

< 논문 >

곡관덕트에 연결된 정사각단면 직관덕트에서 층류정상유동의 유동장내 유동특성

손 현 철*

(2004년 7월 12일 접수, 2005년 3월 4일 심사완료)

Flow Characteristics of Developing Laminar Steady Flows in a Straight Duct Connected to a Square Curved Duct

Sohn Hyun-Chull

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

Abstract

In the present study, The characteristics of developing steady laminar flows of a straight duct connected to a 180°curved duct were examined in the entrance region through experimental measurement. Flow characteristics such as shear stress distributions, pressure distributions and friction coefficient experimentally in a square cross-sectional straight duct by using the PIV system. For the PIV measurement by particles produced from mosquito coils particles. The experimental data were obtained at 9 points dividing the test sections by 400 mm. Experimental 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. Shear stress per unit length on the wall was stronger than that in the fully developed flow region. This was attributed to the fact that shear stress and pressure loss in the curvature of a duct were increased. Pressure distributions were gradually decreased irrespective of Reynolds number in the whole test section. This trends were in a good agreement with the reference results. Pipe friction coefficient in the steady state flow region was calculate from method of least squares. The co-relationship between fiction coefficient and Reynolds number was established as follow; $\lambda=56/Re$.

기호설명

A	: 덕트의 단면적 [mm]	ΔP	: 압력차[N/m ²]
a	: 덕트중앙에서 가로폭 [mm]	x, y, z	: 시험덕트의 좌표
b	: 덕트중앙에서 세로폭 [mm]	그리스문자	
D_h	: 수력반경 ($=4ab/(a+b)$)[mm]	λ	: 마찰계수
Re	: 정상유동의 Reynolds수 ($=D_h \cdot u_m/\nu$)	ν	: 동점성계수 [m ² /s]
u_m	: 단면평균속도값 [m/s]	ρ	: 밀도 [kg/m ³]
		τ	: 전단응력 [N/m ²]

하첨자

cl	: 덕트의 중심선
m	: 단면평균치

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

1. 서 론

공조기기의 공급 및 수요는 다양화되고⁽¹⁾ 대형공조기에서 소형공조에 이르기까지 기계장치에 관련된 각종 관로망은 점차 대형화, 고성능화, 정밀화되는 복잡한 양상을 나타내고 있다. 따라서 관로계의 최적 설계는 플랜트 전체의 효율뿐만 아니라 안정성 및 신뢰성, 경제성과도 밀접한 관계를 갖게 되었다.⁽²⁾

관로유동에 관한 연구로는 작동유체를 물을 대상으로 직관인 경우를 중심으로 진전되어 왔고, 그 연구의 대상은 단면적이 변화하는 관로나,⁽³⁾ 단면형상이 원형인 형태의 관로망⁽⁴⁾ 등으로 한정되어 발전해왔으며 공조설비의 급속한 발달로 인하여 사각단면을 갖는 곡관로에 대한 연구도⁽⁵⁾ 활발하게 진행되고 있다. 그러나 대부분의 관로망은 곡관과 직관 그리고 다시 직관 및 단면의 변화 등 아주 복잡하게 이루어져 있으나 대부분의 연구는 직관 및 곡관에 대한 단일연구만이 이루어지고 있다.

각종 유동장을 가진 덕트유동에 대한 과거의 연구를 살펴보면 Cho,⁽⁶⁾ Park,⁽⁷⁾ Lee⁽⁸⁾ 등은 LDV를 이용하여 곡관을 중심으로 각각 층류유동 천이유동 및 난류유동의 유동특성에 대해서 연구하였고 Sohn⁽⁹⁾ 등은 정사각 단면을 갖는 합류되는 곡관의 출구영역에서 난류유동의 축방향속도분포 등 유동특성을 연구하였다. Goldstein⁽¹⁰⁾ 등은 속도분포를 정사각단면 덕트의 입구영역에서 LDV에 의하여 측정된 실험적 연구를 행하였고 Muchnik⁽¹¹⁾ 등은 사각단면 덕트의 입구영역에서 가시화방법을 이용하여 속도분포를 고찰한 후 입구길이를 결정하였다. Han⁽¹²⁾은 사각덕트내의 층류정상유동에서 운동량방정식을 Langhaar방법으로 선형화 시켜서 균일한 속도분포로부터 완전히 발달된 속도 분포까지 전 영역에 걸쳐 속도분포에 대한 수치해석을 하여 압력분포 및 입구길이를 결정하는 이론적 연구를 하였으며, Fleming⁽¹³⁾ 등도 4각단면 및 3각단면 덕트에서 운동량방정식을 선형화시켜서 속도분포와 압력분포를 이론적으로 연구하였다. Drake⁽¹⁴⁾는 덕트의 완전히 발달된 유동영역에서 주기적인 압력구배를 이용하여 속도분포와 마찰계수를 해석한 이론적 연구를 행하였다. Yun⁽¹⁵⁾은 곡관 후류에 연결된 직관에서 PIV를 이용하여 속도분포, 운동에너지 및 전단응력에 대해서 연구하였고 Sohn⁽¹⁶⁾ 등은 PIV 기법을 이용하여 곡관덕트와 연결된 직관

에서 층류유동의 속도분포를 축방향 위치에 따라 측정된 후 종방향과 횡방향에 대해서 CFD에 의한 분석과 비교 검토하였다. 파형 벽면을 가지는 내부 유동의 특성에 대해서 실험적으로 규명하였다.

