

< 논문 >

## 180° 곡관덕트의 출구영역에 연결된 직관덕트에서 층류유동의 속도분포와 2차유동

손현철<sup>†</sup> · 이행남<sup>\*\*</sup> · 박길문<sup>\*</sup>  
(2005년 3월 2일 접수, 2005년 8월 30일 심사완료)

### Axial Velocity Profiles and Secondary Flows of Developing Laminar Flows in a Straight Connected Exit Region of a 180° Square Curved Duct

Sohn Hyun-Chull, Lee Heang-Nam and Park Gil-Moon

**Key Words:** Laminar Flow(층류유동), PIV(입자영상속도계측기), CFD(전산유체역학), Square Cross Sectional(정사각단면), Curved Duct(곡관덕트), Mosquito Coils Particles(모기향 입자)

#### Abstract

In the present study, characteristics of steady state laminar flows of a straight duct connected to a 180°curved duct were examined in the entrance region through experimental and numerical analyses. For the analysis, the governing equations of laminar flows in the Cartesian coordinate system were applied. Flow characteristics such as velocity profiles and secondary flows were investigated numerically and experimentally in a square cross-sectional straight duct by the PIV system and a CFD code(STAR CD). For the PIV measurement, smoke particles produced from mosquito coils. The experimental data were obtained at 9 points dividing the test sections by 400 mm. Experimental and numerical results can be summarized as follows. 1) Reynolds number,  $Re$  was increased, dimensionless velocity profiles at the outer wall were increased due to the effect of the centrifugal force and secondary flows. 2) The intensity of a secondary flow became stronger at the inner wall rather than the outer wall regardless of Reynolds number. Especially, fluid dynamic phenomenon called conner impact were observed at dimensionless axial position,  $x/D_h=50$ .

#### 기호설명

$A$  : 덕트의 단면적 [mm]  
 $a$  : 덕트중앙에서 가로폭 [mm]  
 $b$  : 덕트중앙에서 세로폭 [mm]  
 $D_h$  : 수력반경 ( $=4ab/(a+b)$ )[mm]

$Re$  : 정상유동의 Reynolds수 ( $=D_h \cdot u_m/v$ )  
 $u_m$  : 단면평균속도값 [m/s]  
 $x, y, z$  : 시험덕트의 좌표  
 $\nu$  : 동점성계수 [ $m^2/s$ ]

#### 1. 서론

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 조선대학교 기계공학과  
<sup>\*</sup> 회원, 조선대학교 기계공학과  
E-mail : gmpark@chosun.ac.kr  
Tel : (062)230-7057 Fax : (062)230-7057  
<sup>\*\*</sup> 회원, 조선대학교 기계공학과

공조기기를 포함한 플랜트의 효율, 운습도, 공기청정 및 환기 등 제반조절설비<sup>(1)</sup>의 필수적인 관로유동에 관한 연구는 직관인 경우를 중심으로 진전되어 축소관이나 확대관과 같은 단면적이 변

화하는 관로나,<sup>(2)</sup> 단면 형상이 원형이 아닌 다른 형태의 관로망<sup>(3)</sup>에 대한 연구로 급속히 확대되고 있다. 대부분의 관로망은 곡관, 직관 그리고 단면의 변화 등 아주 복잡하게 이루어져 있으며 대부분의 연구는 직관 및 곡관에 대한 단일 연구만을 행하였다.<sup>(4)</sup> 각종 유동장을 가진 덕트유동에 대한 과거의 연구들을 살펴보면 Han<sup>(5)</sup>은 사각덕트내의 층류정상유동에서 운동량방정식을 선형화 시켜서 균일한 속도분포로부터 완전히 발달된 속도 분포까지 전 영역에 걸쳐 속도분포에 대한 수치해석으로 압력분포등에 대한 이론적 연구를 하였으며, Godbole<sup>(6)</sup>등은 사각단면 덕트에서 유한요소법을 이용하여 속도분포를 수치 해석하였다. Rubin<sup>(7)</sup> 등은 4각단면덕트에서 덕트 중심에서 속도분포와 모서리 부근에서 2차유동을 수치해석적인 방법으로 연구하였다. Spezialw<sup>(8)</sup>는 회전하는 중형비가 2인 사각덕트에 대해서 각속도의 증가에 따른 2차유동의 특성을 연구하였다. 그는 각속도의 증가에 따라 2차유동이 2개의 와류를 가지는 안정된 유동에서 4개의 와류를 가지는 불안정한 유동으로 변화했다가 다시 2개의 와류를 가지는 안정된 유동으로 나타남을 밝혔으며, Benton<sup>(9)</sup>은 원형 파이프에서 지구의 자전에 의한 영향을 계산하여 2개의 와류가 존재한다는 사실을 밝혔다. 최근 들어 덕트내부 유동에 대한 많은 연구가 이루어지면서 덕트내부의 유동은 전산 유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)분야에서 슈퍼컴퓨터를 이용한 유동해석을 발전시키고 있으며 또한 입자영상속도계측기를 이용하여 한 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 이들에 대한 연구결과를 살펴보면 Lee<sup>(10)</sup>는 PIV를 이용한 순간속도장 측정에 관한 기초연구를 행하였고, Min<sup>(11)</sup> PIV 기법을 이용하여 파형 벽면을 가지는 내부 유동 특성을 규명하였고 Kim<sup>(12)</sup>은 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 고속 비행체의 최적 설계에 대해서 연구하였고, Jang<sup>(13)</sup>은 선박용 프로펠라와 선체의 상호간섭에 대해 연구하였으며 설비분야에 적용된 연구들로 Min<sup>(14)</sup>은 사각 실린더 주위의 유동을 제어함에 따라 표면에 미치는 압력 분포의 형태를 연구하였다. PIV계측과 CFD해석을 통해 비교한 연구로 Lee<sup>(15)</sup>는 분기 사각덕트 내부에서 PIV와 CFD를 이용하여 분지부에서의 축방향속도와 2차유동분포를 측정하여 이론해와 PIV 계측 실험 결과로부터 얻어진 속도

