

정사각단면 곡관덕트에 연결된 직관덕트에서 층류유동의 속도분포

손현철[†] · 이행남* · 박길문* · 이흥구**

(2004년 2월 14일 접수, 2004년 7월 19일 심사완료)

A Study on the Axial Velocity Profile of Developing Laminar Flows in a Straight Duct Connected to a Square Curved Duct

Sohn Hyun-Chull, Lee Haeng-Nam, Park Gil-Moon and Lee Hong-Gu

Key Words: Laminar Flow(층류유동), CFD(전산유체역학), PIV(입자영상속도측지기), Square Cross Sectional(정사각단면), Curved Duct(곡관덕트) Mosquito Coils Smoke(모기향 연기)

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, working fluid produced from mosquito coils smoke. The experimental data were obtained at 9 points dividing the test sections by 400 mm. Experimental and numerical results can be summarized as follows. Critical Reynolds number, Re_{cr} which indicates transition from laminar steady flow to transition steady flow was 2,150. As Reynolds number, Re , was increased, dimensionless velocity profiles at the outer wall were increased due to the effect of the centrifugal force and the secondary flows. The intensity of a secondary flow became stronger at the inner wall rather than the outer wall regardless of Reynolds number.

기호설명

A : 덕트의 단면적 [mm]	u_m : 단면평균속도값 [m/s]
a : 덕트중앙에서 가로폭 [mm]	x, y, z : 시험덕트의 좌표
b : 덕트중앙에서 세로폭 [mm]	ν : 동점성계수 [m ² /s]
D_h : 수력반경 (=4ab/(a+b))[mm]	cl : 덕트의 중심선
R : 곡률반경 [mm]	cr : 임계수치
Re : 정상유동의 Reynolds수 (= $D_h \cdot u_m / \nu$)	m : 단면평균치
	st : 정상유동

[†] 책임저자, 회원, 조선대학교 기계공학과
E-mail : farmersohn@hanmail.net
TEL : (062)230-7221 FAX : (062)230-7055

* 조선대학교 기계공학과

** 동아인재대학 치기공과

1. 서론

산업이 발달함에 따라서 생산현장의 열기관이나 유체기계 등 기계장치에 관련된 각종 관로망

은 점차 대형화되고 고성능화, 정밀화되는 복잡한 양상을 나타내고 있다.⁽¹⁾ 관로계의 최적 설계는 플랜트 전체의 효율뿐만 아니라 안정성 및 신뢰성, 경제성과도 밀접한 관계를 갖게 되었다. 컴퓨터의 발달로 인하여 가시화 영상에 관심을 보인 많은 연구자들이 다양한 기법을 제시하여 왔으며 최근에는 발달된 영상매체의 기술에 힘입어 지금까지 원리적으로만 가능했던 기법들이 실용 가능한 단계에 이르렀다. 특히 디지털 영상처리 기법(Digital image processing)은 컴퓨터를 비롯한 관련 하드웨어의 비약적인 발전과 더불어 수많은 적용 사례를 보여 주고 있다.⁽²⁾ 관로유동에 관한 연구는 직관인 경우를 중심으로 진전되어 왔고, 그 연구의 대상은 단면적이 변화하는 관로나,⁽³⁾ 단면 형상이 원형이 아닌 다른 형태의 관로망⁽⁴⁾ 등으로 급속히 확대되고 최근에는 사각단면을 갖는 곡관로에 대한 연구⁽⁵⁾도 점차 활발하게 진행되고 있다. 대부분의 관로망은 곡관과 직관 그리고 다시 직관 및 단면의 변화 등 아주 복잡하게 이루어져 있다. 각종 유동장을 가진 덕트유동에 대한 과거의 연구를 살펴보면 Goldstein⁽⁶⁾등은 속도분포를 정사각단면 덕트의 입구영역에서 LDV에 의하여 측정 한 실험적 연구를 행하였다. Muchnik⁽⁷⁾등은 사각단면 덕트의 입구영역에서 가시화방법을 이용하여 속도분포를 고찰한 후 입구 길이를 결정하였다. Rubin⁽⁸⁾등은 4각단면덕트에서 경계층 이론을 이용하여 덕트 중심에서 속도분포와 모서리 부근에서 2차유동, 전단응력 분포를 수치해석으로 연구하였다. Min⁽⁹⁾은 PIV 기법을 이용하여 파형 벽면을 가지는 내부 유동의 특성에 대해서 실험적으로 규명하였다. 최근 들어 활발한 연구가 이루어지고 있는 CFD를 이용한 연구를 살펴보면 Kheshgi⁽¹⁰⁾등은 중형비가 1인 경우에 대해서 수치해석을 이용하여 대류관성항의 영향에 따라 미약할 경우에는 2개의 안정된 와류를 가지며 관성항이 클 경우 4개의 와류를 가지는 불안정한 영역이 존재함을 보여주었다.

