

원형단면을 갖는 90° 곡관내의 선회유동에 관한 실험적 연구

장태현† · 이해수*

An Experimental Study on Swirling Flow in a 90 Degree Circular Section Tube

Tae-Hyun Chang† · Hae Soo Lee*

Abstract. The study of swirl flow has been of technical and scientific interest because it has an internal recirculation field and its tangential velocity is related to the curvature of the streamline. The fluid flow for ducts or elbows of an internal engine has been much studied through numerical methods and experiments, but studies about swirl flow has been insufficient. Using the PIV (Particle Image Velocimetry) method, this study found the time-mean velocity distribution, time-mean turbulent intensity, with swirl and without swirl flow for Re=10,000, 15,000, 20,000, and 25,000 along longitudinal sections and the results appear to be physically reasonable. In addition, axial velocity distribution is compared with that of Jeong's, Kodadadi's and Murakami's. It was found that the highest velocity of swirl and non-swirl flow occurs in the opposite position at the center of a round tube, $\phi=45^\circ$

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

Nomenclature

- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| C_{fg} : Cross correction coefficients | u' : Axial velocity fluctuation (m/s) |
| D : Diameter of the test tube(mm) | \bar{u} : Mean axial velocity fluctuation (m/s) |
| f_i : Gray levels of the pixels within the correlation region at first image | U : Local mean axial velocity(m/s) |
| \bar{f}_i : mean Gray levels of the pixels within the correlation region at first image | \bar{U} : Mean axial velocity(m/s) |
| g_i : Gray levels of the pixels within the correlation region at second image | v : Local radial velocity(m/s) |
| \bar{g}_i : mean Gray levels of the pixels within the correlation region at second image | v' : Local radial velocity fluctuation(m/s) |
| R : Radius of curvature(mm) | \bar{v} : Mean local radial velocity fluctuation(m/s) |
| Re : Reynolds number | X : The length of the swirl generator in the swirl chamber(mm) |
| t : Time(s) | y : Radial distance from the tube wall(mm) |
| T : Measuring time(s) | |

Greek Letter

- | |
|---------------------------------------------------|
| θ : Angle of 90° bend(°) |
| ρ : Density of water(kg/m ³) |
| τ : Reynolds Shear Stress(N/m ²) |

†경남대학교 기계자동차공학부 교수
E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr
*경남대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

유동방향으로 곡률이 존재하는 특이한 기하학적 형상을 갖는 곡관 내의 유동은 곡관 입구에서 유입 할 때부터 3차원 적으로 강한 유동이 발생하여 곡관 후류 부분까지 존속하게 된다. 이러한 유동의 속도분포, 압력손실 그리고 Nusselt 수 등과같은 국소 유동변수는 설계자가 산업적 기계장치를 설계함에 있어서 최적화라는 관점에서 중요한 의미를 부여하며, 특히 열교환기 등의 설계에 있어서 에너지의 효율적인 이용 면에서 매우 중요하므로 많은 연구가 되어왔다. 내부유동에 대한 최초의 연구는 Tomson⁽¹⁾에 의하여 내부유동의 굴곡 효과가 알려졌다. 그는 굽은 강에서 물의 흐름에 대한 굴곡 개수로의 유동에 관심이 있었는데, 원심력과 경계층 지역에서 천천히 움직이는 유체사이의 상호 작용이 2차 유동을 유도한다는 현상을 이론화하였다.

Eustice⁽²⁾는 광범위한 유동의 가시화 작업으로 굴곡이 다른 여러 유리관을 사용하여 넓은 Reynolds 수의 범위에서 실험하였다. 그의 실험결과를 이용하여 Dean⁽³⁾은 곡관 내의 유동을 해석적 방법으로 연구하였다. 그는 약한 굴곡의 곡관에 완전 발달된 층류 유동에 대하여 실험하였으며, 이 결과를 간략한 Navier-Stokes식과 비교 검토하였다.

Ito⁽⁴⁾는 곡률비 $Rc=1.25\sim 14.6$ 사이의 곡관을 황동 주물로 제작하여 난류유동의 압력 강하 실험을 통해 Eustice와 Dean의 연구를 비교하였고 나아가 실질적인 측면을 고려하였다. 또한 압력강하 결과로부터 관 마찰계수에 대한 실험식을 제시하였다. 1960년에 들어와서 Binnie⁽⁵⁾는 처음으로 90° 투명관 내에 물을 이용하여 선회를 발생시키고 실험관 내부에서 공기동 (air core)이 발생됨을 발견하였다.

Rowe⁽⁶⁾는 180° 곡관에서 실험과 수치 해석적인 방법으로 2차 유동이 밴드의 시작부분에서부터 증가하여 최대 값에 이른 후 정상상태로 감소함을 발견하였고, Mori⁽⁷⁾ 등은 220° 정 사각 덕트 내에서 유체유동과 열전달에 관한 연구를 해석과 실험적으로 저항 계수와 Nusselt 수를 구하였다. Shimizu⁽⁸⁾ 등은 180° 곡관에서 가이드 베인을 이용한 선회 발생기를 이용하여 물에서 피토폴을 사용하여 수력손실과 속도분포에 관한 연구를 하였다. Sparrow⁽⁹⁾ 등은 90° 원형 밴드에서 나프탈렌 승화법을 이용하여 열전달 실험과 유적법(oil lampblack)을 이용하여 유동의 가시화 실험을

하였다. 그러나 이들의 실험에서는 속도의 분포는 언급하지 않았다. Khodadadi⁽¹⁰⁾ 등은 선회강도 $S=1.445$ 에서 수치 해석적으로 결과를 구하여 Murakami의 실험결과와 비교하여 잘 부합됨을 확인하였다. 그러나 $S=1.445$ 는 강 선회 유동으로 음(negative)의 축 방향 속도가 존재하는 영역이지만, 축 방향 속도는 양(positive)의 속도분포만 나타내었다.

1992년 Daniel⁽¹¹⁾ 등은 액정(liquid crystal)을 이용하여 액정의 색깔 변화로부터 국소 열전달계수를 계산하였다.

