

원통내 회전유동에서 회전봉의 형상이 혼합효과에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

김 유 곤* · 김 동 규**
(1999년 12월 20일 접수)

Experimental Study for the Mixing Effect of the Driven Bar on Rotating Flow in a Closed Cylinder

You-Gon Kim and Dong-Kyu Kim

Key Words: Laser Doppler Velocimetry(레이저 도플러 유속계), Reynolds Number(레이놀즈 수), Reynolds Shear Stress(레이놀즈 전단 응력), Lid-Driven(뚜껑 회전), Rotating Flow(회전 유동), Turbulence Intensity(난류 강도)

Abstract

The experiment is conducted on the rapidly rotating incompressible flow within a confined cylinder using LDV(Laser Doppler Velocimetry). The configurations of interest are the flows between a rotating upper disk with a bar and a stationary lower disk enclosed within a cylinder. The flow is considered to be an axisymmetric undisturbed basic flow. The results show that the flow is strongly dependent on the radius and the shape of bar but is negligibly affected by the Reynolds number in turbulent flow. It is observed that in the lid-driven case the main flow forms near the wall as the Reynolds number increases. The thin bar causes the second axial flow due to the suction effect and the thick bar causes the main flow to be pulled toward the surface of the bar. The step bar shows the dual effect of the two. The 1:2 tilt bar shows that the main flow distributes wider than the other cases in which interference occurs due to the step bar.

1. 서 론

실생활의 많은 부분에 적용되고 있는 회전유동에 대한 연구는 오래 전부터 여러 가지 측면에서 활발한 연구가 이루어지고 있다. 1900년대 초에 G. I. Taylor⁽¹⁾가 동심축상의 두 회전 실린더 사이의 유동에서 테일러 와유동(Taylor vortex flow)이 형성되는 흥미로운 사실을 보고하였다. 밀폐된 원통내에서 두 끝단의 원판이 서로 반대 방향으로 회전함에 따른 유동의 변화 형태가 관찰⁽²⁾된

바 있으며 P.M. Wild⁽³⁾는 저널베어링과 유사한 형상의 모델인 동심축상의 두 실린더에서 외부 실린더는 고정하고 내부 실린더를 회전시켜 두 실린더 사이에서 형성되는 유동의 특성을 살펴보고 내부 실린더를 회전시킴에 따른 토크를 실험 및 수치 해석 방법으로 계산하였다. 그리고 층류 회전 유동에서 온도가 미치는 유동장의 변화 효과⁽⁴⁾나 난류 회전 유동장에서의 수치적 해석⁽⁵⁾ 등이 최근 보고된 바 있다. 회전유동의 가장 단순한 형태인 밀폐된 원통 내에서 단순히 윗 원판이 일정 속도로 회전하는 경우에 이차유동의 층류 유동형태⁽⁶⁾를 살펴보면 다음과 같다. 초기에 회전 원판의 표면에서 점성에 의해 유체가 원판과 같

* 회원, 전남대학교 기계공학과

E-mail : ygkim@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1676 FAX : (062)530-1689

** 전남대학교 대학원

은 속도로 회전하게 되고 이때 유체는 원심력에 의해 반경 방향으로 밀려 나가게 된다. 다음 연속 조건에 의해 원판 가장자리에서 벽면을 타고 축 방향의 하강 유동이 형성되며 이 유동이 중심 축을 향하여 밀려 다시 축 방향의 상승유동을 형성하게 된다. 이때 원통의 하단 부분에 벽면으로부터 중심축을 향한 돌출부 모양의 유동장이 형성된다. 이때 회전수를 증가함에 따라 유선이 벽부근으로 밀리고 하단부에서 형성되는 돌출형상의 유동장이 소멸해 가는 경향을 보인다. 한편 이러한 단순회전 유동의 경우에 있어 층류와 난류의 유동 경향은 $Re = \rho R^2_0 \Omega / \mu$ 의 정의에 의해 Re 수가 16000보다 작으면 층류, Re 수가 64000보다 크면 난류의 경향을 보임이 실험으로 관측⁽⁷⁾된 바 있다.

본 연구에서는 밀폐된 원통에서 윗판과 윗판에 부착된 여러 형상의 봉이 동시에 고속으로 회전하는 경우에 대하여 해석하였다. 원통의 반경을 R_0 라 할 때 봉의 높이를 R_0 로 고정하고 봉의 반경을 $R_0/2$, $R_0/4$ 및 이들 두 봉의 효과가 복합적으로 나타날 것으로 예상되는 다단봉(step bar)과 다단봉 회전시 다단 부분에 의해 유동이 방해받을 것이 예상되므로 이 문제를 해결하기 위해 경사진 봉을 회전시킴으로써 형상에 대한 실린더내의 난류 유동의 특성을 LDV를 이용하여 측정하고자 했다.