본 연구에서는 실험적인 방법으로는 곡관 덕트에 연결된 정사각단면의 직관 덕트내에 정상유동을 발생시켜 이들 유동에 대한 축방향의 속도분

포를 PIV를 이용하여 계측한 후 CFD를 사용하여 비교 검토하였다. 연구의 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 있도록 하였다. 또한 유동특성에 대한 자료는 설비부분에서 온습도, 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

정사각단면 180°곡관에 연결된 직관 덕트의 출구영역내에서 층류정상유동의 축방향속도분포를 규명하기 위하여 실험을 수행하였다. 본 실험에 이용된 작동유체는 공기이고, 산란입자로는 코일형 모기향 연기를 이용하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이며, 작동유체의 유동경로는 실험덕트 입구측에 설치된 정류상자 내에 실험에 사용할 입자를 생성할 수 있는 모기향 연소장치를 갖추었고 생성된 모기향 입자는 입구측 직관부(4000mm)로 유입되어 곡률반경이 400mm인 180°곡관부 및 출구 측 직관부(4000mm)의 덕트를 통과하여 서지탱크와 오리피스를 거쳐 흡입형 송풍기에 의해 송출된다. Fig. 1에 설명된 scotch-yoke형 가진기는 비정상유동을 계측하는 장치로서 본 실험에서는 개도 밸브를 차단시켜 사용하지 않았다.

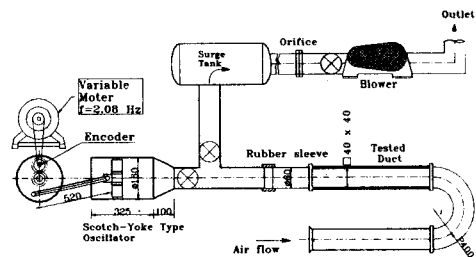


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

본 실험에 앞서 보정실험 과정에서 열선유속계를 이용하여 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, 640×240 Pixel)로 촬영하였다. PIV에서 해석할 영상을 High-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 DT 3152보드이고 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 실험에서는 180°곡관에 연결된 출구측 직관부에 PIV계측실험을 통해서 무차원 축방향위치 (x/D_h) 및 레이놀즈수를 변화시켜가면서 덕트의 중심에서 축방향의 y 방향 및 z 방향에서 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 영상처리장치는 입력영상데이터를 임시 보관하는 이미지 메모리와 메인 프로세서 및 연산 유닛을 갖추고 있다. 입력된 칼라신호를 보다 깨끗하게 획득하기 위하여 크로미너스 노치 필터에서 칼라정보를 제거하고 칼라정보가 제거된 아날로그 신호를 샘플링 하여 A/D 변환기에서 디지털화하며 플래쉬 변환기에 의해서 행해질 수 있도록 하였다. 영상 처리장치는 영상 Data를 하드디스크에 저장하였다. 자료처리는 Cactus'2000 software program에 의해 정리하였다. Fig. 2는 PIV system 개략도이다.

