

수평원통관에서 선회유동의 난동속도에 관한 실험적 연구

장태현[†] · 김희영^{*}

An Experimental Study on Swirl Fluctuation Velocity in a Horizontal Circular Tube

Tae-Hyun Chang[†] and Hee-Young Kim^{*}

Abstract. During the past five decades or so, the characteristics of turbulent swirling flow have been studied extensively because of its great technological and scientific importance. It is well known that the swirling flow improves heat transfer in duct flow. The reason for this is due to the effect of streamline curvature associated with the tangential velocity component. Although many studies have been carried out to investigate the characteristics of the swirling flow in a circular tube. The experimental methods for measuring the velocity components are by hot-wire or LDV (Laser-Doppler-Velocimetry) measuring single point velocity so far. The present study was aimed to analyse the flow characteristics of swirling flow such as time-mean velocity vector, local velocity turbulence intensity and turbulence kinetic energy by using PIV(Particle-Image Velocimetry). The experiment was carried out for four Reynold numbers 1.0×10^4 , 1.5×10^4 , 2.0×10^4 and 2.5×10^4 of the measuring area.

Key Words : turbulence intensity(난류강도), turbulence kinetic energy(난류운동에너지), fluctuating velocity(난동속도), recirculation zone(재순환 영역)

Nomenclature

C_{fg} : Cross correction coefficients
 D : Diameter of the test tube (mm)
 f_i : Gray levels of the pixels within the correlation region in the first image
 \bar{f}_i : Mean gray levels of the pixels within the correlation region in the first image
 g_i : Gray levels of the pixels within the correlation region in the second image
 \bar{g}_i : Mean Gray levels of the pixels within the correlation region in the second image
 R : Radius of curvature (mm)
 Re : Reynolds number
 t : Time (s)

T : Measuring time (s)
 u' : Axial velocity fluctuation (m/s)
 \bar{u} : Mean axial velocity (m/s)
 U : Local mean axial velocity(m/s)
 \bar{U} : Mean axial velocity (m/s)
 v : Local radial velocity (m/s)
 v' : Local radial velocity fluctuation (m/s)
 \bar{v} : Mean local radial velocity (m/s)
 X : Length of the swirl generator in the swirl chamber (mm)
 y : Radial distance from the tube wall (mm)

Greek Letter

θ : Angle of 90° bend (°)
 ρ : Density of water (kg/m³)
 τ : Reynolds shear stress (N/m²)

[†]경남대학교 기계자동화공학부

E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr

^{*}경남대학교 대학원 기계공학과

**저자 2의 소속

1. 서 론

화석 에너지의 고갈 문제가 대두되면서 에너지의 효율적인 이용이 날로 강조되고 있다. 열교환기 내에서 열전달율을 증가시키기 위하여 전열면에 나선형의 표면이나, 너클면, 인공적인 거칠기, 와이어 코일 등을 만들어 전열면적을 증가시킴으로써 열전달 계수를 증가시킬 수 있었다.

유체역학적인 방법으로 굽은 유선 혹은 선회유동 (swirling flow)을 이용함으로써 가열된 벽면으로부터 유체에 보다 많은 에너지를 이동시킬 수 있다.

선회유동을 이용한 열전달에 대한 연구로서 Smithberg 등⁽¹⁾은 물과 공기를 매질로 하여 비틀림 테입을 사용하여 선회를 발생시키고 속도분포와 관마찰 계수 그리고 열전달특성을 실험과 해석적인 방법으로 연구하였다.

선회유동에 대한 초기연구로 Talbot⁽²⁾는 층류 선회유동에서 선회방정식을 유도하였고, Binne 등⁽³⁾과 Robert 등⁽⁴⁾은 공기와 물에 색소를 주입 하여 테스트 튜브의 중앙부에 축방향속도가 역류됨을 관찰하였다.

Chigier 등⁽⁵⁾은 오공 피토크관을 사용하여 $Re=60,000 \sim 70,000$ 에서 공기의 축방향속도와 정압을 측정하였다. 1960대부터 열선풍속계를 사용하기 시작하여, Rose⁽⁶⁾, Robert⁽⁴⁾, Wolf⁽⁷⁾ 그리고 Weske⁽⁸⁾ 등은 공기나 물에서 축방향속도, 반경방향속도와 난류응력 등을 측정하였다. 1980대에서부터 Habib⁽⁹⁾, Sislian⁽¹⁰⁾ 그리고 Komori 등⁽¹¹⁾이 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 사용하여 속도성분과 난류속도를 측정하였다.

이와 같이 많은 연구자가 피토크관이나 열선풍속계, LDV 등을 이용하여 선회유동의 특성에 관하여 연구하였지만, 특정한 한 위치의 점측정에 불과하였고, 계측장비의 사용상 많은 시간이 소요되었다. 특히 열선풍속계나 LDV를 사용하는 경우 관벽 근처에서 정확한 속도분포를 측정하기 어려웠다. 최근 PIV(Particle Image Velocimetry) 기법이 활성화되면서 선회유동에도 이 기법을 사용하여, 저자 등은 이미 참고문헌⁽¹²⁾에서 수평원통관의 평균속도와 일부 난류강도를 발표한 바 있다.