본 실험에서는 다양한 형상의 회전 원판에 대한 실린더내의 유동 특성을 측정함으로써 기존의 수치해석 결과의 정확도를 검증하는 좋은 자료가 될 것이며 또한 회전 유동의 다양한 변화를 알아봄으로써 실제 응용분야에 참고자료로 활용되리라 기대한다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 1에서는 본 연구에서 사용된 2차원 속도 측정용 LDV 실험장치의 전체적인 구성도를 나타내었다. 본 실험에서는 실린더 내부에 회전유동을 형성하기 위해 실린더 상판을 회전시켜 전단 응력을 공급하였다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 직경 20 cm, 높이 20 cm의 아크릴 실린더를 실험시편으로 제작하였다. 그리고 빛의 굴절에 의한 효과를 최소화하기 위해 실린더 외부에 아크릴

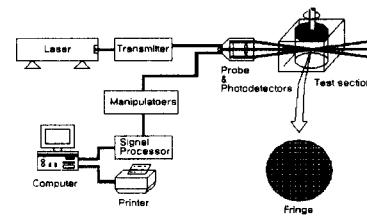


Fig. 1 Schematic diagram of 2-D LDV system

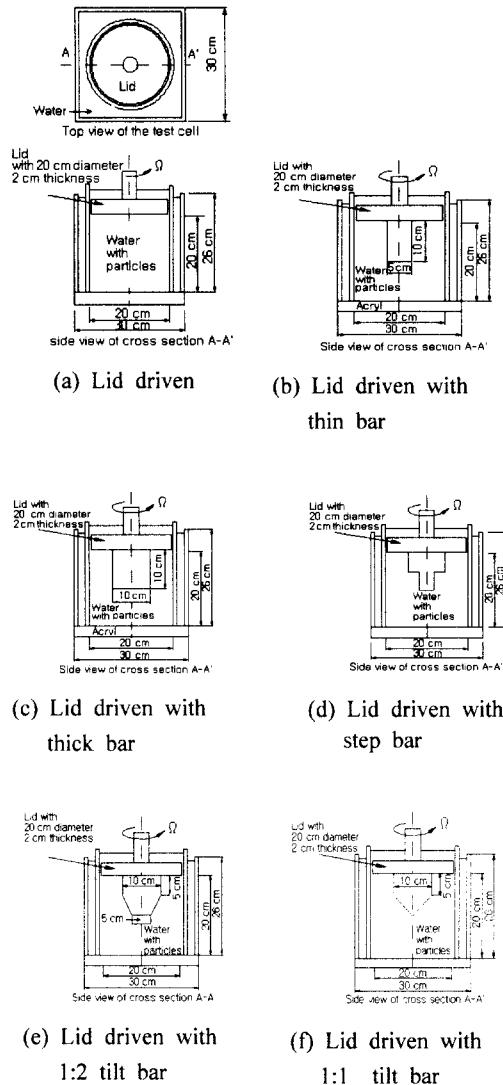


Fig. 2 Schematic views of test

사각 수조를 써웠으며 그 사이의 공간에 물을 채워 실험하였다.

2.2 실험방법

이 절에서는 실험 장비를 구축하는 방법과 실험 과정에 대해서 기술한다.

우선 실험부위인 실린더에 레이저 beam이 통과 할 때 beam의 굴절을 최소화하기⁽⁶⁾ 위해 실린더의 바깥 부분에 사각 수조를 써워 실험시편을 구성하였다.

먼저 실험부위의 아크릴 표면을 부드러운 천으로 깨끗이 닦는다. 그리고 laser의 냉각수를 최소 10 liters/min 가량의 유량으로 순환시킨 후 5 Watts 아르곤이온 레이저(Argon ion laser)를 켠다. 그 후 선택된 산란입자인 송진가루(conifer pollen, 5~10 μm)를 실험 유체인 물과 함께 잘 섞는다. 이때 산란입자의 양은 레이저 광에 대해 충분히 산란할 수 있는 양이며 산란된 빛을 광센서가 감지하는데 방해가 되지 않을 만큼의 알맞은 농도로 넣는다. 그런 후 산란입자가 섞여진 물을 실험 실린더 내부에 붓고 막대로 저어서 물과 산란입자가 잘 섞이게 한다. 그리고 원판의 가장자리와 원통의 내부 벽면이 닿지 않게 실험 장치를 설치한다. 이때 원판 가장자리와 원통의 내부 벽면사이의 간격은 1 mm 이하로써 그 사이로의 질량 유출입은 무시할 만 하므로 밀폐된 실린더내의 회전유동으로 가정한다.

