

## 밀폐된 원통내부에서 회전체의 형상이 회전유동에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

박 천 수\* · 김 유 곤†  
(2001년 7월 19일 접수, 2002년 3월 11일 심사완료)

### Experimental Study for the Influence of Rotator Shape on the Rotating Flow in a Confined Cylinder

Cheon-Soo Park and You-Gon Kim

**Key Words:** Laser Doppler Velocimeter(레이저 도플러 유속계), Reynolds Number(레이놀즈수), Secondary Flow(2차 유동), Rotating Flow(회전 유동), Swirl Velocity(원주 속도), Turbulence Intensity(난류 강도), Disk(회전판), Radial Flow Impeller(반경류 임펠러), Axial Flow Impeller(축류 임펠러), Lid driven(뚜껑 회전)

#### Abstract

Two-dimensional, angle-resolved LDV(Laser Doppler Velocimetry) measurements of the turbulent rotating flow field in a confined cylinder have been performed. The configurations of interest are flows between a rotating upper disk with a rod attached by a disk or impeller( $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ ) and a stationary lower disk in a confined cylinder. The mean flow velocity as well as the turbulent intensity of the flow field have been measured. The results show that the flow is strongly dependent on the position of the impellers or the disk, negligibly affected by the Reynolds number in turbulent flow. It is observed that the mixing effect of the axial flow impeller( $\theta = 45^\circ$ ) is better than that of the radial flow impeller( $\theta = 90^\circ$ ) or a disk.

$\theta$  : 임펠러의 경사각도

$\Omega$  : 회전 속도(200 rpm)

#### 기호설명

H : 원통의 높이(0.2 m)  
L : 봉(rod)의 길이  
R : 원통의 반경(0.1 m)  
Re : 레이놀즈수 ( $\rho R^2 \Omega / \mu = 2.1 \times 10^5$ )  
s : 원주 속도  
T : 임펠러 또는 회전판의 반경  
W : 임펠러 또는 회전판의 높이(10 mm)  
b : 임펠러의 폭(3 mm)  
x : 축 방향 좌표, r : 반경 방향 좌표  
u : 축 방향(x 방향)속도  
u' : 축 방향 떨림속도  
v : 반경 방향(r 방향)속도

#### 1. 서 론

비정상 회전유동에 대한 연구는 실생활의 많은 부분에 적용되어 오래 전부터 세탁기, 교반기, 원심분리기, 유체기계, 생물·화학 반응기등과 같은 공학적인 응용에 직접적으로 관련되어왔다. 원통 내부에서 회전하는 유체의 흐름은 다양한 유동의 형태를 보이므로 고전 연구 대상이 되어왔으며, 응용분야에 적용되어 중요한 정보를 제공해 준다. 1890년 Couette<sup>(1)</sup>는 고정된 외부원통과 일정하게 회전하는 내부원통과의 사이에서 비압축성 점성 유동에 대한 회전원통을 푸는 수학적 근거를 제시하였으나 이 유동은 1923년에 G. I. Taylor<sup>(2)</sup>의 고전적 논문에서 제시된 바 있듯이 내부 원통의 비교적 낮은 회전속도에서 불안정해 그 사이

\* 회원, 전남대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계공학과

E-Mail : ygkim@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-0206 FAX : (062)530-1689

의 유동에서 테일러 와유동(Taylor vortex flow)이 형성되는 결과를 보인 바 있다. 밀폐된 원통내에서 두 끝단의 원판이 서로 반대 방향으로 회전함에 따른 유동의 변화 형태가 관찰<sup>(3)</sup>된 바 있으며 유압배인펌프 내부 회전체에서 작동 유체인 기름의 유동 형태<sup>(4)</sup>를 살펴보기도 하였다. 또한 이중 실린더내 층류 회전유동에 미치는 온도장의 영향에 관한 수치해석 결과<sup>(5)</sup>와 축대칭 난류 회전유동에 대한 수치해석의 결과<sup>(6)</sup>가 보고된 바 있다. 그리고 원통내부에서 회전봉의 형상이 유동에 미치는 영향<sup>(7)</sup>을 혼합효과 측면에서 고찰하기도 하였다. 특히 교반기(agitator)는 그 사용 목적에 따라 임펠러에 부착되는 날개의 형상이 다양하다. 반경류 임펠러(radial flow impeller)는 수직봉에 두 개 또는 네 개의 임펠러 날개가 부착되어 유체의 흐름은 반경방향으로 흘러 원통의 벽면으로 흘러간다. 그 대표적인 예가 Rushton Turbine이다. 이 터빈은 Rushton<sup>(7)</sup>에 의해서 고안된 장치인데 임펠러에 의해 발생된 에너지와 펌프 성능(pumping capacity) 및 터빈내 유동의 순환시간등을 광계측 실험장치를 이용하여 측정하였다. 이것은 원통의 용기 내부에 원통 지름의 0.08~0.1의 차단막(baffle)이 설치되어서 큰 전단력을 발생하여 원통 내부의 기포(bubble)를 제거하고 산소이송률(oxygen transfer rate)을 증가시키기 때문에 호기성 세균 배양에 사용된다. 그러나 혼합효과 측면에서는 축류 임펠러(axial flow impeller)에 미치지 못한다. 이것은 임펠러의 날개가 특정 각도(45°~60°)로 기울어져 부착되어 유체를 축방향을 따라 원통의 바닥면으로 보내어 다시 벽면을 타고 상승해 가는 유동을 보인다. 혼합효과는 뛰어나지만 임펠러의 날개끝에서 와동의 생성을 방해하여 낮은 전단력의 특성을 가지기 때문에 결정화 과정(crystalization), 침전 반응(precipitation reaction)과 같은 진행과정에 적용된다. 근래에는 밀폐 또는 개방된 원통 내부에 차단 장치(baffle)를 설치하여 터빈내의 유동장의 흐름을 관찰하는데 초점이 맞춰져 있어 다방면의 산업현장과 여러 연구 분야에 유익한 정보를 제공하고 있다. 그러나 본 연구의 차단 장치가 없는 유동의 연구는 유체 및 유동 연구의 기본적인 측면이나 산업적인 측면에서 모두 중요한 척도가 되리라 생각된다. 일반적으로 LDV 등에 의해서 측정된 임펠러의 다양한 측정 자료는 정상상태 유동의 시뮬레이션 연구의 경계