본 연구에서는 15°C정도의 증류수를 유체로 하여 2차원 PIV기법을 이용하여 수평 원통관에서 시간평균 속도분포, 난류강도 그리고 운동에너지 등을 구하

여 선회유동 및 비선회유동에 대하여 상호 비교 연구하고자한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치이다. 실험장치의 전체적인 길이와 직경은 각각 $3000 \text{ mm} \times \phi 50 \text{ mm}$ 로 아크릴 원관을 사용하여 제작하였다. 또한, 측정부위인 테스트 튜브의 내·외부의 매질(물과 공기)이 다르므로 빛의 굴절을 방지하기 위하여 테스트 튜브 외부에 $200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 의 아크릴 제품으로 사각박스를 설치하여 내부에 물을 채워 실험하였다. 테스트 튜브 입구에는 Fig. 2의 선회발생기를 설치하였고, 이 선회발생기는 약 140 mm의 아크릴 파이프의 외부에서 22.75° 간격으로 $\phi 3.2 \text{ mm}$ 의 구멍을 접선방향으로 뚫어서 제작하였고, 유체는 펌프의 흡입에 의하여 접선방향으로 유입되어 선회발생기 내에서 원주방향으로 돌면서 유동하도록 제작하였다. 증류수 탱크에서 공급된 물은 선회발생기, 테스트 튜브, 연결호스 그리고 3.75 kW의 순환수 펌프를 통하여 다시 재순환되도록 설치하였다. Reynolds수 조절은 순환수 펌프의 rpm 조절기를 사용하였다

2.2 PIV 시스템

Fig. 3은 본 연구에 사용된 PIV 시스템을 나타낸다. 광원으로는 500 mW Ar-ion 레이저를 사용하였다. 광원의 이동을 용이하게 하기 위하여 광케이블로 빛

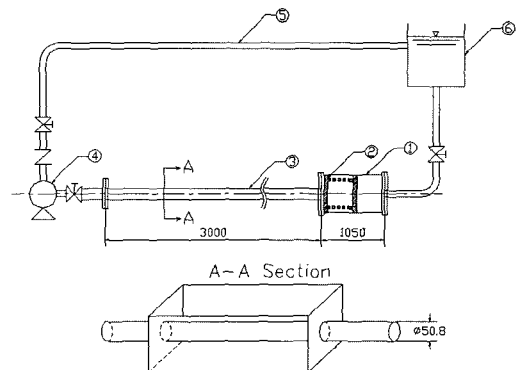


Fig. 1. Experimental Apparatus. ① swirl chamber, ② swirl generator, ③ test tube, ④ water pump, ⑤ flexible hose, ⑥ water tank.

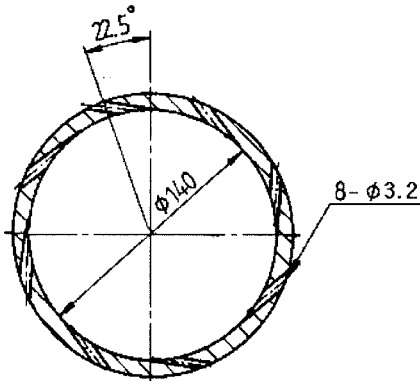


Fig. 2. Cross-sectional views through the swirl generator.

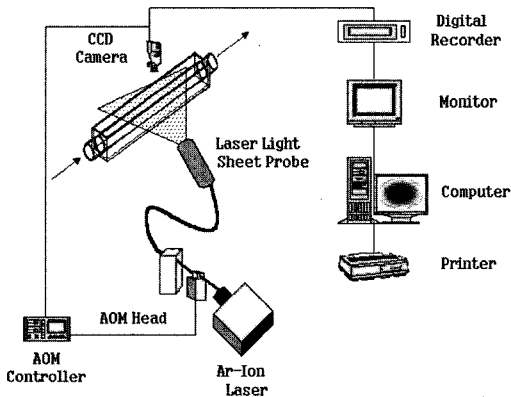


Fig. 3. Schematic arrangement of the PIV system.

을 이동시킬 수 있는 LLSP(Laser light sheet probe)를 사용하였다. 또한, 펄스화된 광원을 얻기 위하여 AOM(Acoustic Optical Modulator)를 사용했다. 유동장의 데이터를 획득을 위해서 1초에 30장의 이미지를 획득할 수 있는 Parasonic 사의 CCD(Charge couple device) 카메라 WV3p310을 사용했다. 영상기록을 위해 디지털 레코가 사용되었고, 획득한 이미지를 컴퓨터로 0에서 255단계의 그레이(Gray) 레벨로 전송하는 보드(DT3155)를 사용했다.

실험에 사용된 작업유체는 증류수(15°C)이고, 사용된 입자는 고체인 나일론 12(비중 1.02, 입자의 크기 50 μm)이다. 입자의 크기가 다소 크지만 선회유동의 경우 빠른 접선 방향속도를 감안하여 이 제품을 사용하였다. 고체 입자의 경우 빛에 쉽게 반응해 실험이 용이하고, 직진성이 잘 확보된다. 나일론 입자가 정전기로 인해 관 벽에 부착되는 것을 방지하고 또한 물

Table 1. Experimental conditions

Items	Specifications
Image Grabber	DT3155(640x480)
Light Source	500mW Ar-ion Laser
Particle Seed	Nylon 12(50 μm)
Working Fluid	Distilled Water
Flow Regulator	RPM Controller
Host Computer	Pentium PC
Calculation Time	3 min. (one frame)
Image Capture	CCD Camera, Digital Record
PIV Algorithm	Two-frame Grey-Level Cross Correlation

에 골고루 잘 섞일 수 있도록 소량의 계면활성제를 물에 첨가하였다. Table 1은 PIV 시스템의 제원을 나타내고 있다. 작업유체는 상온의 증류수를 사용하였으며 순환 펌프를 이용하여 증류수를 테스트튜브 내에 공급하였다. 또한 rpm 조절기를 설치하여 Reynold수의 변경이 가능하도록 실험장치를 제작하였다.