모터에 전원을 공급한 후 tachometer로 모터의 회전수(200 rpm, $Re = 2.1 \times 10^5$)를 확인하여 모터 속도조정기를 조절해 원하는 회전속도에 맞춘다. 레이저시스템을 작동시켜 레이저 beam이 방출될 때까지 기다리고 레이저강도를 2 Watts정도로 조절한다. 그리고 beam splitter에 의해 나누어진 동일 파장의 한 쌍의 beam이 같은 강도를 갖도록 beam 조절 손잡이를 움직여 맞춘다. 다음 이 송장치를 이송시키며 실험부위의 중심점 위치와 실린더 내부의 가장자리 위치를 확인한다.

한편 모터의 회전속도를 고정하여 약 10 분 정도 가동하여 유동이 정상상태가 되면 이송시스템에 측정 위치의 좌표를 입력시킨다. 이때 이송장치는 반경 방향으로는 5 mm 간격으로 20 개 지점을, 축 방향으로는 8.33 mm 간격으로 24 개

지점을 이동해 가며 측정하였다. LDV 계측시 테이터의 유효 sample 개수는 약 7000 ~ 8000 Hz 정도로 유지하였다.

측정 데이터는 후처리 프로그램을 이용하여 속도 및 난류 강도 등의 정보를 얻는다.

3. 실험결과 및 고찰

회전수를 100, 200, 300 rpm($Re = 1.05 \times 10^5$, 2.1×10^5 , 3.15×10^5)으로 변화시켜 보았으나, 난류 유동에서는 점성 영향보다 관성력이 지배적이므로 전체 유선의 형상 변화에는 별 영향을 미치지 못했다. 무차원 운동방정식에서 보면 레이놀즈 수의 역수가 확산항의 계수가 되므로 이 항은 다른 항에 비하여 중요하지 않게 됨을 알 수 있다.

밀폐된 실린더 내에서 단순원판이 회전하는 경우 Fig. 3(a)에 나타난 것처럼 전체적인 유동 패턴은 층류의 속도 증가에 따른 유동의 변화 양상이 이어져⁽⁷⁾ 난류에서의 이차유동의 주 유동장은 벽면 부근에 밀집되어 형성되고 층류에서 보인 하단 부분의 중심축을 향한 유동 형태는 소멸됨을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4(a)에서 보여진 것과 같이 반경 방향의 속도에 비해 아주 큰 원주 방향의 속도 분포가 뚜껑이나 바닥에서 어느 정도 떨어진 거의 모든 축방향 위치에서 solid body motion과 비슷하게 거의 일정한 속도분포를 보이고 있다. 따라서 바닥 부근에서 축을 향한 반경 방향의 유동이 축 중심 부근까지 침투하지 못하고 바로 벽 부근에서 상승하고 있음을 볼 수 있다.

두 번째로 가는 봉(thin bar)을 가진 원판이 회전하는 경우는 Fig. 3(b)에서 보여지는 것과 같다. 원판 회전시 나타나는 벽 부근에서의 이차유동장의 주류(main stream)와 더불어 회전봉과 밀면의 압력차에 의하여 회전 봉이 suction작용을 하여 제2의 축방향 상승유동이 중첩되어 형성되고 있음을 볼 수 있다. 이 경우 밀면으로부터 $x/R = 0.05, 0.25, 0.75, 1.25, 1.75, 1.95$ 에서 원주 방향 속도 분포가 Fig. 4(b)에 나타나있다. 여기서 볼 수 있듯이 봉이 회전하는 상단 부분의 원주 속도는 봉 근처에서 가장 크게 나타나고 벽면 쪽으로 갈수록 감소함을 볼 수 있고 하단 부분에

서는 봉의 밑면의 회전에 의한 영향 때문에 중심축에서 봉 가장자리까지 선형적으로 증가하다가 벽면 부근으로 가면서 다시 감소해 감을 볼 수 있다. Fig. 5에서 보여주고 있는 것처럼 $x/R = 0.75$ 지점에서 축방향 속도 분포를 살펴보면 두 개의 주된 축 방향 상승 유동이 생기고 있음을 잘 보여주고 있다.