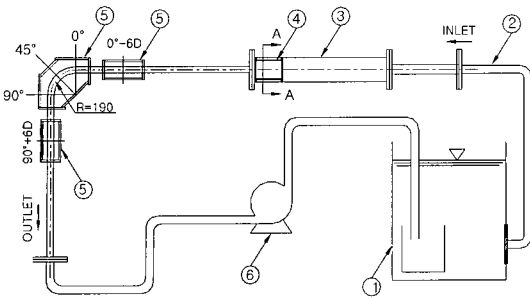
국내의 연구로는 Maeng⁽¹²⁾ 등 그리고 Moon⁽¹³⁾ 등이 180° 정사각 및 직각 단면에서 열선 풍속계를 이용하여 유체유동과 열전달에 대하여 연구하였고, 저자^(14,15,16) 등은 원형단면을 갖는 180° 곡관에서 열전달 실험과 수평 원통 관에서 열선풍속계 및 PIV(Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하여 속도분포를 구하였다.

지금까지의 유동에 대한 실험적 연구는 피토폴, 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 불가능하다는 한계를 극복하지 못하고 있다. 게다가 유동장 내에 센서를 삽입할 경우 유동이 간섭을 받는 단점이 있다.

본 연구에서는 21°C 수도 수를 작동유체로 하여 2차원 PIV 기법을 이용하여 실험을 하였다. 접선 방향 입구조건(tangential inlet condition)으로 발생시킨 선회유동을 90° 곡관의 종단면에 대해 시간평균 속도분포, 난류강도를 구하여 선회유동 및 비 선회유동에 대하여 상호 비교하여 곡관에서 선회유동의 특성을 규명하고자한다.

2. 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험장치를 나타내고 있다. 테스트 튜브는 길이와 내 경이 각각 1500 mm× $\phi 50$ mm이고 두께는 2 mm로 유리관을 가열하여 곡률 반경이 190 mm인 곡관을 만들었다. 선회 발생기로부터 테스트튜브 입구까지의 거리는 1800 mm이고, 그림의 ①은 물탱크이다. 물탱크 내부에는 펌프로부터 나온 물이 바로 물탱크 출구로 나가지 못하도록 칸막이를 설치하였다. 물탱크에서 나온 물은 호스②를 통해 와류실③으로 들어가고 선회 발생기④에 의하여 접선 방향으로 유입된 후 측정 영역⑤로 들어간다. 그리고 다시 펌프⑥



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

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

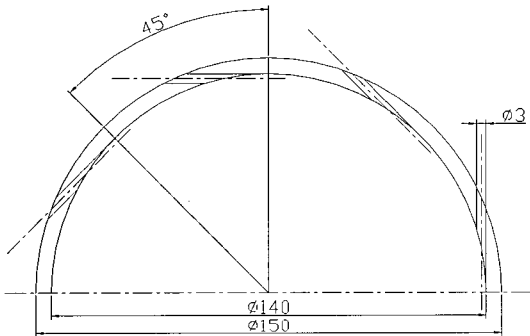


Fig. 2. A-A section views through the swirl generator.

으로 들어가서 물탱크①로 되돌아오게 하였다.

선회의 각이 클 경우 레이저 층 즉, 측정구역에 입자가 머무는 시간이 짧으므로 고출력 레이저와 고해상도의 카메라가 필요하다. 그래서 작동유체가 유입하는 부분에 내경이 같은 아크릴 재질의 투명한 관을 설치했다. 작동유체의 속도 조절은 펌프의 회전속도를 조절하여 실험을 수행하였다.

비 선회유동의 실험에서는 테스트튜브 입구에 에하니콤(honeycomb)을 설치하여 균일한 유체유동이 되도록 하였다.

측정 부분은 모두 다섯 부분으로 나누었으며 각각의 측정 부분은 유체의 밀도 차에 의해 굴절되는 것을 막기 위해 수조를 만들었다. 또한 수조의 물 표면에 얇은 투명한 판을 설치하여 물의 자유표면에서 빛의 난 반사로 인한 영상의 왜곡을 막았다.

Fig. 2는 선회 발생기의 단면도이다. 선회 발생기는 길이가 218 mm, 외경이 $\varnothing 150\text{ mm}$ 이고 접선방향으로 $\varnothing 3\text{ mm}$ 의 구멍 28개가 8조로 설치되어있다. 와류실에서 물은 선회발생기의 외곽에 있는 4개의 구멍을

통해 선회 발생기 바깥으로 들어가고 다시 접선 방향으로 설치되어있는 $\varnothing 3\text{ mm}$ 의 구멍으로 들어가 선회 유동을 만든다.

3. PIV 시스템 및 실험방법

Fig. 3은 본 실험에 사용된 PIV 시스템을 나타낸다. 고속 유동장에서 추적입자의 변위가 매우 클 경우에는 직선 등속도 조건을 만족하기 위해서는 짧은 시간간격이 필요하다. 이를 해결하는 방법으로 시공간 해상도를 제공할 수 있는 고속도 카메라를 사용하거나 고출력 펄스레이저 또는 기계식의 회전 초퍼(mechanical chopper)를 이용하고 영상을 기록할 때 필요한 조명을 제어하여 매우 짧은 시간간격을 얻는 방법, 다면체의 거울을 회전시켜 조명을 제어하는 방법 등이 있으나 고유의 단점이 있다. 이러한 단점을 원리적으로 극복할 수 있는 방법으로서 소리와 빛의 상호간섭을 이용한 AO(Acoustic Optical) 법이 개발되었다. 이것을 해결해주는 기기가 AOM(Acoustic Optical Modulator)이 있다. 이것은 레이저에서 나온 직진 광에 대하여 음향격자를 직각방향으로 높은 주파수로 진동시킬 때 발생하는 음파의 회절 작용에 의하여 레이저광의 진행각도가 미소하게 변하는 성질을 이용한 것으로 외부에서의 인가신호에 대하여 빛의 경로가 바뀌므로 이 신호를 영상기록장치와 동기를 이루도록 해서 직선 등 속도를 만족시킬 수 있는 짧은 시간간격을 만든다. AOM 제어기는 카메라와 AOM 헤드를 동기시켜 주고, AOM 헤드는 레이저를 단속시켜 주는 역할을 한다. Ar-ion 레이저(500 mW, 공랭식)에서 발생된 레이저는 AOM 헤드에서 단속된 다음 LLSP(laser light sheet probe)의 집광 장치에서 광 케이

