어지므로 $L/d=3.0$ 의 경우와 같이 상류쪽 원주로부터 와유출이 억제되어 S_t 도 다시 줄어든 것으로 보인다. 한편, S 의 일부 영역에서는 속도변동 신호의 파워 스펙트럼(power spectrum)을 나타낸 Fig. 9에서도 알 수 있듯이 두 개의 다른 주파수성분이 존재하는 것을 볼 수가 있다. 정확한 그 이유를 파악하기는 어려우나 상류쪽 원주로부터의 와유출과 동시에 회전에 의해 두 원주 사이의 정체영역이 불안정해지면서 간헐적으로 와유출을 하기 때문으로 추측되며, 그 중 보다 높은 주파수성분은 상류쪽 원주로부터의 와유출에 기인한 것으로 보인다.

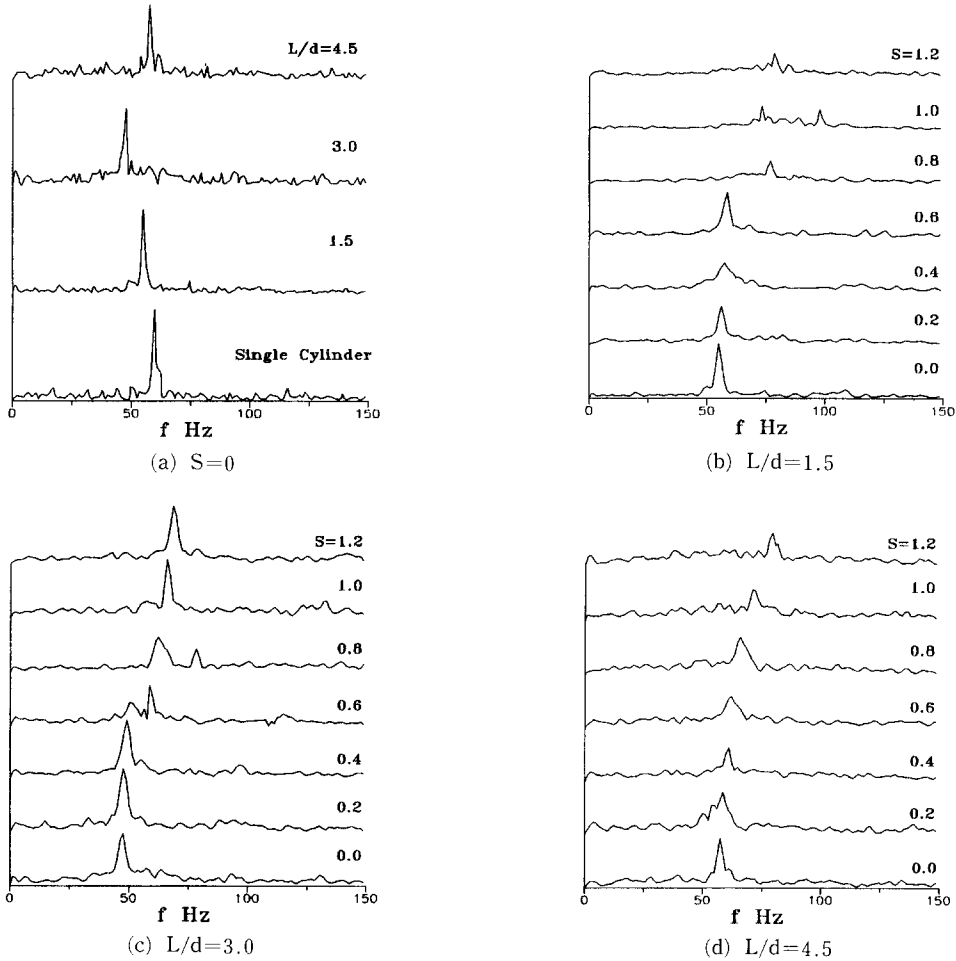


Fig. 9 Power spectrum of lateral velocity at $X/d=2.0$ and $Y/d=-0.5$ behind downstream cylinder for spin rates (S) of upstream cylinder.

