

## PIV기법을 이용한 90° 곡관에서 난류유동에 관한 실험적 연구

장 태 현<sup>†</sup> · 이 해 수<sup>\*</sup>

(원고접수일 : 2003년 3월 20일, 심사완료일 : 2003년 6월 19일)

### An Experimental Study on Turbulent Flow in 90 Degree Bend by using PIV Techique

Tae-Hyun Chang<sup>†</sup> · Hae-Soo Lee<sup>\*</sup>

**Key words** : turbulent intensity, streamwise velocity, particle image velocimetry, concave wall, convex wall.

#### Abstract

An experimental research was performed to study turbulent flow characteristic in a 90° circular bend by using the PIV(Particle Image Velocimetry) method, this study found the time-mean velocity distribution, time-mean turbulent intensity with turbulent flow for Re = 10,000, 15,000, 20,000, and 25,000 along the test bend. It was found that the highest streamwise velocity of turbulent flow occurs near  $y/D = 0.5$  and the flow moved to  $y/D = 0.15$ . The peak turbulence intensity shifted toward the concave wall from  $\theta = 45$  and as  $\theta$  increased, the intensity decayed along the test tube.

#### 기호설명

D : Diameter of the test tube(mm)

R : Radius of curvature for curved tube(mm)

Re : Reynolds number

t : time(s)

T : Measuring time(s)

u : Local streamwise velocity(m/s)

u' : streamwise velocity fluctuation(m/s)

$\bar{U}$  : Mean streamwise velocity(m/s)

v : Mean radial velocity(m/s)

v' : Mean radial fluctuation velocity(m/s)

X : The length of the swirl chamber(mm)

y : Radial distance from the tube wall(mm)

#### Greek Letter

$\theta$  : Angle of 90° bend(°)

$\rho$  : Density of water(kg/m<sup>3</sup>)

$\tau$  : Reynolds stress(N/m<sup>3</sup>)

<sup>†</sup> 책임저자(경남대학교 기계자동차공학부) E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr, T : 055)249-2613

<sup>\*</sup> 경남대학교 대학원 기계공학과

## 1. 서 론

유동방향으로 곡율이 존재하는 특이한 기하학적 형상을 갖는 곡관 내의 유동은 곡관 입구에서 유체가 유입할 때부터 3차원적으로 강한 유동이 발생하여 곡관 후류 부분까지 존속하게 된다. 이러한 유동의 속도분포, 압력손실 그리고 Nusselt수 등과 같은 곡소 유동변수는 설계자가 산업적 기계장치를 설계함에 있어서 최적화라는 관점에서 중요한 의미를 부여하며, 특히 열교환기 등의 설계에 있어서 에너지의 효율적인 이용 면에서 매우 중요하며 많은 연구가 되어왔다. 내부유동의 굴곡효과에 대하여 최초의 연구자는 Tomson(1)에 의하여 유동의 굴곡 효과가 알려졌다. 그는 굽은 강에서 물의 흐름에 대한 굴곡 개수로의 유동을 관찰하여 원심력과 경계층 지역에서 친천히 움직이는 유체 사이의 상호 작용이 2차 유동을 유도한다는 현상을 이론화하였다.

Eustice(2)는 광범위한 유동의 가시화 작업으로 굴곡이 다른 여러 유리관을 통하여 넓은 Re 수의 범위에서 실험하였다. 그의 실험결과를 이용하여 Dean(3)은 곡관 내의 유동을 해석적 방법으로 연구하였다. 또한, 층류 유동에 대하여 Navier-Stokes식을 간략화 하여 약한 굴곡의 곡관에 완전히 발달된 유동에서 실험하였다.

Ito(4)는 곡률비  $R=1.25\sim 14.6$  사이의 곡관을 황동주물로 제작하여 난류유동에 있어서 압력강하 실험을 통해 Eustice와 Dean의 연구를 비교하였다. 또한 압력강하 결과로부터 관 마찰계수에 대한 실험식을 제시하였다.

Rowe(5)는 180° 곡관에서 실험과 수치 해석적인 방법으로 2차 유동이 밴드의 시작부분에서부터 증가하여 최대 값에 이른 후 정상상태로 감소함을 발견하였고, Mori(6) 등은 220° 정사각 덕트(duct) 내에서 유체유동과 열전달에 관한 연구를 해석과 실험적으로 저항 계수와 Nusselt수를 구하였다. Sparrow(7) 등은 90° 원형 밴드에서 나프탈렌 승화법을 이용하여 열전달 실험을 했으며, 또한 유적법(oil lampblack)을 이용하여 유동의 가시화 실험을 하였다. 그러나 이들의 실험에서는

속도의 분포는 언급하지 않았다.