분포, 운동에너지 및 와류분포 등의 유동 특성에 대해서 연구하였다.

본 연구에서는 곡관 덕트에 연결된 정사각단면의 직관 덕트내에 층류정상유동을 발생시켜 이들 유동에 대한 축방향의 속도분포 및 2차유동을 PIV를 이용하여 계측한 후 CFD를 사용하여 비교 검토하였다. 연구 결과는 덕트내부의 기류분포를 고려하여 급기 환기 및 배연 등을 포함한 유체수송계획을 세울 수 있도록 하며 보다 정확성을 얻어 덕트 및 관로망 설계에 실제 적용될 수 있게 함을 목적으로 하였다. 또한 공조설비부에서 온-습도, 공기청정, 환기 등 제반 조절 설비의 합리적 조합으로 환경 제어부하를 크게 경감시킬 수 있도록 하며 기계공학은 물론 환경 및 상하수도 설비에 이르기까지 유체공학에 바탕을 둔 유체유동에 관련된 설계에 자료로 제공 될 것으로 사료된다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

곡관 후류에 연결된 직관 덕트의 입구영역에서 층류정상유동의 축방향속도분포 및 2차유동을 측정하기 위해 PIV를 사용하여 축방향을 따라 측정 한 후 CFD를 사용하여 검토하였다. 본 실험에 이용된 작동유체는 공기이고, 산란입자로는 코일형 모기향을 이용하였다. 산란입자의 크기는 0.1~0.3 $\mu$ m로 본 실험 측정기인 PIV의 fringe 크기와 비교적 일치하여 선택하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 작동유체의 유동 경로는 실험덕트 입구측에 설치된 정류상자 내에 실험에 사용할 입자를 생성할 수 있는 모기향 연소장치를 갖추었고 생성된 모기향 입자는 입구측 직관부(4000mm)로 유입되어 곡률반경이 400mm 인 180°곡관부 및 출구 측 직관부(4000mm)의 덕트를 통과하여 서지탱크와 오리피스를 거쳐 흡입형 송풍기에 의해 송출된다. Fig.1에 설명된 scoatch-yoke형 가진기는 비경상유동을 계측하는 장치로서 본 실험에서는 개도 밸브를 차단시켜 사용하지 않았다. 실험에 사용된 덕트 단면의 크기는  $2a \times 2b = 40 \times 40$ (mm)이고, 길이가 4000(mm)인 정사각 단면을 갖으며 곡률반경이 400 mm인 180°곡관을 중심으로 U자형을 형성하고 있다. 덕트는 매끄러운 투명 아크릴로 제작되었으며, 덕

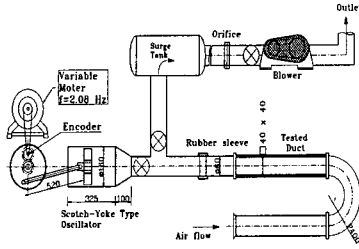


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

트입구에는 정류상자 및 벨마우스형 유입관 (inlet bell mouth)을 설치하였다. 정류상자의 하단에 공기 유입구[500 × 500 × 200 (mm)]를 유입관에 설치하여 무풍상태가 되도록 하였다. PIV의 보정실험은 열선유속계 (Hot-wire anemometer)에 의한 측정값과 비교하였다. 보정실험의 결과는 최소자승법에 의하여 속도와 전압의 관계식  $\Delta U = 4\Delta E$ 를 얻었으며, 최대 오차율은 4% 이내였다. 본 측정에 사용한 입자영상유속계(PIV)는 514.5nm와 488.0nm의 기본 파장을 발산하는 Ar-Ion 레이저로서 효율은  $10^{-1}$ 의 오더를 갖으며 4~5W정도의 가시광으로 시험덕트에 비추게 하여 고속카메라(Photron사, 최대 600pps, 640×240Pixel)로 촬영하였다. PIV에서 해석할 영상을 Hi-speed Camera 등과 같은 영상매체를 통해 나타나는 영상신호를 샘플 당 정의된 비트로 디지털화하여 PC가 처리할 수 있는 신호로 바꾸어 주었다. 고속카메라를 가시광 레이저와 수직방향으로 frame 속도를 120fps로 설정하고 촬영하였으며 135장 비율로 저장하여 평균값을 얻어 도표로 사용하였다. 산술, 논리연산 및 영상처리조작을 행하여 정보를 분석하기 위하여 이미지 보드를 구성하였는데 이미지 보드의 구성은 DT사의 DT3152보드이고 구성은 입출력 LUT (Look-Up-Table)와 이미지 메모리 그리고 입출력을 위한 A/D 및 D/A컨버터, 외부트리거 및 외부동기신호를 위한 포트가 구성되어 있다.