3. 실험결과 고찰

3.1 속도 벡터

각 격자점 상에서의 시간평균 속도는 식 (1)과 같이 변동속도성분은 식 (2)으로 표시할 수 있다.

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt, \quad \bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt \quad (1)$$

$$u' = u - \bar{u}, \quad v' = v - \bar{v} \quad (2)$$

Fig. 4~Fig. 7은 Re=10,000~25,000에서 테스트 튜브 내의 선회유동의 시간 평균 속도분포를 나타내고 있다. X/D=10, 즉 테스트 튜브 입구 근처에서는 관 중심 부분에서 강 선회현상인 음의 벡터를 나타내고 관을 따라 유동하면서 선회강도의 감소에 따라 음의 값이 감소하고 있음을 나타내고 있다. 이 속도벡터는 X/D가 증가할수록 선회가 테스트 튜브를 따라 소멸되는 현상을 나타내었고, 레이놀즈 수가 증가할수록 관중심부에서 강한 음의 속도벡터를 나타내고, 관벽 근처에서는 접선방향속도의 영향으로 강한 양의 속도 벡터를 나타내었다.

3.2 평균속도 분포

Fig. 8은 비선회유동인 경우 Re=10,000과 20,000

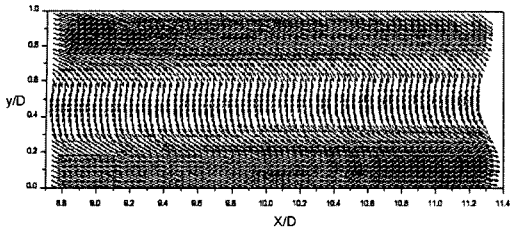


Fig. 4. Time-mean velocity distribution with swirl for $Re=10,000$ at $X/D=10$.

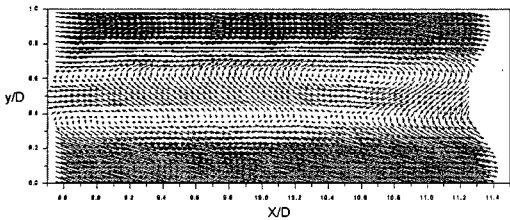


Fig. 5. Time-mean velocity distribution with swirl for $Re=15,000$ at $X/D=10$.

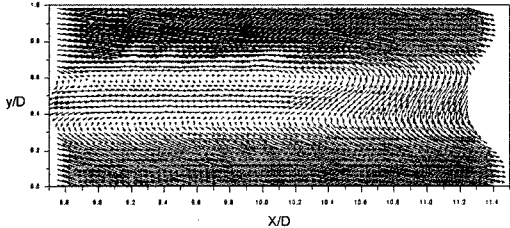


Fig. 6. Time-mean velocity distribution with swirl for $Re=20,000$ at $X/D=10$.

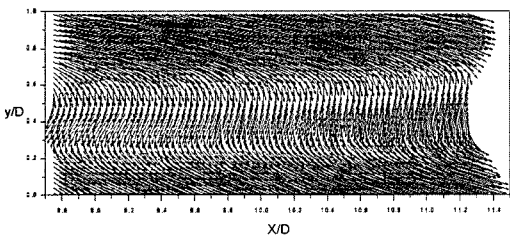


Fig. 7. Time-mean velocity distribution with swirl for $Re=25,000$ at $X/D=10$.

에서의 국소축방향속도를 $X/D=30$ 에서 나타내고 있다. $Re=10,000$ 의 경우는 포물선 형태를 나타내었고, $Re=20,000$ 에서는 난류유동의 기본 형태를 나타내고 있다. $Re=10,000$ 의 경우는 $X/D=30$ 에서 특정한 값으로 난류운동 분포에서 점차 포물선 형태로 변화하는

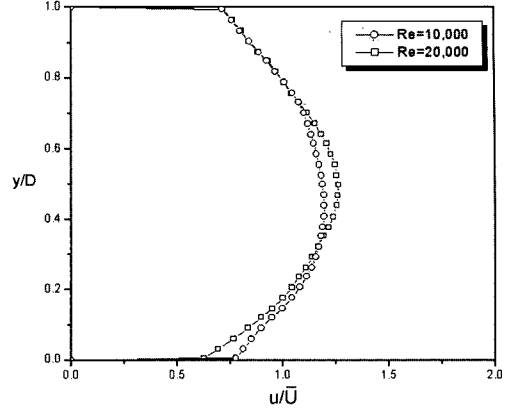


Fig. 8. Axial velocity profile with non-swirl at $X/D=30$

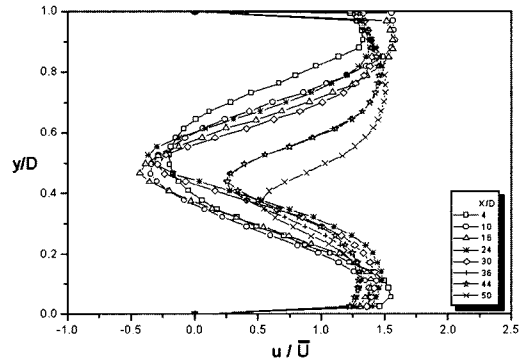


Fig. 9. Axial velocity profile with swirl for $Re=20,000$ along the test tube.