다음 Fig. 3(c)는 두꺼운 봉이 회전함에 따라 유동의 형태가 벽면에 밀집된 이차유동장의 주류가 봉 부근으로 끌어당겨지는 효과를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이는 회전 봉의 밑면에 위치한 유체의 유동을 살펴보면 봉의 회전으로 인한 원심력때문에 봉의 중심부에서 가장자리로 유체가 밀리게 된다. 또한 원판의 회전으로 인해 원판 표면에 위치한 유체가 중심으로부터 원판의 가장자리로 원심력에 의해 밀리게 되어 반경 방향의 압력구배가 형성된다. 그러나 원통 아래면부근에서는 회전이 거의 없으므로 압력이 거의 일정하게 되고 따라서 회전판과 밑면사이에서 생기는 압력차이에 의해서 축 방향의 이차유동이 발생하여 유체가 봉의 벽면을 타고 밀려 올라가게 된다. 이 흐름이 강하여 또 다른 흐름을 형성하게 되고 결과적으로 이차유동장의 주류를 봉의 벽면부근으로부터 끌어당겨 이 곳에서 합쳐지는 효과를 갖는다. 한편 두꺼운 봉에서 원주 방향의 속도 분포 경향은 가는 봉의 경우와 유사하게 나타나고 있음을 Fig. 4(c)에서 볼 수 있다. 또한 Fig. 5에서 단순 원판의 회전에 비해 두꺼운 봉이 회전하는 경우에는 축방향 상승유동이 중심축으로 많이 이동했음을 보여주고 있다.

다음으로 다단(step) 봉의 회전에 의해 생성된 유동장은 위의 두 가지 봉의 효과가 결합된 형태를 나타내고 있음을 Fig. 3(d)에서 볼 수 있는데 가는 봉에 의한 중심 축으로부터 $R/4$ 지점에서 약한 상승유동이 생성되고 있고 상부의 두꺼운 봉의 벽면을 중심으로 전체적인 이차유동의 주류가 끌어 당겨진다. 이 유동 현상의 원리는 앞의 두 봉의 경우와 유사하다. 한편 봉의 다단 부분에서 형성되고 있는 유동장을 살펴보면 하단 봉의 suction작용으로 인해 하단 봉을 타고 올라오는 유체가 다단이 이루어지는 부분에서 막혀서 전체적인 이차유동장 형성을 방해하고 있음을 볼