또한 Fig. 9에서 살펴보면 S 의 증가에 따라 와류출 주파수에 해당하는 선명한 극대치가 그 크기가 감소되면서 비교적 넓은 주파수 범위대로 분산됨을 볼 수 있는데 이는 와류출의 주기성이 회전계수의 증가에 따라 떨어지고 있음을 암시한다. 역시 $L/d=1.5$ 의 경우가 앞서 언급한 대로 회전계수의 영향을 훨씬 많이 받고 있다는 사실을 확인할 수가 있다. 한편 $L/d=3.0$ 의 경우에는 높은 회전계수에서도 아직 극대치가 비교적 잘 나타나고 있는 것으로 볼 때 재부착으로 인하여 와류출은 억제되지만 유동의 주기성은 잘 유지됨을 알 수 있다.

3.3 평균속도와 난류강도

Fig. 10(a)~(d)는 하류쪽 원주중심축에서 X/d

$=5.0$, $-4.0 < Y/d < 4.0$ 영역에서 측정된 평균속도 분포를 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 10(a)는 $S=0$ 인 경우 속도분포로 간격비의 증가에 따라 후류폭이 증가하면서 속도결손(velocity defect)도 같이 커지고 있음을 보이고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 $L/d=1.5$ 인 경우 상류쪽 원주의 박리전단층이 하류쪽 원주표면에 재부착되지 않고 하류쪽 원주로 인해 편평하게 발달됨으로써 단일 원주 보다도 후류폭이 좁아지며, $L/d=4.5$ 의 경우는 재부착하는 3.0의 경우보다 훨씬 후류폭이 넓게 되는데 이는 전단층이 하류쪽 원주 전면에 권입되기 때문으로 해석된다. 또한 L/d 의 증가에 따라 속도결손이 증가하는 것은 역시 앞서 압력분포에서 볼 때 후면 근처의 압력이 낮은 결과와도 잘 일치하고 있다.

