

밀폐된 원통내부에서 회전체의 형상에 따른 혼합효과에 대한 LDV 측정

박 천 수* · 김 유 곤**

LDV Measurement for the Mixing Effect of the Rotator Shape in a Confined Cylinder

Cheon-Soo Park and You-Gon Kim

Key Words: Laser Doppler Velocimetry(레이저 도플러 유속계), Reynolds Number(레이놀즈 수), Secondary Flow(이차 유동), Rotating Flow(회전 유동), Swirl Velocity(원주 속도), Turbulence Intensity(난류 강도), Radial Flow Impeller(반경방향 유동 임펠러), Axial Flow Impeller(축방향 유동 임펠러)

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($\theta = 90^\circ, 45^\circ$) 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.

1. 서론

원통 내에서 회전하는 유체의 유동은 다양한 유동의 형태를 보이므로 고전 연구 대상이 되어 왔으며, 응용분야에 적용되어 중요한 정보를 제공해 준다. 1890년 Couette⁽¹⁾는 고정된 외부원통과 일정하게 회전하는 내부원통과의 사이에서 비압축성 점성유동에 대한 회전원통을 푸는 수학적인 근거를 제시하였으나 이 유동은 1923년에 G. I.

Taylor⁽²⁾의 고전적 논문에서 제시된 바 있듯이 내부 원통의 비교적 낮은 회전속도에서 불안정해 그 사이의 유동에서 테일러 와류(Taylor vortex flow)이 형성되는 결과를 보인 바 있다. 밀폐된 원통내에서 두 끝단의 원판이 서로 반대 방향으로 회전함에 따른 유동의 변화 형태가 관찰⁽³⁾된 바 있으며 유압베인펌프 내부 회전체에서 작동 유체인 기름의 유동 형태⁽⁴⁾를 살펴보기도 하였다. 그리고 원통내부에서 회전체의 형상이 유동에 미치는 영향을 혼합효과 측면에서 수치 해석적으로⁽⁵⁾ 고찰하기도 하였다. 교반기(agitator)는 그 사용 목적에 따라 임펠러에 부착되는 날개의 형상이 다양하다. 반경방향 유동 임펠러(radial flow impeller)는 수직봉에 두 개 또는 네 개의 임펠러 날

* 회원, 전남대학교 대학원

** 회원, 전남대학교 기계공학과

개가 부착되어 유체의 흐름은 반경방향으로 흘러 원통의 벽면으로 흘러간다. 이것은 큰 전단력을 발생하여 원통 내부의 기포(bubble)를 제거하고 산소 이송율(oxygen transfer rate)을 증가시키기 때문에 호기성 세균 배양에 사용된다. 그러나 혼합 효과 측면에서는 축방향 유동 임펠러(axial flow impeller)에 미치지 못한다. 이것은 임펠러의 날개가 특정 각도로 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(crystallization), 침전 반응(precipitation reaction)과 같은 진행과정에 적용된다.

본 실험 연구에서는 밀폐된 원통에서 윗판과 윗판에 부착된 봉(rod)에 임펠러나 회전판(disk)이 부착되어 동시에 고속 회전하는 경우에 대하여 분석하였다. 원통의 반경을 R 라 할 때 봉의 길이(L)를 R , $1.5R$ 로 고정하고 임펠러와 아래 원판의 반경을 $0.25R$ 로 제작, 설치하였다. 이들의 효과를 비교, 분석하기 위하여 LDV를 이용하여 측정하므로써 단순히 윗판만 회전하는 경우(lid-driven)와 1:2 경사진 봉(tilt bar)인 두가지 실험 결과⁽⁶⁾와 비교하여 원통 실린더내의 유체내의 혼합효과 및 난류 유동의 특성을 고찰하였다.