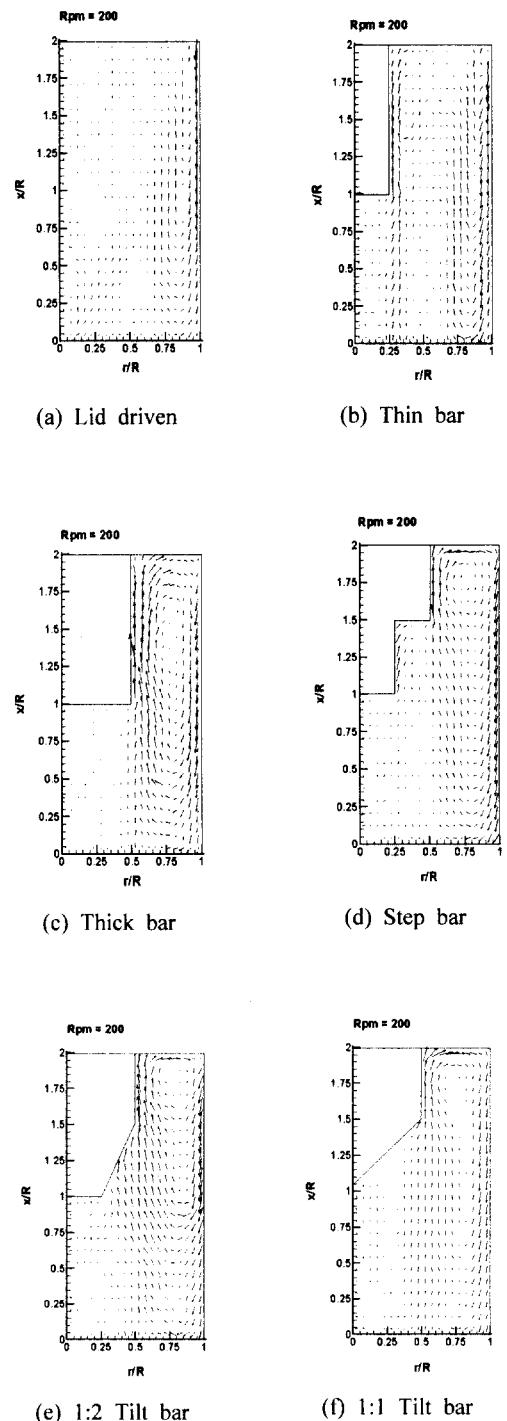


Fig. 3 Vector vector plots of secondary flows

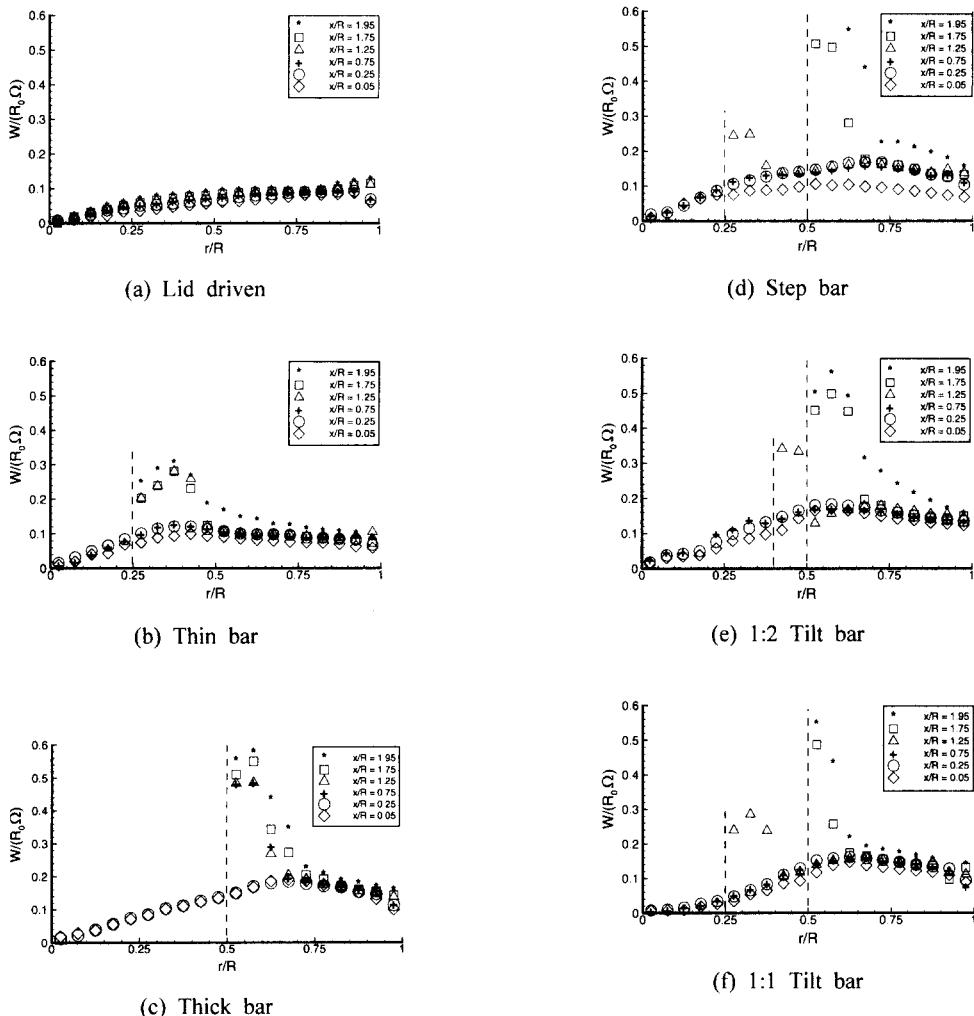


Fig. 4 Swirl velocity profiles

수 있다. 그리하여 다단 봉의 이런 문제점을 해결하고자 1:2 경사진 봉(tilt bar)을 회전시켜 유동장을 측정해 보았다. 경사진 봉을 회전시킨 결과 다단봉의 경우 다단 부분에서 나타났던 이차유동의 활성화를 방해했던 요인이 없어짐으로써 Fig. 3(e)에서 볼 수 있듯이 이차유동의 주류가 경사진 봉을 타고 보다 넓은 부분에 걸쳐 형성되고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 $x/R = 0.75$ 의 위치에서 축 방향 속도 분포를 보면 다단 봉에 비해 큰 축 방향 속도가 보다 넓은 반경 영역에 걸쳐 분포하고 있음을 알 수 있다.