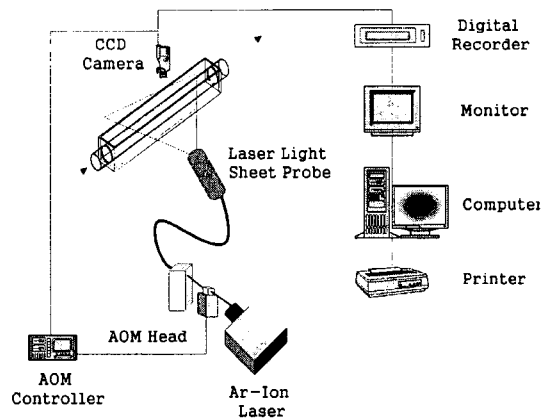


Fig. 3. Schematic arrangement of the PIV system.

블에 의해 케이블 끝에 있는 LLSP 헤드 안에 있는 렌즈에 의해 넓게 펼쳐지게 된다. 넓게 퍼진 빛은 측정 영역에 조사(irradiation)된다. 작업 유체속의 입자들에 레이저가 조사되면 빛의 산란이 일어나며 이 산란된 빛을 CCD(Charge couple device) 카메라로 촬영해서 디지털 리코더(digital recorder)나 PC에 기록하게 된다. PC에 영상이 기록될 경우 영상은 이미지 그래버(image grabber, DT3155, H×V=640×480 pixel, Grey 8 bit, Translation)를 통해 아날로그 영상을 디지털로 바꾸어 컴퓨터에 영상이 전달된다. DT3155 이미지 그래버는 256 계조치의 분해능과 수평 640 pixel과 수직 480 pixel의 해상도를 가진다. 이미지 그래버를 통해 디지털화 된 영상은 전처리과정으로 배경 이미지 제거 및 홀수 필드와 짝수 필드의 분리를 거친 후 속도 벡터 추출알고리즘(본 연구에서는 2-frame grey-level cross correlation method를 사용)으로 속도벡터를 계산했다. 식(1)은 본 연구에 사용된 관계식이다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (1)$$

실험에 사용된 작업유체는 구하기 쉬운 수돗물 (21°C)을 이용했다. 실험에 사용된 입자는- 고체인 나일론 12(비중 1.02, 입자의 크기 120 μm)를 사용했다. 입자의 크기가 다소 크지만 선회유동의 경우 빠른 접선 방향속도를 감안하여 본 제품을 사용하였다. 고체 입자의 경우 빛에 쉽게 반응해 실험에 용이하고, 직진 성이 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 Reynolds 수 10,000, 15,000, 20,000 그리고 25,000에 대하여 각각 5곳 즉, θ=0° -6D ~ -7D, θ=0°, θ=45°, θ=90° 그리고 θ=90°+6D~7D에서 행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 시간평균 주 유동 속도

속도벡터는 θ=0° 부터 θ=45° 부근까지는 균일한 상태로 외벽 쪽으로 쏠리는 현상을 나타내지만 그 후부터는 내벽 쪽으로 이동하고 있다. θ=90° 이후부터는 관 벽 근처를 제외하고는 난류유동분포 상태로 되

돌아 가고있음을 나타내고 있다.

Fig. 9 ~ Fig. 13까지는 선회유동에서 Re=10,000인 경우의 속도 벡터를 나타내고 있다. Fig. 9는 테스트 튜브 입구의 직선부분인 θ=0° -6D ~ -7D에서의 속도 벡터이다. 관 중심부에서 음의 속도 벡터가 존재함을 잘 나타내고 있다. 곡 관을 지나면서 유동의 벡터 성분은 관 중심부에서 음의 속도영역이 변하고 관 출구 부근에서는 선회가 소멸되는 현상을 나타내고 있다. 음의 속도영역은 테스트 튜브를 따라 이동하여 θ=45° 까지 외벽 쪽으로 이동한 후 다시 내벽 쪽으로 이동하였다. 이와 같이 관 입구영역에서 음의 속도벡터가

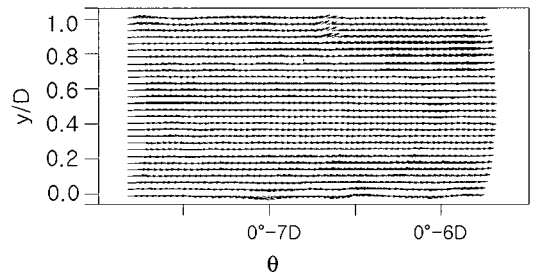


Fig. 4. Time-mean velocity vector distribution without swirl for Re=10,000 at θ=0° -6D ~ -7D

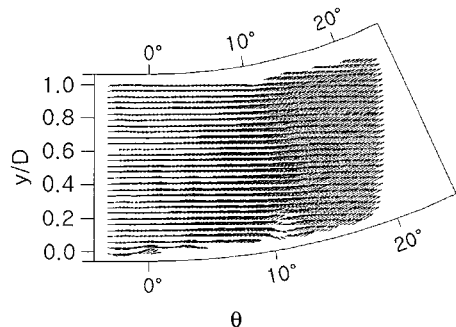


Fig. 5. Time-mean velocity vector distribution without swirl for Re=10,000 at θ=0°