본 실험에서는 반경방향 유동 임펠러의 대표적인 것으로 90° 임펠러를, 축방향 유동 임펠러는 45° 기울어진 임펠러로 제한하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 1에서는 본 연구에서 사용된 2차원 속도 측정용 LDV 실험장치의 전체적인 구성도를 나타내었다. 본 실험에서는 실린더 내부에 회전 유동을 형성하기 위해 실린더 원판을 회전시켜 전단 응력을 공급하였다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 직경 20 cm, 높이 20 cm의 아크릴 실린더를 실험시편으로 제작하여 다양한 형상의 임펠러(90° , 45°)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.

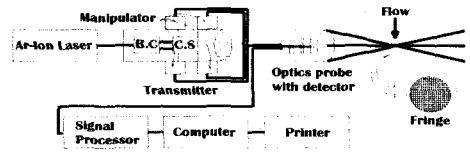


Fig. 1 Schematic diagram of 2-D LDV system

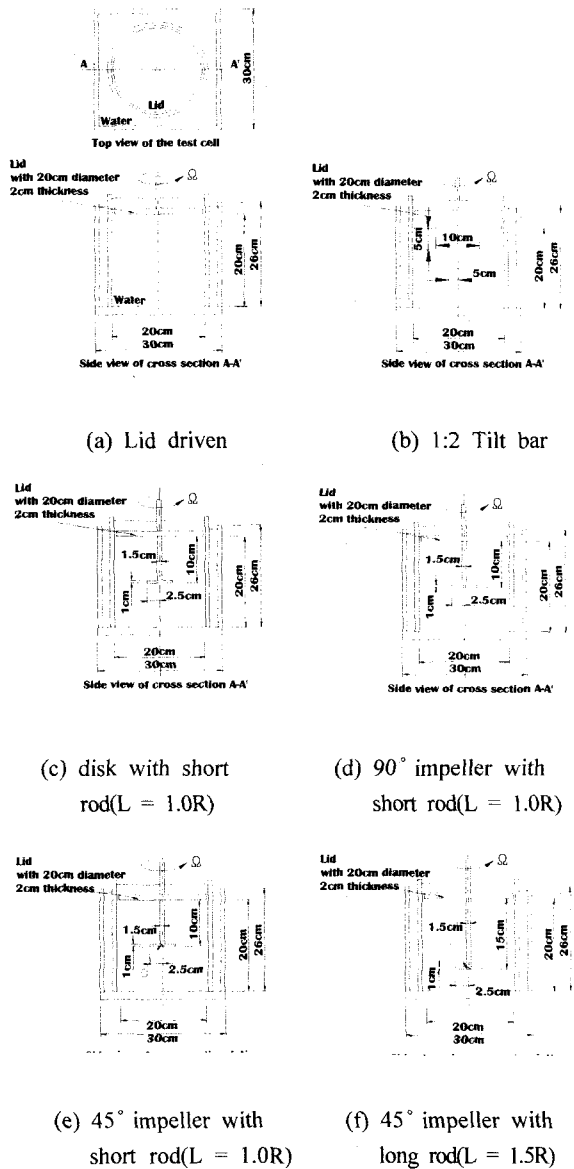


Fig. 2 Geometry of test sections

2.2 실험방법

본 연구에서 실험 장비를 구축하는 방법과 실험과정은 다음과 같다.

원통 내부에 실린더 원판이 잠길 정도로 적당히 물을 채워넣고 실린더 바깥 부분의 사각수조 사이의 공간에도 물을 채워 넣어 레이저 beam이 유체를 통과하며 발생하는 굴절과 지나친 산란을 최소화하였고, 또한 beam이 투과하는 면을 제외한 나머지 세 면에 검정색 셀룰로오지를 부착하여 실험시편을 구성하였다.

물이 채워진 원통 내부에 산란 입자(conifer pollen, 5 ~ 10 μm)를 넣고 작동유체인 물과 골고루 섞이도록 막대를 이용하여 저어준다. 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, $\text{Re} = \rho R^2 \Omega / \mu = 2.1 \times 10^5$)를 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 가정한다.