1992년 Said(8) 등은 액정(liquid crystal)을 이용하여 액정의 색깔 변화로부터 곡소 열전달 계수를 계산하였다.

이 분야에 대한 국내의 연구로는 Moon(9) 등, Park(10) 그리고 Maeng(11) 등이 180° 정사각 및 직각 단면에서 열선 풍속계를 이용하여 유체유동과 열전달에 대하여 연구하였고, Chang(12) 등은 원형단면을 갖는 곡관에서 유체유동과 열전달 실험을 하였다.

지금까지 유동에 대한 실험적 연구는 피토투브, 열선풍속계, LDV(Laser Doppler Velocimetry) 등과 같이 특정한 한 위치를 측정하는 점 측정 방법에 의한 것이었다. 이러한 방법으로는 유동현상의 기본특성인 비정상상의 순간 다점 측정이 원리적으로 불가능한 한계를 극복하지 못하고 있다. 게다가 유동장 내에 센서를 삽입할 경우 유동이 간섭을 받는 단점이 있다.

본 연구에서는 21℃ 수돗물을 사용하여 2차원 PIV(Particle Image Velocimetry) 기법(13)을 이용하여 90° 곡관의 종단면에서 시간평균 속도분포, 난류강도 등을 구하여 곡관에서 난류유동의 특성을 규명하고자한다.

## 2. 실험장치

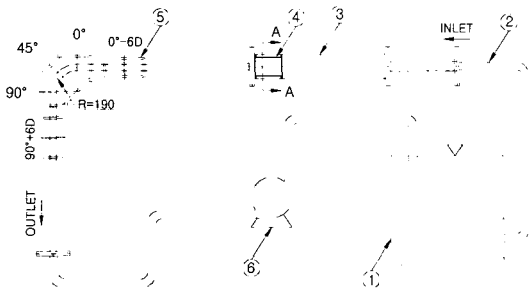
Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험장치로 난류유동과 선회유동 실험을 할 수 있도록 제작하였다. 난류유동의 경우는 테스터튜브 입구에 선회발생기를 제거하고 동일한 직경의 관( $\varnothing 50 \times 1500\text{mm}$ )을 부착하여 난류유동 실험을 할 수 있도록 제작하였다. 테스트 튜브는 길이와 내경은 각각  $1500\text{mm} \times \varnothing 50\text{mm}$ 이고, 두께가 2mm인 유리관을 가열하여 곡률 반지름이 190mm인 곡관을 만들었다.

본 실험에서는 측정 부분은 모두 다섯 부분으로 나누었으며 각각의 측정 부분은 밀도 차에 의해 굴절되는 것을 막기 위해 수조를 만들었다. 또한 수조의 물 표면에 얇은 투명한 판을 설치해 물의 자유표면에서 빛의 난반사로 인한 영상의 왜곡을

막았다.

Fig. 1에서 ①은 물탱크이다. 물탱크 내부에는 펌프로부터 나온 물이 바로 물탱크 출구로 나가지 못하도록 칸막이를 설치했다. 물탱크의 물은 펌프에 의해 테스트 튜브로 흡입되도록 하였으며, 그리고 다시 펌프로 들어가서 물탱크로 되돌아오게 제작하였다.

작동유체의 속도 조절은 모터의 회전속도 조절기를 사용했으며, Reynolds 수는 10,000, 15,000, 20,000 그리고 25,000에서 실험을 하였다.



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

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

### 3. 실험방법

입자의 변위를 구하는 알고리즘은 속도벡터의 추출에 이용되는 개별입자의 중심을 이용하여 입자속도 벡터를 구하는 방법(Particle Tracking Velocimetry, PTV)과 입자군의 분포에 대한 상관 관계로부터 대표 속도를 구하는 PIV(Particle Image Velocimetry)로 구분될 수 있다.