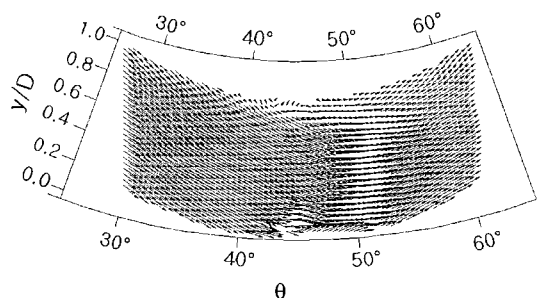


Fig. 6. Time-mean velocity vector distribution without swirl for Re=10,000 at θ=45°

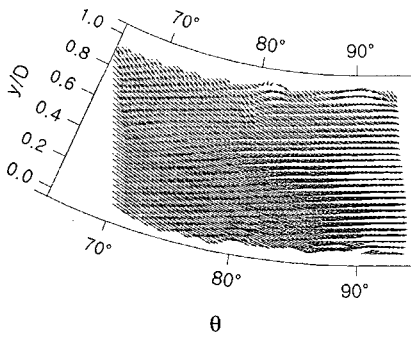


Fig. 7. Time-mean velocity vector distribution without swirl for $Re=10,000$ at $\theta=90^\circ$

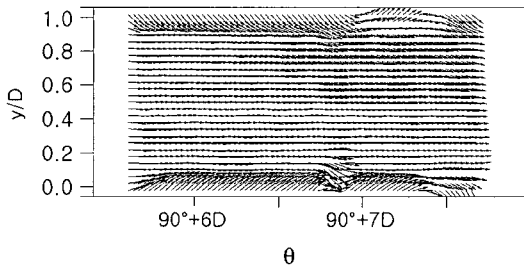


Fig. 8. Time-mean velocity vector distribution without swirl for $Re=10,000$ at $\theta=90^\circ+6D$

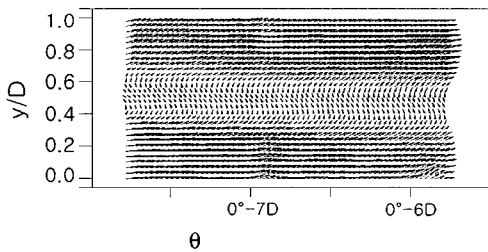


Fig. 9. Time-mean velocity vector distribution with swirl for $Re=10,000$ at $\theta=0^\circ-6D$

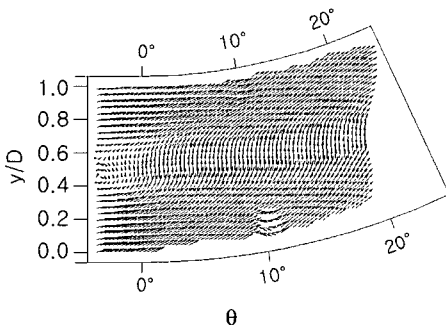


Fig. 10. Time-mean velocity vector distribution with swirl for $Re=10,000$ at $\theta=0^\circ$

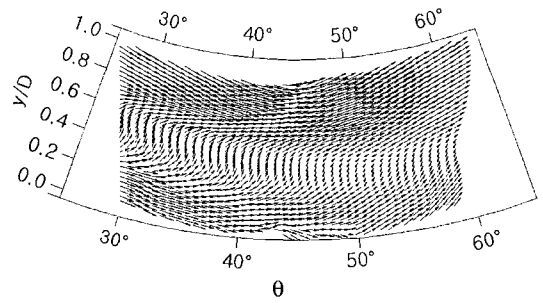


Fig. 11. Time-mean velocity vector distribution with swirl for $Re=10,000$ at $\theta=45^\circ$

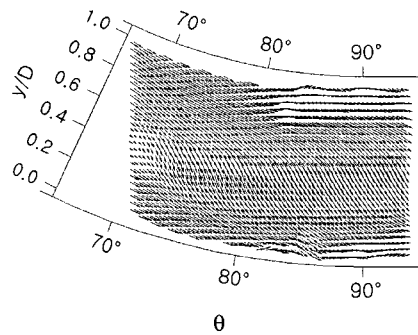


Fig. 12. Time-mean velocity vector distribution with swirl for $Re=10,000$ at $\theta=90^\circ$

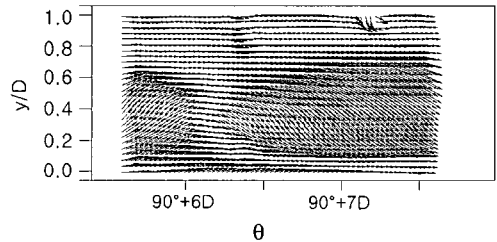


Fig. 13. Time-mean velocity vector distribution with swirl for $Re=10,000$ at $\theta=90^\circ+6D$

저자^(15,16)등의 직관에서 연구한 결과와 잘 부합하였다. Fig. 13은 90° 곡 관을 지나 $6D \sim 7D$ 에서 속도 벡터로 아직도 유동은 곡 관의 영향을 받아 외 벽 쪽에 조밀한 속도분포를 나타내고있다.

이들 속도 벡터로부터 국소 주 유동속도를 선회 및 비 선회유동영역에 대하여 구하였다. Fig. 14는 비 선회유동에서 $Re=10,000$ 인 경우의 국소 속도 분포를 나타낸 그림이다. 테스트 튜브 입구에서부터 최고속도의 위치가 $y/D=0.5$ 에서 나타나며, $\theta=45^\circ$ 이후부터 $\theta=90^\circ+6D \sim 7D$ 까지 최고속도의 위치는 외벽(concave wall)쪽으로 치우치고 있다. 이것은 테스트 튜브 입구에서부터 곡 관의

나타나는 현상은 강 선회 유동에서 지금까지 발표된

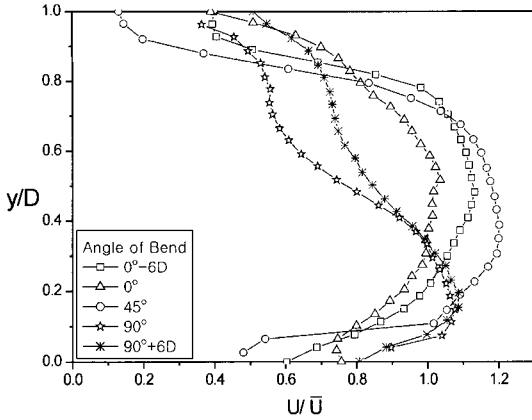


Fig. 14. Streamwise mean velocity profile for $Re=10,000$ without swirl along the test tube.