레이저 발생기를 가동시키기 전 레이저의 냉각수를 최소 10 liters/min 정도의 유량으로 약 10 분간 순환시킨 후 10 Watts 아르곤 이온 레이저(Argon Ion Laser)를 켜다. 레이저 beam이 발생되면 강도를 1 Watts로 조절한다. 다음 이송장치를 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 계측시 데이터의 유효 샘플 개수는 beam에 의해 형성된 초점(fringe)을 지나가는 모든 샘플 개수의 70 ~ 80 % 이상으로 유지한다.

측정 데이터는 후처리 Tecplot을 이용하여 평균 속도와 선회류 속도 및 난류 강도 등의 정보를 얻는다.

3. 실험결과 및 고찰

밀폐된 실린더 내에서 단순 원판이 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 보여준 것과 같이 반경 방향의 속도에 비해 아주 큰 원주 방향의 속도 분포가 뚜껑이나 바닥에서 어느 정도 떨어진 거의 모든 축방향 위치에서 거의 일정한 속도분포를 보이면서 이차유동장의 주류가 벽면으로 밀려 형성되고 있음을 보여준다. 따라서 바닥 부근에서 축을 향한 반경방향의 유동이 축 중심 부근까지 침투하지 못하고 바로 벽 부근에서 상승하고 있음을 볼 수 있다.

다음 Fig. 3(b)에서 보는 것처럼 1:2 경사진 봉(tilt bar)의 회전에 의해 생성된 유동장은 뚜껑회전(Lid driven)인 경우에 비해 주류가 보다 넓은 영역에 걸쳐 형성되고 있음을 볼 수가 있다. 이 경우의 원주 방향 속도 분포는 Fig. 4(b)에 나타내었다.

다음으로 Fig. 3(c)에서 길이가 1.0R인 봉의 끝에 반경이 0.25R인 회전판(disk)이 부착된 경우이다. 원통내의 윗 원판이 회전시 $r/R = 0.75$ 인 부근에서 벽부근을 타고 내려오는 하강유동이 이 부분에서 이차 유동이 활성화되어 상승유동을 보임을 알 수 있다. 또한 회전판의 영향으로 축방향으로 유동이 상승하여 윗 원판에 의한 원심력에 의해 다시 하강 유동을 보임을 알 수 있다. 이 경우 밑면으로부터 $x/R = 0.05, 0.25, 0.5, 1.0, 1.25, 1.95$ 에서 원주 속도가 Fig. 4(c)에 나타나 있다. 여기서 보면 알 수 있듯이 $x/R=1.95$ 인 경우에 가장 큰 속도 분포를 나타내어 윗 원판의 점성에 의한 원심력의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. $x/R = 1.0$ 인 부근에서 회전판에 의한 속도는 원판의 상단부분보다 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다. 그리고 이 원주 속도는 벽면쪽으로 갈수록 감소함을 볼 수 있다.

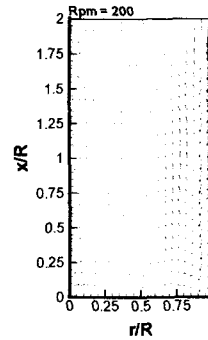
다음 Fig. 3(d)는 짧은 봉에 반경방향 유동 임펠러($\theta = 90^\circ$)가 부착되어 함께 회전하는 경우이다. 이 경우 이차 유동이 임펠러에 의해 끌어당겨지듯이 윗 판으로 상승하여감을 알 수 있다. 전체적인 흐름이 임펠러가 없는 경우에 비해 봉의 주변에서 더 큰 반경 방향의 유동의 영향을