본 연구에서 사용된 방법은 2차원 PIV 기법을 사용하였다. 실험에 사용된 광원은 공랭식 500mW Ar-ion 레이저를 이용하였다. 광원의 이동을 용이하게 하기 위해 광케이블로 빛을 이동시킬 수 있는 LLSP(laser light sheet probe)를 사용하였다. 또한 이 LLSP는 레이저 층의 두께를 약 1mm 정도 조절을 할 수도 있다. 광케이블

의 길이는 약 10m이다. 펄스화된 광원을 얻기 위해서 AOM (Acoustic Optical Modulator)를 사용했다. 유동장의 획득을 위해서 1초에 30장의 영상을 획득할 수 있는 Panasonic 사의 CCD (Charge couple device) 카메라 WV3P310를 사용하였다. 영상의 기록을 위해 디지털 레코더가 사용되었다. 그리고 획득된 이미지를 컴퓨터로 0에서 255단계의 gray 레벨로 전송하는 DT3155(640× 480 pixel) 보드를 사용하였다. 실험에 사용된 입자(particle)는 나일론12(120  $\mu\text{m}$ )이다. 작동유체는 구하기 쉬운 수도물(tap water)을 사용하였고, 측정 영역은 테스트튜브입구인  $\theta = 0^\circ - 6D$ ,  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  그리고  $\theta = 0^\circ + 6D$  등의 5개소에서 측정하였다. 실험시의 물의 온도는 21°C였다. Fig. 2는 이 실험에 사용된 PIV 시스템의 구성도이다.

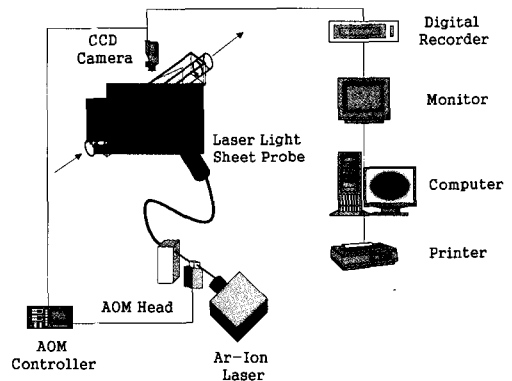


Fig. 2 Schematic arrangement of the PIV system

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 시간평균 속도벡터

각 격자점에서의 시간평균 속도는 식(1)과 같이 변동 속도 성분은 식(2)로 표시할 수 있다.

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

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

Fig. 3~Fig. 7은  $Re=10,000$ 에서 난류유동의 시간평균 속도벡터를 나타내고 있다. 각각의

단면은 곡관의 종단면이다. 관의 직선 부분은 곡관의 입구와 출구를 기준으로 6D 전후의 위치이다. 여기서 D가 테스트 튜브의 직경으로 50mm 이므로 6D는 300mm 이다. Fig. 3은  $\theta = 0^\circ - 6.7D$  위치에서 유동상태이며, 관 벽 근처에서는 속도가 느리고 관 중심 부근에서는 속도가 거의 일정한 전형적인 난류흐름을 잘 나타내고 있다. Fig. 4는 곡관이 시작되는 부분으로 Fig. 3과 맨 앞부분의 속도벡터를 비교했을 때 상대적으로  $y/D = 0.8$  부근 보다  $y/D = 0.2$  부근의 속도벡터의 길이가 더 길어짐을 알 수 있다. 즉, 이 영역은 개수로 유동에서와 같이 내벽(Convex wall) 쪽은 감속되고 외벽 쪽은 침식되는 것과 같이 유동이 가속되고있음을 알 수 있다. Fig. 5에서는 곡관의 가운데 부분인  $\theta = 45^\circ$  전후의 속도분포이다. 속도분포는 외부 관벽(concave wall)으로 치우쳐 있고, 내부 관벽에서는 2차유동이 일어나고 있다. Fig. 6은 곡관이 끝나는 부분으로  $y/D = 0.1$  부근에서 속도벡터의 길이가 가장 긴 것을 알 수 있다.

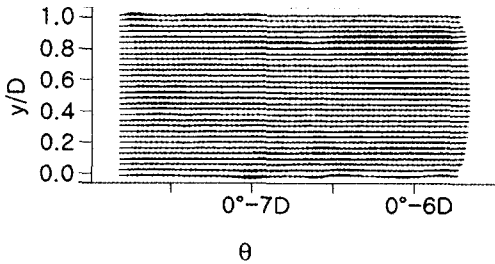


Fig. 3 Time-mean velocity distribution for  $Re = 10,000$  at  $\theta = 0^\circ - 6D$

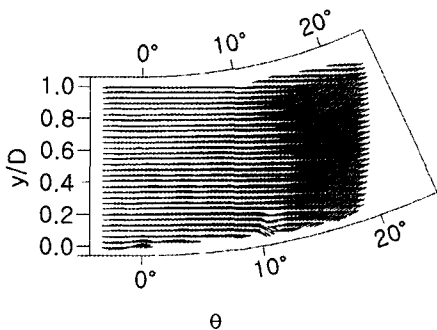


Fig. 4 Time-mean velocity distribution for  $Re = 10,000$  at  $\theta = 0^\circ$