조건으로 사용<sup>(8)</sup>되곤 한다.

본 실험 연구에서는 밀폐된 원통에서 윗판과 윗판에 부착된 봉(rod)에 임펠러나 회전판(disk)이 부착되어 동시에 고속 회전하는 경우에 대하여 분석하였다. 원통의 반경을 R이라 할 때 봉의 길이(L)를 R, 1.5R로 고정하고 임펠러와 아래 원판의 반경을 0.25R, 0.5R로 제작 및 설치하였다. 이들의 혼합 효과를 비교, 분석하기 위하여 LDV를 이용하여 측정하므로써 단순히 윗판만 회전하는 경우(lid-driven)와 1:2 경사진 봉(tilt bar)인 경우의 실험결과<sup>(9)</sup>와 비교하여 원통 실린더내의 유체의 혼합효과 및 난류 유동의 특성을 실험적으로 고찰하였다.

본 실험에서는 반경류 임펠러의 대표적인 것으로 90° 임펠러를, 축류 임펠러는 45° 경사진 임펠러를 선정하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

Fig. 1에서는 본 연구에서 사용된 2차원 속도 측정용 LDV 실험장치의 전체적인 구성도를 나타낸다. 본 실험에서는 실린더 내부에 회전유동을 형성하기 위해 실린더 원판을 회전시켜 작동 유체에 전단응력을 공급하였다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 직경 20 cm, 높이 20 cm의 아크릴 실린더를 실험시편으로 제작하여 다양한 형상의 임펠러( $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ )와 회전판을 각각 실린더 원판에 부착하였다. 또한 빛의 굴절과 산란에 의한 효과를 최소화하기 위해 실린더 외부에 아크릴 사각 수조를 씌우고 그 사이의 공간에 물을 채워 실험하였다. 그리고 Fig. 2(c)에 실험시편의 각 치수들을 Table 1에 제시하였다. 여기에서 각도에 따른 임펠러의 형상과 회전판의 반경 및 봉의 길이에 따라서 간략히 소개한다.

### 2.2 실험방법

본 연구에서 실험 장비를 구축하는 방법과 실험 과정은 다음과 같다.

우선 주 동력원인 모터의 회전에 의한 유체의 진동을 방지하기 위하여 실험 받침대를 제작하여 수평도를 유지하였다. 그 위에 실험시편을 올리고 원통 내부에 실린더 원판이 잠길 정도로 적당히 물을 채워넣고 실린더 바깥 부분의 사각수조 사이

의 공간에도 물을 채워 넣어 레이저 beam이 유체를 통과하며 발생하는 굴절과 지나친 산란을 최소화하였고, 또한 beam이 투과하는 면을 제외한 나머지 세 면에 셀룰판지를 부착하여 실험시편을 구성하였다.

먼저 물이 채워진 원통 내부에 산란입자(conifer pollen, 5 ~ 10 μm)를 넣고 작동유체인 물과 끈고루 섞이도록 막대를 이용하여 저어준다. 선택된 산란입자는 가능하면 물과 비슷한 비중과 밀도를 가질수록 좋으며 입자의 직경이 작을수록 난류 유동(turbulent flow)에 대한 추종성이 좋다. 그러나 공급 입자량이 너무 적으면 도플러 신호(doppler signal)의 드랍 아웃(drop - out) 현상이 발생할 우려가 있으므로 적절한 양과 크기를 선택한다. 모터에 연결된 회전축에 원판, 봉(rod), 회전판(disk) 또는 임펠러를 순서대로 연결하여 원통내부의 유체에 동력을 전달한다. 이때 발생하는 기포를 제거하고 속도 조절기(tachometer)를 이용하여 모터의 회전수(200 rpm,  $Re = \rho R^2 \Omega / \mu = 2.1 \times 10^5$ )를 일정하게 조절하고 유체의 흐름이 정상상태가 되도록 약 10 분 정도를 가동한다. 원판 가장자리와 원통의 내부 벽면사이의 간격은 약 1 mm 이하로써 그 사이로의 유량의 유출입은 무시할만하므로 이 실험시편을 밀폐된 실린더내의 회전유동으로 가정하여도 무관하다.