관찰할 수 있으며 이러한 유동은 이차 유동의 상승유동과 합쳐져 윗 원판의상단 부분에서 강한 흐름을 보여주고 있고 전체적으로 봉과 임펠러의 원심력에 의한 상승유동이 윗판에 의해 벽면으로 밀려 내려감을 볼 수 있다. Fig. 4(d)에서는 이 경우의 원주 속도가 나타나 있다. 단순히 회전판(disk)이 회전하는 경우와 비교해 볼 때 임펠러가 있는 부근($L/R = 1.0$)에서 윗 원판으로 접근해 갈수록 속도 분포가 크게 증가함을 나타내고 있다. 또한 임펠러 하단 부분과 상단 부분의 속도가 크게 차이가 있음을 보여주고 있다. 이것은 90° 임펠러가 원통내의 물을 벽면으로 쳐내듯이 밀어내며 작용하는 원심력에 의해 원주 방향으로의 속도에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

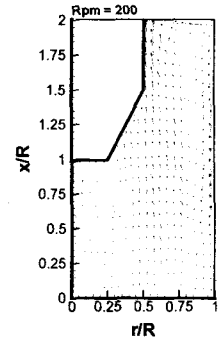
다음은 축방향 유동 임펠러($\theta = 45^\circ$)가 회전하고 봉의 길이가 짧은 경우($L = 1.0R$)가 Fig. 4(e)에 나타나 있다. 축방향으로 기울어진 임펠러에 의해 유동은 다른 경우와 비교해서 축방향으로의 상승 유동이 크게 나타나 있음을 알 수 있다. 이것은 유체가 원통의 바닥면으로 분산되어 밀어내는 (pumping) 효과에 의해 Fig. 3(c)와 3(d)보다 혼합의 효과가 더 뛰어난 것을 볼 수 있다. 임펠러 끝에서 발생하는 와동의 영향을 감소시켜 원통의 전 영역에 걸쳐 유체가 고루 분산되어 있음을 알 수 있다. Fig. 4(e)에서는 임펠러가 위치되어 있는 지점을 경계로 원주 속도의 분포를 볼 수 있다. 특히 $x/R = 1.95$ 에서는 벽면으로 진행되어 갈수록 다소 증가하다가 감소해가는 형태를 보였다.

Fig. 3(f)는 Fig. 3(e)인 경우에서 봉의 길이만 길게($L = 1.5R$) 변경시켜 본 결과이다. 이 경우도 역시 축방향으로의 유동이 회전판이나 다른 경우에 비해서 다소 크게 나타나는 결과를 보였지만 3(e)에서와 같은 임펠러에 의한 밀어내는 (pumping) 작용이 다소 둔화되어 보임을 알 수 있었다. Fig. 4(f)에서는 원주 속도가 임펠러의 위치를 기준으로 Fig. 4(e)와 비슷하게 분포되어 있음을 알 수 있었다.

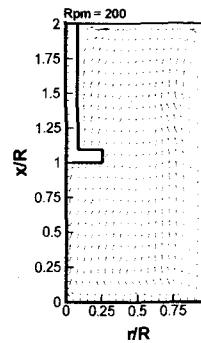
지금까지의 결과를 살펴보면 90° 임펠러나 회전판의 전영역에서의 유동은 다소 활성화된 반면 전체적인 유동장이 약 $r/R = 0.75$ 의 위치에서 부분적으로 주류가 나누어짐을 볼 수 있다. 그러나 45° 로 기울어진 임펠러의 경우에는 반경방향으로 크게 작용하는 임펠러와는 달리 축방향으로 유체를 원통의 내부에 끌고루 분산시켜 전체적인



