

## PIV 기법을 이용한 원형단면을 갖는 90° 곡관내의 선회유동의 난류특성에 관한 실험적 연구

장태현† · 이해수\*

### Experimental Study on Turbulent Characteristics of Swirling Flow in a 90° Degree Circular Tube by Using a PIV Technique

Tae-Hyun Chang and Hae Soo Lee

**Abstract.** An experimental investigation was performed to study the turbulent characteristics of swirling flow a 90° circular tube for Re = 10,000, 15,000 and 20,000. 2D-PIV(Particle Image Velocimetry)technique was employed to measure the fluctuation velocity field. The results include spatial distributions of mean velocity vectors, turbulence intensity and turbulence kinetic energy. The axial and radial turbulence intensities, and kinetic energy profiles show double-peak structures in the inlet region of the 90 degree bend and the profiles are disappeared along the test tube with decaying the swirl intensity.

**Key Words :** swirl intensity(선회강도), tangential inlet condition(접선방향 입구조건), concave wall(오목한 벽, 외벽), convex wall(볼록한 벽, 내벽)

#### Nomenclature

- $D$  : Diameter of test tube (mm)
- $R$  : Radius of curvature (mm)
- Re : Reynolds number
- $u'$  : Axial fluctuation velocity (m/s)
- $\bar{u}$  : Bulk mean axial velocity (m/s)
- $U$  : Local mean axial velocity(m/s)
- $\bar{U}$  : Mean axial velocity (m/s)
- $V$  : Local mean radial velocity (m/s)
- $v'$  : Local radial fluctuation velocity fluctuation (m/s)
- $y$  : Radial distance from the tube wall (mm)

#### Greek Letter

- $\theta$  : Angle of 90° bend (°)
- $\rho$  : Water density (kg/m<sup>3</sup>)
- $\tau_{xy}$  : Reynolds shear stress (N/m<sup>2</sup>)

#### 1. 서 론

선회유동에 대한 초기연구로는 Talbot<sup>(1)</sup>는 층유 선회유동에서 선회방정식을 유도하였고, Binne 등<sup>(2)</sup>과 Robert 등<sup>(3)</sup>은 공기와 물에 색소를 주입하여 튜브 중앙부에 축방향 속도가 역류됨을 관찰하였다.

유동 방향으로 곡율이 존재하는 곡관 내부 유동은 곡관 입구에서 3차원적으로 강한 유동이 발생하여 곡관 하류까지 존속하게 된다. 이와 같은 곡관 내부유동에 대한 최초 연구로 Thomson<sup>(4)</sup>은 굽은 강의 흐름이 원심력과 경계층 사이의 상호작용이 2차 유동을 유도한다는 것을 이론화하였다.

Ito<sup>(5)</sup>는 곡률비 Rc = 1.25~14.6 사이의 곡관을 황동으로 제작하여 난류유동의 압력강하 실험을 통해 Eustice<sup>(6)</sup>와 Dean<sup>(7)</sup>의 연구와 비교하였고, 압력강하 결과로부터 관 마찰계수에 대한 실험식을 제시하였다

Rowe<sup>(8)</sup>는 180° 곡관에서 실험과 수치해석적인 방법으로 2차 유동이 밴드의 시작부분에서부터 증가하여 최대값에 이른 후 정상상태로 감소함을 발견하였고, Mori 등<sup>(9)</sup>은 정사각단면의 220° 곡관 내에서 유체 유동과 열전달에 관한 연구를 수행하여 저항계수와

†경남대학교 기계자동화공학부

\*경남대학교 대학원 기계공학과

E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr

Nusselt 수를 구하였다.

Sparrow 등<sup>(10)</sup>은 90° 원형 밴드에서 나프탈렌 승화법을 이용하여 열전달 실험과 유적법을 이용하여 가시화 실험을 하였다.

Said 등<sup>(11)</sup>은 액정(liquid crystal)을 이용하여 국소 열전달계수를 계산하였다.

곡관에 대한 선회유동의 연구로는 Binne 등<sup>(2)</sup>은 90° 투명관 내에서 물에 선회를 발생시켜, 튜브 내부에 공동(air core)이 발생됨을 관찰하였고, Shimizu 등<sup>(12)</sup>은 180° 곡관에서 가이드 베인형 선회 발생기를 이용하여 수력손실과 속도분포에 관하여 연구를 수행하였다. Khodadadi 등<sup>(13)</sup>은 선회강도(Swirl intensity)가  $S = 1.445$ 인 조건에서 해석적 방법으로 결과를 구하여 Murakami<sup>(15)</sup>의 실험 결과와 비교하여 잘 부합됨을 확인하였다.

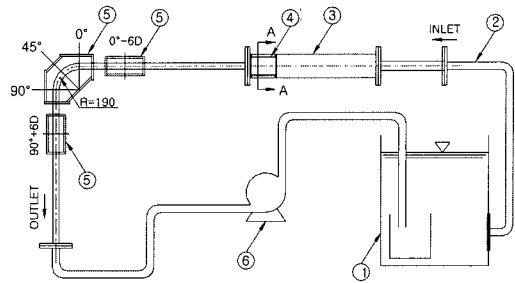
곡관에 대한 국내의 연구로는 Maeng 등<sup>(15)</sup>과 Moon 등<sup>(16)</sup>이 180° 정사각 및 직각 단면에서 열선풍속계를 이용하여 난류유동과 열전달에 대하여 연구하였고, 본 연구실<sup>(17,18,19)</sup>에서는 원형단면을 갖는 180° 곡관에서 열전달 실험과 수평 원통관에서 열선풍속계 및 PIV(particle image velocimetry) 기법을 이용하여 속도분포를 구하였다.