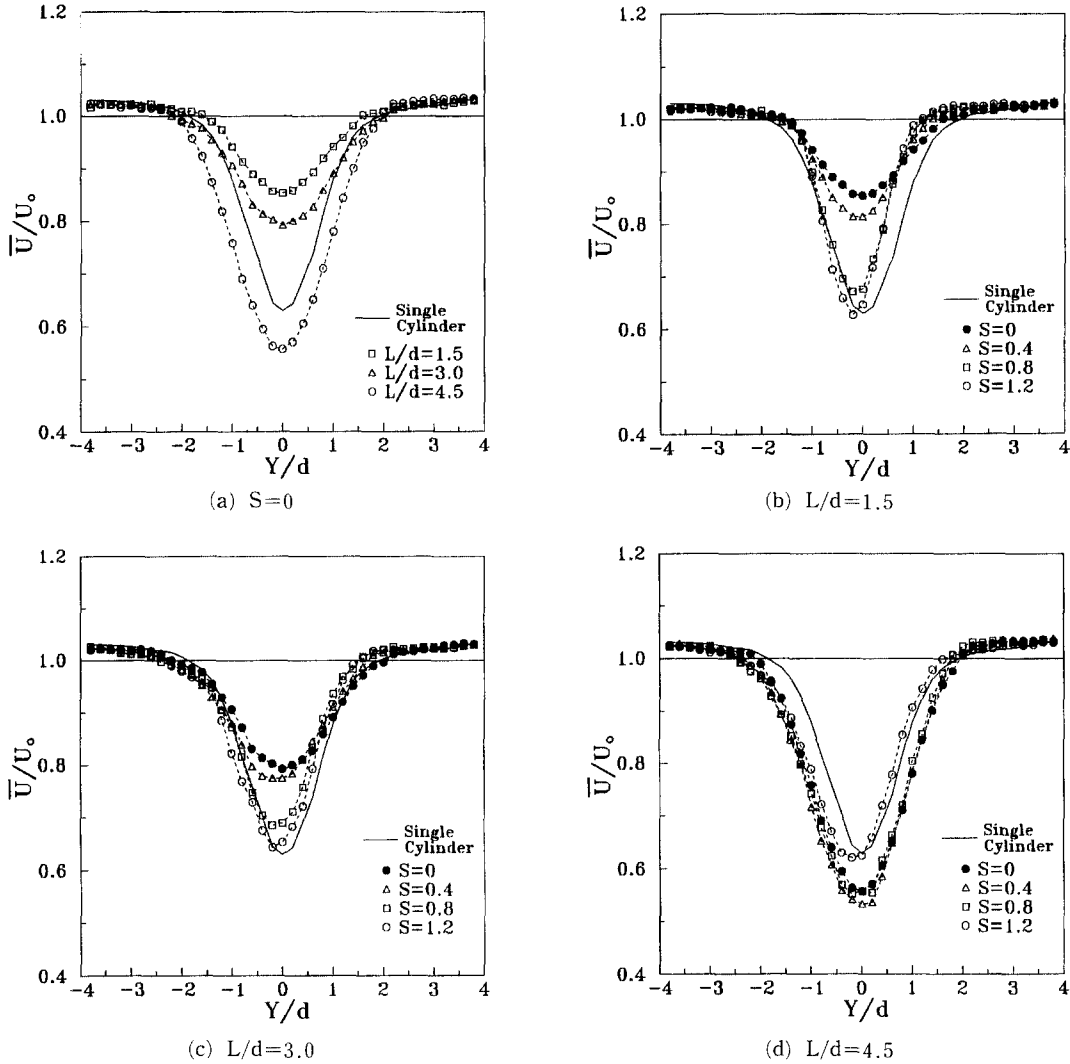


Fig. 10 Distributions of time mean velocity behind downstream cylinder for spin rates(S) of upstream cylinder.

Fig. 10(b)는 $L/d=1.5$ 경우에 S 의 변화에 따른 평균속도 분포이다. 전체적으로 후류폭은 단일 원주의 경우에 비해 상당히 축소되어 있으며, 회전의 영향으로 후류쪽 원주의 상부측 주위 유동의 가속이 진행됨에 따라 상대적으로 후류중심선 상부 영역에서의 속도결손도 적어져 운동량이 많이 회복된 것으로 나타났다. 다음의 $L/d=3.0$ 과 4.5 의 경우와 비교하여 볼 때 이 영역에서는 S 의 영향이 훨씬 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 또한 $L/d=4.5$ 에서는 S 의 증가에 따라 감속부쪽 약 $Y/d=-0.3$ 까지 최대 속도결손(maximum velocity defect) 위치가 편향되면서 $S=0$ 일 때 보다 그 크

기도 약 4%, 21% 및 26% 정도로 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 $S=0.4$ 와 0.8 사이에서 큰 폭으로 차이가 나는 것은 Fig. 4(b)에서도 알 수 있듯이 상류쪽 원주의 전단층이 하류쪽 원주 표면에 재부착 유무에 따라서 원주주위의 유동형태에 크게 영향을 주게 되고 그 결과 후류유동장에도 큰 영향을 미친 것으로 해석된다. Fig. 10(c)는 $L/d=3.0$ 의 경우로서 전체적으로 후류폭은 재부착으로 인하여 단일 원주의 경우와 비슷하며, 속도결손도 S 의 변화에 따라 약 2%, 13% 및 19% 정도로 증가하는 것으로 나타났다. $L/d=1.5$ 의 경우와 같이 S 에 따라 큰 차이를 보이지 않는 이유는 전단