2.2 실험방법

본 실험에서 사용한 흡입형 송풍기는 3m<sup>3</sup>/min의 풍량 및 600 mmAq의 정압 그리고 최대 3500rpm의 회전수를 갖는 송풍기로서 그 위치는 덕트의 말단에 위치한 Surge tank 직후에 설치되

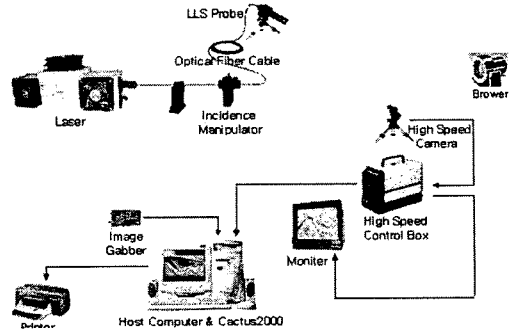


Fig. 2 Schematic diagram of the PIV system

어 있다. 유입량의 조절은 개도밸브에 의해 조절하고 rpm의 조절은 가변저항기를 사용하였다. 또한 Surge tank는 직경 600mm 높이 800mm로 제작되었다. 본 실험에서는 180°곡관에 연결된 출구측 직관부에 PIV계측실험을 통해서 무차원 축방향위치 ( $x/D_h$ ) 및 레이놀즈수를 변화시켜가면서 덕트의 중심에서 축방향위치를 따라 속도분포를 측정하였다. 실험에서 무차원 축방향위치가 변함으로 LLS probe를 레이저 본체에 고정하고 optical fiber line로 연결하여 임의의 위치와 각도로 설치할 수 있도록 하였다. 본 실험에서 영상 입력장치는 고속도 카메라이고 영상처리장치(Image board)는 입력영상데이터를 임시 보관하는 이미지 메모리와 메인 프로세서 및 연산 유니트를 갖추고 있다. 입력된 칼라신호를 보다 깨끗하게 획득하기 위하여 크로미너스 노치 필터에서 칼라정보를 제거하고 칼라정보가 제거된 아날로그 신호를 샘플링하여 A/D 변환기에서 디지털화하며 플래쉬 변환기에 의해서 행해질 수 있도록 하였다. 영상처리장치는 영상 Data를 하드디스크에 저장하였다. 자료처리는 Cactus'2000 software program에 의해 정리하였다. Fig. 2 는 PIV system 개략도이다. 본 논문에서 곡관덕트내의 유량 및 레이놀즈수 작기 때문에, 열 전달과 압축성 효과를 무시했으며, 속도분포 및 2차유동을 분석하기 위해 PIV계측 실험과 CFD 비교를 통한 실험을 목적으로 실시하였다. 분석을 위해 사용된 해석 알고리즘으로 SIMPLER 이다. 실험장치에서 직교좌표계에서 1cm 당 1개의 격자를 선택하여 Test-section의 총 격자의 수는 79431개였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 축방향속도분포

층류 정상유동의 발달과정을 고찰하기 위해 무차원 축방향위치 80인 곳까지 측정된 후 유동이 완전히 발달되었다고 생각되는 무차원 축방향위치 50인 곳까지의 PIV로 계측한  $x-y$  축에 대한 속도벡터를 Fig. 3에서 Fig. 5까지 나타내었다. 유량변화에 따른 Reynolds수는 각각 1,150, 1,650, 2,150이다. 실험 결과를 고찰해 보면 Reynolds수에 관계없이 곡관의 영향을 받는 직관덕트의 입구영역에서는 곡관에 의한 원심력의 영향으로 관단면 전 영역에서 강한 와류가 발생과 소멸을 반복하고 무차원 축방향 위치가 증가 될수록 유동이 점차 안정화되어가며  $x/D_h=50$  이후부터 출구쪽에 가까워짐에 따라 안정된 유동형태를 나타내고 있다. Reynolds수를 증가시켜 천이입계부근까지 접근시킨 경우 입구영역에서 와류는 내벽면 쪽으로 점차 이동하고 있으며 유동은 더욱 강해짐을 알 수 있다.