대부분의 기존 연구는 점 측정(Point measuring) 방법에 의한 것이었고, 난류특성에 대한 연구는 드물고 대부분이 평균속 결과를 발표하였다. 저자 등<sup>(19)</sup>은 90° 곡관에서 선회유동의 속도벡터 및 평균속도와 일부 난류강도 등을 발표한 바 있다.

본 연구에서도 물을 작동유체로 하여 PIV 기법을 이용하여 실험을 하였다. 접선 방향 입구조건(tangential inlet condition)으로 발생시킨 선회유동을 90° 곡관의 종단면에서 전편에서 누락된 시간평균 반경방향 속도, 난류강도, 운동에너지 그리고 레이놀즈 응력 등을 구하여 비 선회유동의 결과와 비교하여 곡관에서 선회유동의 영향을 연구하여 효과적이고 경제적인 열교환기 설계에 기여하고자 한다.

## 2. 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험장치이고, 테스트 튜브는 길이와 내경이 각각 1500 mm, 50 mm이고 두께는 2 mm로 유리관을 가열하여 곡률 반경이  $R = 190$  mm인 90° 곡관을 만들었다. 선회 발생기로부터 테스트튜브 입구까지의 거리는 1800 mm 이다. 물탱



① Water tank	② Flexible hose
③ Swirl chamber	④ Swirl generator
⑤ Test tube $\varnothing$ 50mm	⑥ Water Pump (220V*3.7kW)

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

크에서 나온 물은 호스를 통해 와류실로 들어가고 선회 발생기에 의하여 접선 방향으로 유입 된 후 테스트 튜브로 들어간다. 그리고 다시 펌프를 거쳐 물탱크로 되돌아오게 제작하였다.

작동유체의 속도는 펌프의 회전속도를 조절하여 원하는 레이놀즈수가 되도록 하였다.

비 선회유동 실험에서는 선회발생기를 제거하고 테스트 튜브 입구에 허니콤(honey comb)을 설치하여 균일한 유체유동이 형성되도록 하였다.

측정 튜브는 모두 다섯 부분으로 나누어지며 각각의 측정 부분은 유체의 밀도 차에 의해 굴절되는 것을 막기 위해 수조를 만들었다. 또한 수조의 물 표면에 얇은 투명한 판을 설치하여 자유표면에서 빛의 난반사에 기인한 영상의 왜곡을 막았다.

Fig. 2는 선회발생기의 단면도이다. 선회발생기는 길이가 218 mm, 외경이 150 mm이고 접선 방향으로 직경 3 mm의 구멍 28개가 8세트로 설치되어 있다. 와류실에서 물은 선회발생기에 있는 4개의 구멍을 통해 선회 발생기로 들어가 선회유동을 만들었다.

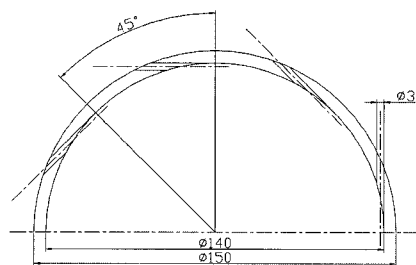


Fig. 2. A-A sectional view of swirl generator.

### 3. PIV 시스템 및 실험방법

Fig. 3은 본 연구에 사용된 PIV 시스템을 구성을 나타낸다. 사용된 광원은 500 mW Ar-ion 레이저를 사용하였다. 광원의 이동을 용이하게 하기 위하여 광케이블로 빛을 이동시킬 수 있는 레이저 평면광 probe를 사용하였다. 또한, 펄스화된 광원을 얻기 위하여 AOM(acoustic optical modulator)를 사용했다. CCD 카메라 (Parasonic WV3p310)를 사용하여 1초에 30장의 유동영상을 획득하였다. 영상기록을 위해 디지털 레코더가 사용되었고, 획득한 이미지를 컴퓨터로 0에서 255단계의 그레이 레벨로 전송하는 보드(DT3155)를 사용했다.

실험에 사용된 작동유체는 수돗물(21°C)이고, 사용된 입자는 나일론 12(비중 1.02, 입자의 직경 120 μm)를 사용했다. 입자의 크기가 다소 크지만 선회유동의 경우 빠른 접선방향 속도를 가지므로 이 제품을 사용하였다. 고체입자의 경우 빛에 쉽게 반응해 실험이 용이하고, 직진성이 잘 확보된다. 나일론 입자가 정전기로 인해 관 벽에 부착되는 것을 방지하고 또한 물에 골고루 잘 섞일 수 있도록 소량의 계면활성제를 물에 첨가하였다. 측정은 90° 곡관의 종단면을 따라 레이놀즈수를 10,000, 15,000, 20,000 그리고 25,000에 대하여 각각 5곳 즉,  $\theta = 0^\circ-6D \sim 7D$ ,  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  그리고  $\theta = 90^\circ+6D \sim 7D$  지점에서 속도장을 측정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 주유동 속도벡터

Fig. 4는  $Re = 20,000$ 에서 비 선회유동의 시간 평균 속도장을 나타낸다. Fig. 4 (a)는 곡관 입구인  $\theta = 0^\circ$ -

6D~7D [곡률이 시작되는 부분을 기준점( $\theta = 0^\circ$ )으로 하여 관 직경의 6배 내지 7배 되는 거리 상류위치(-6D~-7D) 단면]에서의 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 4(b)~(d)까지는 유체가 곡관 입구에서 출구까지 움직이는 사이의 유속 변화를 보여주고 있다. Fig. 4의 (c)는 곡관의 가운데 부분인  $\theta = 45^\circ$  단면에서는 테스트 튜브 외벽(concave wall) 부근에서 유동의 꺾임이 발생하고 내벽(convex wall) 쪽으로는 2차 유동이 발생하는 것을 알 수 있다.