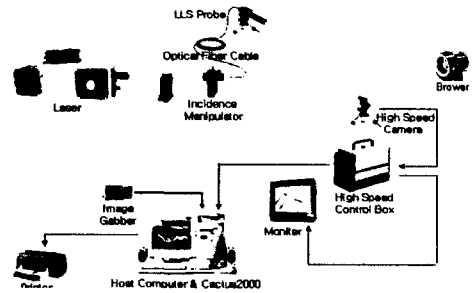


Fig. 2 Schematic diagram of the PIV system

또한 본 연구에서는 PIV계측 실험을 바탕으로 동일한 조건의 직관덕트의 입구영역에서 발생된 속도분포를 CFD 해석을 수행하였다.

본 논문에서 PIV계측 실험을 바탕으로 했으므로, 곡관덕트내의 유량 및 레이놀즈수 작기 때문에, 열 전달과 압축성 효과를 무시했으며, 해석 알고리즘으로 SIMPLE를 사용했다. 실험장치에서 직교좌표계에서 1cm 당 1개의 격자를 선택하여 Test-section의 총 격자의 수는 79431개였다. CFD의 solver로 사용된 워크스테이션의 사양은 CPU 1GHz×2를 설치할 수 있는 Dual-board, SSCI방식의 10000rpm HDD를 사용했으며, memory 1GHz Rambus, graphic-card (64M FirG2)를 사용했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동영역의 분류

정사각 덕트의 내부유동에서 층류 정상유동의 유동영역을 분류하기 위하여 Sohn⁽⁴⁾의 실험결과를 근거로 하여 완전히 발달되었다고 생각되는 지점인 무차원 축방향 위치 ($x/D_h=50$)의 덕트 중심에 열선유속계에 연결된 열선을 삽입하고 Reynolds수를 변화시켜 가면서 얻어지는 출력신호를 정온 열선유속계의 선형기를 지나 광기록계에 속도파형을 기록하여 완전한 층류유동 범위만을 선택하여 실험한 결과들을 정리하였다. 사용된 열선유속계는 TSI 1051모델로서 신호안정기와 선형기를 통하여 속도와 출력 전압을 선형화시켜 덕트내에 삽입된 열선으로부터 얻어진 신호를 오실로스코프에 기록하여 측정되는 신호를 상관기에 의해서 아날로그신호로 연산한 값을 RMS 전압계에서 얻고 A/D 변환기를 거쳐 디지털 값으

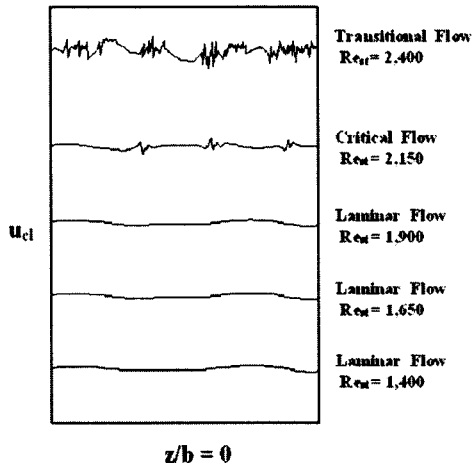


Fig. 3 Waveforms of laminar steady flows in a straight square duct by the hot-wire anemometer at $x/D_h=0$

로 변환하여 컴퓨터에 저장하고 임계 Reynolds 수의 결정은 열선유속계에 의한 광기록 분석에서 얻어진 순간 속도파형에 난류성분이 간헐적으로 나타나기 시작할 때까지의 순간 유동속도로부터 계산하였다. 정상유동의 유량을 오리피스로 측정하여 단면평균속도 (u_m)를 계산하여 다음과 같은 식 (1)로 임계 레이놀즈수를 결정하였다.