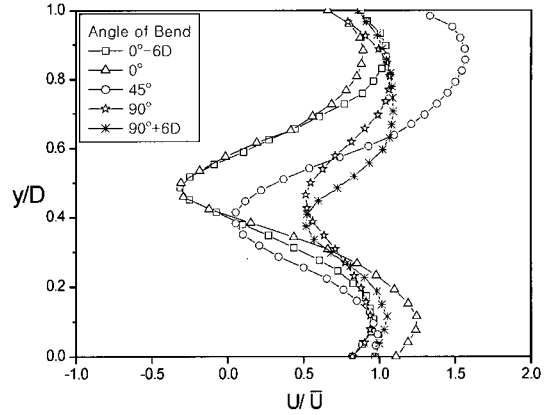


Fig. 16. Streamwise mean velocity profile for $Re=15,000$ with swirl along the test tube.

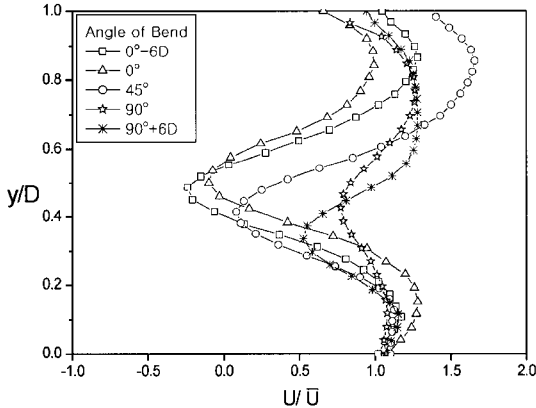


Fig. 15. Streamwise mean velocity profile for $Re=10,000$ with swirl along the test tube.

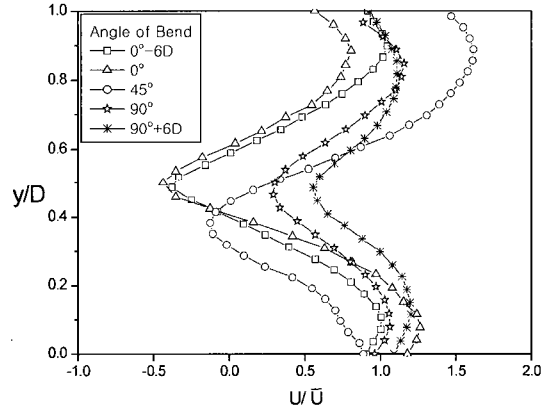


Fig. 17. Streamwise mean velocity profile for $Re=20,000$ with swirl along the test tube.

영향으로 인한 원심력에 의한 것으로 생각된다. 이와 같은 결과는 Reynolds 수가 증가하여도 유사한 경향을 나타내었으며, 지금까지 발표된 결과와 부합되는 것으로 생각된다.

Fig. 15 ~ Fig. 18은 선회유동에서 $Re=10,000$, $15,000$, $20,000$ 그리고 $25,000$ 경위의 곡소 주 유동속도 성분을 나타낸다. 속도벡터에서와 같이 테스트튜브 입구에서는 이 속도는 관 벽 근처에서는 강한 축 방향 성분을 나타내고 관 중심에서는 음의 속도를 나타내는 강 선회유동을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 지금까지 선회유동 연구에서 발표된 결과로 보면 선회강도(swirl intensity)가 0.6 이상의 강 선회에서 나타나는 현상으로 본 연구에서는 2차원적인 연구로 인하여 이 강도 값을 구하지 못하였다. 이 속도는 테스트튜브를 따라 $\theta=45^\circ$ 까지 내벽(convex wall)쪽으로 치

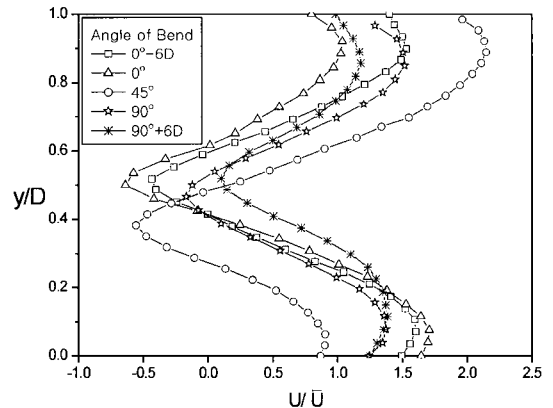


Fig. 18. Streamwise mean velocity profile for $Re=25,000$ with swirl along the test tube.

우치고, 이 위치에서 Reynolds 수에 관계없이 최고 값을 나타내고 있다. $\theta=45^\circ$ 이후에서부터 외벽 쪽으로

이동하고, $\theta=90^\circ$ 이후부터는 선회각이 소멸되면서 속도 분포는 균형을 잡아가고 있다. 이와 같은 현상은 지금까지 발표된 곡관에서 비 선회유동의 속도분포와 반대되는 현상을 나타내었다. 이것은 선회유동에서 접선방향속도 성분과 곡관의 특성에 기인된 것으로 생각된다.

Fig. 19와 Fig. 20은 속도분포를 Jeong⁽¹⁷⁾등의 사각관의 결과와, Khodadadi⁽¹⁰⁾와 Murakami등의 원형관의 연구 결과와 비교하였다.