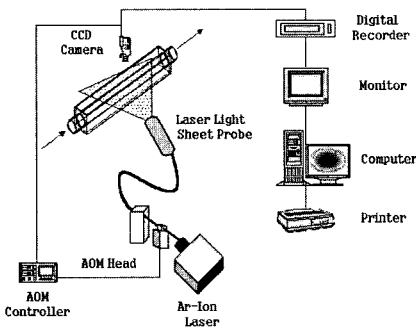


Fig. 3. Schematic diagram of PIV system.

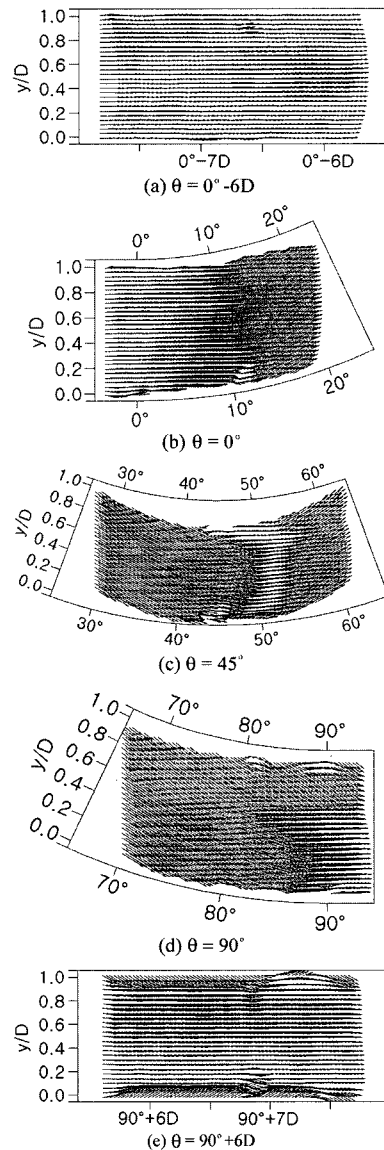


Fig. 4. Time-mean velocity vector field without swirl for  $Re = 20,000$ .

전체적으로  $\theta = 0^\circ$ 부터  $\theta = 45^\circ$  부근까지 속도벡터는 균일한 상태로 외벽 쪽으로 쏠리는 경향을 보이지만, 그 후 구간에서는 내벽 쪽으로 이동하고 있다.  $\theta = 90^\circ$  이후부터는 관벽 부근을 제외하고는 난류유동 상태로 되돌아가고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 5는 선회유동이 부가된 조건에서  $Re = 20,000$ 인 경우의 속도장 결과를 나타내고 있다. 테스트 튜브 입구의 직선부분인  $\theta = 0^\circ \sim 6D \sim 7D$  구간에서의 측정된 속도벡터이다. 관 중심부에서 음의 속도 벡터가 존재하며, 곡관을 지나면서 유동의 벡터 성분은 관 중심부에서 음의 속도영역이 변하고 관 출구 부근에서는 선회가 소멸되는 현상을 보여주고 있다.

음의 속도영역은 테스트 튜브를 따라 이동하여  $\theta = 45^\circ$  까지 외벽 쪽으로 이동한 후 다시 내벽 쪽으로 움직였다. 관 입구영역에서 음의 속도 벡터가 나타나는 현상은 강 선회 유동에서 기존의 결과<sup>(18,19)</sup>와 잘 부합된다. 90° 곡관을 지난 후 6D~7D위치 단면에서 측정된 속도장 결과를 보면 아직도 곡관의 영향을 받아 외 벽 쪽에 조밀한 속도분포를 가지며, 관 중심 영역에서는 음의 속도영역이 존재하고 있다.

#### 4.2 곡부 주유동 속도

Fig. 6은 비 선회유동에서  $Re = 20,000$ 인 경우의 곡부 주유동 속도분포를 나타낸다. 전체적으로 난류영역이지만 층류유동과 유사한 속도분포를 보여주고 있다. 이것은 비 선회유동의 실험에서 테스트 튜브 입구에 허니콤(honey comb)을 설치한 결과로 생각된다. 최고 속도는 위치는  $y/D = 0.5$ 위치에서 나타나며,  $\theta = 45^\circ$  이후에는 최고속도의 위치는 외벽(concave wall)쪽으로 치우치고 있다. 이것은 테스트 튜브 입구부터 곡 관의 영향으로 원심력에 기인한 것으로 생각되어진다. 이와 같은 결과는 레이놀즈수가 증가하여도 유사한 경향을 나타내었다. Fig. 7은 선회유동에서  $Re = 20,000$ 인 경우의 곡부 주유동 속도성분 분포를 나타낸다. 테스트 튜브 입구에서는 관 벽 근처에서 강한 축 방향 성분을 가지며, 관 중심에서는 음의 속도를 가지는 강 선회유동을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 기존의 선회유동 연구에서 발표된 결과를 참조하면 선회강도  $S = 0.6$  이상의 강 선회에서 나타나는 현상이다. 주유동 속도성분은 테스트 튜브를 따라  $\theta = 45^\circ$  까지 내벽(convex wall)쪽으로 치우치고, 이 위치에서 레이놀즈수에 관계없이 최고값을 가진다.  $\theta = 45^\circ$  이후에서는 외벽 쪽으로 이동하고,  $\theta = 90^\circ$  이