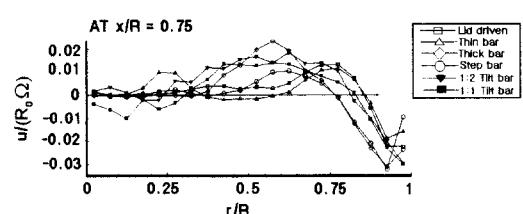


Fig. 5 Axial velocity profiles

이 경우의 원주 방향 속도 분포는 Fig. 4(e)에 나타내었다. 그리고 이차유동을 더욱 활성화시키

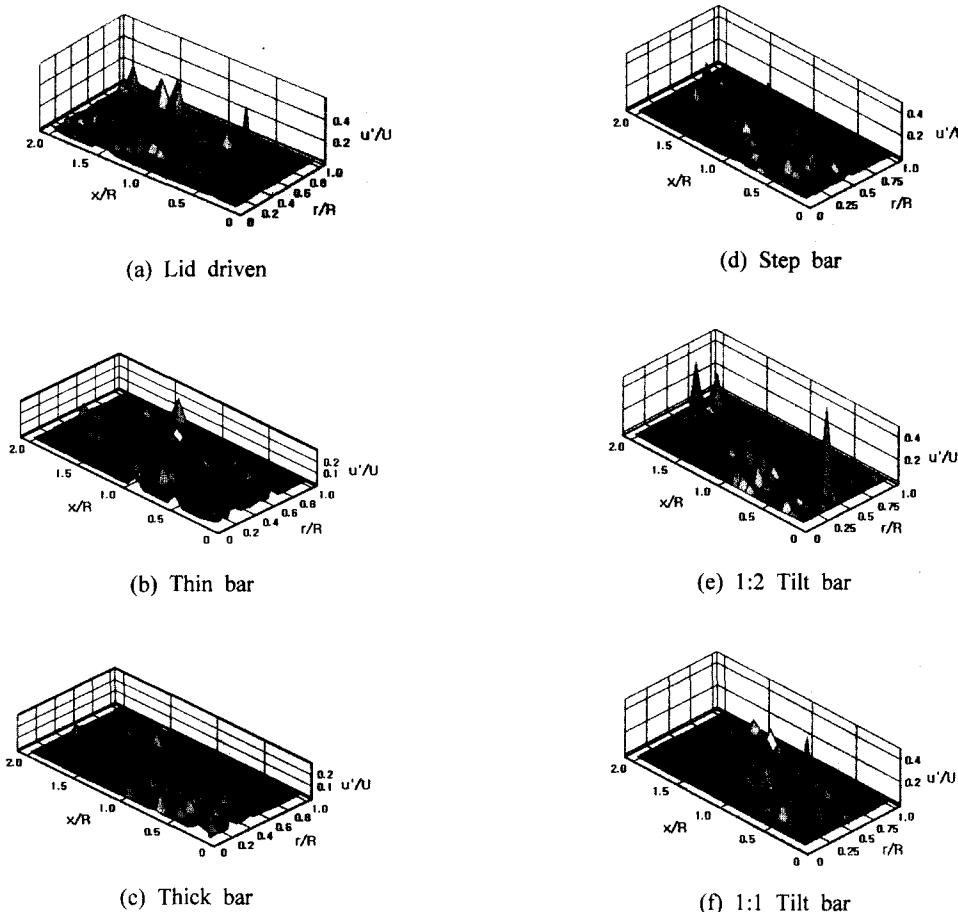


Fig. 6 Turbulence intensity

는 봉의 형상을 찾아보고자 원추 형태인 1:1 경사진 봉을 회전시킨 결과 Fig. 3(f)와 같은 유동장을 형성하였다. 이를 살펴보면 봉 하단부에서의 유동은 다소 활성화된 반면 전체적인 유동장이 약 $r/R = 0.5$ 의 위치에서 2개의 유동 셀로 분리되고 있음을 볼 수 있다. 이때의 원주 방향의 속도 분포 및 축 방향의 속도 분포를 각각 Fig. 4(f)와 Fig. 5에 나타내었다. 이차유동장에서 주 유동 성분인 축방향 유동에 대한 난류강도를 Fig. 6에서 각 경우에 대해 나타내었다. 그럼에서 보여지는 바와 같이 속도가 작은 축 중심 부근에

서 난류강도가 높게 나타나고 있음을 볼 수 있고 원판 회전의 경우를 보면 반경방향 성분이 축 방향 성분으로 바뀌게 되는 원판 가장 자리에서 비교적 높은 난류 강도를 보인다.

