

## 합류 곡관덕트 출구영역에서 난류유동의 유동특성

손현철\* · 박상규\*

(2002년 8월 5일 접수, 2003년 3월 5일 심사완료)

### Flow Characteristics of Turbulent Flow in the Exit Region of Join Stream Curved Duct

Hyun Chull Sohn and Sang kyoo Park

**Key Words:** Join stream(합류), Straight Duct(직관덕트), Exit Region(출구영역), Shear Stress Distribution(전단응력 분포), Hot-wire Anemometer(열선유속계)

#### Abstract

In the present steady the flow characteristics of turbulent steady flows were experimentally investigated in the exit region of join stream. The experimental was carry out to measure the velocity profiles of air in a square duct. For the measurement of velocity profiles, a hot-wire anemometer was used. The experimental results shows that the velocity profiles do not change behind the fully developed flow region , which is defined as dimensionless axial direction  $x/D_h=50$ . In addition, the gradient of shear stress distribution became stable as the flow reached progress downstream.

#### 기호설명

- $a$  : 실험덕트의 폭(mm)
- $b$  : 실험덕트의 높이(mm)
- $cl$  : 곡관덕트 중심에서의 값
- $D_h$  : 수력반경(mm)
- $Re$  : 레이놀즈수
- $x, y, z$  : 시험덕트의 좌표
- $x/D_h$  : 무차원 축방향 위치
- $\bar{u}$  : 단면최대속도
- $\bar{u}_m$  : 단면평균속도
- $P$  : 압력 ( $Kg/m^2$ )
- $\tau$  : 전단응력 ( $Kg/m^2$ )
- $\rho$  : 밀도 ( $Kg/m^3$ )
- $\lambda_{st}$  : 마찰계수

#### 1. 서론

산업발달기에 도입된 플랜트를 포함한 설비기술에 바탕을 둔 관로망의 설비는 기계설비, 건축설비 및 공조설비산업 등을 포함한 유체수송 설비에 많이 사용되고 있다. 또한 관로망의 설비는 위생 및 배연 설비 등을 구성할 때 계획상 필수적인 설비과정으로 여러 기술인들의 노력에 힘입어 큰 발전을 이루었으며<sup>(1)</sup> 기계공학을 포함하여 건축, 토목, 환경, 화학분야 등 많은 산업분야에 널리 사용되고 있다. 특히 관로망의 설계에 따라서 시스템을 관리하고 유지하는데 경제적인 요소 등 2차 산업에도 큰 영향을 미칠 수 있다.<sup>(2)</sup> 모든 관로망의 설비는 직관과 곡관으로 이루어져 있으며 곡관 내부에서의 흐름은 직관과 달리 원심력이 작용한다. 따라서 곡관내의 유동은 직관에서 찾아볼 수 없는 복잡한 유동의 현상을 동반하며 이후 연결된 직관에서는 곡관의 원심력에 의한 덕트내의 압력차로 새로운 입구길이가 형성되면서<sup>(3)</sup> 유체유동은 더욱 복잡한 형태를 나타낸다.

† 책임저자, 회원, 순천제일대학 건축설비과  
 E-mail : farmersohn@hanmail.net  
 TEL : (061)740-1255 FAX : (061)740-1262  
 \* 회원, 여수대학교 기계공학과

이런 현상은 유동입자의 충돌로 수격 현상이 나타나며 건축물 배관계 및 플랜트의 수명을 단축시킬 뿐 만 아니라 소음과 진동을 유발하여 경제적인 부담을 증가시키기도 한다.<sup>(4)</sup>