과정을 보여주고 있다.

Fig. 9는 선회유동의 경우 $Re=20,000$ 에서 축방향 속도를 $X/D=10\sim 50$ 의 범위에 걸쳐 나타내고 있다. u/\bar{U} 가 관 중심에서 -0.5 정도이고, 관 벽 부근에서는 1.6 정도를 보이고 있다. $X/D=44$ 근처에서는 음(-)의 속도가 점차 소멸되어서 양(+)의 값을 나타내고 있다. 이 현상은 레이놀즈 수가 낮을수록 큰 감소를 나타내고 레이놀즈 수가 클수록 그 감소 폭이 줄어들는다. 이러한 현상은 접선방향 속도에 기인한 선회강도의 영향에 따른 것으로 생각된다. 이와 같은 결과는 지금까지 열선풍속계나, LDV를 사용한 연구 결과와 잘 부합함을 알 수 있다.

3.3 난류강도

각 격자점에서 순간 난류강도(turbulence intensity)는 식 (1)과 식 (2)로부터 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$T, I = \sqrt{\frac{(u'^2 + v'^2)}{2}} \quad (3)$$

Fig. 10과 Fig. 11은 Re=10,000과 20,000에서 비선 회유동의 주유동방향 난류강도를 X/D=30에서 나타 내고 있다. 지금까지 발표된 결과와 같이 양 벽 근처 에서 최대값을 나타내고 테스트 튜브 중심에서 최소 값을 보이고 있다.

Fig. 12~Fig. 15은 선회유동에 대하여 Re=10,000, 15,000, 20,000 그리고 25,000에서 주유동방향 난류 강도를 나타내고 있다.

Fig. 12은 Re=10,000에서 난류강도를 X/D=10에서 나타내고 있다. 특이한 현상은 테스트 튜브 입구에서 3-셀(Cell)을 보이고 있고, 관벽근처에서는 그 값이 최 소로 나타나고 있다. 이 것은 강선회유동에서 나타나 는 현상으로 테스트 튜브 입구에서는 3-셀을 보이지만 그 강도는 약하고, 테스트 튜브를 따라가면서 2-셀로 바뀌고 있다.

Fig. 13은 Re=15,000의 경우 난류강도를 나타내고 있다. Re=10,000와는 달리 강한 2-셀 현상을 보이 다. 점차 소멸되는 현상을 보이고 있다. 반면 Re= 20,000에서 난류강도는 1-셀에 가까운 강한 2-셀을

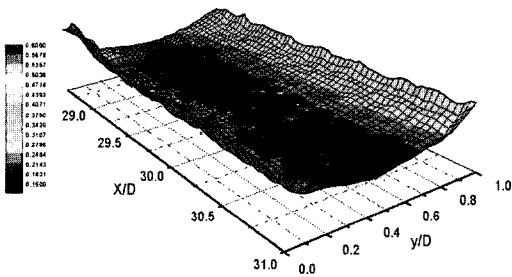


Fig. 10. Contours of turbulent intensity with non-swirling flow for Re=10,000 at X/D=30.

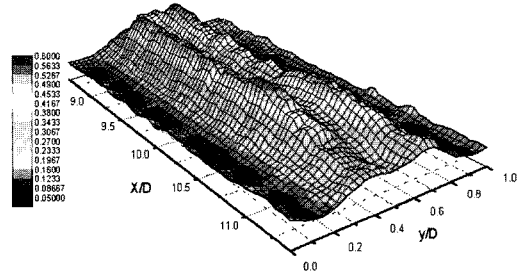


Fig. 13. Contours of turbulent intensity with swirling flow for Re=15,000 at X/D=10.

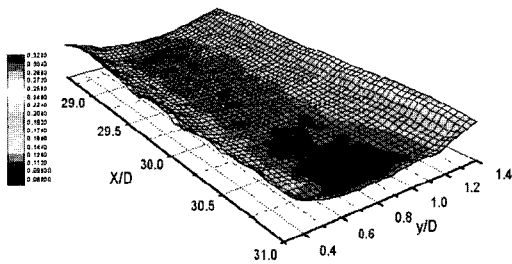


Fig. 11. Contours of turbulent intensity with non-swirling flow for Re=20,000 at X/D=30.

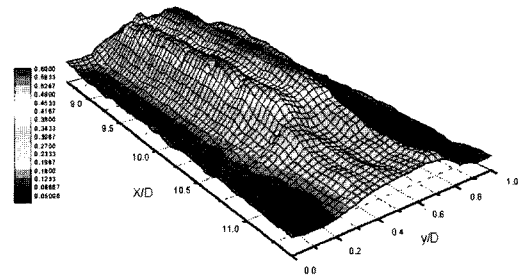


Fig. 14. Contours of turbulent intensity with swirling flow for Re=20,000 at X/D=10.