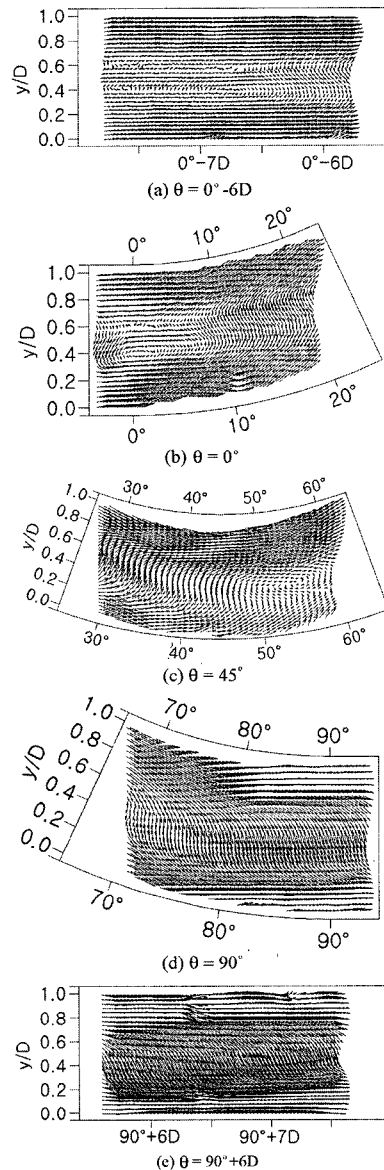


Fig. 5. Time-mean velocity vector field with swirl for  $Re = 20,000$ .

후구간에는 선회가 소멸되면서 속도분포는 균형을 잡아가고 있다. 이와 같은 유동현상은 지금까지 발표된 곡관에서 비 선회유동의 속도분포와는 다른 유동 현상을 보여주고 있다. 이것은 선회유동에서 접선 방향 속도 성분과 곡관의 기하학적 형상에 기인된 것으로 생각된다. 또한, 레이놀즈수 수 변화에 상관없이 유사한 속도분포를 가지고 있다.

Fig. 8은 레이놀즈 수 변화에 따른 선회유동의 반경 방향 속도를 나타내고 있다. 수평 원통 관에서 선회가

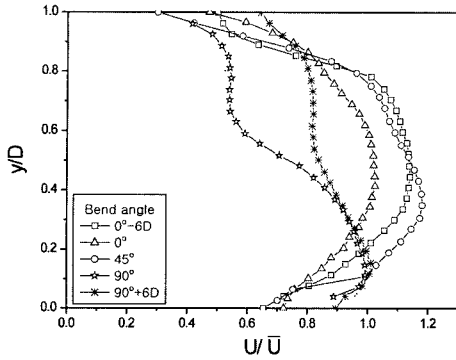


Fig. 6. Streamwise axial velocity profile without swirl for  $Re = 20,000$  along the test tube.

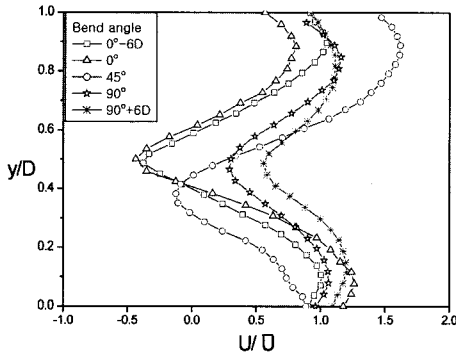


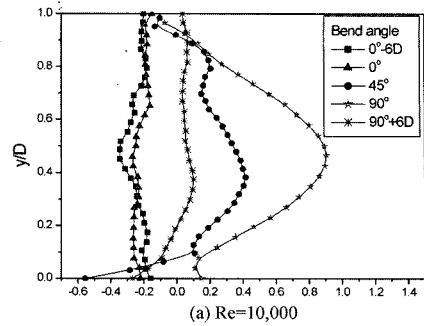
Fig. 7. Axial velocity profiles with swirl for  $Re = 20,000$  along the test tube.

있는 경우 반경방향 속도에 대한 기존의 연구에서는 아주 적은 값을 가지는 것으로 보고 되었다.  $Re = 10,000$  인 경우 곡관의 입구인  $\theta = 0^\circ$ -6D 그리고  $\theta = 0^\circ$  에서 음의 값을 나타내며, 기존의 연구결과와 부합된다. 그러나 벤드 각이 증가하면서 속도는 점차 증가하여  $\theta = 90^\circ$ ,  $y/D = 0.4$  부근에서 최대값을 가진다.

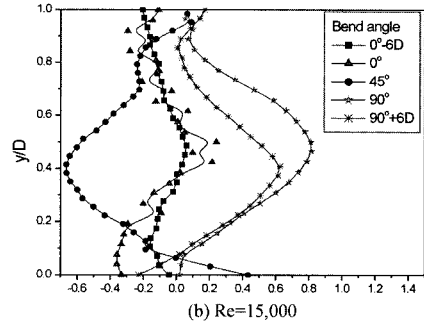
레이놀즈수가 증가하면서  $\theta = 45^\circ$ 에서 반경방향 속도는 저하하여 음의 값을 가지며, 테스트 튜브 끝 부분인,  $\theta = 90^\circ$  와  $\theta = 90^\circ+6D$ 에서 최대값을 나타내고 있다. 벤드 각이 증가하면서 이 속도성분은 증가하는 경향을 보여주고 있다.