레이저 발생기를 가동시키기 전 레이저의 냉각수를 최소 10 liters/min 정도의 유량으로 약 10분간 순환시킨 후 최대출력 5 Watts 아르곤 이온 레이저(Argon Ion Laser)를 켜다. 레이저 빔(beam)이 발생되면 강도를 1 Watts로 조절하고 빔을 Brag cell에 의해 40 MHz로 주파수를 전이시켜 color splitter에 의해 나누어진 동일 파장의 한 쌍의 빔이 manipulator를 거쳐 각각의 빔이 동일한 강도를 갖도록 조절한다. 다음 이송장치(traverse system)를 이송시키며 실험부위의 중심점 위치와 실린더 내부의 가장자리 위치를 확인하고 이송장치에 측정 위치의 좌표를 입력시킨다. 이때 이송장치는 반경 방향으로 5 mm 간격으로 20 개 지점을, 축 방향으로 8.33 mm 간격으로 24 개 지점을 이동해 가며 측정하였다. LDV 측정시 데이터의 유효 sample 개수는 빔에 의해 형성된 fringe를 지나가는 모든 sample 개수의 70 ~ 80 % 이상을 유지<sup>(10)</sup>한다.

측정 데이터는 후처리용 Tecplot을 이용하여 평균 속도와 원주 속도 및 난류 강도 등의 정보를 얻는다.

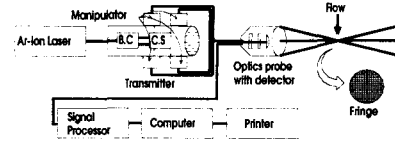
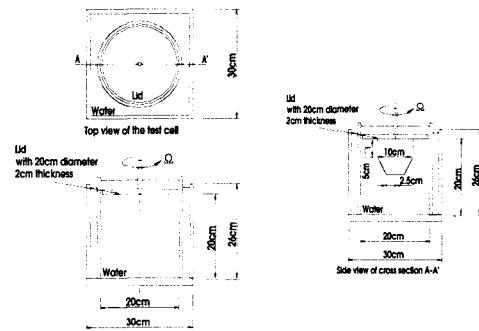
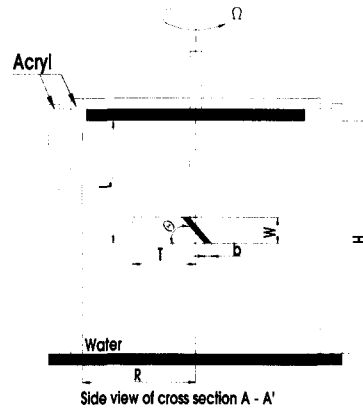


Fig. 1 Schematic diagram of 2-D LDV system



(a) Lid driven

(b) 1:2 tilt bar



(c) Geometry of impellers and disk

Fig. 2 Geometry of test sections

### 3. 실험결과 및 고찰

단순히 원통의 윗 원판만 회전할 경우(lid - driven)에 회전수를 100, 200, 300rpm( $Re = 1.05$

Table 1 Dimensions of Fig. 2(c)

CASE	TYPE	L(m)	T(m)	$\theta(^{\circ})$
1	disk	1R	0.25R	
2	impeller	1R	0.25R	90
3	impeller	1R	0.25R	45
4	impeller	1.5R	0.25R	45
5	impeller	1R	0.5R	45
6	impeller	1.5R	0.5R	45

$\times 10^5$ ,  $2.1 \times 10^5$ ,  $3.15 \times 10^5$ )으로 변화시켜 보았으나, 난류 유동에서는 점성 영향보다 관성력이 지배적이므로 전체 유선의 형상 변화에는 별로 영향을 미치지 못했다. 또한 회전판 및 반경류 임펠러( $\theta = 90^{\circ}$ )의 반경을 0.5R로 하여 측정을 하였으나 혼합 효과의 측면에서는 크게 개선된 점이 없어서 반경을 0.25R로 고정하고, 측류 임펠러인 경우만 0.25R과 0.5R로 설치하여 실험한 결과를 정리하면 다음과 같다.

밀폐된 실린더 내에서 lid driven인 경우에는 층류인 조건에서 벽부근을 타고 내려오는 유동이 원통의 밀면을 따라서 이동한 후 중심축 방향으로 상승하는 결과<sup>(11)</sup>를 보였다. 그러나 회전수가 증가함에 따라 Fig. 3(a)에 나타난 것처럼 난류 경우에서 2차유동의 주 유동장은 주로 벽면 부근에 밀집되어 형성되고 층류에서 확인되었던 하단 부분에서 중심축방향으로 상승하는 유동 형태는 많이 약화됨을 볼 수 있었다. 따라서 원통의 바닥 부근에서 중심축을 향한 반경 방향의 유동이 중심 영역에 비해서 바로 벽 부근에서 강한 상승을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4(a)에서 제시된 것과 같이 반경 방향의 속도에 비해 아주 큰 원주 방향의 속도 분포가 각각 윗 원판과 바닥에서 어느 정도 떨어진 대부분의 모든 축방향 위치에서 강제 운동(solid body motion)과 비슷하게 거의 일정한 속도분포를 보임에 따라서 2차유동장의 주류가 벽면으로 밀려 형성되고 있음을 나타낸다. 여기서 나타낸 속도 분포는 길이는 대표 길이를 원통의 반경(R)으로 무차원화하였고 속도는 원판의 가장자리의 원주속도( $R\Omega$ )로 무차원화하였다.