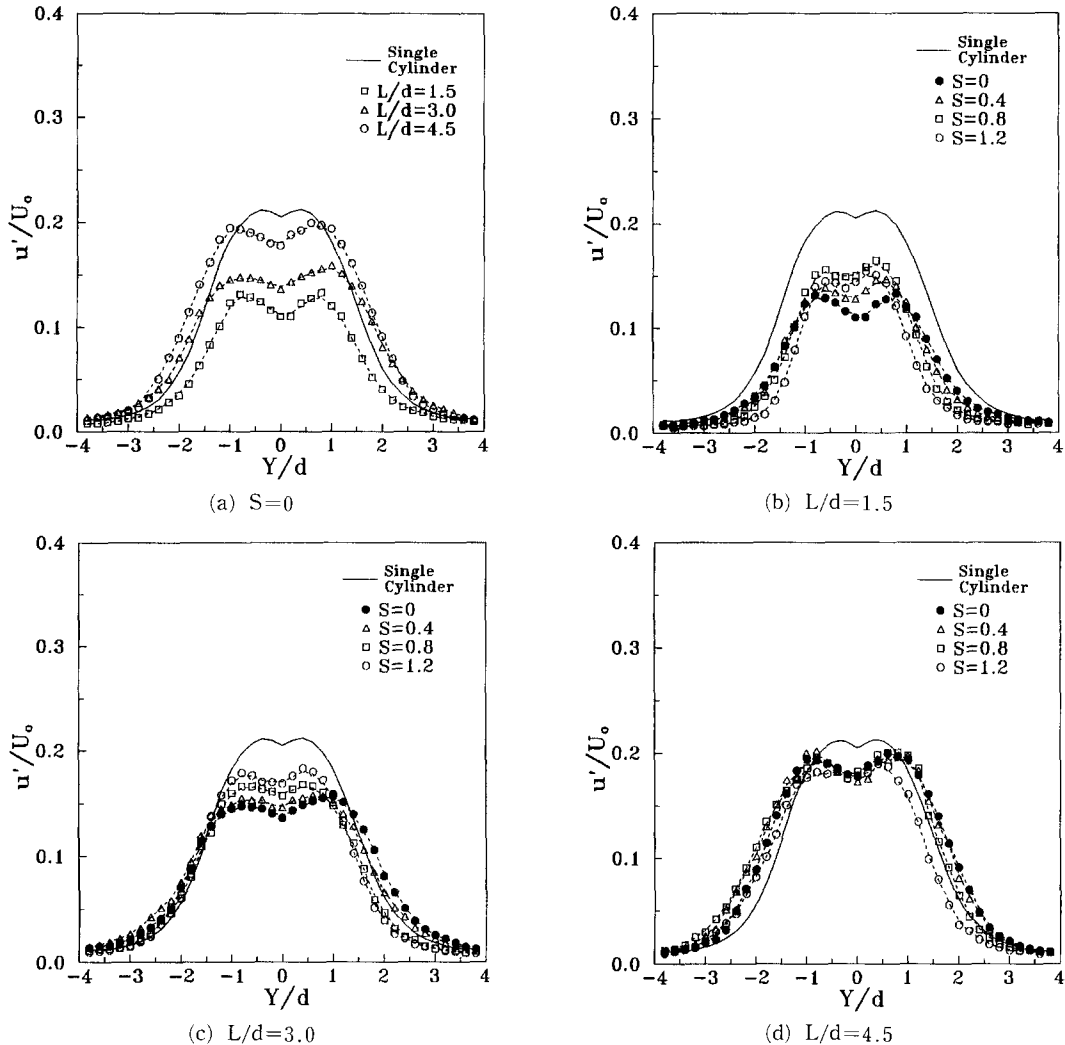


Fig. 11 Distributions of streamwise turbulent intensity behind downstream cylinder for spin rates (S) of upstream cylinder.

층이 S 와 관계없이 재부착되기 때문이며, 그 차이도 단지 회전에 의한 재부착 세기에 따른 영향일 것으로 생각된다. 한편, Fig. 10(d)는 간격비가 가장 큰 $L/d=4.5$ 의 결과로 단일 원주 보다 후류폭이 상당히 증가되어 있으나(약 1.0d) $S=1.2$ 의 경우를 제외하고는 대체로 후류중심에서 속도결손 정도가 비슷하며, S 에 따른 최대 속도결손 위치도 거의 일정한 것으로 나타났다. 그러나 $S=1.2$ 의 경우는 매우 강한 회전에 의하여 Fig. 4(d)에서도 알 수 있듯이 약 15° 부근에서 높은 압력값을 가지면서 상부측과 하부측의 압력분포가 비대칭 구조를 하는 사실로 판단해 볼 때 하류쪽 원주의 전면

으로 유입되는 유동이 증속되면서 감속부측으로 편향되고 그 결과 속도결손이 다소 줄어들면서 최대 속도결손 위치에도 약간의 편향이 생긴 것으로 해석된다.