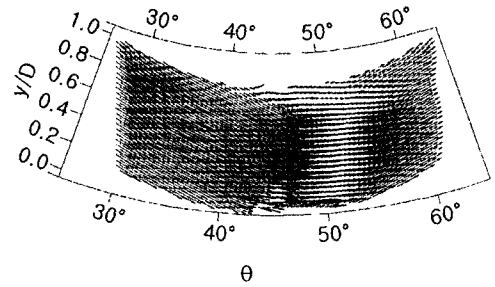


Fig. 5 Time-mean velocity distribution for  $Re = 10,000$  at  $\theta = 45^\circ$

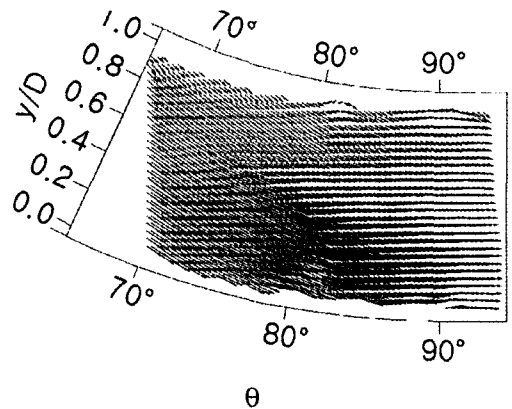


Fig. 6 Time-mean velocity distribution for  $Re = 10,000$  at  $\theta = 90^\circ$

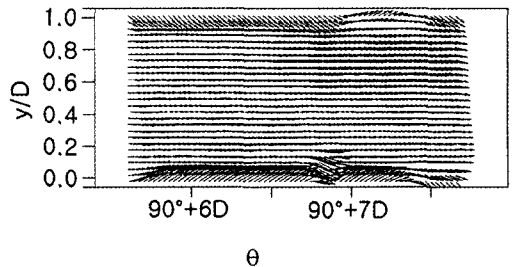


Fig. 7 Time-mean velocity distribution for  $Re = 10,000$  at  $\theta = 90^\circ + 6D$

Fig. 7은 곡관을 지나서 직선부분에서 속도분포를 나타낸다. 여전히  $y/D = 0.1$ 에서 속도벡터의 길이가 다른 부분에 비해 길게 나타남을 관찰할 수 있다. 또한, 유동이 난류유동으로 되돌아가고 있는 것을 볼 수 있다. 이상의 속도분포에서 보면 Fig. 4의 외벽에서  $\theta = 10^\circ$  부근과 Fig. 5에

서  $\theta = 45^\circ$ 에서 다소 실험오차를 나타내었다. 이 실험오차는 유리관의 면이 완벽하지 못했기 때문인 것으로 생각된다.

4.2 시간평균 주유동속도

Fig. 8~Fig. 11은 난류유동의 주유동 속도분포를  $Re=10,000, 15,000, 20,000$  그리고  $25,000$ 에서 나타내고 있다. Fig. 8은  $Re=10,000$ 에서 주유동 속도는 테스트튜브의 양 벽에서는 낮은 속도를 보이고 있으며 관의 입구에서 출구 쪽으로 유동이 진행함에 따라 최고속도에 이르는 점은  $y/D = 0.5$ 에서  $y/D = 0.15$ 로 이동함을 알 수 있다. 즉 이것은 앞서 말한 바와 같이 곡관의 바깥쪽이 속도가 빠르고 안쪽이 속도가 느리다는 것을 잘 말해준다. 유동이 곡관을 나온 후인  $\theta = 90^\circ + 6D$ 부분에서도 여전히  $y/D=0.15$ 부근에서 가장 큰 속도를 보여준다. 또한  $\theta = 0^\circ - 6D, \theta = 0^\circ$  그리고  $\theta = 45^\circ$ 에서는  $y/D = 0.5$  부근을 기준으로 상·하 대칭을 나타내고 비교적 완만한 속도 구배를 나타내었다. 하지만  $\theta = 90^\circ$ 와  $\theta = 90^\circ + 6D$ 에서는 대칭의 형태를 보이지 않으며 속도 구배가 다른 곳과 비교해서 매우 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 Reynolds 수가 증가함에 따라 속도변화의 폭은 감소한다는 것이 관찰되었다.