다음 Fig. 3(b)에서 보는 것처럼 1:2 경사진 봉(1:2 tilt bar)의 회전에 의해 생성된 유동장은 lid driven인 경우에 비해 2차유동이 경사진 봉을 타고 보다 넓은 영역에 걸쳐 형성되고 있음을 볼 수가 있다. 이 경우의 원주 방향 속도 분포는

Fig. 4(b)에 나타내었다.

Fig. 3(c)에서는 길이가 1.0R인 봉에 반경이 0.25R인 회전판(disk)이 부착된 경우이다. 원통내의 윗 원판이 회전시 벽부근을 타고 내려오는 하강유동이  $r/R = 0.75$ 인 부근에서 2차 유동이 활성화된다. 더욱이 회전판의 흡입효과(suction)에 의하여 중심축과 회전판으로 진행되는 상승유동을 보인 후 원통의 윗 원판에 의한 원심력에 의해 다시 벽 부근에서 하강 유동을 보임을 알 수 있다. 이 경우 밀면으로부터  $x/R = 0.05, 0.25, 0.5, 1.0, 1.25, 1.95$ 에서 원주 속도가 Fig. 4(c)에 나타나 있다. 여기서  $x/R = 1.95$ 인 지점에서 가장 큰 원주속도 분포를 나타내어 윗 원판의 점성에 의한 원심력의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 회전판이 위치한 곳에서 윗 원판으로 갈수록 큰 속도 분포를 나타내었다. 그러나 이 원주 속도는 벽면으로 갈수록 감소함을 확인할 수 있다.

이어서 Fig. 3(d)는 짧은 봉( $L = 1.0R$ )에 반경류 임펠러가 부착되어 함께 회전하는 상황이다. 앞의 경우와 마찬가지로 임펠러에 의해서 형성된 2차 유동이 윗 원판 부근으로 상승하여 윗판에 의해 다시 벽면으로 밀려 내려가는 현상을 볼 수 있다. 전체적인 흐름이 임펠러가 없는 경우에 비해 봉의 주변에서 더 큰 반경 방향의 유동의 영향을 관찰할 수 있으며 이러한 유동은 2차 유동의 상승하는 유동과 더해져 윗 원판의 상단 부분에서 강한 흐름을 보여주고 있다. Fig. 4(d)에서 이 경우의 원주 속도를 제시하였다. 단순히 회전판(disk)이 회전할 때와 비교해보면 임펠러가 존재하는 위치( $x/R = 1.0$ )에서 윗 원판으로 접근해 갈수록 속도 분포가 크게 증가함을 나타내고 있다. 이것은 임펠러의 상단부분에서 임펠러에 의한 회전이 큰 흡입 효과를 보여주어 원주 방향으로의 속도에 더 큰 영향을 주고 있기 때문이다.

측류 임펠러( $\theta = 45^{\circ}$ )가 회전하고 봉의 길이가 짧은 경우( $L = 1.0R$ )가 Fig. 3(e)에 나타나 있다. 축방향으로 기울어진 임펠러에 의해 유동은 다른 경우와 비교해서 축방향으로의 상승유동이 크게 나타나 있음을 알 수 있다. 이것은 측류 임펠러의 경사진 각도만큼 유체가 원통내부의 바닥면으로 분산하므로 반경류 임펠러보다 유체에 대한 저항을 감소시켜서 임펠러 끝에서 발생하는 와(vortex)의 영향을 감소시키므로 원통의 전영역에 걸쳐 유체가 고루 분산 되도록 한다. 이때의 원주 속도의 분포를 Fig. 4(e)에 나타내었다. 특히  $x/R = 1.95$ 에서는 중심축에서 벽면으로 진행되