Fig. 11(a)~(d)와 Fig. 12(a)~(d)는 각 L/d 에서 자유흐름방향과 수직방향으로의 난류강도 분포를 구하여 S 에 따라 나타낸 것으로 서로 비교하면서 각 경우를 설명하고자 한다. 먼저 Fig. 11(a)와 Fig. 12(a)는 $S=0$ 인 경우로 흐름방향으로의 난류강도는 상류쪽 원주의 박리전단층이 보유하고 있는 난류강도가 하류쪽 원주의 존재에 의해 강화되어 L/d 에 따라 증가하고 있으나, 수직방향으로의 난

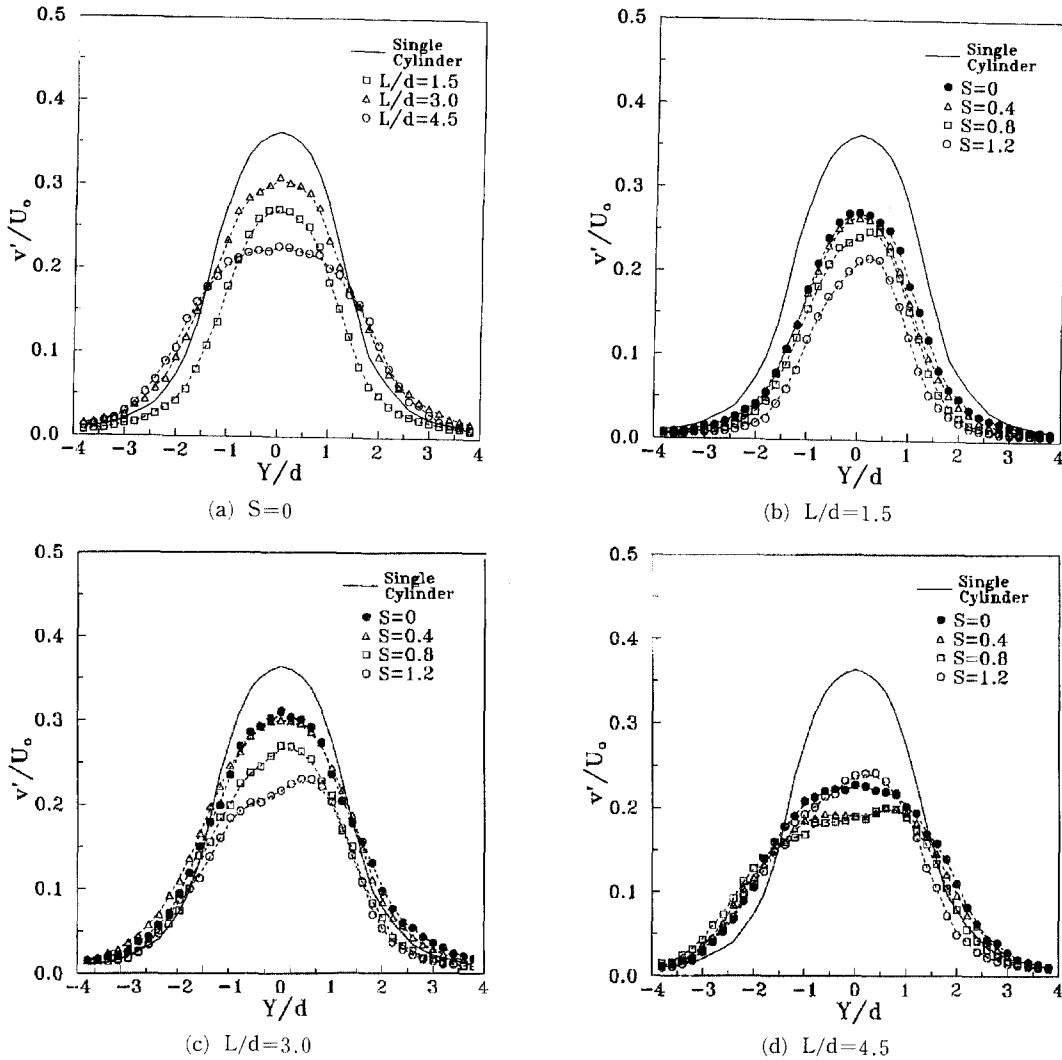


Fig. 12 Distributions of lateral turbulent intensity behind downstream cylinder for spin rates(S) of upstream cylinder.

류강도는 재부착되지 않고 상류쪽 원주의 후류속에 놓여 있는 $L/d=4.5$ 의 경우가 오히려 줄어드는 결과를 보이고 있다. Fig. 11(b)와 Fig. 12(b)는 $L/d=1.5$ 의 결과로서 S 에 따라 흐름방향 난류강도는 점차 증가하지만 수직방향으로는 후류중심 부근에서 최대 22% 정도 줄어든 효과를 얻었다. 역시 재부착이 일어나는 $L/d=3.0$ 경우도 Fig. 11(c)와 Fig. 12(c)에서 보는 바와 같은 경향을 보이고 있는데, 후류중심 부근에서 수직방향으로의 난류강도가 최대 30% 정도 줄어든 결과를 얻었다. S 에 따른 영향은 후류중심선의 하부영역에서 더욱 크게 나타나고 있는 것으로 볼 때 하류쪽 원주의 상부보

다는 하부측으로의 유입량과 박리지점 변화에 상대적으로 영향을 많이 받기 때문인 것으로 생각된다. 한편 $L/d=4.5$ 의 경우는 앞의 두 경우에 비하여 S 의 변화에 관계없이 흐름방향으로 난류강도는 대체로 큰 값을 보이고 있으며, 수직방향으로는 후류의 변동폭이 넓으면서 후류중심 부근에서의 크기가 가장 적어 난류성분이 훨씬 억제되고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