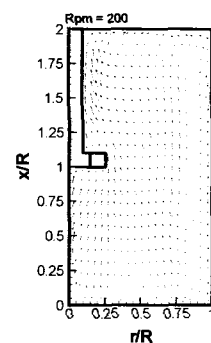
(a) lid driven



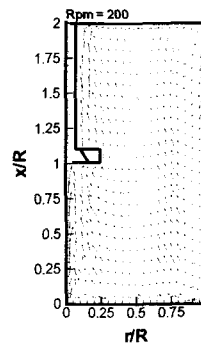
(b) 1:2 tilt bar



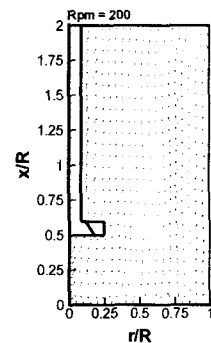
(c) disk with short rod($L = 1.0R$)



(d) 90° impeller with short rod($L = 1.0R$)

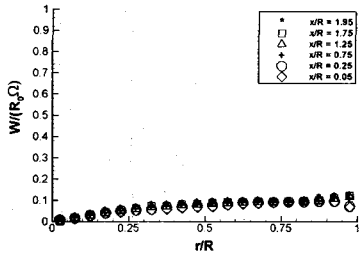


(e) 45° impeller with short rod($L = 1.0R$)

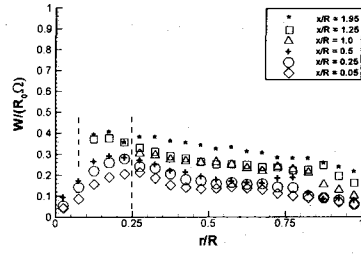


(f) 45° impeller with long rod($L = 1.5R$)

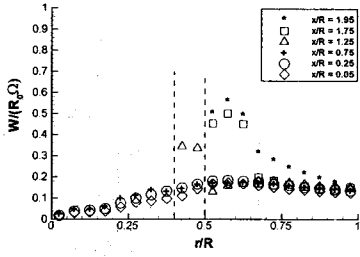
Fig. 3 Vector plots of secondary flows



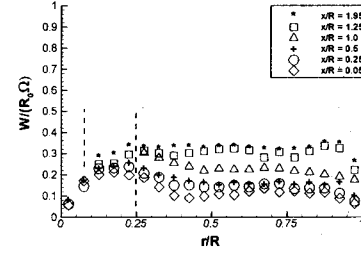
(a) lid driven



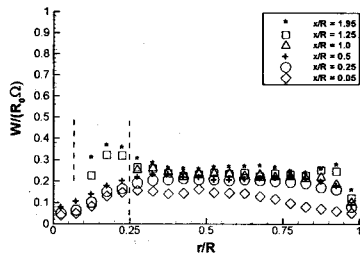
(d) 90° impeller with short rod(L = 1.0R)



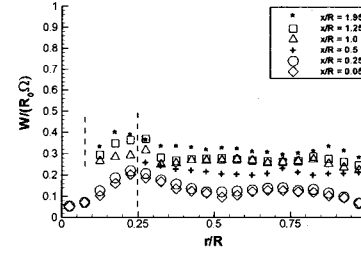
(b) 1:2 tilt bar



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



(c) disk with short rod(L = 1.0R)

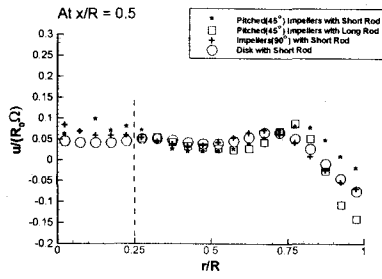


(f) 45° impeller with long rod(L = 1.5R)

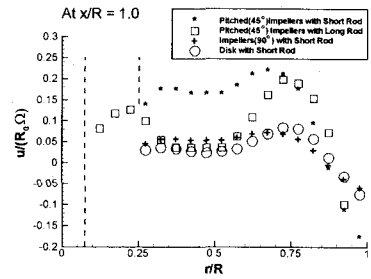
Fig. 4 Swirl velocity profiles

혼합효과가 크게 나타날 것을 확인 할 수 있었지만 봉의 길이가 길어질수록 이 효과는 다소 둔화됨을 알 수 있었다. 이 때의 축방향의 속도 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 이차 유동에서 주 유동 성분인 축방향 유동에 대한 난류 강도를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 단순히 윗 원판이 회전하는 경우와 1:2 경사 진봉(tilt bar)에 비해서 $L/R = 1.0$ 인 경우 90°