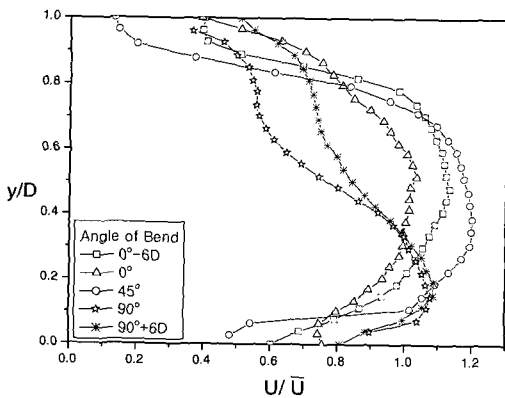


Fig. 8 Streamwise mean velocity profiles for  $Re=10,000$  along the test tube

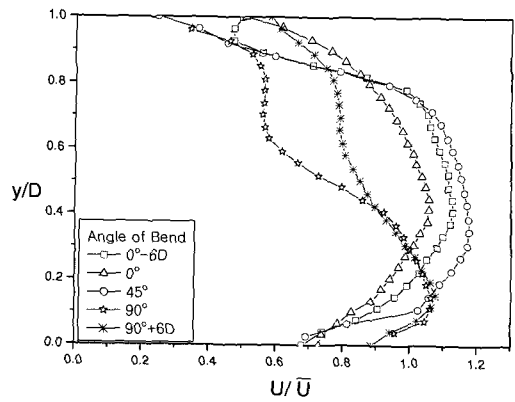


Fig. 9 Streamwise mean velocity profiles for  $Re = 15,000$  along the test tube

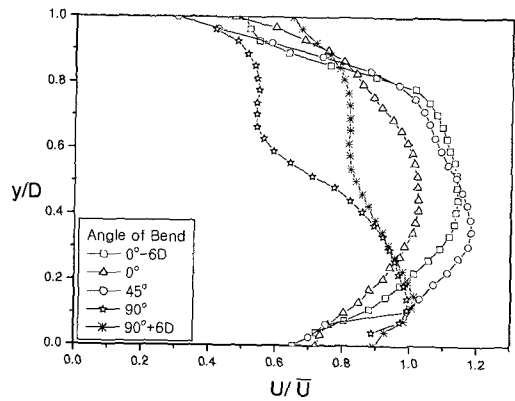


Fig. 10 Streamwise mean velocity profiles for  $Re = 20,000$  along the test tube

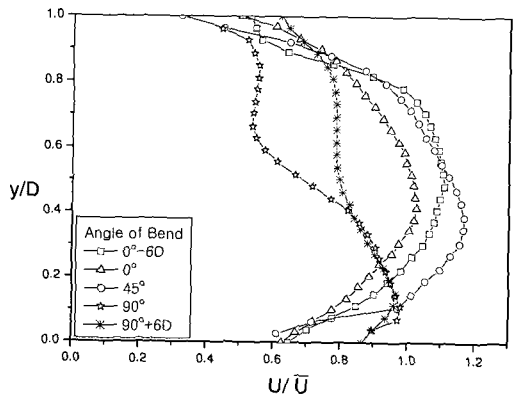


Fig. 11 Streamwise mean velocity profiles for  $Re = 25,000$  along the test tube

### 4.3 주유동방향 속도분포의 비교

원형곡관에서 속도 분포를 연구한 논문은 드물었다. Fig. 12은 난류유동에서 Jeong(14)의 사각관에서 “확장된  $\kappa - \varepsilon$ ” 난류 모델에 의한 수치해석 결과와 비교한 결과이다.  $\theta = 11.25^\circ$ 와  $\theta = 41.25^\circ$ 의 속도 분포는 거의 비슷한 형태를 나타내고 있으며 완만한 속도 구배를 나타낸다. 그리고 테스트튜브의 외벽에서 최고 속도를 나타내고 있다.  $\theta = 56.25^\circ$ 에서는 앞의 두 속도분포보다 큰 속도 구배를 나타내고 있다. 본 실험결과인  $\theta = 0^\circ$ 와  $\theta = 45^\circ$ 의 속도분포와는 차이를 나타내고 있다. 그러나  $\theta = 90^\circ$ 의 속도분포는 Jeong의  $11.25^\circ$ 의 결과와 유사하나 차이를 나타낸다. 이것은 원형관과 사각관의 기하학적차이에 기인된 것으로 생각된다. 그러나 최고속도는  $y/D = 0.1$  부근에서 나타나는데 이것은 수치해석의 결과와 부합하였다.