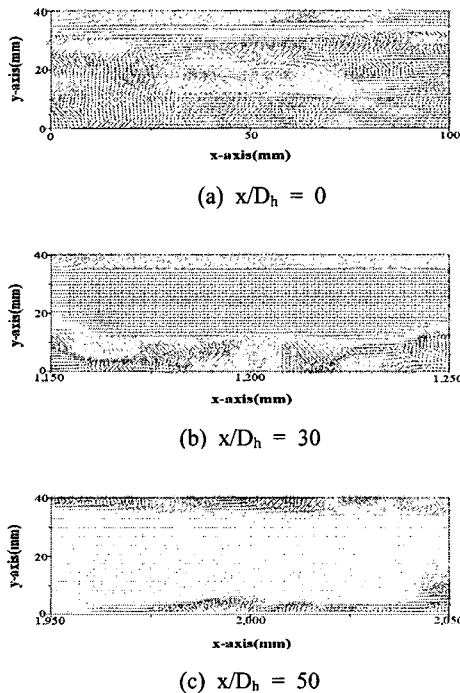


Fig. 3 Velocity vector maps of  $x-y$  plane for  $Re=1,150$

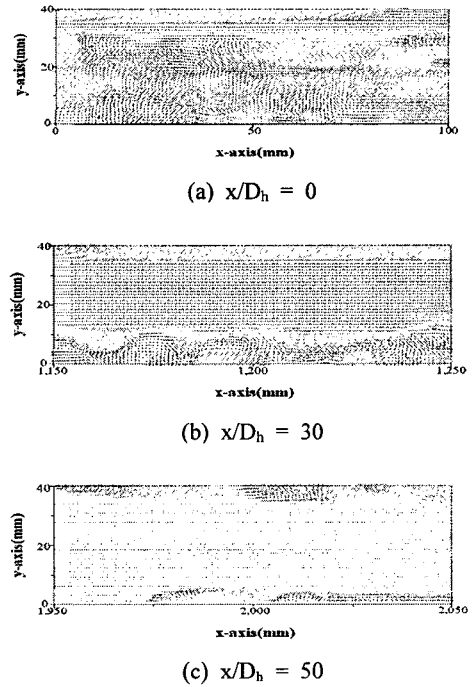


Fig. 4 Velocity vector maps of  $x-y$  plane for  $Re=1,650$

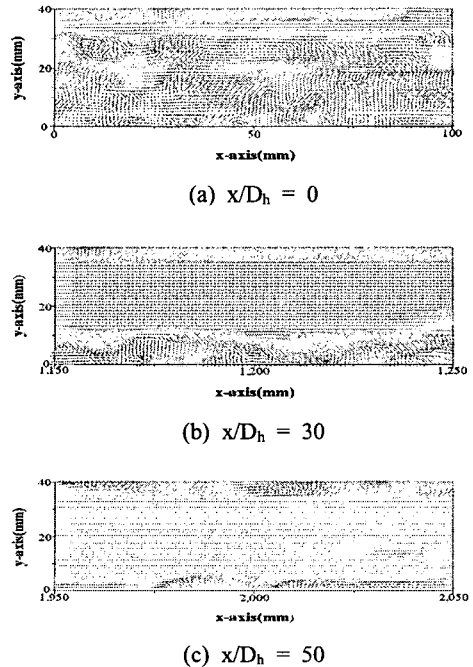


Fig. 5 Velocity vector maps of  $x-y$  plane for  $Re=2,150$

또한 곡관에 연결된 직관에서 축방향 속도분포를 측정하기 위하여 직관을 400mm간격으로 무차원 축방향위치를 덩트 하류로 변화시켜 가면서 y방향에 따라 9등분한 지점까지 PIV계측실험을 통한 속도분포결과를 CFD에 의한 수치해석 결과와 비교하여 Fig. 6에서 Fig. 8까지 나타내었다. 곡관과 직관이 연결된 부분에서는 원심력을 받는 Dean수의 영향으로 관축방향으로 나선형운동을 하는 유체의 유동을 관축방향의 주류와 관축에 수직한 단면내의 2차유동으로 구별하고 곡관유동을 지배하는 특성파라메타 Dean 수에 의존하고 있다. Reynolds수와 Dean수와의 관계를 살펴보면 식 (1)과 같다.

$$Re \sqrt{\frac{a}{R}} = \sqrt{\frac{D_h}{2R}} \left( D_h \cdot \frac{u_m}{\nu} \right) \quad (1)$$