4.3 난류강도

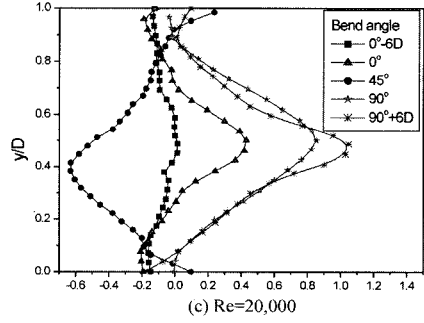
Fig. 9는 선회유동에서  $Re = 20,000$ 인 경우의 주유동 방향 난류강도를 테스트 튜브를 따라 변하는 과정을 나타낸 결과이다. 테스트 튜브 입구인  $\theta = 0^\circ$ -6D~7D에서는 주유동 속도에서와 같이 쌍봉(double peak) 현상이 나타나고 있다. 이것은 강 선회유동이 주어진 수평



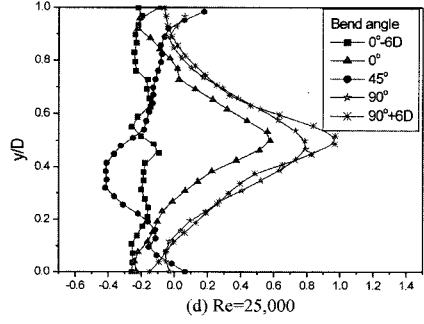
(a)  $Re=10,000$



(b)  $Re=15,000$



(c)  $Re=20,000$



(d)  $Re=25,000$

Fig. 8. Reynolds number effect on radial velocity profiles with swirl.

원통 관에서 나타나는 재 순환영역의 출현과 유사한 현상으로 생각된다. 그러나  $\theta = 0^\circ$  에서부터 쌍봉이 점차 감소하고 있고, 난류강도가 최대값을 가지는 영역 역시  $90^\circ$  곡관을 지나면서 변하고 있다.

$\theta = 45^\circ$  근처에서는 큰 난류강도 값을 갖는 영역이

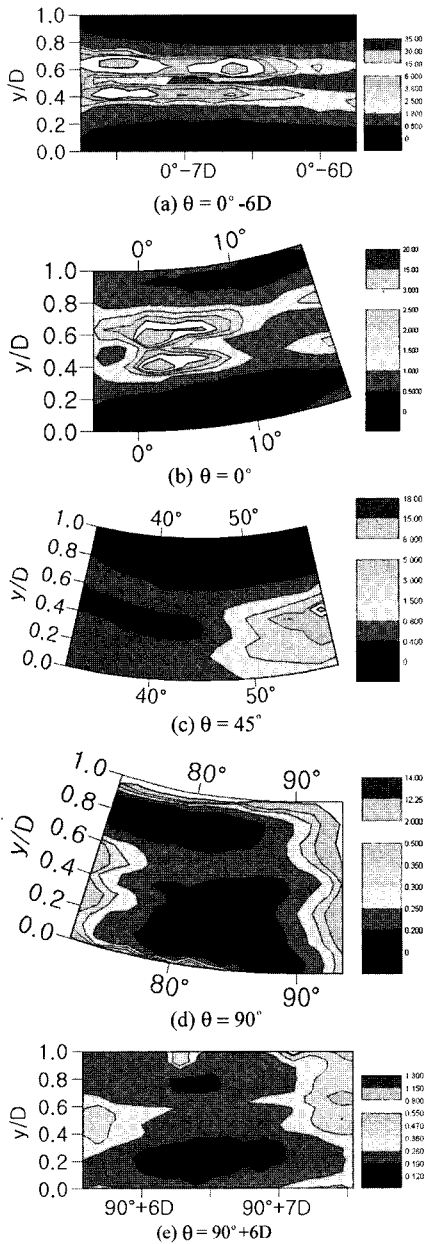


Fig. 9. Contour plots of axial turbulence intensity with swirl for  $Re = 20,000$ .

테스트 튜브 외벽 쪽으로 이동하고 있다. 또한, 테스트 튜브 끝인  $\theta = 90^\circ + 6D \sim 7D$ 에서는 쌍봉현상도 선회유동이 소멸되면서 난류강도 역시 감소하여 소멸되고 있다.

이와 같은 결과는 레이놀즈수 증가에 따라 곡관의 하류에까지 계속되었다. 이것은 레이놀즈수가 선회강

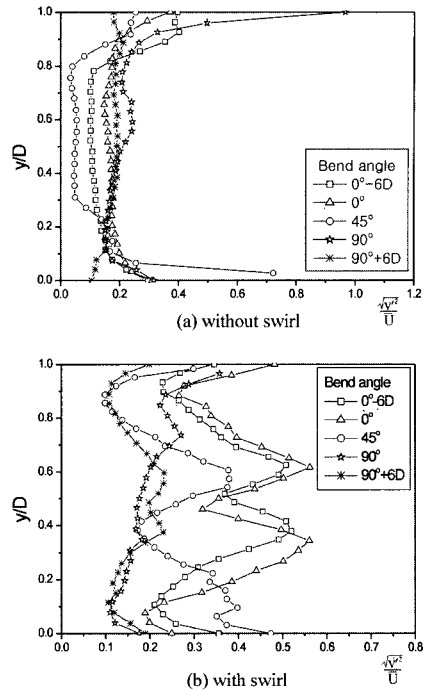


Fig. 10. Local axial turbulence intensity profiles for  $Re = 20,000$ .

도의 함수관계인 것으로 생각된다.

Fig. 10(a)는 비 선회유동에서 축방향 난류강도를 나타낸다. 수평 원통관에서의 난류강도 분포와 유사하게 벽면 근처에서 큰 값을 가지며, 관 중심에서 최소값을 가지고 있다.