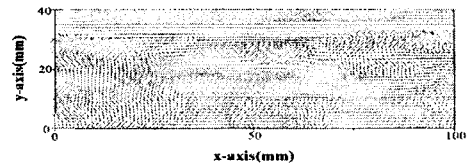
$$Re_{cr} = \frac{u_m \cdot D_h}{\nu} \quad (1)$$

본 실험에서는 실험범위를 결정하기 위하여 Reynolds 수에 따른 변화 과정의 속도파형을 광기록계에 기록하여 Fig. 3에 나타내었다.

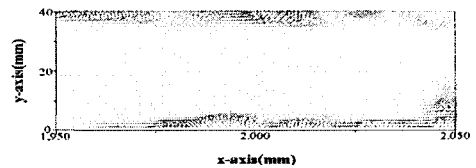
3.2 속도분포

곡관에 연결된 직관에서 축방향 속도분포는 직관을 400mm 간격으로 9등분하여 실험하였다. 실험은 유량변화에 따른 Reynolds 수를 각각 1,150, 1,650, 2,150으로 변화시키고, 무차원 축방향 위치를 변화시켜 가면서 y 방향 및 z 방향에 따라 PIV 측정 실험을 통한 속도분포 결과를 CFD에 의한 수치해석 결과와 비교하여 나타내었다.

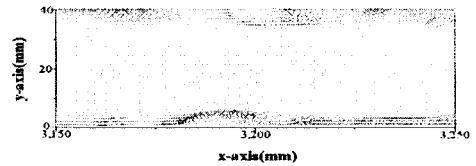
Fig. 4에서 Fig. 6까지는 Reynolds 수의 변화에 따른 무차원 축방향 위치를 변화시켜 가면서 PIV로



(a) $x/D_h = 0$

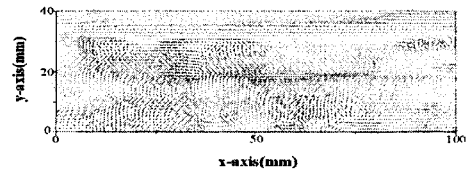


(b) $x/D_h = 50$

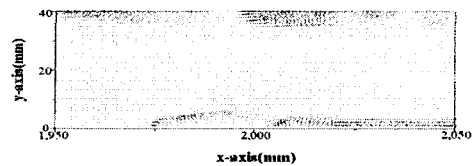


(c) $x/D_h = 80$

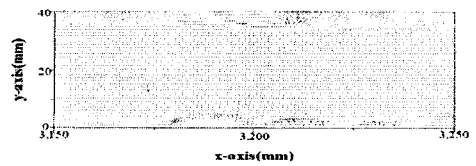
Fig. 4 Velocity vector maps of x-y plane for $Re=1,150$