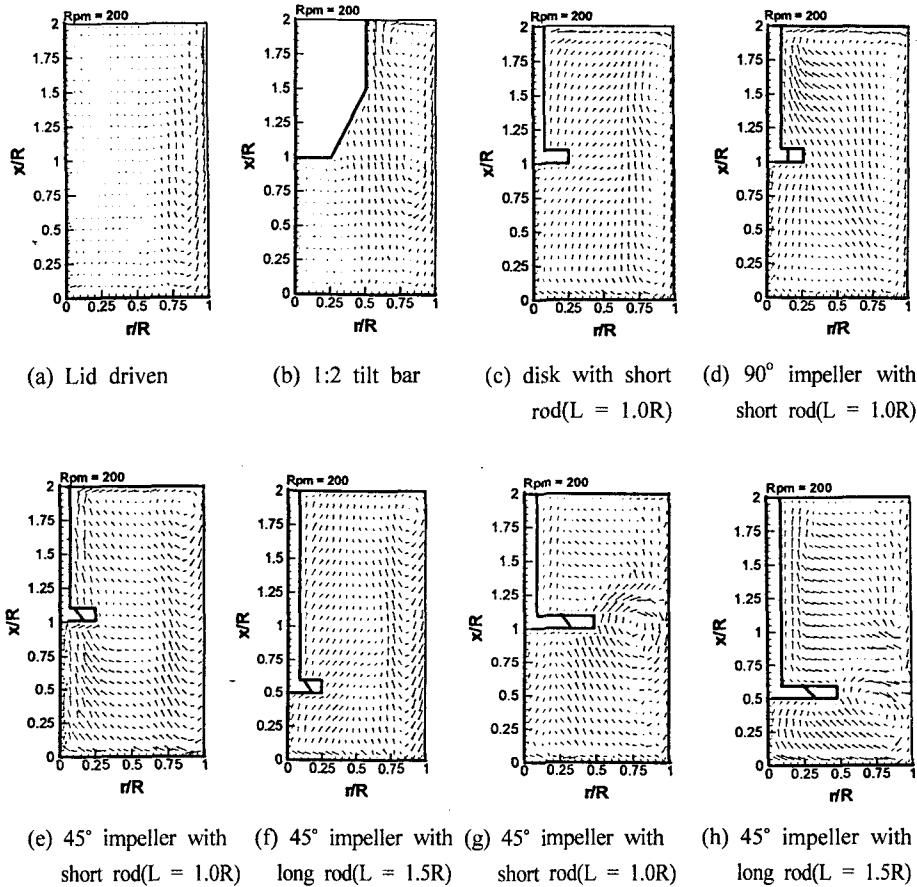


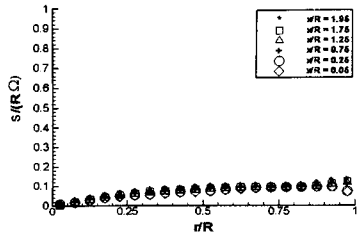
Fig. 3 Vector plots of secondary flows

여 갈수록 다소 증가하다가 감소하였다.

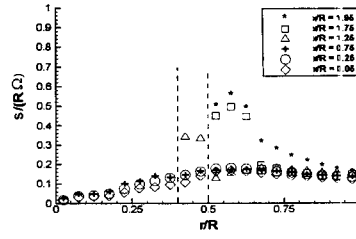
Fig. 3(f)는 Fig. 3(e)에서 봉의 길이만 길게 변 ( $L = 1.5R$ ) 경시킨 결과이다. 마찬가지로 축 방향으로의 유동이 회전판이나 다른 경우에 비해서 다소 크게 나타나는 결과를 보였지만 3(e)와는 달리 임펠러가 원통의 바닥면에 가까이 위치하여서 흡입하는 작용이 다소 둔화되어 보임을 알 수 있었다. Fig. 4(f)에서는 원주 속도가 임펠러의 위치를 기준으로 Fig. 4(e)와 비슷하게 분포되어짐을 알 수 있었다. Fig. 3(g)에서는 축류 임펠러( $\theta = 45^\circ$ )의 봉의 길이가  $1.0R$ 이고 임펠러의 지름이  $0.5R$ 로 확장되었다. 그림에서 보는 바와 같이 임펠러가 위치한 부분( $x/R = 1.0$ )과 원통의 벽 사이에서 벽면으로 하강하는 유동이 재순환하는 영역이 형성되어 바로 상승해가며 2차유동이 형성되어 흘러가는 양상을 확인할 수 있다. 이것은 축류 임펠러의

지름이 커짐에 따라 임펠러와 벽면사이에 유·출입하는 유동에 대해서 차단막처럼 작용하여 앞 경우들과 달리 재순환(recirculation)영역이 형성되었다. Fig. 3(h)는 Fig. 3(g)의 경우에서 봉의 길이만  $1.5R$ 로 늘린 경우이다. Fig. 3(g)에서처럼 임펠러가 위치한( $x/R = 0.5$ ) 부분에서 유동이 분리되어 혼합효과 측면에서 임펠러의 지름이 작은 경우보다 떨어짐을 알 수 있었다. Fig. 3(g)와 3(h)의 원주 속도를 Fig. 4(g)와 4(h)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 임펠러가 각각 위치한 축방향 근처에서( $x/R = 0.5, 1.0$ ) 원주속도가 다소 분리되어 분포되어 있음을 알 수 있다.

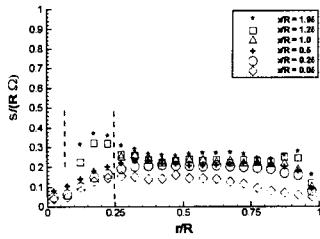
본 연구에서 고려된 각 경우에 대해서 축방향의 속도 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 특히 Fig. 5(b)의  $x/R = 1.0$ 에서 축방향의 속도는 축류 임펠러가 다른 경우에 비해서 급격히 변화해 가는



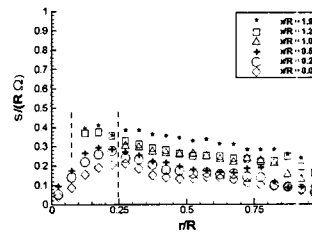
(a) Lid driven



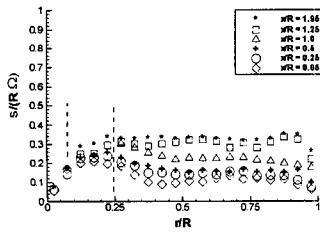
(b) 1:2 tilt bar



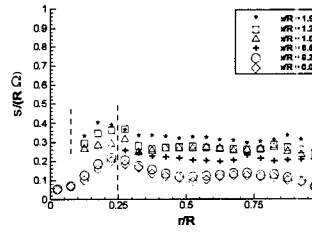
(c) Disk with short rod  
(L = 1.0R, T = 0.25R)