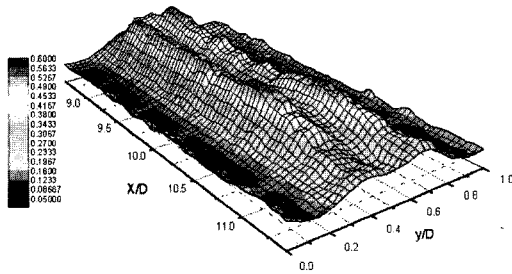


Fig. 12. Contours of turbulent intensity with swirling flow for Re=10,000 at X/D=10.

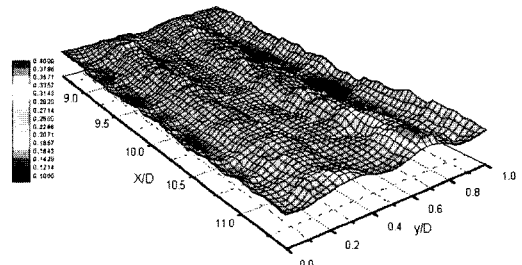


Fig. 15. Contours of turbulence intensity with swirling flow for Re=25,000 at X/D=10.

나타내다 테스트 튜브를 따라 점차 소멸되고 있다.

Fig. 15은 $Re=25,000$ 에서 난류강도를 나타내고 있다. 앞의 세 경우와는 달리 2-셀을 보이지만 그 강도는 약하게 나타난다. 그러나 셀 간의 간격이 넓고 관벽 근처에서 난류강도는 전자들보다 강하게 나타났다. 이 현상은 레이놀즈 수가 증가하면서 선회강도 역시 증가하여 테스트 튜브내에서 재순환 영역(recirculation zone)이 확산되는 결과로 생각된다.

Fig. 16은 비 선회유동의 국소 난류강도를 $Re=10,000$ 과 $20,000$ 에서 나타내고 있다.

지금까지 발표된 연구 결과와 유사하게 관 중심에서 최소값을 나타내고 관벽 근처에서 최대 값을 보이고 있다.

Fig. 12~Fig. 15의 결과로부터 Fig. 17~Fig. 20의 국소 난류강도를 계산하였다.

Fig. 17은 $Re=10,000$ 에서 국소 난류강도를 나타낸다. 주유동 난류강도 분포에서의 같이 $X/D=10$ 에서는

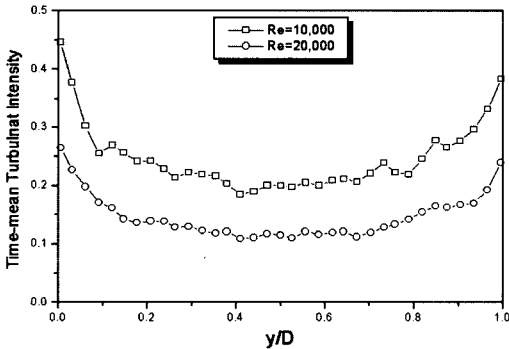


Fig. 16. Time mean turbulent intensity with non-swirl at $X/D=30$.

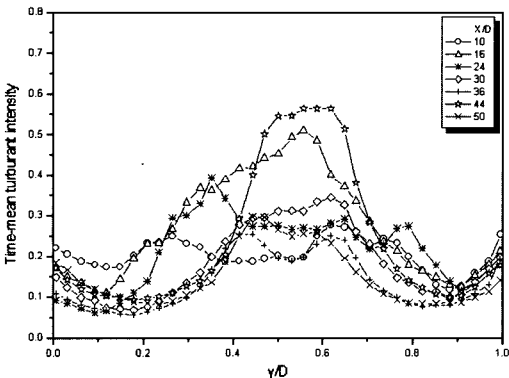


Fig. 17. Time-mean turbulent intensity profile in $Re = 10,000$ for swirling flow.

약한 3-셀을 보이지만, 테스트 튜브를 따라 선회강도가 소멸되면서 2-셀로 변하고 다시 테스트 튜브 끝에서는 1-셀로 나타나고 있다.

Fig. 18은 테스트 튜브 입구에서부터 2-셀의 강한 난류강도를 나타내다 $X/D=44$ 이후부터 선회가 소멸되면서 테스트 튜브 끝에서는 1-셀에 가까운 형태를 보이고 있다.

Fig. 19는 $Re=20,000$ 에서 국소 난류강도를 나타내고, 최고값(u/U)은 약 0.55 정도이고, 셀 간의 간격은 0.21 정도로 나타나고 있다.

그러나 Fig. 20의 $Re=25,000$ 에서 국소 난류강도는 약한 2-셀을 보이지만 셀 간의 간격은 0.4 정도로 증가되고 있다. 이는 재순환 영역이 확대되는 결과로 생각된다.

3.4 난류 운동에너지

순간 난류에너지(turbulence kinetic energy)는 식 (1)과 식 (2)로부터 식 (4)와 같이 표시된다.