(a) $x/D_h = 0$



(b) $x/D_h = 50$



(c) $x/D_h = 80$

Fig. 5 Velocity vector maps of x-y plane for $Re=1,650$

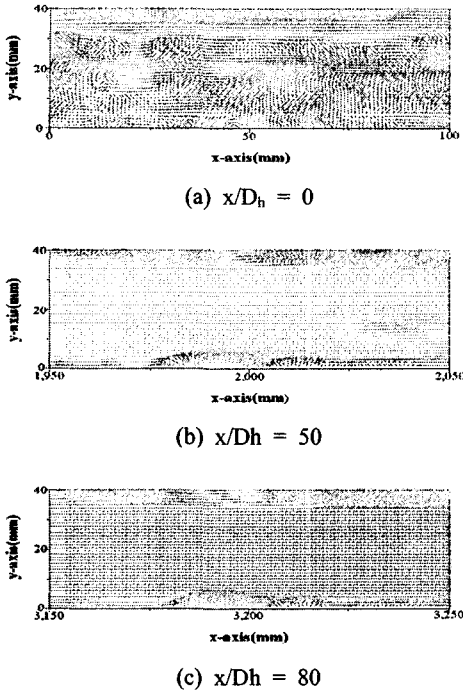


Fig. 6 Velocity vector maps of x-y plane for Re=2,150

계측한 속도벡터의 형태를 $x-y$ 축 대해서 나타내었다. 실험 결과를 고찰해 보면 Reynolds수에 관계없이 곡관의 영향을 받는 직관덕트의 입구영역에서는 곡관에 의한 원심력의 영향으로 판단면 전 영역에서 강한 와류가 발생과 소멸을 반복하고 무차원 축방향 위치가 증가 될수록 유동이 점차 안정화되어가며 $x/D_h=50$ 이후부터 출구쪽 가까워짐에 따라 안정된 유동형태를 나타내고 있다. Reynolds수를 증가시켜 천이입계부근 까지 접근시킨 경우 입구영역에서 와류는 내벽면 쪽으로 점차 이동하고 있으며 유동은 더욱 강해짐을 알 수 있다. Fig. 7에서 Fig. 9까지는 PIV로 측정값을 CFD를 사용하여 나타낸 그래프로 곡관과 연결된 직관의 입구영역인 무차원 축방향거리 0에서 30지점까지는 Reynolds 수에 관계없이 곡관의 원심력의 영향으로 외벽측의 속도값이 내벽측의 값보다 크게 나타나지만, 무차원 축방향거리 40지점부터 곡관의 영향으로부터 점차 벗어나 외벽쪽으로 치우쳤던 속도분포가 관 중심으로 이동하여 무차원 축방향위치 50지점 이후부터 포물선 분포를 나타내었다. 무차원 축방향 위치가 하류

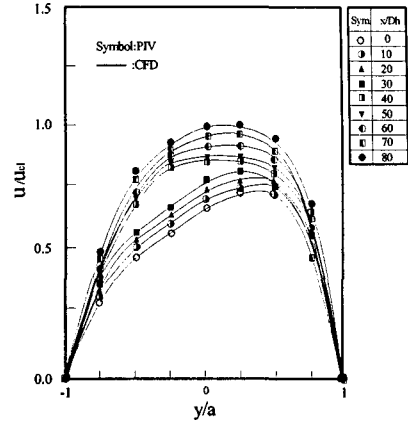


Fig. 7 Velocity profiles along the dimensionless y-axis in a straight duct of laminar steady flow at Re=1,150

방향으로 이동할수록 완전히 발달된 정상유동 형태를 나타내고 있다. 이는 와류가 사라지고 원심력의 영향을 벗어나 덕트벽면 점성의 영향을 받는 것으로 판단된다. PIV 계측분포 및 수치해석으로 구한 속도분포는 비교적 잘 일치하고 있지만 Reynolds수가 천이 입계점 부근에 이른 경우 무차원 축방향거리 70~80지점에서는 이론곡선과 불일치를 이루고 있음을 알 수 있는데 이는 Reynolds수의 증가에 따라 흡입형 송풍기의 영향이 크게 미치고 있는 것으로 판단된다. 본 실험에서 사용한 흡입형 송풍기는 3m³/min의 송풍량 및 600 mmAq의 정압 그리고 최대 3500rpm의 회전수를 갖는 송풍기로서 Fig. 1에서 설명한바와 같이 Surge tank 직후에 설치되어 있다. 흡입량의 조절은 개도밸브에 의해 조절하고 rpm의 조절은 가변저항기를 사용하였다. 또한 Surge tank는 직경 600mm 높이 800mm로 제작되었다.

본 실험의 경우 출구영역이므로 흡입형 송풍기에서 발생한 미세한 진동의 영향을 받을 것으로 생각한다. y방향의 속도분포를 전체적으로 고찰해 보면 Reynolds수에 관계없이 입구영역에서는 강한 와류가 발생과 소멸을 반복했으며 Reynolds수가 증가할수록 곡관을 지난 직관의 입구영역에서는 곡관을 통과한 유체는 원심력의 영향으로 외벽쪽의 속도분포가 크게 나타났으며, 상대적으로 내벽쪽의 속도분포는 작아졌다. PIV 실험결과와 수치해석 결과는 비교적 잘 일치하였다.