컴퓨터의 발달로 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 영상처리기법(Digital image processing)은 컴퓨터를 비롯한 관련 하드웨어의 비약적인 발전과 더불어 수많은 적용 사례를 보여주고 있다.⁽¹⁷⁾ 유동의 계측장치는 열선유속계(Hot-Ware), 레이저유속계(LDV) 및 입자영상속도계(PIV)로 발전해왔다. PIV의 측정은 속도의 크기와 관련하여 벡터의 형태를 가시화시켜 확인할 수 있는 기법으로 유동의 형태를 명확히 살필 수 있는 장점이 있어 최근 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 실험적인 방법으로는 곡관 덕트에 연결된 정사각단면 직관 덕트에서 층류정상유동을 발생시켜 이들 유동에 대한 축방향 속도분포를 2-D PIV로 계측한 후 벽면전단응력분포 압력분포 및 관마찰계수 등 유동특성을 나타내었다. 연구 결과는 덕트 설비를 통한 체육관 지하철 등 실내 공간에서 온-습도, 공기청정을 위한 환기 등 덕트 내부의 기류분포를 고려하여 유체수송을 보다 효율적으로 제어할 수 있도록 하였으며 체반 조절설비의 합리적 조합으로 유체공학적 환경 제어부하를 크게 경감시킬 수 있는 자료를 제공하고 또한 기계공학은 물론 환경관련 체반 설비에 이르기까지 기계공학에 바탕을 둔 유체유동에 관련된 설계 자료로 제공 될 것으로 사료된다.

2. 실험

2.1 실험장치

정사각단면 180° 곡관에 연결된 직관 덕트의 출구영역내에서 층류정상유동의 유동특성을 규명하기 위한 방법으로 축방향속도분포를 근거로 전단응력분포, 압력분포 및 관마찰계수를 정리하였다. 축방향속도측정은 2-D PIV를 사용하였다. 본 실험에 이용된 작동유체는 공기이고, 산란입자로는 코일형 모기향을 이용하였다. 산란입자의 크기는 0.1~0.3 μm 로 본 실험 측정기인 PIV의 fringe 크기와 비교적 일치하여 선택하였다. Fig. 1은 실험장치의

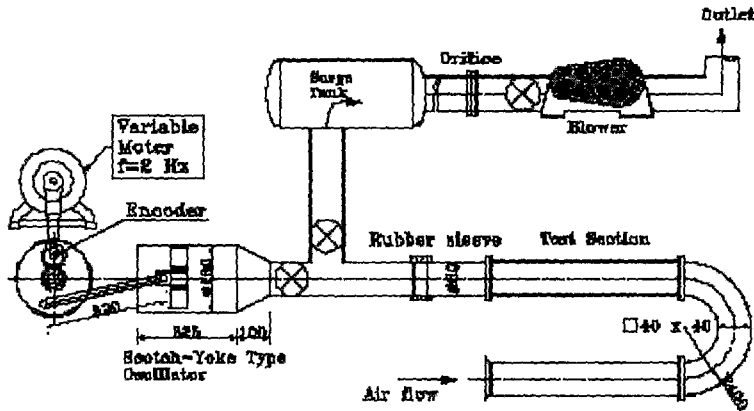


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

개략도를 나타낸 것이다. 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 출구측 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. 실험에 사용된 덕트는 단면의 크기가 $2a \times 2b = 40 \times 40$ (mm)이고, 길이가 4000(mm)인 정사각 단면을 갖으며 곡률반경이 400 mm인 180°곡관을 중심으로 U자형을 형성하고 있다. 덕트는 유동현상을 쉽게 관찰할 수 있도록 매끄러운 투명 아크릴로 제작되었으며, 덕트입구에는 정류상자 및 벨마우스형 유입관(inlet bell mouth)을 설치하였다. 정류상자 [500 × 500 × 1000 (mm)]의 하단에 공기 유입구[500 × 500 × 200 (mm)]를 유입관에 설치하여 무풍상태가 되도록 하였다. PIV에 의한 속도측정값을 열선유속계(Hot-wire anemometer)에 의한 측정값과 비교하기 위하여 입구측 직관부와 출구측 직관부에는 열선을 삽입할 수 있는 열선지대 삽입구(47-φ 5.4 Drill, Tap 1/4")를 만들었고, 본 실험에 앞서 보정실험 과정에서 열선유속계를 이용하여 최소자승법에 의하여 속도와 전압의 관계식 $\Delta U = 4\Delta E$ 를 얻었으며, 최대 오차율은 4% 이내였다. 본 측정에서 사용한 입자영상유속계(PIV)는 514.5nm와 488.0nm의 기본파장을 발산하는 Ar-Ion 레이저로서 효율은 10⁻¹의