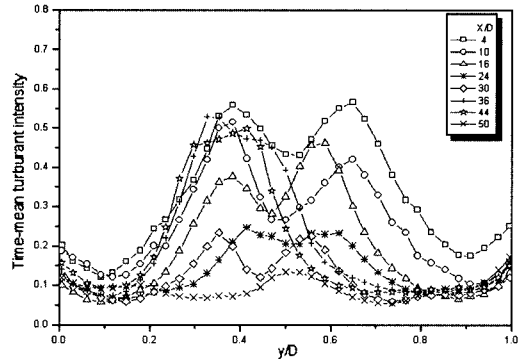


Fig. 18. Time-mean turbulent intensity profile for $Re=15,000$ for swirling flow.

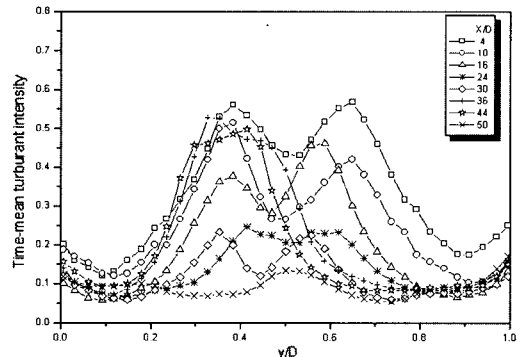


Fig. 19. Time-mean turbulent intensity profile for $Re = 20,000$ for swirling flow.

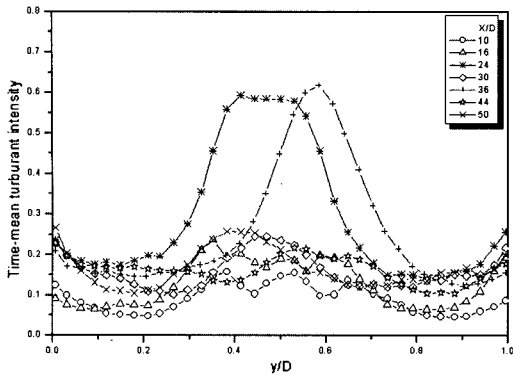


Fig. 20. Time-mean turbulent intensity profile in Re=25,000 for swirling flow.

$$T.K.E. = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{2} \quad (4)$$

Fig. 21은 비 선회유동의 주유동방향 운동에너지를 Re=10,000에서 나타내고있다.

Fig. 21~Fig. 25는 Re=10,000~25,000에서 시간 평균한 운동에너지를 나타내고 있다. 난류강도의 분포와 유사하게 테스트 튜브 중심부에서는 최대 값을 나타내나 관 벽 부근에서 최소값을 나타내고 있다. 특이한 현상은 테스트 튜브 입구(X/D=10 부근)에서 난

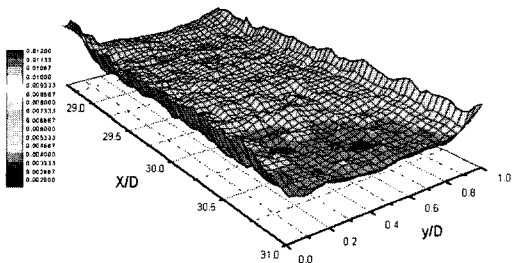


Fig. 21. Contours of kinetic energy with non-swirl for Re=10,000 at X/D=30.

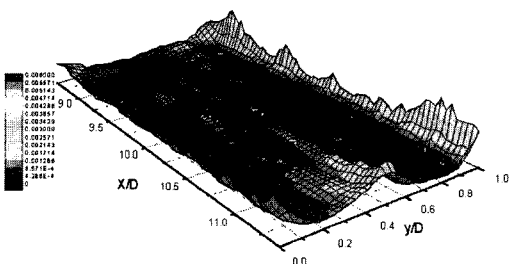


Fig. 22. Contours of kinetic energy with swirl for Re = 10,000 at X/D=10.

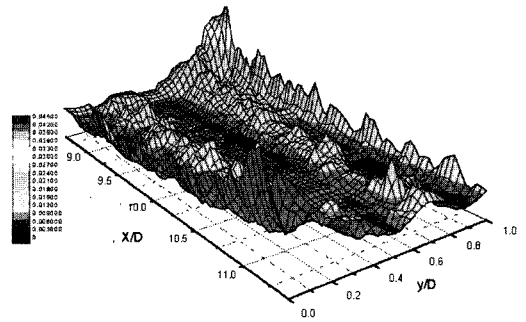


Fig. 23. Contours of kinetic energy with swirl for Re=15,000 at X/D=10.

류강도 분포와 유사하게 두 개의 셀(2-cell) 현상을 나타내고 있고, 이 현상은 X/D가 증가함에 따라 점차 감소하여 셀이 하나로 통합되어 나타내다 관 끝에 가서는 소멸되고 있다.

관 입구에서의 두 개의 셀(2-cell) 현상은 선회강도가 큰 것에 기인되는 것으로 생각된다.

Fig. 21의 비선회유동의 주유동 운동에너지로부터 국소운동에너지를 계산한 결과가 Fig. 26이다.

관 중심 근처에서는 거의 동일한 값을 나타내지만,

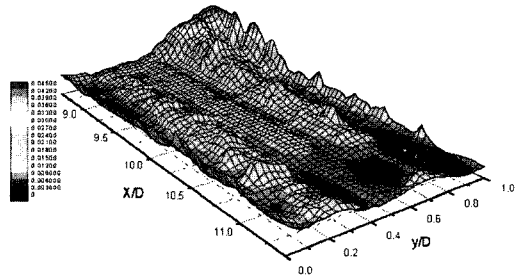


Fig. 24. Contours of kinetic energy with swirl for Re = 20,000 at X/D=10.