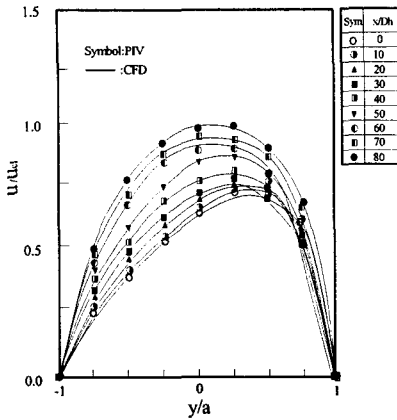


Fig. 8 Velocity profiles along the dimensionless y-axis in a straight duct of laminar steady flow at $Re=1,650$

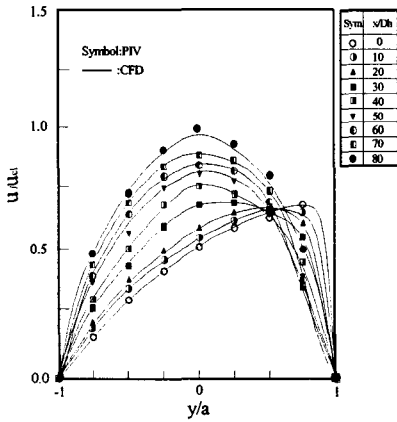


Fig. 9 Velocity profiles along the dimensionless y-axis in a straight duct of laminar steady flow at $Re=2,150$

Fig. 10에서 Fig. 12까지는 $x-z$ 방향에 대해서 PIV 측정 결과를 나타내었다. 분포의 형태를 고찰하여 보면 무차원 축방향 위치 $0 \sim 30$ 부근에서는 y 방향에서 고찰한 결과와 매우 유사한 형태를 나타내고 있으며 와류의 소멸과 생성이 반복적으로 일어나는데 이는 곡관의 원심력 영향으로 판단된다. 천이 임계부근인 Reynolds수가 2,150일 때는 입구영역에서의 와류의 세기가 강해졌고 덕트 중앙에서의 속도는 약간 증가하였다. 이후 점차 안정된 분포형태를 나타내고 있으며 Reynolds수에 관계없이 아래면보다는 윗면쪽으로 유동의 세기가 상대적으로 강하게 나타나고 있다.