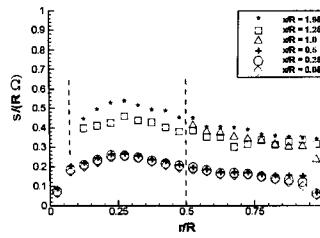
(d) 90° impeller with short rod  
(L = 1.0R, T = 0.25R)



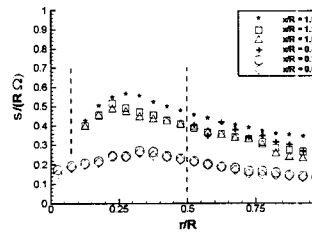
(e) 45° impeller with short rod  
(L = 1.0R, T = 0.25R)



(f) 45° impeller with long rod  
(L = 1.5R, T = 0.25R)



(g) 45° impeller with short rod  
(L = 1.0R, T = 0.5R)



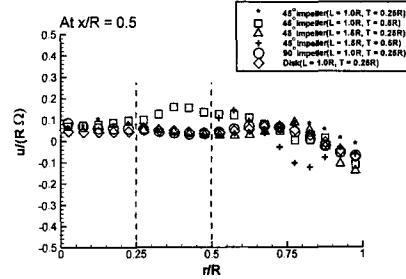
(h) 45° impeller with long rod  
(L = 1.5R, T = 0.5R)

Fig. 4 Swirl velocity profiles

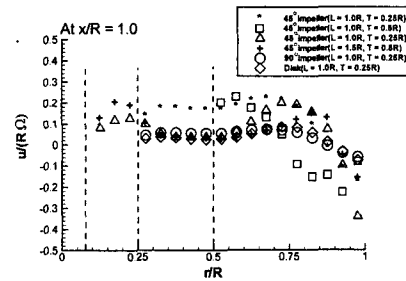
것을 볼 수 있다. 이와는 달리 임펠러와 회전판이 위치하지 않는 곳( $x/R = 0.5, 1.25$ )에서는 다소 안정된 일정한 변화를 보여주어 대조적인 형상을 보였다.

또한  $x/R = 1.0$ 에서 축 방향 유동 임펠러의 봉의 길이가 길고( $L = 1.5R$ ) 임펠러의 반경이 큰( $T = 0.5R$ ) 경우의 축 방향 속도의 변화가 더 크게 나타나고 복잡한 양상을 보여주고 있다. 2차 유동에서 주유동 성분인 축 방향 유동의 떨림 속도에 대한 난류강도를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 lid driven인 경우와 1:2 경사진 봉(tilt bar)이 연결된 경우에 비교해서 길이가 짧고( $L/R = 1.0$ ) 반경류 임펠러인 경우가 두드러지게 봉(rod)과 임펠러의 부분적인 영역에 걸쳐서 난류강도가 높게 나타나고 있음을 볼 수 있고, lid driven의 경우는 반경 방향 성분이 축 방향 성분으로 바뀌게 되는 원판 가장 자리에서 비교적 높은 강도를 보인다. Fig. 6(g)를 Fig. 6(e)와 비교했을 때, 임펠러가 위치한 부분을 중심으로 원통의 벽면에서 난류강도가 높게 나타나 원통의 벽면 부근에서 축 방향으로의 속도가 더 크게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6(h)는 Fig. 6(f)와는 달리 원통의 벽부근과 임펠러가 위치한 사이에 걸쳐서 넓게 분포하며 큰 난류강도를 나타내고 있다. Fig. 6(g)와 6(h)는 임펠러의 반경이 커서 유동장을 분리시키는 역할을 하고 있으며 임펠러 부근에서 높은 난류강도를 보여준다. 이에 비해서 회전판(disk)이 부착되어 회전하는 경우에는 벽면에서의 하강 유동과 어느정도 떨어진 부근( $r/R = 0.75$ )에서의 상승 유동의 영향으로 벽면과 회전판이 있는 영역에 걸쳐 난류강도가 다소 균형있게 분포를 하고 있다. 축류 임펠러 설치시 축방향으로 상승하는 유동의 영향으로 봉과 원통의 벽면에서 난류강도가 크게 분포를 하였지만 전영역에 걸쳐서 골고루 분산되어 있는 형태를 보였다. 또 임펠러의 지름이 클 때( $T = 0.5R$ ), 임펠러가 위치한( $x/R = 0.5, 1.0$ ) 부근에서 더 큰 강도를 보여주었고, 특히 임펠러 끝에서 발생하는 와(vortex)의 생성이 둔화되어 낮은 전단응력을 보여 주었다.