동일 직경(d)을 가지는 두 원주를 흐름방향으로

나란히 설치하고 중심축간 간격비(L/d)를 각각 1.5, 3.0 및 4.5로 변화시키면서 상류쪽 원주의 회전계수(S)를 0~1.4까지 변화시킬 때 하류쪽 원주의 표면압력분포 및 후류유동에 미치는 영향을 $Re = 1.32 \times 10^4$ 영역에서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상류쪽 원주가 회전하지 않을 때, 간격비가 가장 적은 1.5의 경우는 전단층이 하류쪽 원주표면에 재부착이 되지 않다가 3.0에서는 재부착이 일어나며, 간격비가 가장 큰 4.5에서는 전단층이 하류쪽 원주 전면에서 권입되는 등 간격비에 따라 유동 형태는 크게 변하는 것으로 나타났다. 상류쪽 원주가 회전하는 경우 회전계수의 변화는 하류쪽 원주의 주위유동에 크게 영향을 미치며 그 영향이 근접 후류 영역까지도 비교적 강하게 나타나고 있다.

(2) 하류쪽 원주표면의 평균압력은 회전계수와 간격비의 영향을 강하게 받으며, 회전계수가 증가할수록 그리고 간격비가 작을수록 상부측($0^\circ \sim 180^\circ$) 영역에서의 압력증가량이 하부측($180^\circ \sim 360^\circ$) 영역보다 훨씬 크게 나타났다. 간격비가 1.5와 3.0일 경우 재부착 위치는 회전계수의 증가에 따라 전면 앞쪽으로 당겨져 나타나며, 그 크기도 급격히 증가된다. 그러나 간격비가 4.5의 경우 압력분포 형태는 회전계수에 관계없이 대체로 단일 정지원주의 경우와 유사하게 나타났다.