다음 봉 회전의 경우를 살펴보면 회전 봉 하단부분의 다른 부분에 비해 속도가 비교적 미미한 부분에서 난류강도가 크게 분포함을 볼 수 있다. 또한 벽이나 봉 부근에서 상승유동과 하강유동이 형성되는 주 유동의 중앙부분에 난류 강도가 다소 큰 분포를 하고 있다. 한편 레이놀즈 전단 응력(Reynolds shear stress)은 물리적으로 운동량

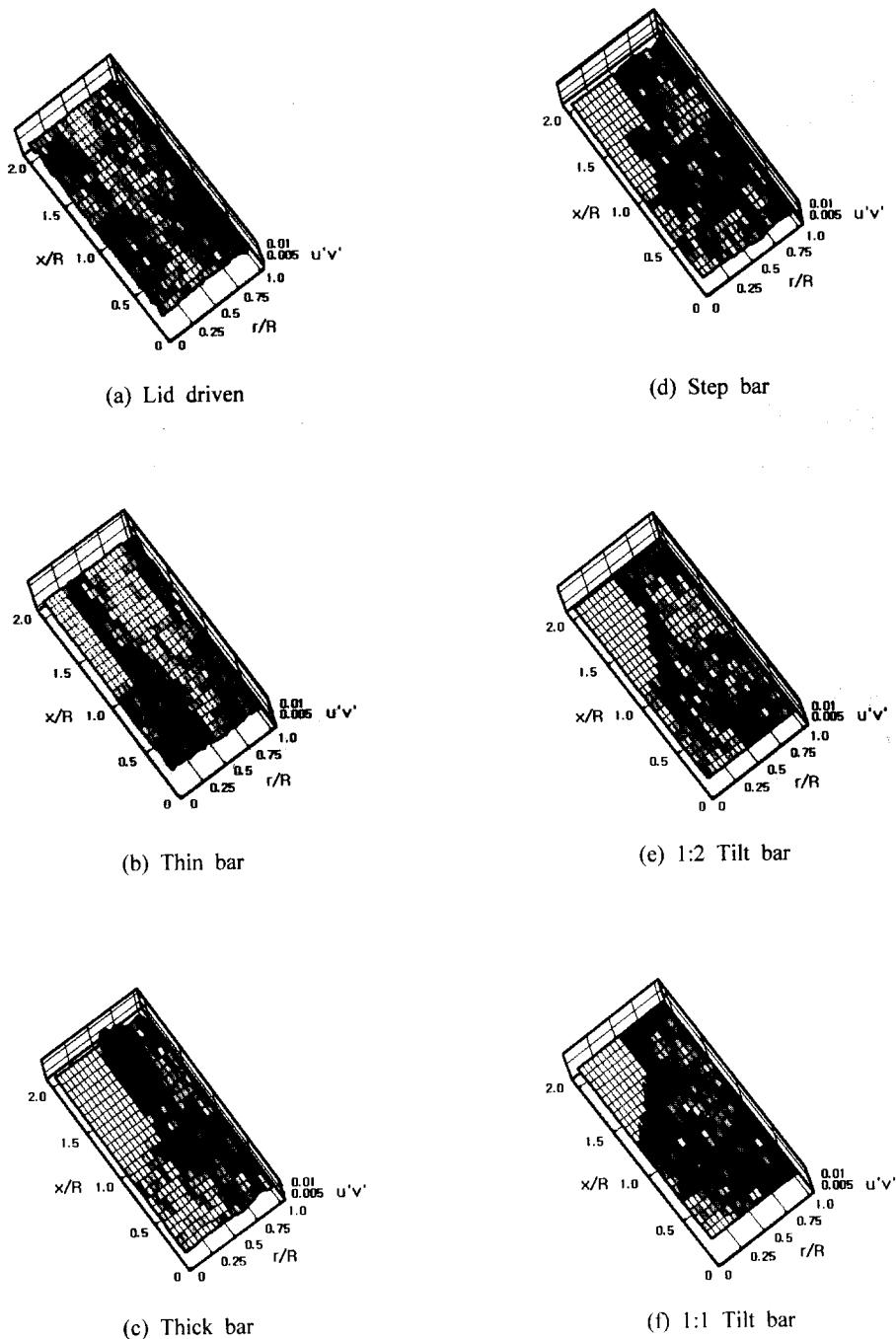


Fig. 7 Turbulence shear stress

(momentum)의 전달을 의미한다.