오더를 갖으며 4~5W 정도의 가시광으로 실험덕트에 비추게 하여 고속카메라(Photron사, 최대 600 pps, 640×240Pixel)로 촬영하였다. PIV에서 해석할 영상을 고속카메라 등과 같은 영상매체를 통해 나타나는 영상신호를 샘플 당 정의된 비트로 디지털화하여 PC가 처리할 수 있는 신호로 바꾸어 주었다. 고속카메라를 가시광 레이저와 수직방향으로 영상 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/A 컨버터, 외부트리거 및 외부동기신호를 위한 포트 구성되어 있다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 180°곡관에 연결된 출구측 직관부에 PIV계측실험을 위해 무차원 축방향위치를 곡관과 직관이 맞닿는 지점을 0으로 설정하고 축방향 무차원수를 10의 등간격으로 80까지 측정하였으며 Reynolds수의 변화는 층류유동 범위인 1400, 1650, 1900 그리고 2150으로 변화시켜가면서 덕트의 중심에서 축방향으로 속도분포를 측정하였다. 또한 전단응력, 압력 및 관마찰계수등은 주어진 수식을 이용하여 계산하였다. 실험에서 무차원 축방향 위치가 변함으로 LLS probe를 레이저 본체에 고정하고 광섬유(optical fiber line)로 연결하여 입

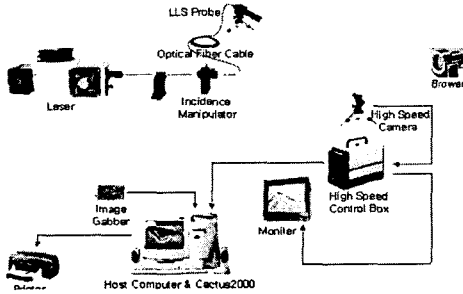


Fig. 2 Schematic diagram of the PIV system

의 위치와 각도로 설치할 수 있도록 하였다. 본 실험에서 영상 입력장치는 고속도 카메라이고 영상 처리장치(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 샘플링 하여 A/D 변환기에서 디지털화하며 플래쉬 변환기에 의해서 행해질 수 있도록 하였다. 영상처리장치는 영상 자료를 하드디스크에 저장하였다. 자료처리는 Cactus'2000 프로그램에 의해 정리하였다. Fig. 2는 PIV 장치의 개략도이다. 본 연구에서는 시험부 입구에서 출구까지 유입되는 유량 및 Reynolds수 작기 때문에, 열전달과 공기밀도에 따른 압축성 효과를 무시했으며, 해석 알고리즘으로 SIMPLER 해석법을 사용하였다. 실험 장치는 직관부를 위주로 작성하였으므로 직교좌표 1cm 당 1개의 격자를 선택하여 시험부의 총 격자의 수는 79431개였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동영역의 분류

정사각 덕트의 내부유동에서 층류 정상유동의 유동영역을 분류하기 위하여 Lee⁽¹⁸⁾의 실험결과를 근거로 하여 완전히 발달되었다고 생각되는 지점인 무차원 축방향 위치($x/D_h=50$)의 덕트 중심에 열선유속계에 연결된 열선을 삽입하고 덕트 말단에 연결된 가변식 유량조절기를 사용하여 풍량에 따른 Reynolds수를 변화시켜 가면서 얻어지는 출력신호를 광기록계에 속도파형을 기록하여 완전한 층류유동 범위만을 선택하였다. 열선유속계를 사용한 이유는 PIV의 경우 유동장의 전체현상만 나타내기

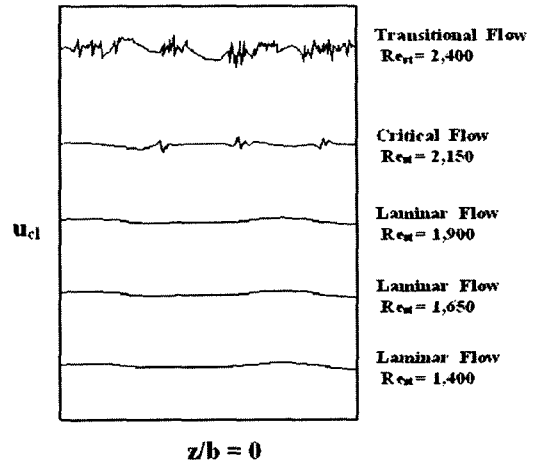


Fig. 3 Waveforms of laminar steady lows in a straight square duct by the hot-wire anemometer at $x/D_h=50$