임펠러가 있는 경우가 봉(rod)과 임펠러의 부분적인 영역에 걸쳐서 난류강도가 높게 나타나고 있음을 볼 수 있고 윗 원판만 회전(lid driven)하는 경우 반경방향 성분이 축방향 성분으로 바뀌게 되는 원판 가장 자리에서 비교적 높은 강도를 보인다. 이에 비해서 단순히 회전판(disk)이 회전하는 경우에는 벽면에서 하강 유동과 어느정도 떨어진 부근에서의 하강 유동이 형성되는 유동의

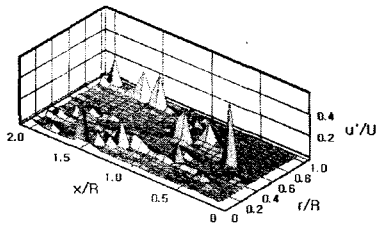


(a) At $x/R = 0.5$

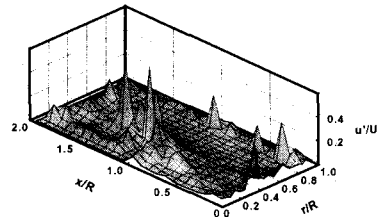


(b) At $x/R = 1.0$

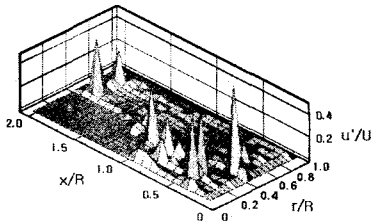
Fig. 5 Axial velocity profiles



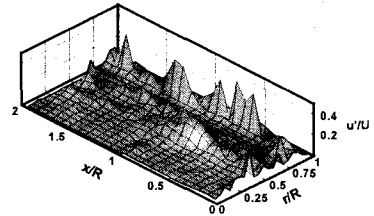
(a) Lid driven



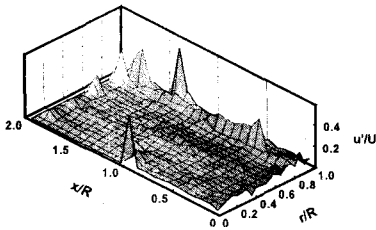
(d) 90° impeller with short rod ($L = 1.0R$)



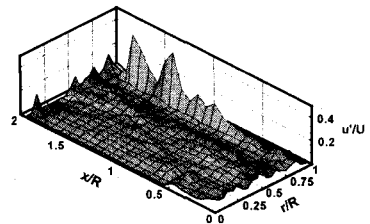
(b) 1:2 tilt bar



(e) 45° impeller with short rod ($L = 1.0R$)



(c) disk with short rod ($L = 1.0R$)



(f) 45° impeller with long rod ($L = 1.5R$)

Fig. 6 Turbulent intensity

중양부분을 포함하여 벽면과 회전판이 있는 영역에 걸쳐 난류강도가 크게 분포를 하고 있음을 알 수 있다. 45° 임펠러에서는 축방향으로 상승하는 유동의 영향으로 봉과 벽면에서 난류강도가 크게 분포를 하였지만 전영역에 걸쳐서 골고루 분산되어 있는 형태를 보였으며 특히 임펠러의 끝에서 와동(eddy)의 생성이 둔화되어 낮은 전단응력을 보여 주었다.