Fig. 19에서는 비 선회유동에서 Jeong⁽¹⁷⁾의 “확장된 $\kappa-\epsilon$ ” 난류 모델에 의한 수치해석 결과와 비교하였다. 본 연구에서 얻은 비 선회유동의 속도분포가 층류 유동과 같은 포물선 형태를 나타내는 것은 선회 발생기출구에서 하니콤을 사용한 결과인 것으로 생각된다. $\theta=11.25^\circ$ 와 $\theta=41.25^\circ$ 에서 Jeong의 속도분포

는 본 실험의 $\theta=90^\circ$ 에서의 값과 거의 비슷한 형태를 나타내고 있으며 완만한 속도 구배를 나타낸다. 그러나 $\theta=0^\circ\sim\theta=45^\circ$ 에서는 큰 차이를 나타내고 있다. 이것은 Jeong의 경우는 $Re=750,000$ 으로 본 연구에서의 $Re=25,000$ 보다 아주 큰 것에 기인된 것으로 생각된다. 또한, 장치의 차이 즉, Jeong은 90° 로 굽혀진 4각 관인 반면 본 연구에서는 90° 굽혀진 원관이기 때문에 생각된다. 그러나 양 Reynolds수에서 $\theta=45^\circ$ 이 이후부터는 속도분포가 외벽 쪽으로 이동하는 유사한 경향을 나타내고 있다.

그러나 곡률 반경을 가지고있는 원형튜브에서 선회유동에 대한 연구는 적었다.

Fig. 20은 선회유동에서 Khodadadi⁽¹⁰⁾의 수치해석 결과와 Murakami의 실험결과를 비교한 것이다. 두 사람의 결과 모두 $Re=30,000$ 으로 관 벽 근처에서 높은 속도를 보이고 관 중심부에서는 낮은 속도를 잘 나타내고 있다. 그러나 이들 두 속도성분은 음의 값을 나타내지 않은 약 선회에서 구한 결과인 것으로 생각된다. 특히 $X/D=20$ 에서의 Khodadadi의 수치해석 결과와 Murakami의 실험 결과가 잘 부합하는 것을 볼 수 있다. 그러나 본 실험의 결과와는 외벽 근처에서 큰 차이를 보이고 있다. 이는 실험조건의 차이로 생각된다. 즉, Khodadadi의 선회각도는 $S=1.445$ 로 강 선회이지만 그의 결과 중 $X/D=5.1$ 에서는 중앙부분으로 갈수록 속도가 줄어들기는 하지만 음의 속도분포(negative velocity)까지 도달하지는 않았다. 이는 약 선회에서 얻은 속도성분을 수치해석에서 경계조건으로 이용한 결과로 생각된다. 그러나 2-Cell 형태의 속도분포를 나타내는 것은 유사한 현상이었다.

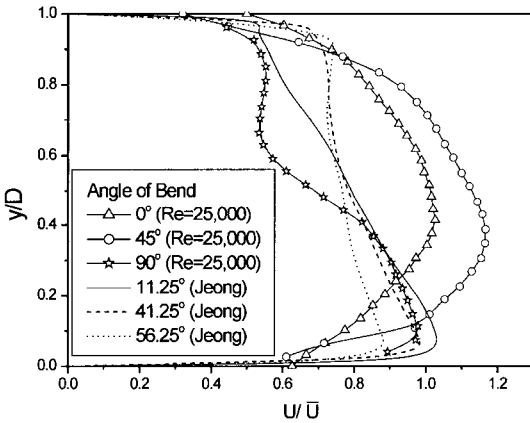


Fig. 19. Comparisons of streamwise mean velocity profiles for non-swirl with Jeong's.

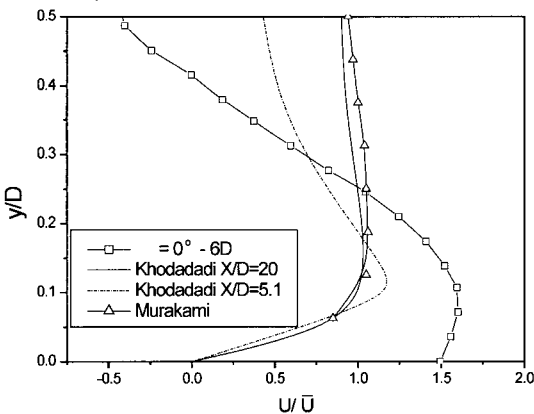


Fig. 20. Comparisons of streamwise mean velocity profiles for swirl with Khodadadi's and Murakami's.

4.2 난류강도

Fig. 21은 비 선회유동에서 $Re=10,000$ 인 경우의 시간 평균 난류강도를 나타낸 것이다.

Fig. 22 ~ Fig. 26은 선회유동에서 $Re=10,000$ 인 경우의 주 유동방향 난류강도가 테스트튜브를 따라 변하는 과정을 나타내는 결과이다. 테스트튜브 입구인 $\theta=0^\circ -6D \sim -7D$ 에서는 주 유동속도에서와 같이 2-Cell(double peak) 현상이 나타나고 있다. 이것은 강 선회유동으로 나타나는 재 순환영역에 기인된 것으로 생각된다. 그러나 $\theta=0^\circ$ 에서는 2-Cell이 점차 소멸되고 있고, 난류강도의 최고영역 역시 90° 곡 관을 통하여 변하고 있음을 보여준다. $\theta=45^\circ$ 근처에서는 최고영역이 테스트튜브 외벽 쪽으로 이동하고 있다. 그러

나 테스트 튜브 끝인 $\theta=90^\circ+6D\sim 7D$ 에서는 Cell은 소멸되고 있음을 보여준다. 즉, 이 현상은 테스트 튜브를 통하여 선회유동이 소멸되면서 난류강도 역시 소멸되는 현상을 나타낸다. 그러나 $Re=25,000$ 의 경우 이와 같은 현상은 $\theta=90^\circ+6D\sim 7D$ 에서도 강 선회 현상을 나타내었다. 이것은 선회 강도가 Re 수의 함수인 것으로 생각된다.