때문에 정확한 유동영역을 찾기 어렵기 때문이다. 사용된 열선유속계는 TSI 1051모델이며 임계 Reynolds수의 결정은 열선유속계에 의한 광기록 분석에서 얻어진 순간 속도파형에 난류성분이 간헐적으로 나타나기 시작할 때까지의 순간 유동속도로부터 단면평균속도 (u_m)를 계산하여 다음과 같은 식 (1)로 임계 Reynolds수를 결정하였다.

$$Re_{\alpha} = \frac{u_m \cdot D_h}{\nu} \tag{1}$$

이때 동점성계수는 일반공기와 모기향연기의 차이가 있을 것으로 생각되나 모기향 연기의 동점성계수 측정의 불가능 및 공기와 모기향 연기의 희석비율이 너무 낮아 일반 공기 20℃를 기준하였다. 본 실험에서는 실험범위를 결정하기 위하여 Reynolds수에 따른 변화 과정의 속도파형을 광기록계에 기록하여 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 PIV 계측

본 실험에서는 축방향 속도분포를 근거로 전단 응력 압력분포 및 관마찰계수를 정리하기 위해서 곡관에 연결된 직관에서 Reynolds수를 각각 1,400부터 2,150까지 변화시키고, 축방향의 위치에 따라 속도분포가 변화될 것으로 예상하여 축방향위치 (x/D_h)를 0에서부터 80 까지 등간격으로 PIV를

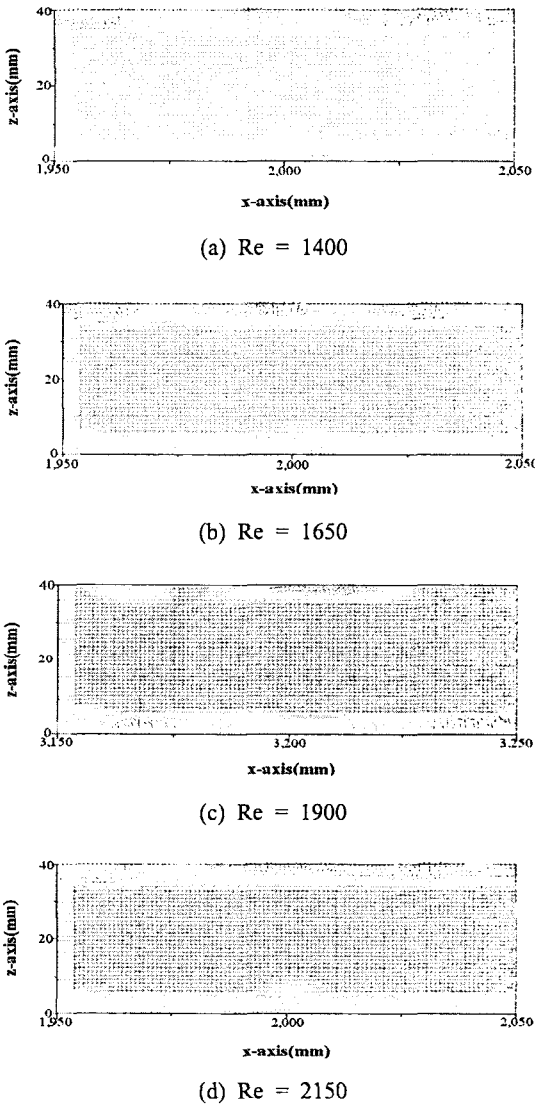


Fig. 4 Velocity vector maps of x-z plane at the $x/D_h=50$

사용하여 계측하였다. Fig. 4에는 유동이 완전히 발달되었다고 생각되는 무차원 축방향 거리가 50인 곳의 속도벡터의 형태를 나타내었고 Fig. 5에는 계측에 의한 속도분포와 이론속도분포를 비교하였다. Fig. 4와 Fig. 5를 정리하면 Reynolds수가 증가할수록 덕트의 반단면 중심에서 이론곡선보다 약간 큰 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 무차원 축방향 40 이후부터는 곡관의 영향에서 벗어남을 알 수 있다.