곡관과 연결된 직관의 입구영역인 무차원 축방향거리 0에서 30지점까지는 Reynolds 수에 관계없이 곡관의 원심력의 영향으로 외벽측의 속도값이 내벽측의 값보다 크게 나타나지만, 무차원 축방향위치 40이 넘어서는 지점부터는 곡관의 영향으로부터 점차 벗어나 외벽쪽으로 치우쳤던 속도분포가 관 중심으로 이동하여 무차원 축방향위치 50지점 이후부터 포물선 분포를 나타내었다. 무차원 축방향 위치가 하류방향으로 이동할수록 완전히 발달된 정상유동 형태를 나타내고 있다. 이는 와류가 사라지고 원심력의 영향을 벗어나 덩트 벽면으로부터 점성의 영향을 받는 것으로 판단된다. Fig. 6부터 Fig. 8까지 살펴보면 Reynolds 수가 1150정도에는 주유동의 속도분포가 무차원 축방향거리 40부근에서부터 발달하여 Reynolds수 1650을 지나 2150에 이르기 까지 무차원 축방향거리 일정한 유동의 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 Reynolds수가 증가할수록 원심력의 영향을 벗어나 직관에서의 유동형태를 나타내고 있다. PIV 계측분포 및 수치해석으로 구한 속도분포는 비교적 잘 일치하고 있다. Reynolds수가 천이 임계점 부근에 도달할 경우 무차원 축방향거리 70~80지점에서는 이론곡선과 불일치가 이루고 있음을 알 수 있는데 이 현상은 Reynolds수 증가에 따른 흡입형 송풍기의 영향이 미치고 있음을 알 수 있다. y방향의 속도분포를 전체적으로 고찰해 보면 Reynolds수에 관계없이 입구영역

에서는 강한 와류가 발생과 소멸을 반복했으며 Reynolds수가 증가할수록 곡관의 영향을 벗어난 직관의 입구영역에서 곡관을 통과한 유체는 원심력의 영향으로 외벽측의 속도분포가 크게 나타나고 있으며, 상대적으로 내벽측의 속도분포는 작아졌다. PIV 실험결과와 수치해석 결과는 비교적 잘 일치하였다.

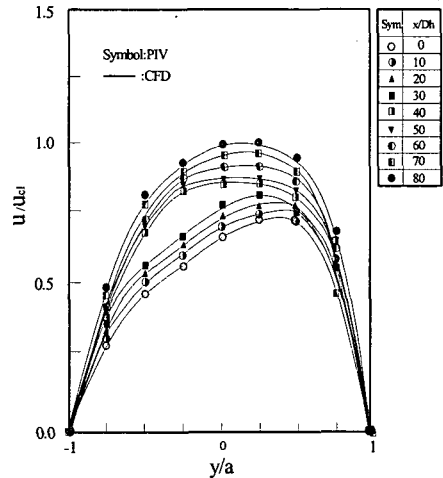


Fig. 6 Velocity profiles along dimensionless y-axis direction in a straight duct of laminar steady flow at Re=1,150

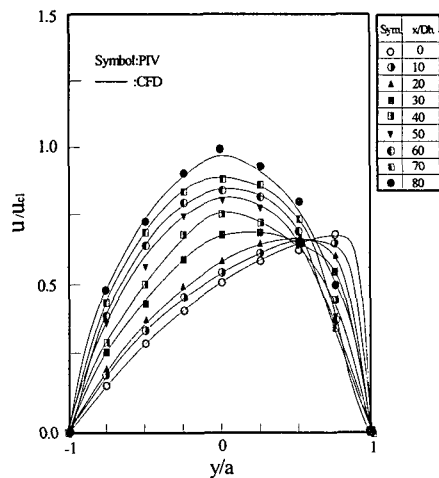


Fig. 7 Velocity profiles along dimensionless y-axis direction in a straight duct of laminar steady flow at Re=1,650

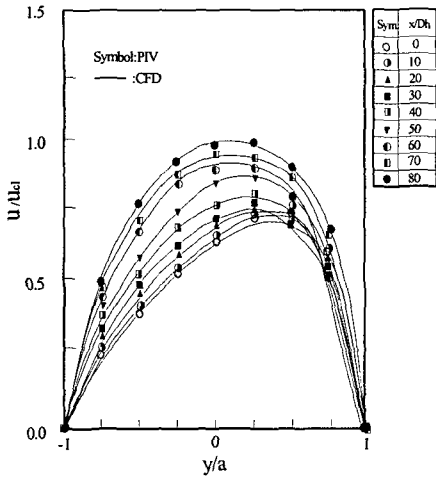


Fig. 8 Velocity profiles along dimensionless y-axis direction in a straight duct of laminar steady flow at Re=2,150

3.2 2차유동

본 장에서는 PIV를 이용하여 정사각단면을 갖는 180°곡관에 연결된 종횡비가 1인 직관덕트의 입구영역에 곡관에서 발생한 유동의 영향이 Reynolds수의 변화에 따른 2차유동의 구조와 2차유동이 축방향의 유동에 미치는 영향에 대해서 고찰하였다. 덕트나 파이프에 대한 대부분의 유동연구에서 축방향으로 일정한 압력기울기를 가지는 유동 및 충분히 긴 덕트나 파이프의 완전발달유동에 대해서 많은 연구하였다. 관단면 내에서 초기의 2차 유동 연구는 약한 회전에 대한 이론적인 연구가 이루어 졌다. Baek<sup>(16)</sup>등은 회전하는 사각덕트내의 층류 정상유동의 수치해석을 통하여 Reynolds수가 증가하게 되어 속도가 충분히 클 경우 유동은 Coriolis힘이 지배하는 내부영역과 덕트의 상하벽을 따라 흐르는 Ekman 경계층과 덕트의 내외벽을 따라 흐르는 수직방향 경계층으로 구분되는 Taylor-Proudman 유동을 하게 된다고 하였다. Reynolds수가 작을 때는 덕트내의 유동에 교란을 가해 2개의 와류를 가지는 2차유동을 발생시킨다. 이때는 완전히 발달된 포물선 모양의 속도분포와는 달리 일그러진 축방향 속도분포를 나타낸다. 2차유동을 지배하는 Coriolis힘은 덕트에서 빠른 속도를 가지는 중심부분의 유체를 우측에서 좌측으로 밀어 좌측벽면의 수직방향 경계층을 따라 흐르다가 Ekman 경계층에서는