Fig. 27 ~ Fig. 30은 $Re=10,000, 15,000, 20,000$ 그리고 $25,000$ 인 경우에서 선회유동에서 국소 난류강도를 나타내고 있다. Fig. 27은 Fig. 22로부터 Fig. 26

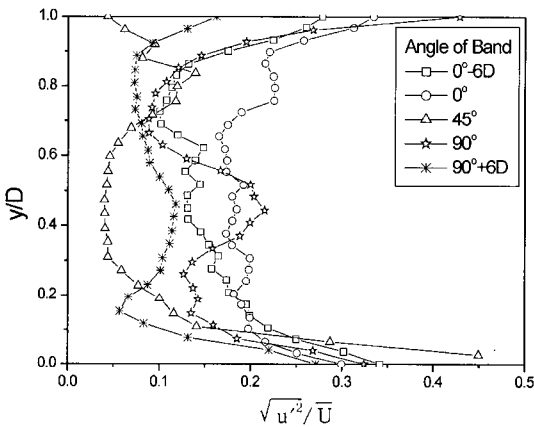


Fig. 21. Time mean turbulence intensity profiles with non swirl for $Re=10,000$ along the test tube.

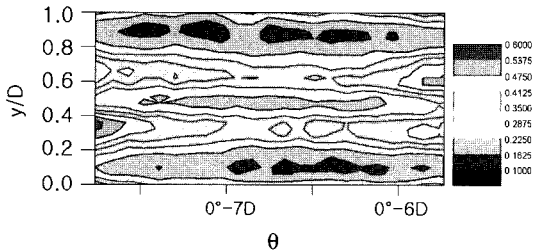


Fig. 22. Contours of streamwise turbulence intensity with swirl for $Re=10,000$ at $\theta=0^\circ-6D$

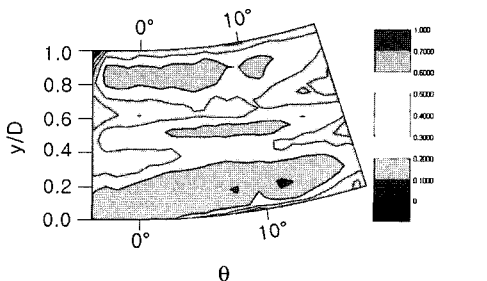


Fig. 23. Contours of streamwise turbulence intensity with swirl for $Re=10,000$ at $\theta=0^\circ$

까지의 측정결과로부터 실시간 평균 난류강도를 계산하여 정리한 것이다. 관 입구인 $\theta=0^\circ-6D\sim 7D$ 에서 강한 선회 유동을 나타내는 2-Cell 현상을 보이고 있다. 테스트 튜브입구를 들어오면서 $Re=10,000$ 에서 난류강도는 관 중심근처에서 최고치를 나타내고 있다. 같은 방법으로 $Re=15,000, 20,000$ 그리고 $25,000$ 인 경우를 Fig. 28, 29, 30에 각각 나타내었다. 이들 결과에 의하면 $Re=15,000$ 의 경우 $\theta=0^\circ$ 에서부터 2-Cell 현상이 나타나고 $Re=25,000$ 에서는 $\theta=90^\circ+6D$ 까지 2-Cell이 계속되었다.

난류강도의 최고점은 $\theta=45^\circ$ 근처에서부터 외벽 쪽으로 이동하고 있음을 보여주고, θ 가 증가함에 따라 난류강도는 소멸하고 있다. 이것은 곡관이 난류강도에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 그러나 양 관

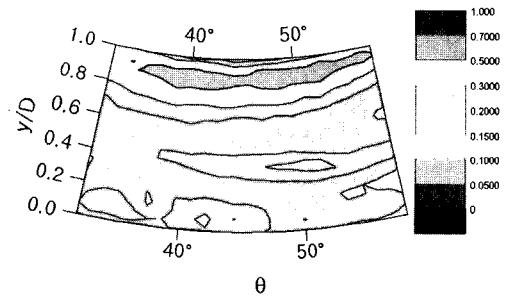


Fig. 24. Contours of streamwise turbulence intensity with swirl for $Re=10,000$ at $\theta=45^\circ$

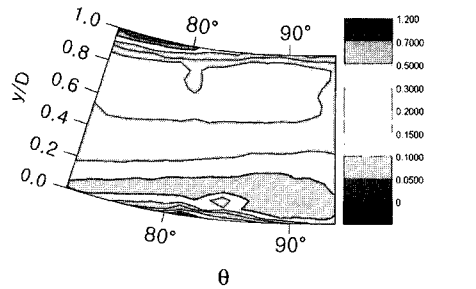


Fig. 25. Contours of streamwise turbulence intensity with swirl for $Re=10,000$ at $\theta=90^\circ$

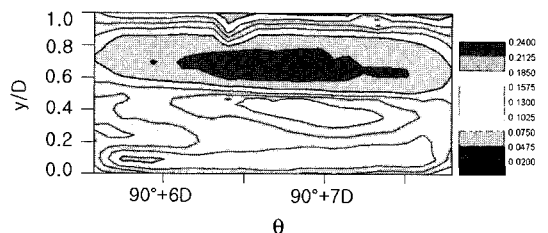


Fig. 26. Contours of streamwise turbulence intensity with swirl for $Re=10,000$ at $\theta=90^\circ+6D$

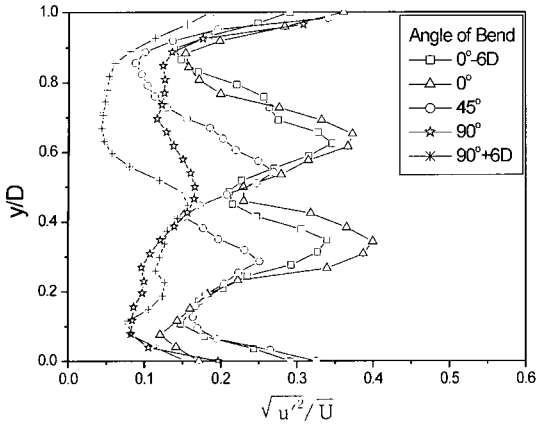


Fig. 27. Time mean turbulence intensity profile for Re=10,000 with swirl along the test tube.