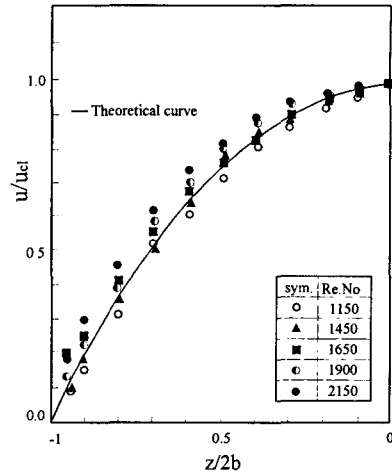


Fig. 5 Velocity profiles of the fully developed laminar steady flow in a straight duct at $x/D_h=50$

3.3 전단응력분포

덕트를 따라 흐르는 정상유동에서 축방향으로부터 PIV로 속도를 측정하여 식 (2)을 사용하여 마찰계수를 계산하였다.

$$\lambda = \frac{D_h^2}{\nu} \frac{du_{cl}}{dx} \quad (2)$$

덕트의 입구영역에서는 점성이 미치는 영역과 점성이 미치지 않는 영역으로 구별되므로 Pohlhausen의 압력구배식을 변형하면 식 (3)과 같다.⁽¹⁶⁾

$$\lambda = \frac{2D_h^2}{u_{cl}} \left(\frac{\partial u^2}{\partial z^2} \right) - \frac{D_h^2}{\mu u_{cl}} \frac{du}{dx} \quad (3)$$

식 (3)과 같이 마찰계수 값을 구한 후 정상유동에 대한 전단응력값은 식 (4)을 이용하였다.

$$\tau = \lambda \cdot \rho \nu_m^2 / 8 \quad (4)$$

Fig. 6부터 Fig. 9에는 덕트의 무차원 축방향 변화와 함께 무차원 횡방향 변화에 따른 유동의 전단응력분포를 나타내었는데 이는 Reynolds수와 관계없이 무차원 축방향 위치가 입구영역에서 벽면 전단응력의 변화가 심하고 하류방향으로 진행함

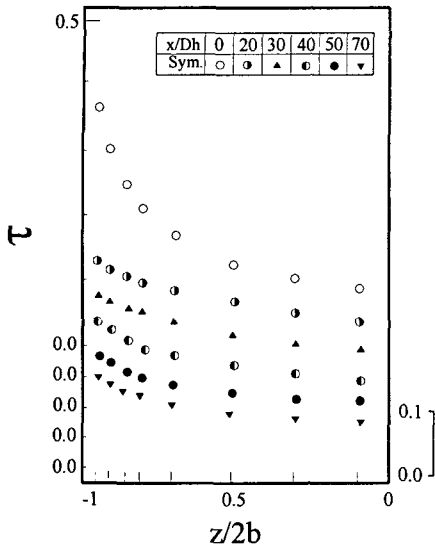


Fig. 6 Shear stress variations along the dimensionless z-axial direction in a laminar steady flow at Re=1,400

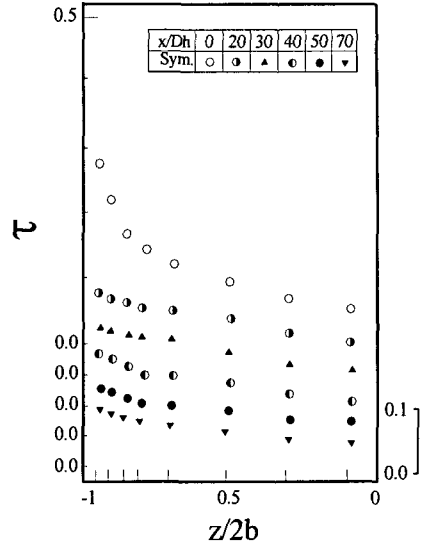


Fig. 8 Shear stress variations along the dimensionless z-axial direction in a laminar steady flow at Re=1,900

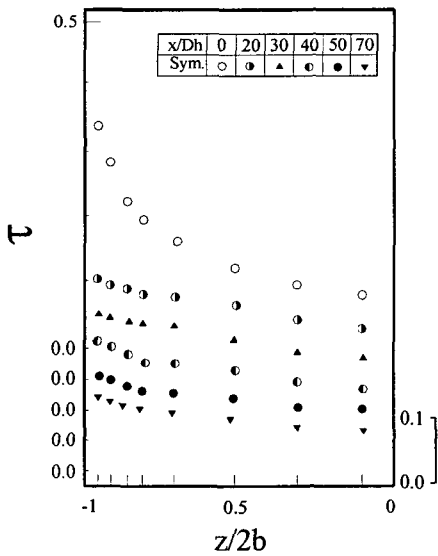


Fig. 7 Shear stress variations along the dimensionless z-axial direction in a laminar steady flow at Re=1,650