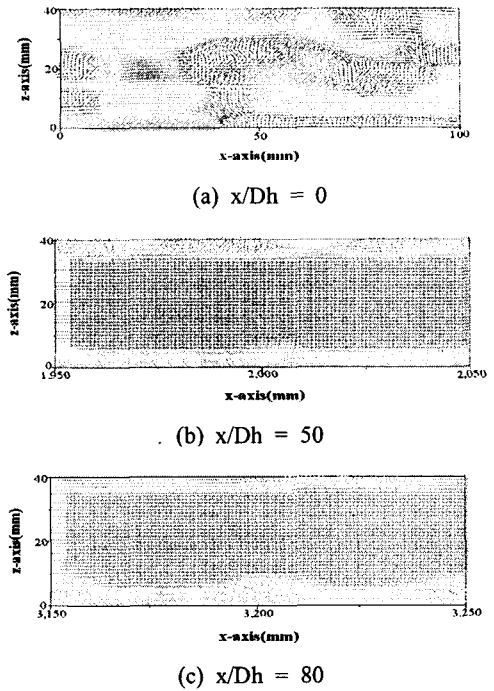


Fig. 10 Velocity vector maps of $x-z$ plane for $Re=1,150$

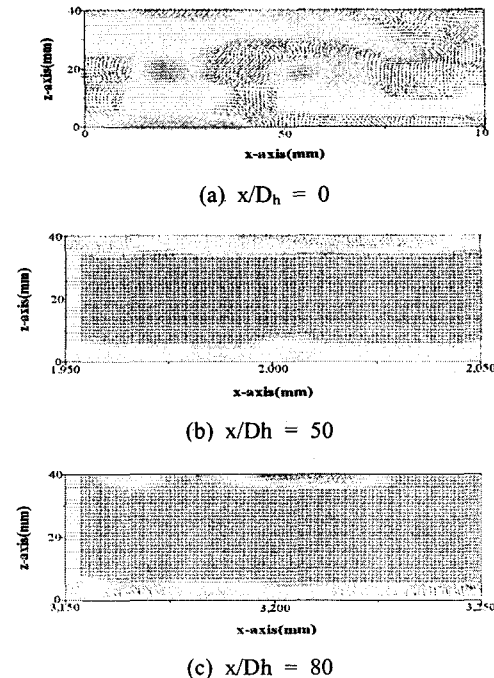


Fig. 11 Velocity vector maps of $x-z$ plane for $Re=1,650$

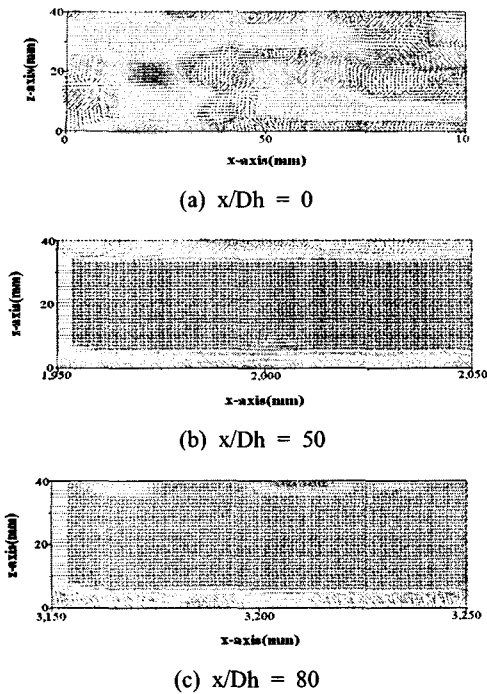


Fig. 12 Velocity vector maps of x-z plane for $Re=2,150$

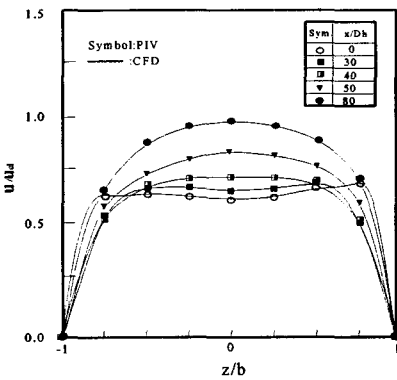


Fig. 13 Velocity profiles along the dimensionless z-axis in a straight duct of laminar steady flow at $Re=1,150$

Fig. 13에서 Fig. 15는 PIV로 측정한 속도벡터를 $x-z$ 축에 대해서 CFD에 의한 그래프를 나타내었다. 분포의 형태를 고찰하여 보면 덕트의 입구영역인 무차원 축방향 위치 0~30 부근에서는 y 방향에서

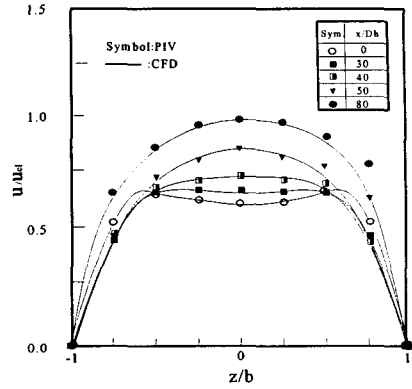


Fig. 14 Velocity profiles along the dimensionless z-axis in a straight duct of laminar steady flow at $Re=1,650$

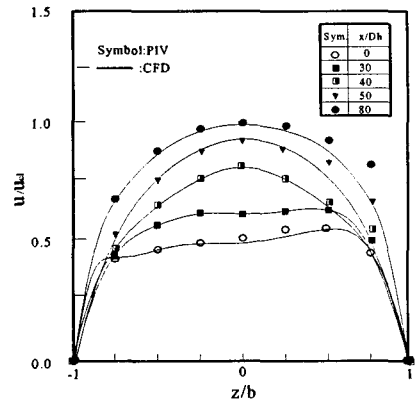


Fig. 15 Velocity profiles along the dimensionless z-axis in a straight duct of laminar steady flow at $Re=2,150$