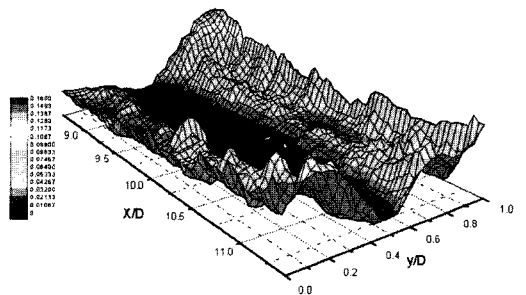


Fig. 25. Contours of kinetic energy with swirl for Re = 25,000 at X/D=10.

관 벽 부근에서 최대값을 보여주고 있다. 이 현상은 지금까지 보고된 결과와 잘 일치하고 있다. 난류 운동에너지의 분포와 유사하게 관벽근처에서 최대값을 나타내고, 레이놀즈 수가 증가하면서 그 값은 증가되었다.

Fig. 27~Fig. 30은 선회유동의 국소운동에너지를 $Re=10,000, 15,000, 20,000$ 그리고 $25,000$ 에서 $X/D=10\sim 50$ 까지 국소 난류운동에너지 분포를 나타내고 있다. 난류강도에 비하여 선명하게 관 벽과 관 중심에서 큰 값을 나타내고 있다. 레이놀즈 수가 증가할수록 관중심에서 난류에너지의 강도는 저하하나 관벽근처에서는 증가하고, 재순환영역의 범위가 넓어짐을 볼 수 있다.

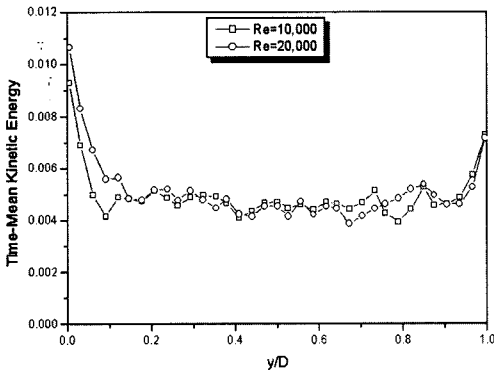


Fig. 26. Time-mean kinetic energy profile with non-swirl at $X/D=30$.

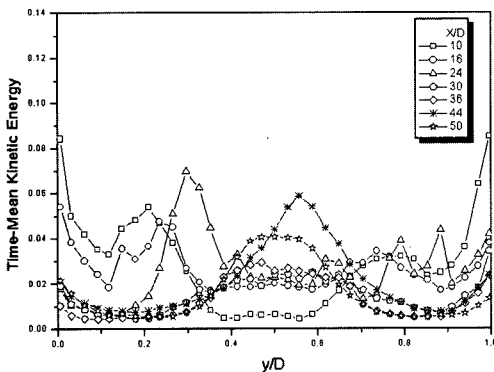


Fig. 27. Time-mean kinetic energy profile with swirl for $Re=10,000$.

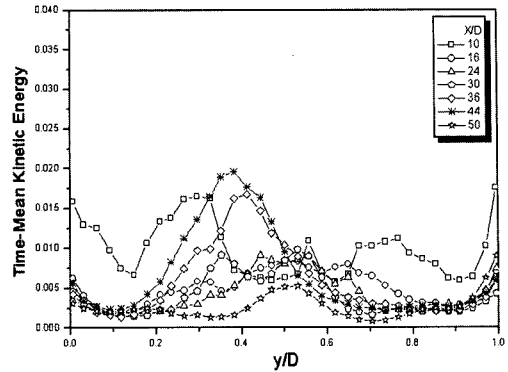


Fig. 28. Time-mean kinetic energy profile with swirl for $Re=15,000$.

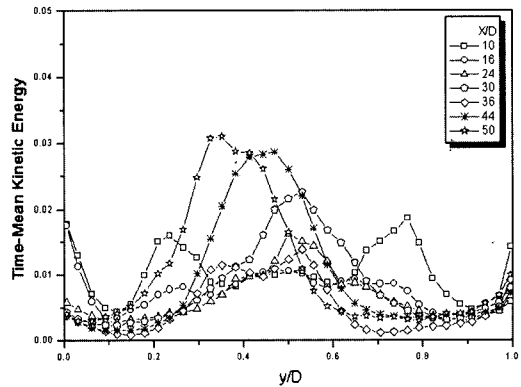


Fig. 29. Time-mean kinetic energy profile with swirl for $Re=20,000$.

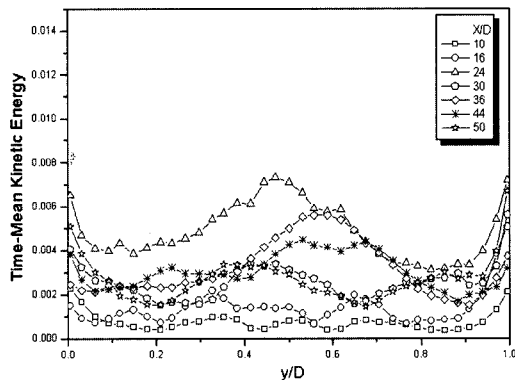


Fig. 30. Time-mean kinetic energy profile with swirl for $Re=25,000$.