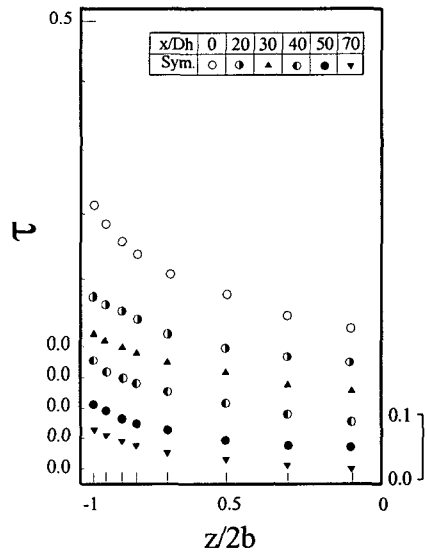


Fig. 9 Shear stress variations along the dimensionless z-axial direction in a laminar steady flow at Re=2,150

에 따라 벽면전단응력 값이 적어짐을 알 수 있다. 입구영역을 제외하고는 Reynolds수의 증가 및 유체가 하류방향으로 진행할수록 덕트중심에 대하여 점근적인 일직선 하향분포의 형태를 나타내고 있으며 기울기는 0에 접근하였다. 이 현상은 덕트 입구영역에서 새로운 입구길이 형성되기 전 입구의 영향을 크게 받음을 알 수 있고 Reynolds수가 작아질 때 덕트의 무차원 축방향 위치가 입구영역에 근접할수록 전단응력의 분포변화가 심하게 나타났다. 이는 새로운 경계층의 형성에 따라 점성항과 관성항의 영향에 따라 다르게 나타나므로 Reynolds수가 증가하고 유동이 하류방향으로 진행할수록 전단응력 분포가 완만해짐을 알 수 있다. 달리 표현하면 국소 포텐셜 코어 부근에서 가속도는 양(+)의 값에 영향을 주고 입구영역에서는 유체 유동이 하류로 진행하면서 경계층이 성장하고, 중심속도가 점점 증가하여 경계층의 두께와 중심속도의 함수로 나타내는 마찰계수의 값은 덕트 하류방향으로 진행하면서 증가하지만 발달된 영역에서의 가속도는 (-)의 값으로 상쇄됨을 알 수 있다. 이 결과를 고찰하여 보면 덕트 입구영역에서 단위길이당 전단응력은 완전히 발달된 유동영역에서 단위길이당 전단응력보다 크다는 것을 알 수 있다.

3.4 압력분포

덕트의 입구영역은 유동이 발달하고 있는 영역이므로 완전히 발달된 유동영역보다 압력강하가 크게 나타날 것으로 예측할 수 있다. 그러므로 입구에서의 압력강하는 식 (5)와 같이 표현하였다.

$$\frac{\Delta P}{1/2\rho u_m^2} = \alpha(\bar{\lambda}) \frac{x}{D_h} + K(\bar{\lambda}) \frac{x}{D_h} \tag{5}$$

여기서 $\alpha(\bar{\lambda})$ 는 유동이 완전히 발달된 유동에서 압력강하계수이며 $K(\bar{\lambda})$ 는 유체유동이 하류방향으로 진행할 때 압력강하계수이다. 본 연구에서는 Han⁽¹²⁾의 실험식 곡선을 사용하였고 Lee⁽¹⁸⁾가 제시한 CFD 결과와 비교하였다. 본 실험에서 측정된 결과 $K(\bar{\lambda})$ 는 0.8 정도로 나타났다. 발달된 유동영역에서의 $\alpha(\bar{\lambda})$ 는 $\frac{56}{Re} \cdot \frac{x}{D_h}$ 로 $\frac{64}{Re} \cdot \frac{x}{D_h}$ 인 원관의 경우보다 다소 작게 나타나고 있다. 측정구간 전 영역에 점근적으로 강하하는 압력분포를 나타내고 압력분포에 미치는 영향은 Reynolds수가 클수록

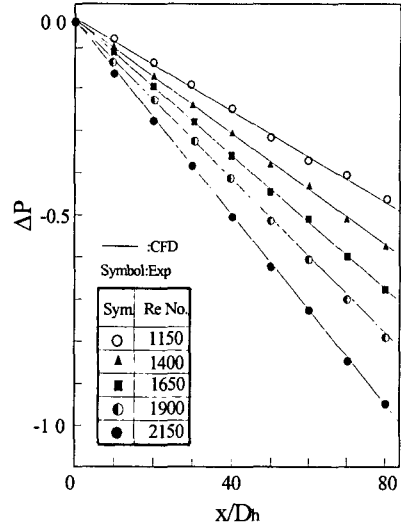


Fig. 10 Pressure variations with x/D_h in a straight duct for the laminar steady flow

심한 변화를 나타내었으며 압력의 영향은 덕트의 입구형상 및 유동상태 등에 대해서도 많은 영향을 미칠 것으로 생각된다. 있으며 압력의 영향은 덕트의 입구형상 및 유동상태 등에 대해서도 많은 영향을 미칠 것으로 생각된다. Fig. 10에는 180° 곡관의 출구에 연결된 직관에 대한 압력분포를 나타내었는데 실험값은 Lee⁽¹⁸⁾가 제시한 수치해석 결과와 비교적 일치하였다.