특이한 현상은 내벽(convex wall)에서는  $\theta = 45^\circ$  부근에서 최대값을 나타내나, 외벽(concave wall)에서는  $\theta = 90^\circ$  에서 최대치를 가진다. 전자의 경우는 내벽에서 2차유동의 영향인 것으로 생각되고 후자는 외벽에 작용하는 원심력의 영향으로 간주되어 진다.

Fig. 10(b)는  $Re = 20,000$ 에서 선회유동의 축방향 난류강도분포이다. 비 선회유동과 달리  $y/D = 0.5$ 에서 극부 최소난류강도를 값을 가지며,  $y/D = 0.4$  와  $y/D = 0.6$  위치에서  $u/U \approx 0.75 \sim 0.8$  정도의 최대값을 가지는 것으로 이것은 강 선회에서 나타나는 쌍봉(double peak) 현상으로 곡관 내에 재순환영역이 존재함을 의미한다. 이 현상은  $\theta = 45^\circ$ 에서 최대값을 나타내었으며, 곡관 출구쪽으로 이동하면서 점차 소멸되었다.

Fig. 11은 반경방향 국소 난류강도 분포를 보여주고 있다. 벤드 입구인  $\theta = 0^\circ - 6D$  및  $\theta = 0^\circ$  위치 단면

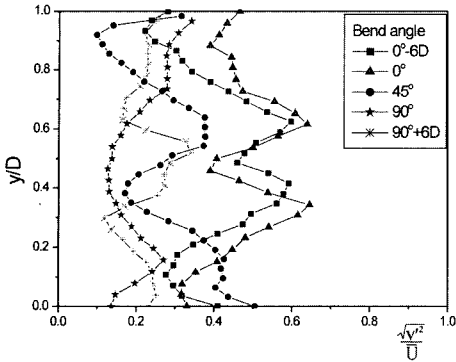


Fig. 11. Local radial turbulence intensity profiles with swirl for  $Re = 20,000$ .

에서는 쌍봉현상이 나타나지만, 벤드를 따라 가면서 점차 소멸되어 벤드 끝 영역에서는 최소값을 가진다. 특이한 현상은  $\theta = 90^\circ$ ,  $y/D = 0.4 \sim 0.5$  위치에서 반경 방향 평균속도는 최대값을 가지나, 난류강도는 최저값을 나타내고 있다. 즉, 재순환 영역의 중심 영역에서 반경방향 난류변동성분이 억제되는 것으로 생각된다.

Fig. 12는 선회유동 조건하에서  $Re = 20,000$ 인 경우 난류 운동에너지 분포를 나타낸 것이다. 곡관의 입구인  $\theta = 0^\circ-6D \sim 0^\circ-7D$  위치 단면은 속도벡터 분포나, 난류강도분포와 마찬가지로 튜브의 중심부에 쌍봉이 나타나고 있다. 벤드입구인  $\theta = 0^\circ$ 를 지나면서 운동에너지는 내벽 쪽에서 증가하나,  $\theta = 45^\circ$  지점에서는 외벽 쪽에서 증가하고 있다. 그러나  $\theta = 90^\circ$ 에 가까워지면서 유동은 내벽 쪽에서 이동하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 선회유동이 곡관을 따라 이동하면서 선회강도가 소멸되기 때문으로 생각되어진다.

4.4 난류운동에너지

Fig. 13(a)는 비 선회유동의 곡소 운동에너지 분포를 나타내고 있다. 축방향 난류강도 분포와 유사하게 양 벽면에서 최대 운동에너지 값가지며, 관중심 영역에서는 최소값을 나타내는 수평 원통관 결과와 유사한 분포를 보여주고 있다. 그러나, 선회유동의 경우 (Fig. 13(b))에는  $\theta = 0^\circ \sim \theta = 45^\circ$  까지  $y/D = 0.37$  와  $y/D = 0.62$  위치에서 최대값을 나타내는 쌍봉현상을 보여주고 있다. 이 결과 역시 국부속도분포와 난류강도분포에서 나타나는 쌍봉현상과 연관이 있는 것으로 생각된다. 또한, 관 중심에서는 상대적으로 작은 값을 가지고 있다.

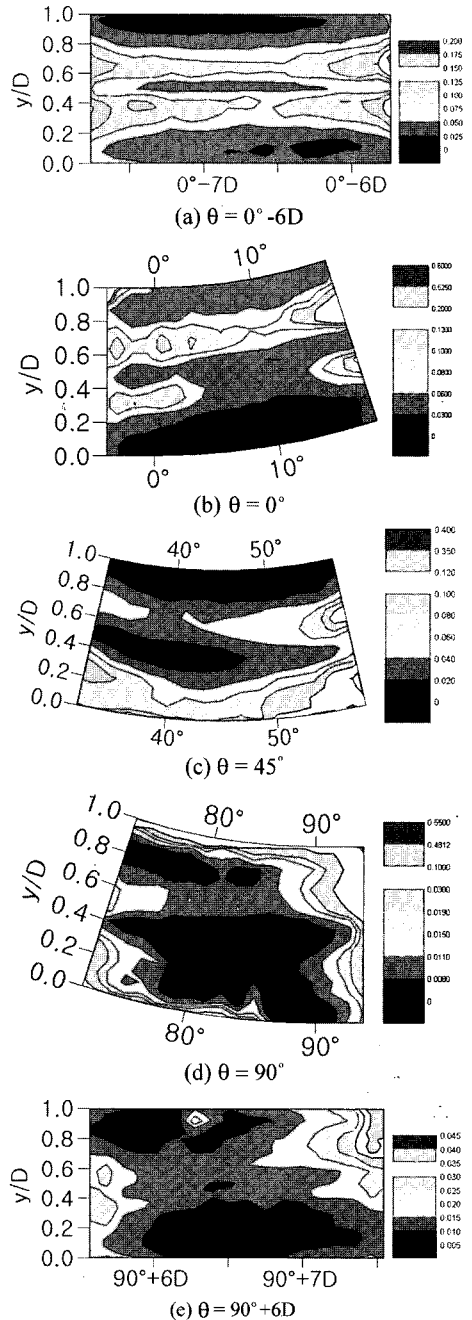


Fig. 12. Contour of turbulent kinetic energy with swirl for  $Re = 20,000$ .