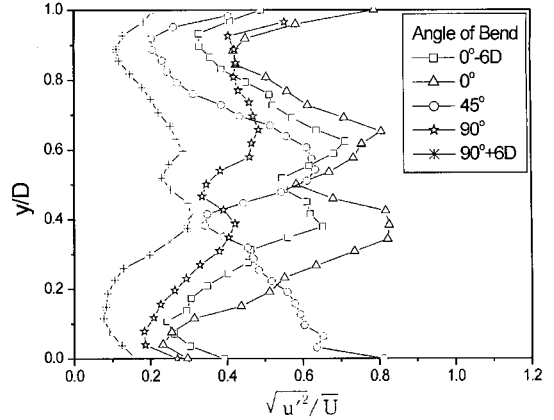


Fig. 30. Time mean turbulence intensity profile for Re=25,000 with swirl along the test tube.

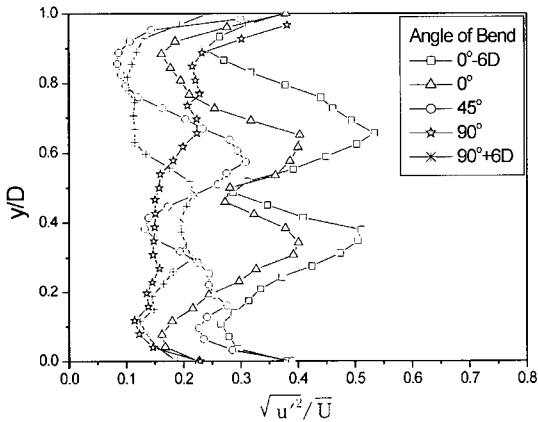


Fig. 28. Time mean turbulence intensity profile for Re=15,000 with swirl along the test tube.

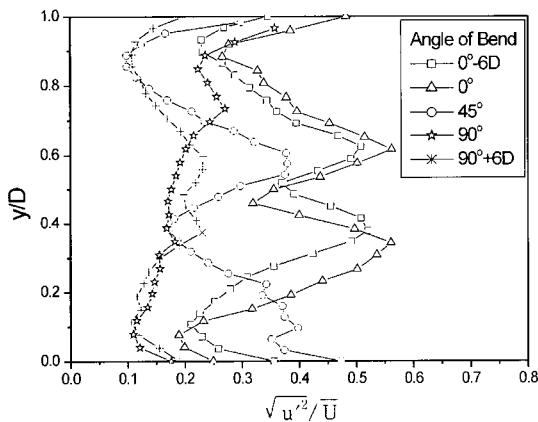


Fig. 29. Time mean turbulence intensity profile for Re=20,000 with swirl along the test tube.

벽 근처에서는 비 선회보다 큰 난류강도를 나타내었다. 이것은 선회유동의 접선방향속도성분에 기인된

것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 PIV 기법을 이용하여 Reynolds 수 10,000, 15,000, 20,000 그리고 25,000일 때의 비 선회유동 및 선회유동에 대한 시간평균 속도분포, 시간평균 난류강도를 구해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비 선회유동의 속도분포에서 최고속도 위치는 테스트 튜브의 입구에서는 $y/D=0.5$ 에서 나타나지만 $\theta=45^\circ$ 를 지나면서 $y/D=0.2$ 이하로 내려갔다. 즉 최고속도의 위치가 중심에서 외벽쪽으로 이동했다.
2. 선회유동의 경우는 관 입구에서부터 강 선회인 2-Cell 현상을 나타내고 테스트 튜브를 따라가면서 선회가 점차 소멸되어 $\theta=45^\circ$ 까지는 최고 속도영역이 내벽 쪽으로 이동되나 그 이후부터는 외벽 쪽으로 이동하였다.
3. 시간평균 난류강도에서 비 선회유동의 경우 관 벽 부근에서 최대 값을 나타내었다. 하지만 선회유동의 경우 관 입구 쪽에서 강한 2-cell 현상을 보였고, 테스트 튜브를 따라가면서 선회강도의 소멸과 함께 감소하는 현상을 나타내었다. 그러나 $Re=25,000$ 에서는 관의 출구 쪽인 $\theta=90^\circ+6D$ 에서도 여전히 약한 2-cell 현상을 보였다.

후 기

본 연구는 2002학년도 경남대학교 학술논문게재 연구비지원으로 수행되었으며, 관계 기관에 감사를 드립니다.

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, 1876.
- 2) Eustice, I., "Flow of water in curved pipe", Proc. K. Sdc. London Ser. A, Vol.85, 1911. pp.5~9.
- 3) Dean, W., 1928, "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) Binnie, A.M. 1962, "Experimental on the Swirling flow of water in a Vertical pipe and a Bend", Proc. Roy. Soc. A, Vol.270, plate, 10, pp.452~465.
- 6) Rowe, M. 1970, "Measurements and Computations of flow in pipe bends", J. Fluid Mech, Vol.43, part 4, pp.771~783.
- 7) Mori, Y., Uchida, Y. and Ukon, T., 197, "Forced Convection Heat Transfer in a Curved Channel with a Square Cross Section", Int. J. of Heat Transfer, Vol.14, pp.1787~1805.
- 8) 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.
- 9) Sparrow, E.M. and Chrysler, G.M., 1986, "Turbulent Flow and Heat Transfer in Bends of Circular Cross Section : I-Heat Transfer Experimental", J. of Heat Transfer, Vol.108. pp.40~47.
- 10) 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.
- 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) Maeng, J.S., Lyu, M.S., Si-Young Yang and Jang Y.J., 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.
- 13) Moon, C., Lee, G.H. and Choi, Young Don , 1991, "A Experimental Study on Forced Convective Heat Transfer in a Rectangular Duct with a 180° Bend" J. of KSME Vol.16, No.2 pp.290~301.
- 14) 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 Bend with Uniform Heat Flux", J. of KSME(B) Vol.21, No.5 pp.615~627.
- 15) Medwell, J.O., Chang, T.H. and Kwon S.S. , 1989, "A Study of Swirling Flow in a Cylindrical Tube", Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.1 pp.265~274.
- 16) 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.
- 17) 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.