3.5 관마찰계수

덕트내 완전히 발달된 층류 유동영역에서 덕트의 축중심상에 2점간의 압력차를 측정하기 위하여 식 (6)을 사용하였다.

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D_h} \rho u_m^2 \tag{6}$$

식 (6)으로부터 λ 를 계산하고, 식 (1)로 정상유동의 Reynolds수를 계산하여 (λ)와 (Re)와의 관계를 정리하기 위하여 식 (7)과 같이 정의된 수력직경으로 나타낼 수 있다.

$$D_h \equiv \frac{4A}{P} = \frac{4 \times \text{면적}}{\text{접수길이}} \tag{7}$$

본 연구에서는 정사각단면 덕트에 대한 등가직경을 계산하여 Hagen의 이론 결과식 $\lambda = 64/Re$ 와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 또한 본 연구의 실험 결과는 산술 평균값을 취하여 Log-Log 그래프에 도시하였고, 최소자승법에 의하여 직선의 식을 구하여 곡관덕트에 연결된 직관에서 관마찰계수는 $\lambda = \frac{56}{Re}$ 의 관계식을 얻었다. 이 결과들을 고찰해보면 원관에 대하여 발표된 Hagen식에 비해서 관마찰계수값이 작게 나타나고 있다. 정사각단면 덕트내의 등가 유효직경은 식 (8)로 표시하였다.

$$D_{eff} = \frac{64}{56.91} D_h \quad (8)$$

Whitelaw⁽³⁾에 의한 연구결과 층류마찰저항상수는 단면이 원형인 곡관덕트에서 $\lambda \cdot Re = 56.91$ 로 나타나고 있으므로 본 실험결과는 Whitelaw가 제안한 결과보다 약간적게 나타난다. 사각단면 덕트에서 압력손실이 원형 덕트의 압력손실보다 작게 나타나는 원인은 정사각 단면덕트 모서리 부근에서 2차 유동이 미약하게 발생 하고 정사각단면과 원형단면의 등가원을 고려해 볼 때, 원형단면 덕트에서는 원주 전체의 고체 경계면을 갖고 유체유동이 이루어지는 반면 정사각단면 덕트에서는 모서리 부근에서 유체 경계면을 형성하면서 유체유동이 이루어

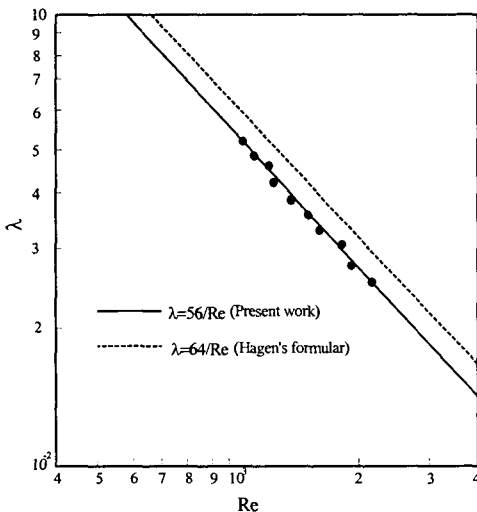


Fig. 11 Friction factors of the laminar steady flow for different Reynolds

어지므로 유체마찰이 고체마찰보다 적게 되어 원형덕트보다 정사각덕트의 관마찰계수가 적게 되는 것으로 예측된다.

4. 결 론

정사각단면 곡관에 연결된 직관덕트의 출구영역에서 발달과정에 있는 층류정상유동에 대한 유동영역을 분류한 후 PIV에 의한 측방향속도분포 측정실험에 의한 벽면전단응력, 압력분포, 관마찰계수 등의 유동특성에 대한 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유동이 충분히 발달되었다고 생각되는 덕트의 무차원 측방향위치 (x/D_h) 50지점에서 층류 유동에서 천이유동으로 변화하는 임계 Reynolds 수는 약 2,150정도였다.

(2) 벽면전단응력은 입구영역에서 변화가 심해짐을 알 수 있고 유체유동이 하류방향으로 진행함에 따라 벽면전단응력값이 작아짐을 알 수 있다. 결과를 종합하여 고찰하면 덕트 입구영역에서 단위길이당 전단응력은 완전히 발달된 유동영역에서 단위길이당 전단응력보다 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 덕트 입구에서 곡관의 유동영향을 받아 입구영역에서 전단응력과 압력손실이 크게 되기 때문이다.