4.5 레이놀즈 전단응력

테스트 튜브 내부의 레이놀즈 전단응력분포를 조사한 결과 곡관 입구인  $\theta = 0^\circ-6D \sim 0^\circ-7D$ 에서 난류강도와 유사한 분포를 가지며,  $\theta = 0^\circ$ 를 지나면서 내벽쪽

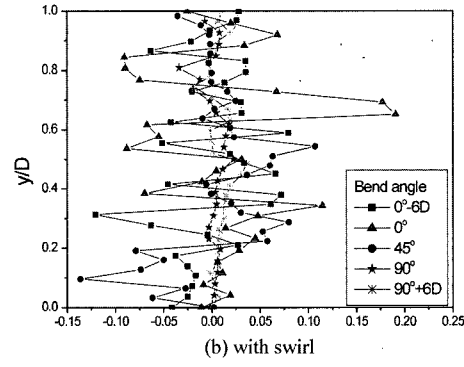
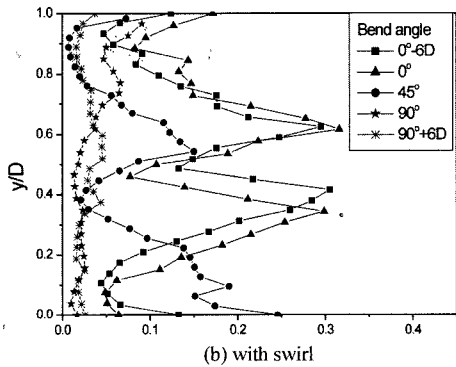
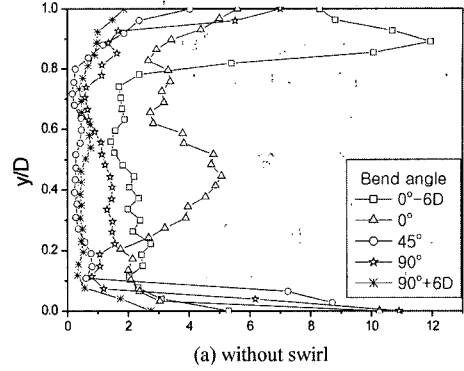
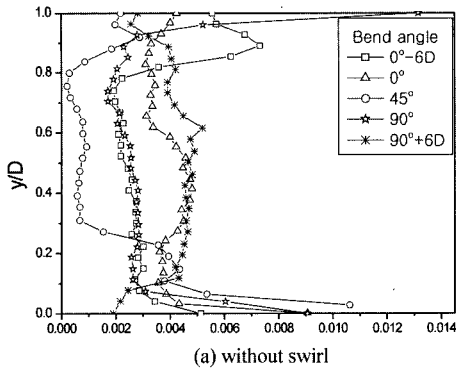


Fig. 13. Turbulent local kinetic energy profiles for  $Re = 20,000$ .

Fig. 14. Reynolds shear stress  $\tau_{xy}$  profiles for  $Re = 20,000$ .

에서는 증가하고,  $\theta = 45^\circ$  부근에서는 외벽 쪽에서 현저하게 전단응력이 증가하고 있다. 이것은 선회유동에 의한 축방향 난류강도에 기인한 것으로 생각된다.

Fig.14(a)는 비 선회유동의 곡부 레이놀즈 전단응력 분포를 나타내고 있다. 난류강도 분포와 유사하게 양 관벽에서는 최대값을 가지고, 특이하게 곡관 중심부에서 다소 높은 값을 나타내고 있다. 이것은 곡관 입구인  $\theta = 0^\circ$  에서 곡관 효과가 나타나다 벤드를 따라 점차 소멸되기 때문인 것으로 생각된다.

선회유동이 주어진 경우  $Re = 20,000$ 에서 얻은 전단응력 분포를 벤드의 입구에서 쌍봉 현상을 보이지만, 테스트 튜브를 따라가면서 주유동방향의 결과와는 상당히 차이가 있는 분포를 보여주고 있다. 특히  $\theta = 0^\circ$  에서 전단응력 값의 변동이 크게 나타나고 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 2차원 PIV 기법을 이용하여 90° 곡관 내부의 선회유동에 대한 난류특성에 관하여 연구하고 비 선회유동 결과와 비교하여 다음과 같은 결론

을 얻었다.

1. 선회유동의 주유동 속도는 관 입구에서부터 강선회인 쌍봉현상을 나타내고 축방향 속도성분은 음의 값을 나타내며, 테스트 튜브를 따라 선회가 점차 소멸되어  $\theta = 45^\circ$  까지는 빠른 속도영역이 내벽 쪽으로 이동하나, 그 이후부터는 외벽 쪽에서 나타났다.

2. 반경방향 속도성분은 레이놀즈수가 증가함에 따라  $\theta = 45^\circ$  에서 저하하여 음의 값을 나타내고 테스트 튜브 끝 부분인,  $\theta = 90^\circ$  와  $\theta = 90^\circ+6D$ 에서 최대값을 나타낸다.