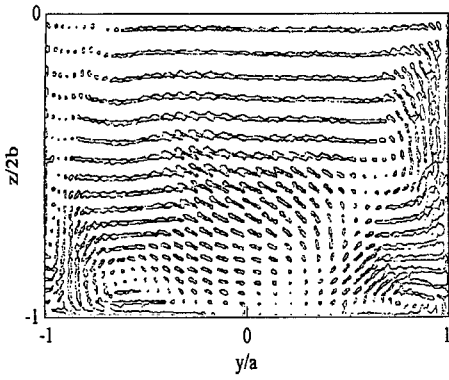
유체가 다시 좌에서 우측으로 흐르고 수직방향 경계층을 따라서 덕트의 중심부분으로 돌아가는 유동을 하게 된다. Ekman 경계층에서는 점성력이 주된 역할을 하고 이 부분에서의 유동은 주로 덕트의 상하 방향(z)만의 함수인 유동을 한다. 관성력의 영향이 작은 경우에는 속도의 증가에 관계없이 2개의 와동을 가지는 유동을 하며, 관성력의 영향이 큰 경우에는 속도가 증가함에 따라 4개의 와동을 가지는 유동으로 변화함을 알 수 있다.

Fig. 9에서 Fig. 11에는 곡관의 영향을 받는 직관에서 PIV 측정에 의한 층류정상유동의 2차유동 속도분포를 나타내었다.

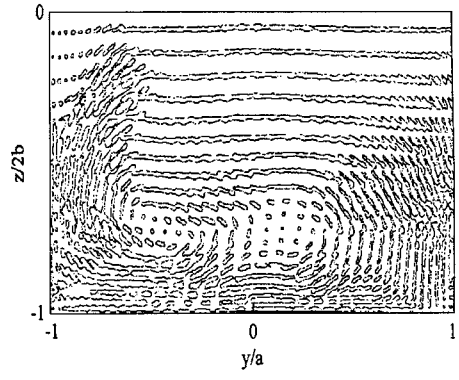
Fig. 9는 Reynolds수가 1,150일 때 2차유동의 속도분포를 나타내었는데 입구영역인 무차원 축방향 위치 0지점에서 2차유동의 세기는 덕트의 외측벽 및 내측의 코너부에서 심하게 발생하였고, 하류방향으로 진행하면서 그 세기는 점점 약해져 무차원 축방향 위치 30지점에서는 덕트의 반단면을 중심으로 2차유동이 발생하고 무차원 축방향 위치 50지점부터는 2차유동의 세기는 약해짐을 알 수 있다.

Reynolds수를 상승시켜 1,650일 때의 2차유동의 형태를 Fig. 10 나타낸 것으로 벽면 부근에서 상대적으로 2차유동의 세기가 크게 나타났으며 하류방향으로 진행할수록 2차 유동의 세기가 감소하였다. 무차원 축방향 위치가 50 부근에서는 corner impact 현상에 의해서 귀 부분에서 아주 미약한 유동의 형태만을 고찰 할 수 있었다.

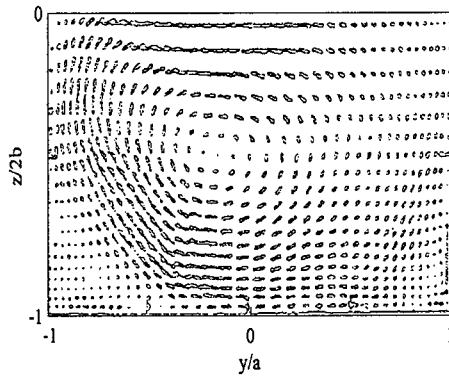
천이영역에 근접한 Reynolds수가 2,150 일 때 2차유동의 분포를 Fig. 11에 나타내었는데 Reynolds수의 증가에 따라 2차유동의 세기는 더욱 강하게 나타났으며 무차원 축방향 위치가 증가하여도 그 세기는 상당히 강하게 나타났으나 무차원 축방향 위치가 증가하여 50 지점이 되면 2차유동의 세기는 미약하지만 Reynolds수가 적은 경우에 비하여 상당한 크기를 유지하고 있다. Reynolds수가 1,150인 경우 무차원 축방향 위치 50에서 유동단면에서 2차유동을 볼수 없으나 Reynolds수를 점점 증가시키에 따라 주류가 하류방향으로 움직일수록 덕트의 반단면에 4개의 2차유동이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 전형적인 정사각덕트 난류유동에서 발생하는 난류 2차 유동현상과 유사함을 나타내고 있다.