(3) 압력분포는 측정구간 전 영역에 걸쳐 점근적으로 강하하는 압력분포를 나타내고 있으며 Reynolds수가 증가할수록 압력분포의 기울기는 더욱 크게 나타났다. 압력분포는 CFD해석으로 얻어진 결과와 비교적 일치하였고, 덕트 하류부로 유동이 진행할수록 직선적으로 압력강하가 발생했으며, Reynolds수가 증가됨에 따라 압력강하의 기울기가 더욱 크게 나타났다.

(4) 관마찰계수는 최소자승법에 의한 직선식을 구하여 층류유동영역에서는 $\lambda = \frac{56}{Re}$ 의 관계식을 얻었다. 이는 정사각단면 덕트에서는 모서리 부근에서 유체경계면을 갖고 유체유동이 이루어지므로 유체중 유체마찰이 고체마찰 보다 작게 되어 원형단면 덕트 보다 정사각단면 덕트내의 관마찰계수가 작게 되는 것으로 예측된다.

(5) 곡관에 연결된 직관에서의 유동특성은 곡률반경 및 Reynolds수에 따라 유동의 형태가 변화되므로 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

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) Sohn, H.C., Lee, H.N. and Park, G.M., 2002, "Velocity Profile and Wall Shear Stress Distribution of Developing Turbulent Oscillatory Flows in an Oscillator Connected to Straight Duct Located in Exit Region of a Curved Duct," *Transaction of the KSME B*, Vol. 26, No. 10, pp. 1378~1386.
- (3) Whitelaw, J. H., 1993, "Velocity Measurements in an S-shaped Diffusing Duct," *Experiments in Fluids*, Vol. 15, pp. 364~367.
- (4) Uchida, S., 1956, "The Pulsating Viscous Flow Superposed on the Steady Laminar Motion of Incompressible Fluid in a Circular Pipe," *Z. Angew. Math. Phys.*, Vol. 7, pp. 403~423.
- (5) 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.
- (6) Cho, B. G., 1995, "A Study on Flow Characteristics of Laminar Steady and Unsteady Flow in a Square-sectional 180° Curved Duct," *Ph.D. Thesis chosun Univ.*
- (7) Park, G.M., Bong, T.G. and Sohn, H.C., 1999, "A Study on the Flow Characteristics of Developing Transitional Steady Flows in the Entrance Region of a Curved Duct," *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 23, No. 1, pp. 33~39.
- (8) Lee, H.G., Son, H.C., Lee, H.N. and Park, G.M., 2001, "Axial Direction Velocity and Wall Shear Stress Distributions of Turbulent Steady Flow in a Curved Duct," *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 25, No. 1, pp. 131~138.
- (9) 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.
- (10) Goldstein, R. J. and Kreid, D. K., 1967, "Measurement of Laminar Flow Development in a Square Duct Using a Laser-Doppler Flowmeter," *J. Applied Mech*, pp. 813~818.
- (11) Muchnik, G. F. and Gordon, A. R., 1973, "Hydrodynamic Development of a Laminar Velocity Field in Rectangular Channels," *J. Eng. Phys. (USSR)*, Vol. 25, pp. 1268~1271.
- (12) Han, L. S., 1960, "Hydrodynamic Entrance Lengths for Incompressible Laminar Flow in Rectangular Ducts," *J. of Appl. Mech. Trans. ASME*, Vol. 82, series E, pp. 403~409.
- (13) Fleming, D. P. and Sparrow, E. M., 1969, "Flow in the Hydrodynamic Entrance Region of Ducts of Arbitrary Cross Section," *J. Heat Transfer*, Vol. 91, pp. 345~354,
- (14) Drake, D. G., 1965, "On the Flow in a Channel due to a Periodic Pressure Gradient," *Q. J. Mech. Appl. Math.*, Vol. 18, No. 1, pp. 1~10.
- (15) Yun, W. J., 2002, "A Study on the Flow Characteristics of Laminar Steady Flows in the Exit Region Connected to the Square-Sectional 180° Curved Duct," *M.S. Thesis, Chosun Univ.*
- (16) Sohn, H.C., Lee, H.N., Park, G.M. and Kee, H.G., 2004, "A Study on the Axial Velocity Profiles of Developing Laminar Flows in a Straight Duct Connected to a Square Curved Duct," *Transaction of the KSME B*, Vol. 28, No. 9, pp. 1058~1065.
- (17) Park, K.H. and Kim, K.C., 2001, "Development of a High Resolution Digital Cinematic Particle Image Velocimetry," *Transaction of the KSME B*, Vol. 25, No. 11, pp. 1535~1542.
- (18) Lee, H. G., 2003, "Flow Characteristics of Developing Laminar Flows in a Straight Duct Connected to a Curved Duct," *Ph.D. Thesis Chosun. Univ.*