3. 비 선회유동의 경우 축방향 난류강도는 관 벽 부근에서 최대값을 가졌다. 선회유동의 경우 관입구 쪽에서 강한 쌍봉현상을 보였고, 테스트 튜브를 따라가면서 선회강도의 소멸과 함께 감소하였다.

4. 반경방향 국소 난류강도는 벤드입구인  $\theta = 0^\circ-6D$  및  $\theta = 0^\circ$  에서 쌍봉현상이 나타나지만, 점차 감소하여 벤드 끝 부근에서는 최소값을 보여주고 있다. 특이한 현상은  $\theta = 90^\circ$ ,  $y/D = 0.4-0.5$ 에서 반경방향 평균속도는 최대값을 가지나, 난동속도는 최저값을 가지는 것으로 나타났다.



5. 난류운동에너지는  $\theta = 0^\circ \sim \theta = 45^\circ$  까지  $y/D = 0.37$  와  $y/D = 0.62$ 에서 최대값을 나타내는 쌍봉현상을 나타내고, 관 중심에서는 낮은 값을 보이고 있다.

6. 레이놀즈 전단응력은 난류강도분포와 유사하게 곡관입구에서는 쌍봉현상을 나타내고, 테스트 튜브를 따라가면서 복잡하게 혼합된 형태를 보이고 있다.  $\theta = 0^\circ$  를 지나면서 내벽에서는 증가하지만  $\theta = 45^\circ$  부근에서는 외벽 쪽으로 현저하게 응력이 증가하고 있다.

## 후 기

본 연구는 2003학년도 경남대학교 학술논문게재 연구비지원으로 수행되었으며, 관계 기관에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Talbot, L., 1954, "Laminar swirling pipe", J. of Applied Mechanics, ASME, Vol. 21, pp. 1~7.
- 2) Binnie, A. M. 1962, "Experimental on the Swirling flow of water in a Vertical pipe and a Bend", Proc. Roy. Soc. A, Vol. 270, pp. 452~465.
- 3) Rowe, M., 1970, "Measurements and Computations of flow in pipe bends", J. Fluid Mech, Vol. 43, part 4, pp. 771~783.
- 4) Thomson, J., 1876, "On the origin of winding of river in alluvial planic, with remarks on the flow of water round bend in pipe", Proc. Royal Soc. London Ser. A25, pp.5~9.
- 5) Ito, H., 1959, "Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes", J. of Basic Engineering, pp. 123~134.
- 6) Eustice, I., 1911, "Flow of water in curved pipe", Proc. K. Sdc. London Ser. A, Vol. 85, pp. 5~9.
- 7) Dean, W., 1928, "The streamline motion of fluid in a curved pipe", Philos Mag, Vol. 30, pp. 673~693.
- 8) Rowe, M., 1970, "Measurements and Computations of flow in pipe bends", J. Fluid Mech., Vol. 43(4), pp.771~783.
- 9) Mori, Y., Uchida, Y. and Ukon, T., 1971, "Forced Convection Heat Transfer in a Curved Channel with a Square Cross Section", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 14, pp. 1787~1805.
- 10) Sparrow, E. M. and Chrysler, G. M., 1986, "Turbulent Flow and Heat Transfer in Bends of Circular Cross Section : 1-Heat Transfer Experimental", J. of Heat Transfer, Vol. 108, pp. 40~47.
- 11) Said, D., Nader, S., and Daniel B., 1992, "Use of Liquid Crystal for Local Heat Transfer Coefficient Measurement around a 180 Degree Bend", HTD-Vol. 210, Fundamentals of Convection Heat Transfer ASME.
- 12) Shimizu Y., and Sugino, K., 1980, "Hydraulic Losses Flow Patterns of Swirling Flow in U-bends", Bulletin of JSME, Vol. 23, No. 183, pp. 1443~1449.
- 13) Khodadadi, J. M. and Vlachos, N. S., 1987, "Computation of Confined Swirling Flows : Effects of Boundary Conditions and Turbulence Model", Numerical Method in Laminar and Turbulent Flow, pp. 458~469.
- 14) Murakami, M., Kito, O., Katayama, Y., and Iida, Y., 1976, "An Experimental Study of Swirling Flow in Pipes", Bullètin of JSME, Vol. 19, No. 128, pp. 118~126.
- 15) Maeng, J.S., Lyu M.S., Yang S.Y. and Jang Y.J., 1991, "Experimental Study of Three Dimensional Turbulent Flow in a 90° Rectangular Cross Sectional Strongly Curved Duct", J. KSME Vol. 15, No. 1 pp. 262~273.
- 16) Moon, C., Lee, G. H. and Choi, Y. D., 1991, "A Experimental Study on Forced Convective Heat Transfer in a Rectangular Duct with a 180° Bend" J. KSME Vol. 16, No. 2 pp. 290~301.
- 17) Lee, S.B., Kwon, K.R. and Chang, T.H., 1997, "A Study on the Heat Transfer Characteristics of Swirling Flow in a Circular Sectioned 180° Bend with Uniform Heat Flux", J. KSME(B) Vol. 21, No. 5 pp. 615~627.
- 18) 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.
- 19) Chang, T.H. and Lee, H.S., 2003, "An Experimental Study on Swirling Flow in 90 Degree Circular Section Tube", J. of the Korean Society of Visualization, Vol. 1, No.1, pp. 82~91.
- 20) Jeong, S.J. Kim, T.H. and Cho, J.H., 1996, "Numerical Computations of Turbulent Flow in a 180° Curved Duct Using a Modified Extended k-ε Turbulence Model" J. KSAE Vol. 4, No.3, pp. 139~146.