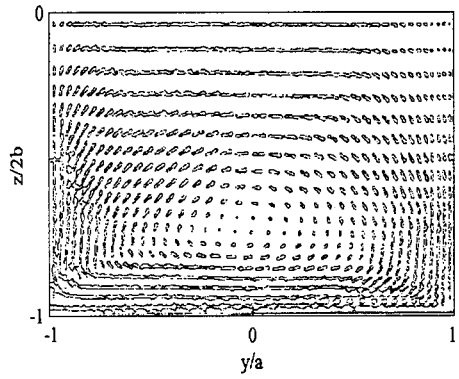
(a)  $x/D_h = 0$



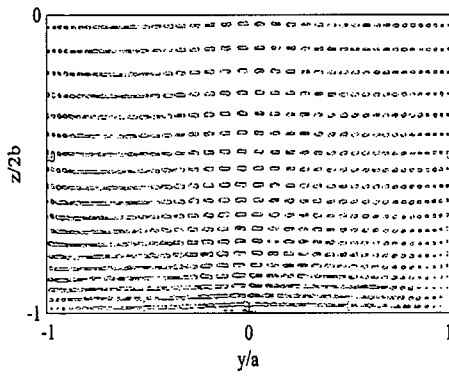
(a)  $x/D_h = 0$



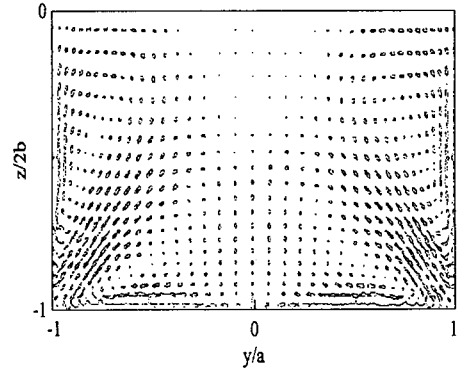
(b)  $x/D_h = 30$



(b)  $x/D_h = 30$



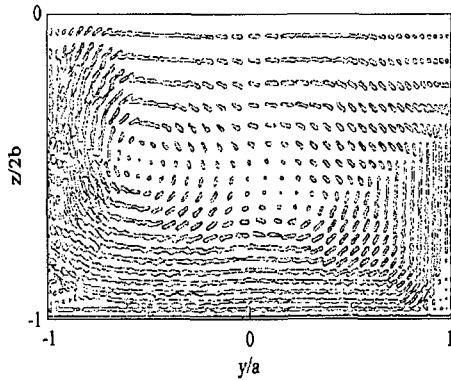
(c)  $x/D_h = 50$



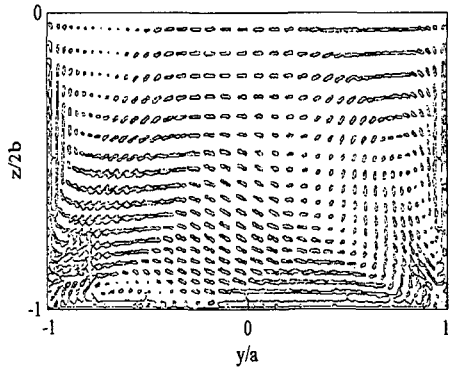
(c)  $x/D_h = 50$

**Fig. 9** Secondary flow development for  $Re=1,150$

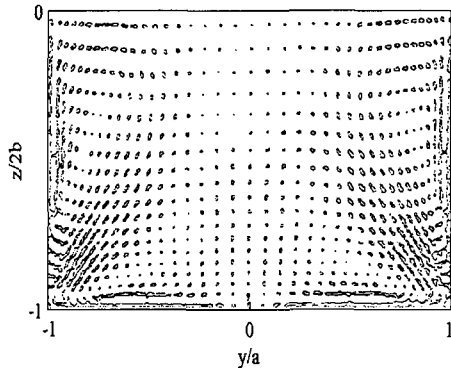
**Fig. 10** Secondary flow development for  $Re=1,650$



(a)  $x/D_h = 0$



(b)  $x/D_h = 30$



(c)  $x/D_h = 50$

Fig. 11 Secondary flow development for  $Re=2,150$

이와 같은 원인은 Reynolds수가 비교적 높은 직관에 유입되는 곡관덕트에 의한 2차유동의 영향에 의해 임계Reynolds수보다 낮은 흐름에 대해 덕트하류에서 미약한 난류유동을 발생시키는 것으로도 판단할 수 있다. 2차유동에 대해서 정리하여 보면 Reynolds수에 관계없이 곡관의 영향을 받는 무차원 축방향 위치 0부근에서 크게 나타났으며 무차원 축방향 위치가 증가할수록 점차 감소하여 무차원 축방향 위치 50 지점에서는 코너부를 제외하고는 2차유동의 형태가 아주 미약함을 알 수 있다. 또한 외측벽면에 비하면 내측벽면에서 그 세기가 더욱 강함을 알 수 있고 Reynolds수가 증가할수록 2차유동의 세기는 강하게 나타났으며 Reynolds수의 증가에 따라 corner impact 현상은 미약하게 나타났다.