Fig. 7에서 보이는 것을 고찰하면 회전 봉 부근에서 운동량의 전달이 가장 크게 이루어지고 있음을 볼 수 있고 또한 유동장 생성의 원동력인 회전원판의 가장자리에서 레이놀즈 전단응력이 상대적으로 크게 분포하고 있다. 그리고 이차유동의 주류가 형성되고 있는 부분에서 운동량 전달이 활발하게 이루어짐을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 밀폐된 원통에서 다양한 형상의 원판이 회전함에 따른 유동 특성을 측정한 것으로써 본 실험 결과에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 원판 회전의 경우 유동의 형태는 속도의 증가에 따른 층류 유동에서의 유동형태가 발달하여 이차유동장의 주류가 벽면으로 밀려 형성된다.

(2) 가는 봉이 회전하는 경우 이차유동장에 회전판과 밀연의 압력차에 의한 유체의 suction 효과가 추가된 경향을 보인다.

(3) 두꺼운 봉의 경우 전체적인 이차유동의 형태가 봉 부근으로 끌어 당겨지는 효과를 나타내고 있으며 다단 봉의 경우는 이들 두꺼운 봉과 가는 봉의 효과가 결합된 유동 특성을 갖는다.

(4) 1:2 경사를 가진 봉이 회전하는 경우 다단 봉이 회전하는 경우에 나타난 다단 부근에서의 이차유동의 방해 현상이 없어져 주류가 보다 넓은 영역에 걸쳐 형성되고 또한 난류 강도나 레이놀즈 전단응력과 같은 혼합효과의 정도를 판단하는 기준이 될 수 있는 유동 특성이 보다 넓은 유동 영역에 걸쳐 높게 분포하고 있음을 볼 수 있다.

(5) 1:1 경사를 가진 봉이 회전하는 경우 두꺼운 봉의 회전시의 유동형태가 지배적으로 봉 하단부의 유동이 활성화된 반면 이차유동의 본류와 분리되어 전체적으로 2개의 독립된 셀을 형성하고 있다.

위의 결과를 종합적으로 고찰해 보면 1:2 경사진 봉을 회전시킨 경우에는 다단 부분이 이차유

동장 형성에 미치는 나쁜 영향이 감소되어 이차유동장의 주류가 크게 활성화되며 난류전단응력과 난류 강도의 유동특성이 비교적 넓은 부분에 걸쳐 크게 분포하고 있어 다른 봉에 비해 혼합효과가 크게 향상될 것으로 사료된다. 반면 보다 향상된 혼합효과를 나타낼 것으로 기대했던 1:1 경사 봉을 회전시킨 경우 난류 강도가 다른 봉에 비해 다소 높게 분포하여 국부적인 혼합효과는 향상되겠지만 유동 셀이 두 개로 나누어져 전체적인 혼합효과의 측면에서 보면 바람직하지 않을 것으로 판단된다.

이와 같이 본 실험에서 나타난 봉의 형상에 따른 유동 특성이 전체적인 혼합효과를 증가시키는 데에 있어서 기본적인 참고 자료로 이용될 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- (1) Schlichting, 1979, *Boundary Layer Theory*, McGRAW-HILL, pp. 559~568, 525~529.
- (2) Jae Min Hyun, 1985, "Transient Starting Flow in a Cylinder With Counter-Rotating Endwall Disks," *ASME*, Vol. 107, pp. 92~96.
- (3) Wild, P. M., 1996, "Experimental and Computational Assessment of Windage Losses in Rotating Machinery," *ASME*, Vol. 118, pp. 116~122.
- (4) 김유곤, 송효근, 1995, "이중실린더내 층류 회전유동에 미치는 온도장의 영향에 관한 수치해석," 대한기계학회, '95년도 추계학술대회논문집 (II), 95F195. pp. 110~114.
- (5) 김유곤, 최진우, 1997, "축대칭 난류 회전유동에 대한 수치해석," 대한기계학회, '97년도 추계학술대회논문집 B, 97F276. pp. 570~575.
- (6) Kim, Y. G., 1991, "Development of Digital Vector Velocimetry Method and Its Application to Rotating Flows," Ph.D. Dissertation, The University of Iowa, pp. 68~69.
- (7) You-Gon Kim, 1995, "Digital Vector Image Processing of Lid-Driven Rotating Cavity Flow," *KSME*, Vol. 9, No. 2, pp. 187~196.