4. 결론

본 연구는 밀폐된 원통에서 봉의 길이에 따라서 임펠러와 작은 회전 원판(disk)이 회전함에 따른 유동 특성을 측정함으로써 본 실험 결과에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 회전판(disk)이 봉에 매달려 회전하는 경우에는 봉(rod)이 짧은 경우 회전 원판의 기하학적인 형상과 유동에 대한 영향력은 적어져 전체적으로 원활한 큰 유동장을 보이며 유체가 이차 유동의 큰 방해없이 골고루 섞이는 효과를 보이며 실린더 내부의 부분적인 영역에 걸쳐 난류강도가 크게 나타난다.

(2) 반면에 90°로 기울어진 임펠러가 회전하는 경우에는 봉과 임펠러의 부근에서 큰 운동량을 전달하여 이차 유동이 회전판인 경우에 비해 훨씬 크게 발달하지만 임펠러 근처의 부분적인 영역에 한해서 난류강도가 높게 나타나어 혼합효과의 측면에서 보면 바람직하지 않을 것으로 판단된다.

(3) 1:2 경사진 봉(tilt bar)과 단순히 회전판(disk)이 회전하는 경우를 비교하면 경사진 봉에서는 원통의 벽면과 봉(bar)사이에서의 부분적인 이차 유동이 크게 형성되었지만 회전판인 경우에는 $x/R = 0.75$ 인 부근에서 주류의 상승유동을 보이면서 윗 원판의 회전력에 의해 바깥으로 밀려나가는 유동의 영향으로 전 영역에 걸쳐 원활한 회전을 함을 확인할 수 있었다.

(4) 45°로 기울어진 임펠러인 경우에는 축방향으로의 유동의 흐름이 크게 분포되어 임펠러의 끝에서 발생하는 와동을 감소시키면서 낮은 전단응력을 보이면서 90°로 기울어진 임펠러와 비교해서 더 좋은 혼합효과의 한 면을 보여 주었다. 또한 봉의 길이가 길어질수록 임펠러에 의한 축방향으로의 유동의 효과는 다소 둔화되어짐을 알

수 있었다.

위의 결과를 종합적으로 고찰해 보면 반경 방향으로 기울어진 임펠러나 회전판에 비해 축방향으로 기울어진 임펠러가 효율적인 유동의 흐름을 보여주었다. 반경 방향으로 기울어진 임펠러에 의한 회전은 복잡한 유동을 보이며 임펠러 부근에서의 운동량 전달이 크게 나타나며 봉의 길이에 따라 다른 난류강도를 보이긴 했지만 이것은 국부적인 혼합효과에 향상되었지만 전체적인 혼합효과의 측면에서 보면 좋은 결과를 보기는 힘들 것으로 보인다.

이와 같이 본 실험에서 나타난 봉(rod)의 길이와 임펠러와 회전판(disk)에 따른 유동 특성이 전체적인 혼합효과를 증가시키는 데에 있어서 기본적인 참고 자료로 이용될 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- (1) Frank M. White, 1995, *Fluid Mechanics*, McGRAW-HILL, 3rd., pp. 279~282.
- (2) G. I. Taylor, 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*, Vol. 107, pp. 92~96.
- (4) J. H. Kim, J. Y. Jung, 1990, "The Dynamic Behavior of Internal Rotating Slider of Oil Hydraulic Pump," *한국윤활학회*, Vol. 6, No. 2.
- (5) 김유곤, 최진우, 1997, "축대칭 난류 회전유동에 대한 수치해석," *대한기계학회*, '97년도 추계 학술대회논문집 B, 97F276, pp. 570~575.
- (6) 김유곤, 김동규, 2001, "원통내 회전유동에서 회전봉의 형상이 혼합효과에 미치는 영향에 관한 실험적 연구," *대한기계학회*, '01년도 대한기계학회논문집 B, 제 25권, 5호, pp. 156~163.
- (7) You-Gon Kim, 1995, "Digital Vector Image Processing of Lid - Driven Rotating Cavity Flow," *KSME*, Vol. 9, No. 2, pp. 187~196.