#### 4. 결론

정사각단면 곡관에 연결된 직관덕트의 출구영역에서 발달과정 층류정상유동에 대한 유동영역을 분류한 후 PIV계측실험과 CFD해석을 통하여 축방향속도분포와 2차유동분포에 대한 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 곡관에 연결된 직관에서 속도분포는 Reynolds수가 증가할수록 곡관덕트의 유동특성인 원심력의 영향으로 외벽쪽의 무차원 속도분포가 크게 나타났으며, 이런 현상은 곡관의 원심력에 의해 발생하는 2차유동의 영향으로 판단된다. 무차원 축방향위치 40지점 이후부터 점차 발달된 정상유동의 포물선형 속도분포를 보이는데 이는 곡관의 원심력에 의한 영향으로부터 벗어나 덕트벽면에서 상대적으로 큰 점성의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

(2) 2차유동은 Reynolds수에 관계없이 외측벽면보다는 내측벽면에서 심하게 나타났으며 Reynolds수가 증가할수록 2차 유동의 세기는 강해졌으며 유동이 하류로 진행할수록 점차 감소하여 무차원 축방향 위치 50 지점에서는 코너부를 제외하고는 2차유동의 형태를 볼 수 없다. Reynolds수의 증가에 따라 코너임팩트 현상은 미약하게 나타났다.

#### 후기

이 논문은 2004년도 조선대학교 학술연구비의



지원을 받아 연구 되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Kim, J.W., Kim, J.H. and Kim, J.S., 2001, "A Study on the Helically Coiled Heat Exchanger of Small Diameter Tubes," *Transaction of the KSME, B*, Vol. 25, No. 11, pp. 1492~1499.
- (2) Whitelaw, J. H., 1993, "Velocity Measurements in an S-shaped Diffusing Duct," *Experiments in Fluids*, Vol. 15, pp. 364~367.
- (3) Sohn, H.C. and Park, S.K., 2003, "Flow Characteristics of Turbulent Flow in the Exit Region of Join Stream Curved Duct," *Transaction of the KSME B*, Vol. 27, No. 5, pp. 569~578.
- (4) Lee, H.G., Sohn, H.C., Lee, H.N. and Park, G.M., 2001, "An Experimental Study on Flow Characteristics of Turbulent Pulsating Flow in a Curved Duct by Using LDV," *Transaction of the KSME B*, Vol. 25, No. 11, pp. 1561~1568.
- (5) Han, L. S., 1960, "Hydrodynamic Entrance Lengths for Incompressible Laminar Flow in Rectangular Ducts," *J. of Appl. Mech.* Vol. 27, *Trans. ASME*, Vol. 82, series E, pp. 403~409.
- (6) Godbole, P. N., 1975, "Creeping Flow in Rectangular Ducts by Finite Element Method," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 9, pp. 727~731.
- (7) Rubin, S. G., Khosla, P. K. and Saari, S., 1976, "Laminar Flow in Rectangular Channels, Part 1, Entry Analysis, Part 2 : Numerical Solution for a Square Channel, Numerical/Laboratory Computer Methods in Fluid Mechanics," *Am. Soc. Mech. Eng.*, New York, pp. 29~51.
- (8) Spezialw, C. G., 1982, "Numerical Study of Viscous Flow in Rotating of Rectangular Duct," *J. Fluid Mech.*, Vol. 122, pp. 251~271.
- (9) Benton, G. S., 1956, "The Effect of the Earth's Rotation on Laminar Flow in Pipes," *J. Appl. Mech.*, Vol. 23, pp. 123~127.
- (10) Lee, G. K., 1995, "A Basic Study on the Instantaneous Velocity Field Measurement Using PIV," *M.S. Thesis. Pohang Univ.*
- (11) Min, H. J., 2001, "An Experimental Study on the Measurement of Flow Field in Wavy Wall Using PIV Algorithm," *M.S Thesis. Konkuk Univ.*
- (12) Kim, J. S., 2001, "A Study on the Shape Design Optimization of High-Speed Air Vehicles Using Navier-Stokes Equations," *M.S. Thesis. Korea Maritime Univ.*
- (13) Jang, C. J., 1997, "Application of CFD to Marine Propellers and Propeller-Hull Interactions," *Ph.D Thesis. London Univ.*
- (14) Min, K. H., 2001, "Surface Pressure Measurement on the Square Cylinder in the Wind-Tunnel," *M.S. Thesis. Incheon Univ.*
- (15) Lee, H. N., Park, G. M. and Lee, G. D., 2001, "A Study on the Flow Characteristics in Dividing Rectangular Duct," *KCORE*, Vol. 1, No. 1, pp. 270~275.
- (16) Baek, J. H. and Ko, C. H., 1996, "Numerical Study of Laminar Flow in a Rotating Square Duct," *Transaction of the KSME, B*, pp. 198~203.