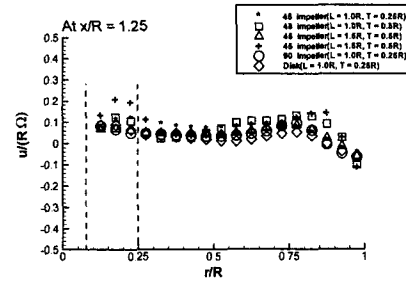
지금까지의 실험 결과를 정리하면 일반적으로 반경류 임펠러보다 축류 임펠러를 설치할 경우에 혼합 효과가 더 뛰어난 것을 확인하였다. 이것은 Fig. 3의 2차유동의 전체적인 유동 경향과 이 때



(a) At  $x/R = 0.5$



(b) At  $x/R = 1.0$



(c) At  $x/R = 1.25$

Fig. 5 Axial velocity profiles

의 2차유동장에서 형성되는 국부적인 떨림 속도(fluctuation velocity)에 대해서 각 경우마다 원통내부에 분포하는 Fig. 6의 난류강도에 근거하여 분석한 것이다. 그러나 축류 임펠러에서 임펠러의 반경이 클수록 원통의 벽면을 따라 흐르는 유동의 유·출입을 방해하여 임펠러의 상단 부분에서 유동의 정체 현상에 의한 결과로 그 성능이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 회전판(disk)이 부착된 경우에는 유동장의 주류가 크게 활성화되어 비교적 넓은 영역에 걸쳐서 난류강도의 유동특성이 크게 분포하고 있어 반경류 임펠러에 비해

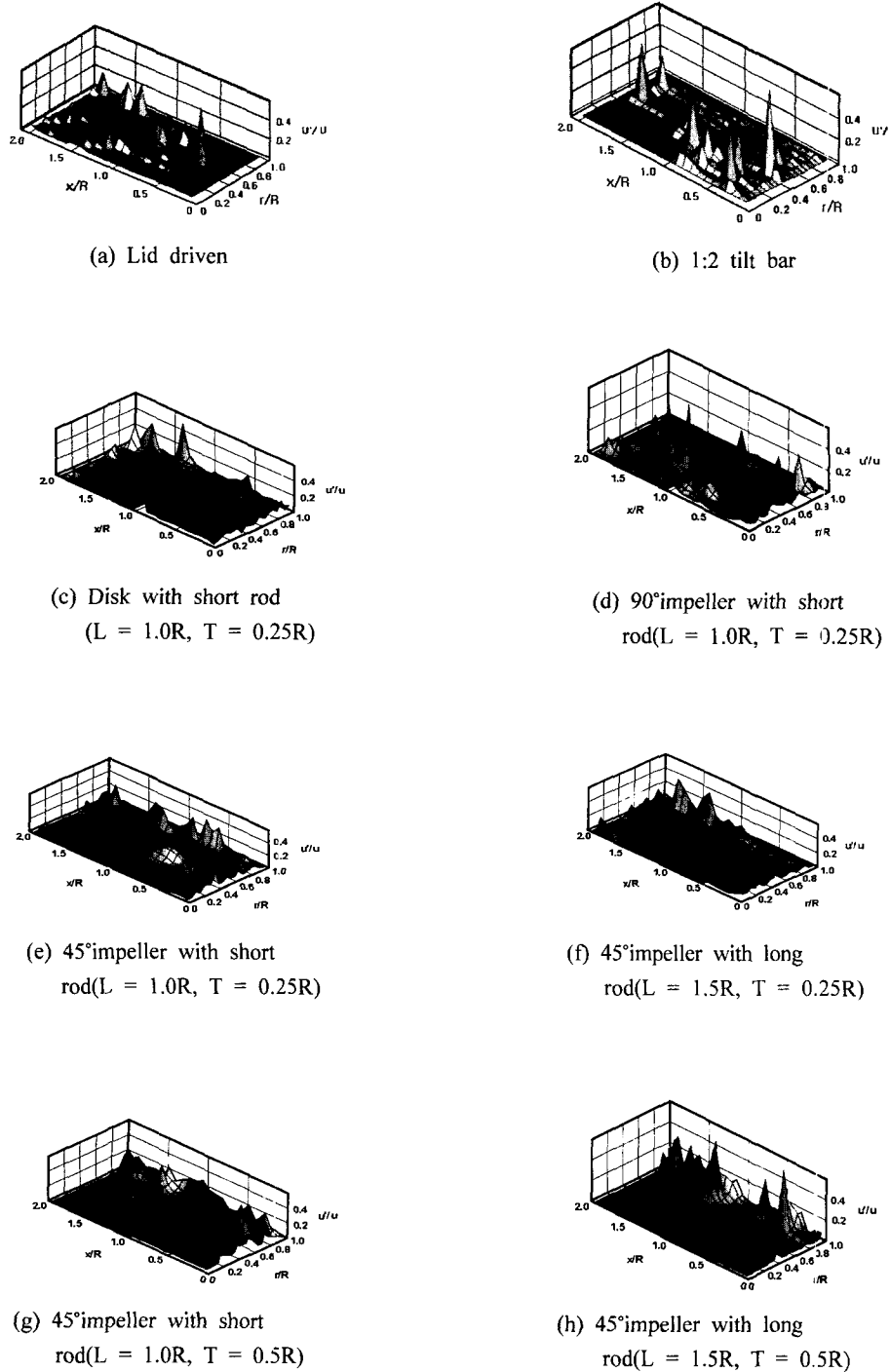


Fig. 6 Turbulence intensity



서 혼합효과가 크게 향상될 것으로 보인다. 그러나 회전판이 유체를 단순히 원심력에 의해 밀어내는 작용을 하지만 축류 임펠러는 유체를 임펠러 영역으로 능동적으로 흡입하여 유동장의 전 영역에 전파시키므로 회전판에 비해 더 큰 흡입 성능을 가지게 된다. 따라서 축류 임펠러가 회전판에 비해 더 뛰어난 혼합 효과를 보인다고 할 수 있겠다.