4. 결 론

PIV기법을 이용하여 수평원형 관내에 선회유동의 난동속도를 $Re=10,000, 15,000, 20,000$ 그리고 $25,000$ 에서 측정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 레이놀즈 수가 증가할수록 관 중심부에서 강한 음의 속도벡터를 나타내고, 관벽 근처에서는 접선방향 속도의 영향으로 강한 양의 속도벡터를 나타내었다.
2. 평균속도(\bar{u}/U)는 관 중심에서 -0.5 정도이고, 관벽 부근에서는 1.6 정도를 보이고, $X/D=44$ 근처에서는 음(-)의 속도가 점차 소멸되어서 양(+)의 값을 나타내었다. 이 현상은 Re 가 낮을수록 큰 감소를 나타내고 Re 가 클수록 그 감소 폭이 줄어든다.
3. 난류강도가 관 중심부에서 선회가 강한 즉 관 입구에서 2-셀이 발생하여 X/D 가 증가함에 따라 선회가 감소하여 1-셀로 변화하고 있다.
4. 난류 운동에너지는 난류강도의 분포와 유사하게 테스트 튜브 중심부에서는 최대 값을 나타내나 관 벽 부근에서 최소값을 나타내었다. 특이한 현상은 테스트 튜브 입구(X/D 10 부근)에서 난류강도 분포와 유사하게 2-셀의 현상을 나타내었고, 이 현상은 X/D 가 증가함에 따라 점차 감소하여 셀이 하나로 통합되어 나타내다 관 끝에 가서는 소멸되었다.

후 기

본 연구는 경남대학교 2003 학년도 학술논문 게재 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- 1) Smithberg. E. and Landis F. 1964, "Friction and Convection Heat Transfer Characteris in Tubes with Twisted Tape Swirl Generator", J. Heat Transfer, Vol. 86, pp. 39~40.
- 2) Talbot, L., 1954, "Laminar Swirling Pipe", J. Applied Mech., ASME, Vol. 21, pp. 1~7.
- 3) Binnie, A.M. and Tear, J.D., 1955, "Experimental Measurement of Flow Swirling Water through a Pressure Nozzle and Open Trumpet", Proc. Roy. Soc., Vol. 235A, pp. 78-88.
- 4) Roberts, L.W., 1971, "The Prediction of Turbulent Swirling Pipe Flow". Report. EF/TN/A/37, Dept. Mech. Eng., Imperial College, London.
- 5) Cigier, N.A. and Chervinsky, A., 1967, "Experimental Investigation of Swirling Vortex Motion in Jet", J. Mech. ASME, Vol. 34, pp. 443~451 .
- 6) Rose, G.W., 1962, "A Swirling Round Turbulent Jet-Mean Flow Measurements", J. Appl. Mech., Vol. 29, pp. 615~625.
- 7) Wolf, L. Jr., Lavan, Z., and Fejer, A.A., 1969, "Measurement of the Decay of Swirl in Turbulent Flow", AIAA J., Vol. 7, No. 3 pp.971~973.
- 8) Weske, D.R. and Sturov. G.Y.E., 1984, "Experimental Study of Flow Reattachment in a Single Sided Sudden Expansion", NASA Cont. Research MD - 41, Stanford University.
- 9) Habib A.M. and Whitelow H.J., 1980, "Velocity Characteristics of Confined Co-Axial jet with and without Swirl", J. Fluids Eng, Vol. 102, pp. 47~53.
- 10) Sislian P.J., and Cusworth R.A., 1986, "Measurements of Mean Velocity and Turbulent Intensities in a Free Isothermal Swirling Jet", AIAAJ, Vol. 24, No. 2, pp. 303~309.
- 11) Komori S. and Ueda H., 1985, "Turbulence Flow Structure in the Mean Field of a Swirling Round Free Jet", Phys. Fluids Vol. 28, pp. 2075~2082.
- 12) Chang T.-H. and Kim H.-Y., 2001, "An Investigation of Swirling Flow in a Cylindrical Tube", KSME Int. J., Vol. 15, No.12, pp. 1892~1899.
- 13) Kimura I., Takamori T. and Inoue T., 1986, "Image Processing Instrumentation of Flow by Using Correlation Technique", Flow Visualization, Vol. 6, No. 22, pp. 269~272.
- 14) Kobayashi, T., Saga, T., Haeno, T. and Tsuda, N., 1991, "Development of a Real-Time Velocity Measurement System for High Reynolds Fluid Flow Using a Digital Image Processing Design", Experimental and Numerical Flow Visualization (Ed Khalighia B et al.), ASME FZD No. 128, pp. 9~14.
- 15) Utami T. and Blackwelder R., 1991, "A Cross Correlation Technique for Velocity Field Extraction from Particulate Visualization", Exp. in Fluids, Vol. 10, pp. 213~223.
- 16) Khodadadai J.M. and Vlachos N.S., 1987, "Computation of Confined Swirling Flow: Effects of Boundary Conditions and Turbulence Model", Numerical Method in Laminar and Turbulent Flow, Vol. pp. 458~469.