(3) 항력계수는 각 경우 모두 단일 원주보다 작으며, 회전계수의 증가에 따라 점진적으로 증가하여 간격비가 클수록 단일 원주의 값에 접근한다. 또한 간격비가 4.5인 경우 회전계수와 상관없이 하류쪽 원주는 양(+)의 힘을 받으나, 재부착이 발생하는 1.5와 3.0의 경우에는 회전계수의 증가에 따라 음(-)의 힘에서 양(+)의 힘으로 공력특성에서 변화가 발생한다. 한편 양력계수는 상부측에서 하부측으로 회전계수의 증가에 따라 점진적으로 증가하며, 간격비가 적을수록 그 영향이 크게 나타난다.

(4) 간격비가 3.0인 경우는 회전계수에 관계없이 재부착됨에 따라 와유출이 억제되어 스트로울수(S_t)가 상대적으로 낮게 나타났으며, 그 경향은 간격비가 4.5인 경우와 함께 회전계수에 따라 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 간격비가 작은 1.5의 경우는 회전계수에 따른 영향이 크게 나타나며 와유출의 주기성이 다소 빨리 소멸된다.

(5) 간격비가 증가할수록 하류쪽 원주의 후류폭이 증가하면서 후류중심 부근의 속도결선량도 점차 커지는 것으로 나타났다. 재부착이 발생하는 간격비 1.5와 3.0에서는 회전계수의 증가에 따라 흐름 방향의 난류강도는 점차 증가하나 수직방향의 난류강도는 감소하여 회전계수에 따른 영향이 크게 나타나고 있다. 한편, 재부착이 되지 않는 4.5의 경우는 단일 정지원주에 비해 각 방향으로의 난류강도는 상당히 작으면서 회전계수에 따른 영향도 크게 나타나지 않았다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학: ME96-B-02)에 의하여 연구되었으며, 연구에 도움을 주신 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Zdravkovich, M. M., 1977, "Review of Flow Interference Between Two Cylinders in Various Arrangements," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 99, No. 4, pp. 618~633.
- (2) Igarashi, T., 1981, "Characteristics of the Flow around Two Circular Cylinders Arranged in Tandem(Part 1)," *Bulletin of the JSME*, Vol. 24, No. 188, pp. 323~331.
- (3) Igarashi, T., 1984, "Characteristics of the Flow around Two Circular Cylinders Arranged in Tandem(Part 2)," *Bulletin of JSME*, Vol. 27, No. 233, pp. 2380~2387.
- (4) Igarashi, T., 1982, "Characteristics of a Flow around Two Circular Cylinders of Different Diameters Arranged in Tandem," *Bulletin of JSME*, Vol. 25, No. 201, pp. 349~357.
- (5) Okajima, A., 1978, "Flows Around Two Tandem Circular Cylinders High Reynolds Numbers," *Bulletin of JSME*, Vol. 22, No. 166, pp. 504~511.
- (6) King, R., and Jones, D. J., 1976, "Wake Interaction Experiments with Two Flexible Circular Cylinders in Flowing water," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 45, No. 2, pp. 259~283.
- (7) Arie, M., Kiya, M., Moriya, M., and Mori, H.,

- 1983, "Pressure Fluctuations on the Surface of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 105, pp. 161~167.
- (8) Diaz, F. and Gavalda, J., 1985, "Asymmetric Wake Generation by a Spinning Cylinder," *AIAA Journal*, Vol. 23, No. 1, pp. 49~54.
- (9) 谷口清一, 松村昌典, 1989, "一樣流中て回轉する圓柱の後流構造," 日本機械學會 論文集(B編), 55卷, 509, pp. 41~47.
- (10) 부정숙, 이종춘, 1994, "정지 및 회전하는 원주에 의한 난류후류의 응집구조," 대한기계학회 논문집, 제18호, 제5권, pp. 1310~1321.
- (11) Jung Sook Boo, Kyung Chun Kim, Jong Pil Yang and Sang Dong Lee, 1994, "Control of Vortex Shedding from a Spinning Cylinder by Tripping Wire," *The 3rd JSME-KSME Fluid Engineering Conference*, pp. 577~582.
- (12) 이종춘, 1995, "원주의 회전 및 부착물에 의한 후류 특성에 관한 연구," 부산대학교 박사학위 논문.