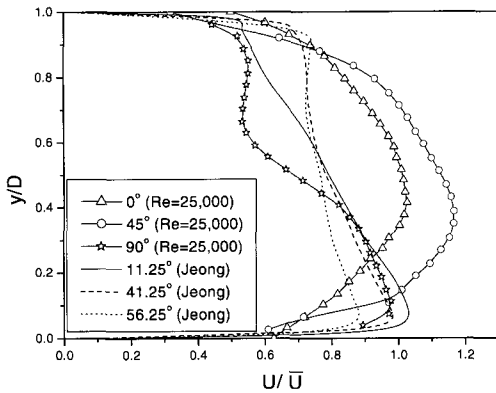


Fig. 12 Comparisons of the streamwise mean velocity profiles with those of Jeong's

### 4.4 시간평균 난류강도

난류강도는 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 13-Fig. 17은 축방향 등 난류강도(Contours of axial turbulent intensity) 등 분포를 테스트튜브를 따라  $Re = 10,000$ 에서 나타낸다.

Fig. 13에서 난류강도 분포는 테스트튜브입구에서는 다소 균일한 분포를 보이나 관을 따라가면서 내벽 쪽으로 이동하는 밴드의 입구영향을 나타

내고 있다. 그러나 Fig. 14에서  $\theta = 0^\circ$ 를 지나면서 점차 외벽 쪽으로 이동하고  $\theta = 45^\circ$  이후부터는 강한 난류강도를 나타내고 있다. 그러나 내벽의 경우  $\theta = 40^\circ$  이후부터 2차유동이 발생하고 있음을 나타낸다.  $\theta = 90^\circ$  이후부터는 점차 유동의 균형을 잡아가고 있으나, Fig. 17에서와 같이 외벽 쪽으로 난류강도가 높음을 알 수 있다. 이것은  $90^\circ$  밴드의 영향으로 생각된다.

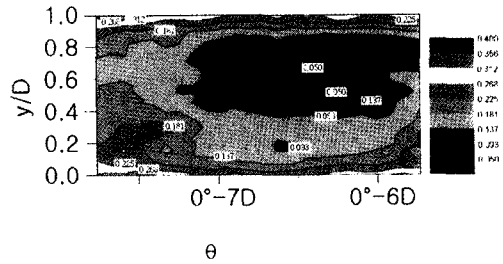


Fig. 13 Contours of axial turbulence intensity for  $Re = 10,000$  at  $\theta = 0^\circ - 6D$

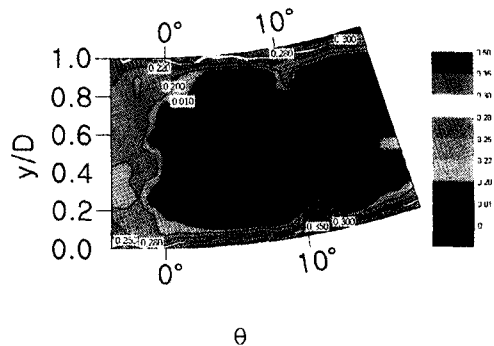


Fig. 14 Contours of axial turbulence intensity for  $Re = 10,000$  at  $\theta = 0^\circ$

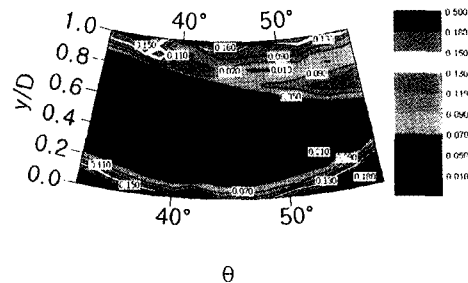


Fig. 15 Contours of axial turbulence intensity for  $Re = 10,000$  at  $\theta = 45^\circ$

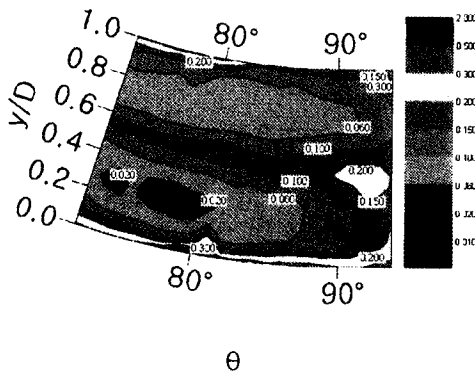


Fig. 16 Contours of axial turbulence intensity for  $Re = 10,000$  at  $\theta = 90^\circ$

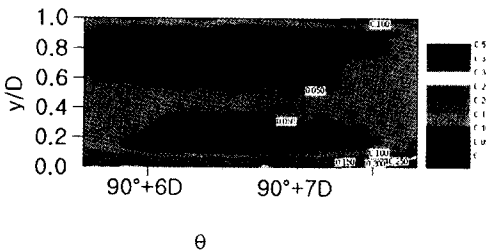


Fig. 17 Contours of axial turbulence intensity for  $Re = 10,000$  at  $\theta = 90^\circ + 6D$