이를 종합적으로 설명하면 반경류 임펠러나 회전판(disk)을 설치할 때가 윗 원판만 회전하는 경우(lid driven)에 비해서 유동은 다소 활성화된 반면에 전체적인 유동장이 약  $r/R = 0.75$ 의 위치에서 부분적으로 2차 유동장의 주류가 나누어짐을 볼 수 있다. 그러나 축류 임펠러의 경우에는 반경류 임펠러와는 달리 축 방향으로 유체를 원통의 내부에 끌고루 전파시켜 전체적인 혼합 효과가 크게 나타날 것을 확인할 수 있었지만 임펠러의 지름이 커질수록 이 효과가 커진다고 단언할 수 없다. 축 방향 유동 임펠러의 지름이 0.25 R에서 0.5R로 증가시켜 실험한 결과는 반경류 임펠러의 지름이 0.5R인 경우와 비슷하게 임펠러가 위치한 부분에서 재순환 유동이 형성되는 경향을 보였다.

#### 4. 결론

본 연구는 밀폐된 원통내부에서 임펠러나 작은 회전판(disk)이 붓을 통하여 부착된 윗 원판(Lid)과 함께 회전함에 따라 생성되는 유동 특성을 측정함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 1:2 경사진 붓(tilt bar)과 lid driven이 회전하는 경우에는 부분적인 2차 유동의 주류가 형성되었지만 회전판(disk)이 붓에 부착되면 회전판 부근에서 주류의 상승 유동과 윗판의 원심력에 의한 유동이 합해져서 다소 안정된 경향을 보였다. 특히 붓(rod)이 짧은 경우에( $L/R = 1.0$ ) 회전판의 기하학적인 형상과 유동에 대한 영향력은 적어져 전체적으로 원활한 2차유동장을 보였으며 원통 내부의 부분적인 영역에 걸쳐 난류 강도가 크게 나타난다.

(2) 반경류 임펠러( $\theta = 90^\circ$ )가 회전하는 경우에는 붓과 임펠러의 부근에서 큰 운동량을 전달하여 2차 유동이 회전판인 경우에 비해 훨씬 크게 발달하지만 임펠러 근처의 부분적인 영역에 한해서 난류강도가 높게 나타내어 혼합효과의 측면에

서 보면 바람직하지 않을 것으로 판단된다.

(3) 축류 임펠러( $\theta = 45^\circ$ )인 경우에는 축방향으로의 유동흐름이 크게 분포되어 임펠러의 끝에서 발생하는 와(vortex)가 임펠러의 날개에 의해서 다시 소멸되면서 낮은 전단 응력을 보여주므로 반경류 임펠러와 비교해서 더 좋은 혼합 효과의 한 면을 기대할 수 있겠다.

(4) 축류 임펠러의 경우에 임펠러의 반경이 커질수록 2차유동에서 재순환 유동이 발생하여 반경이 0.5R인 경우가 0.25R일 때보다 혼합효과가 떨어짐을 확인하였다. 따라서 향상된 혼합 효과를 기대한다면 축류 임펠러의 반경은 원통 반경의  $1/3 \sim 1/4$ 로 설정하는 것이 좋은 결과를 바랄 수 있겠다.

#### 후 기

본 연구는 전남대학교 2001년 BK21 지역대학 육성 사업단(수송 기계 분야)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Frank M. White, 1995, *Fluid Mechanics*, McGRAW-HILL, 3rd., pp. 279~282.
- (2) Taylor, G. I., 1923, "Stability of a Viscous Liquid Contained between Two Rotating Cylinders," *Philos. Trans. Roy. Soc. London Ser.*, Vol. 223, pp. 289~343.
- (3) Jae Min Hyun, 1985, "Transient Starting Flow in a Cylinder With Counter-Rotating Endwall Disks," *ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 92~96.
- (4) Kim, J. H. and Jung, J. Y., 1990, "The Dynamic Behavior of Internal Rotating Slider of Oil Hydraulic Pump," *KSTLE Journal*, Vol. 6, No. 2.
- (5) 김유곤, 송효근, 1995, "이중실린더내 층류 회전유동에 미치는 온도장의 영향에 관한 수치해석," 대한기계학회, '95년도 추계학술대회 논문집(II), 95F195. pp. 110~114.
- (6) 김유곤, 최진우, 1997, "축대칭 난류 회전유동에 대한 수치해석," 대한기계학회, '97년도 추계 학술대회논문집 B, 97F276. pp. 570~575.

- (7) Rushton JH, Costich EW, Everett HJ, 1950, "Power Characteristics of Mixing Impeller and II," *Chem Eng Prog* 46 : pp. 394~404, 467~476.
- (8) Bakker A, 1994, "Single-Phase Flow in stirred Reactors," *Trans Int Chem Eng* 72A, pp. 583~593.
- (9) 김유곤, 김동규, 2001, "원통내 회전유동에서 회전봉의 형상이 혼합효과에 미치는 영향에 관한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B*, 제25권, 제2호, pp. 156~163.
- (10) Fiberflow & FVA interface : *Installation and User guide*, Dantec.
- (11) You-Gon Kim, 1995, "Digital Vector Image Processing of Lid-Driven Rotating Cavity Flow," *KSME Journal*, Vol. 9, No. 2, pp.187~196.