고찰한 결과와 같이 입구영역의 곡관부 영향으로 국소적인 강한 2차 유동의 와류가 발생하여 덕트 중심부에서의 속도가 약간 작게 나타났고, 윗벽면 쪽의 속도기울기가 아래벽면쪽 보다 약간 크게 나타났다. 무차원 축방향 위치 50지점부터는 완전히 발달된 정상유동의 형태를 나타내고 있다. 이는 벽면에서 발생한 국소와류가 점진적으로 소멸되고 있으며 무차원 축방향 위치 80지점에서 윗벽면쪽으로 속도분포가 치우치는 현상이 나타났는데, 이것은 무차원 y 축 방향의 속도분포에서도 언급했듯이 흡입형 송풍기의 영향으로 판단된다.

4. 결론

정사각단면 곡관에 연결된 직관덕트의 출구영역에서 발달과정 층류정상유동에 대한 유동영역을 분류한 후 PIV계측실험과 CFD해석을 통하여 축방향속도분포, 2차유동분포 등의 유동특성에 대한 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유동이 충분히 발달되었다고 생각되는 덕트의 무차원 축방향위치 (x/D_h) 50지점에 열선유속계를 이용하여 층류유동영역을 분류하였고, 층류정상유동에서 천이정상유동으로 변화하는 임계 Reynolds 수는 약 2,150 정도였다.

(2) 곡관에 연결된 직관에서 속도분포는 레이놀즈수가 증가할수록 곡관덕트의 유동특성인 원심력의 영향으로 외벽쪽의 무차원 속도분포가 크게 나타났으며, z 방향에서의 속도분포는 입구영역인 무차원 축방향 위치 30 지점 이전까지의 유동형태는 덕트 중앙에서 속도분포가 작게 나타났으며 레이놀즈수가 증가할수록 윗벽면쪽으로 치우치는 유동의 형태를 나타내었다. 이런 현상은 곡관의 원심력에 의해 발생하는 2차유동의 영향으로 판단된다.

(3) 무차원 축방향위치 40지점 이후부터 점차 발달된 정상유동의 포물선형 속도분포를 보이는데 이는 곡관의 원심력에 의한 영향으로부터 벗어나 덕트 벽면에서 상대적으로 점성의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2003년도 조선대학교 학술연구비의 지원으로 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 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.

(2) Whitelaw, J. H., 1993, "Velocity Measurements in an S-Shaped Diffusing Duct," *Experiments in Fluids*, Vol. 15, pp. 364~367.

(3) Patankar, S. V., 1975, "Prediction of Laminar Flow and Heat Transfer in Helically Coiled Pipes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 67, part. 3 pp. 583~595.

(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) Park, G. M., 1987, "Flow Characteristics of Developing Laminar Unsteady Flow in a Square Duct," *Ph.D. Thesis Korea. Univ.*

(6) Goldstein, R. J. and Kreid, D. K., 1967, "Measurement of Laminar Flow Development in a Square Duct Using a Laser-Doppler Flowmeter," *J. Appl. Mech.*, Vol. 34, pp. 813~818.

(7) Muchnik, G. F., Solomonov, S. D. and Gordon, A. R., 1973, "Hydrodynamic Development of a Laminar Velocity Field in Rectangular Channels," *J. Eng. Phys. (USSR)*, Vol. 25, pp. 1268~1271.

(8) 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.

(9) Min, H. J., 2001, "An Experimental Study on the Measurement of Flow Field in Wavy Wall Using PIV Algorithm," *M.S Thesis. Konkuk Univ.*

(10) Khesghi, H. S. and Scriven, L. E., 1985, "Viscous Flow Through a Rotating Square Channel," *Phys. Fluids*, Vol. 28, pp. 2968~2979.