Fig. 18~Fig. 21은  $Re = 10,000, 15,000, 20,000$  그리고  $25,000$ 에서 시간평균 난류강도를 테스트튜브를 따라 나타내었다. 테스트튜브 입구 상태인  $\theta = 0^\circ - 6D$  와  $\theta = 0^\circ$ 에서는 난류강도는 외벽보다 내벽에서 다소 높은 값을 나타내었다. 이것은 밴드의 입구영향인 것으로 생각된다. 그러나  $\theta = 45^\circ$ 에서는 내벽보다 외벽에서 이 값이  $0.30 \sim 0.45$ 로 높게 나타났다. 이 현상은 유동의 원심력에 의한 것으로 생각된다.  $Re = 25,000$ 인 경우  $\theta = 90^\circ$ 에서는 유체가 밴드를 지나면서 내벽 쪽에서  $0.30 \sim 0.58$  정도의 강한 난류강도를 나타내었다. 이것은 유동이 밴드를 지나면서 유동의 방향이 바뀌면서 발생하는 현상으로 생각된다. 그러나  $\theta = 90^\circ + 6D$ 에서는  $Re$  수에 관계없이  $0.1 \sim 0.27$  정도로 낮은 값을 나타내었다. 이것은 유체가 밴드를 지나 정상적인 난류유동으로 돌아가는 현상으로 생각된다. 또한,  $y/D = 0.5$  부근에서는  $0.03 \sim 0.06$  정도로 낮게 나타났다. 이것은 유동의 최고속도영역과 일치하는 것으로 이 영역에서 난류강도가 낮게 나타나는

것으로 생각된다.

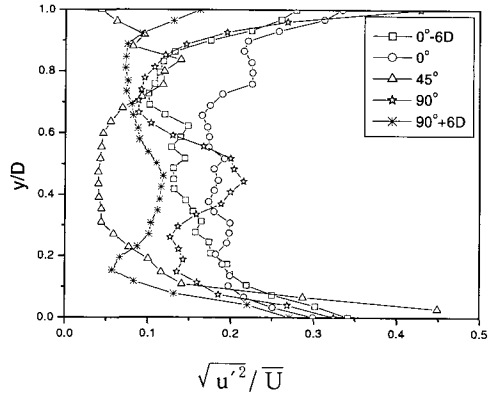


Fig. 18 Time-mean axial turbulence intensity profiles for  $Re = 10,000$  along the test tube

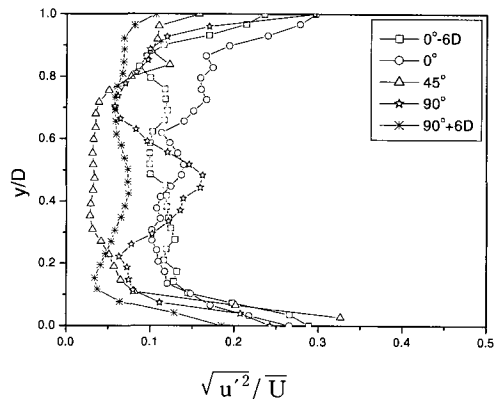


Fig. 19 Time-mean axial turbulence intensity profiles for  $Re = 15,000$  along the test tube

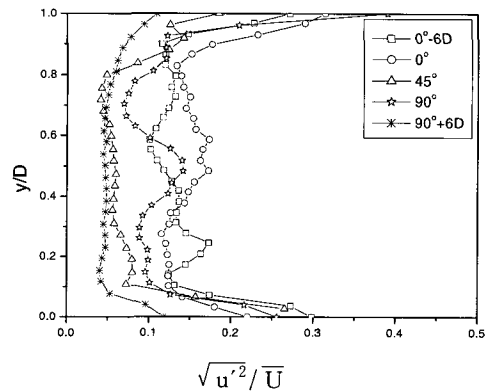
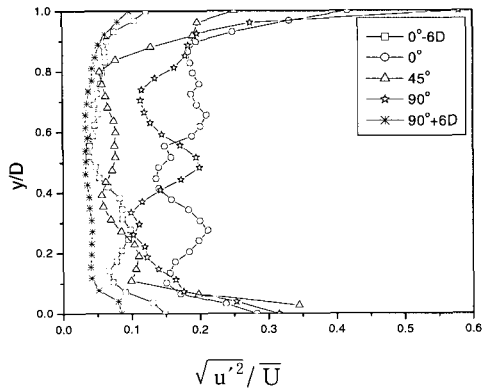


Fig. 20 Time-mean axial turbulence intensity profiles for  $Re = 20,000$  along the test tube



**Fig. 21 Time-mean axial turbulence intensity profiles for Re = 25,000 along the test tube**

### 5. 결 론

본 연구에서는 비정상적의 순간 다점 측정이 가능한 PIV 기법을 이용하여 90°곡관에서 Reynolds 수 10,000, 15,000, 20,000 그리고 25,000에서 난류유동에 대한 시간평균 속도벡터, 시간평균 주유동속도 그리고 난류강도를 구해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 곡관의 중심 부분인  $\theta = 45^\circ$ 에서 속도벡터의 분포는 외벽 쪽으로 가속되고 있고 내벽에서는 이차 유동이 발생하였다. 또한  $y/D = 0.3$  부근에서 최대값을 나타내었다.

2) 주유동속도 분포는 테스트튜브를 지나면서 최고속도가  $y/D = 0.5$ 에서  $y/D = 0.15$ 로 이동하였고, 이 최고속도 위치는 사각관에서의 경우과 다소 일치하였다.

3) 난류강도는  $\theta = 45^\circ$ 에서 내벽보다 외벽에서 원심력의 영향으로 0.30~0.45로 높게 나타나고 내벽에서는 2차유동이 발생하였다.  $\theta = 90^\circ + 6D$ 에서는 Re 수에 관계없이 0.1~0.27정도로 낮은 값을 나타내었다. 이것은 유체가 밴드를 지나 정상적인 난류유동으로 돌아가는 현상으로 생각된다.

### 후 기

본 논문은 2003년도 경남대학교 학술논문게제 연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

### 참고문헌

- [1] 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. K. Sdc. London Ser. A25, pp. 5 - 9.
- [2] Eustice, I., 1876, Flow of water in curved pipe, Proc. K. Sdc. London Ser. A, Vol. 85,1911. pp. 5 - 9.
- [3] Dean, W., 198, The streamline motion of fluid in a curved pipe, PhilosMag, Vol. 30, pp. 673 - 693.
- [4] Ito, H., 1959, Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes, J. of Basic Engineering, pp. 123 - 134.
- [5] Rowe, M., 1970, Measurements and Computations of flow in pipe bends, J. Fluid Mech, Vol. 43, part 4, pp. 771 - 783.
- [6] Mori, Y., Uchida, Y. and Ukon, T., 1971, Forced Convection Heat Transfer in a Curved Channel with a Square Cross Section, Int. J. of Heat Transfer, Vol. 14, pp. 1787 - 1805.
- [7] 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.
- [8] Said Daniel, Nader Saniei and Daniel Bartlett, 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.
- [9] Moon C., Lee G. H., and Choi Y. D., 1992, An Experimental Study on Forced Convective Heat Transfer in a Rectangular Duct with 180° Bend , J. of KSME, Vol. 16, No. 2, pp. 290-301.



- [10] Park H. Y., Yoo S. J. and Choi Y. D., 1990, "Measurement of Turbulent Flow Characteristic of a Rectangular Duct with 180° Bend by Hot Wire Anemometer", J. of KSME, Vol. 14, No. 3, pp. 734-746.
- [11] Maeng Joo-Sung, Lyu Myung Seok, Yang Si-Young and Jang Yang-Jung, 1991 "Experimental Study of Three-Dimensional Turbulent Flow in a 90° Rectangular Cross Sectional Strongly Curved Duct", J. of KSME, Vol. 15, No. 1, pp. 262-273.
- [12] Chang T. H., Oh K. J. and Lee S. B., 1995. "A Study on Development of a Circular Duct with 180° Bend and Heat Transfer Characteristics", Proceeding of the SARK '95 Annual Summer Conference pp. 118-122.
- [13] "Thinker's Eyes", TNTech Co. Ltd. <http://www.tientech.com/>
- [14] 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. of KSAE Vol. 4, No. 3 pp. 139 - 146.

## 저 자 소 개



### 장태현 (張泰鉉)

1942년 2월생. 1969년 동아대학교 기계공학과 졸업. 1971년 동아대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1991년 12월 University of Wales(Swansea, U.K.) 대학원 기계공학과 졸업(Ph.D), 2001년 5월 제6차 ASV'6(Asian Symposium on Visualization) 조직위원장 역임, 현재 경남대학교 기계자동차공학부 교수



### 이해수 (李海洙)

1974년 2월생. 2000년 경남대학교 기계공학부 졸업. 2000~2002 동대학원 기계공학과 석사졸업.