합류되는 곡관에 대한 연구는 배연 및 환기설비 뿐만 아니라 각종 플랜트의 배관계통 및 대형 건축물의 공조설비장치, 유체의 수송라인, 열교환기 등 많은 설비산업에 적용할 수 있으며 이러한 공업목적의 필요성 및 학술적인 관심에 의해서 덕트내 유동에 관한 연구는 오래 전부터 많은 연구가 이루어져왔으며 최근에는 폐 및 기도 등 생체에 적용한 유동해석을 기계공학적인 방법으로 도입하여 해석하고 있다.<sup>(5)</sup> 관내 유동에 대한 연구는 오래 전부터 연구되어져왔으며 Leutheusser<sup>(6)</sup>는 비압축성 유동의 완전 발달된 유동에서 중형비가 다른 사각덕트와 원관을 비교하여 마찰계수, 축방향 속도분포 및 전단응력 분포등을 실험하여 발표하였다. 곡관내의 유동은 19세기 말 곡관로에서 유체유동이 공학적으로 연구되기 시작하여 1927년에 Dean<sup>(7)</sup>은 단면이 원형인 곡관내에서 관축방향으로 나선형 운동을 하는 유체의 유동을 관축방향의 주류와 관축에 수직인 단면내의 2차 유동으로 구별하고 곡관유동을 지배하는 특성 파라메타로 Dean 수 ( $Re\sqrt{a/R} \approx Re\sqrt{D_w/2R}$ )에 의존한다는 것을 발표하였다. Lee<sup>(8)</sup> 등은 180° 원형단면 곡관에서 선회류의 열전달 특성을 발표하였고 Park<sup>(9)</sup> 등은 180° 곡관덕트에서 층류유동의 특성을 발표하였고 Kim<sup>(10)</sup> 등은 정사각 단면을 갖는 90° 곡관덕트를 회전시켜 난류유동을 측정하였으며 Kim<sup>(11)</sup> 등은 분기관 혼합기의 난류혼합에 대한 유동에 대해서 기사화를 연구하였으며 Lee<sup>(12)</sup> 등은 Reynolds 응력 모델을 이용하여 압력구배가 있는 난류경계층의 유동장에 대해서 해석하였다.

본 연구에서는 배연 및 환기설비 등에 필수적으로 조합된 합류덕트에 대한 많은 연구가 이루어지지 않아 곡관덕트의 합류점 이후의 직관부만을 시험대상으로 덕트내의 속도분포를 Reynolds 수 및 축방향과 횡방향의 위치를 변화시키며 실험을 수행하여 합류 이후의 직관내부의 속도분포와 전단응력을 규명하여 덕트내부의 기류분포를 고려한 보다 나은 환기 및 배연 계획을 세울 수 있도록 하며 유해가스, 오염원의 기류분포 등에 따른 정확성을 얻어 덕트 및 관로망 설계에 실제 적용될 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

## 2 실험

### 2.1 실험장치

실험장치의 주요구성은 매끄러운 아크릴로 제작된  $2a \times 2b = 40 \text{ mm}$  덕트로 합류 ( $x/D_h = 10$ ) 이후의 길이가 3000 mm이며 작동유체의 밀도차를 적게하기 위해 유입관에 honey-com 형식의 필터를 제작하여 설치하였다. 곡관 덕트의 크기는 직관부와 동일단면이며 시험덕트의 대칭벽 사이의 거리는  $40 \pm 0.5 \text{ mm}$ 가 유지되도록 하였다. 벽의 인접각은  $90 \pm 0.4^\circ$ 가 되도록 하였으며, 밀면은 전길이에 걸쳐  $\pm 0.5 \text{ mm}$  이내에서 수평이 되도록 하였고 축방향의 위치( $x/D_h$ )는 90° 곡관과 직관이 연결되는 부분을  $x/D_h = 0$ 으로 결정하고, 5의 등간격으로 열선지지대 삽입구를 만들었다. 열선 센서의 이송기구는 총 150mm 이고 미소 이송거리는 1/100mm로서 이송기구 지지대의 수평은 수준기에 의해 확인하고 열선 센서가 수직으로 삽입되어 축방향 및 상하방향의 위치를 자유로이 이송할 수 있도록 하였다. Fig.1은 실험장치의 개략도를 나타내었는데 작동유체는 흡입형 송풍기에 의해 흡입되며 흡입된 작동유체는 시험덕트 입구측에 설치된 2개의 유입유량비가 같은 정류상자(1)를 통과한 후 고정된 정사각단면 90° 곡관 덕트(2)와 여기에  $x/D_h$ 를 일정한 간격으로 유지한 다음 단면의 크기가 같은 60° 합류 곡관(3)을  $x/D_h = 10$ 지점에 설치하였다. 고정된 곡관과 합류되는 두 곡관의 곡률반경은 400mm로서 동일하며 단면의 크기 또한 동일하다. 90° 고정된 곡관의 설치는 사각 flange를 이용하였고 60° 합류곡관을 설치하기 위해서 실험 범위인 직관부를 제작한 후 milling machine 및 end mill 공구를 이용하여 절개하였고 합류관의 부착은 합류관 끝 부분에 평판형 flange를 설치하여 set screw를 사용하여 고정하였다. 또한 leak방지를 위하여 silicon rubber를 사용하여 봉합하였다. 합류 이후에 덕트를 통과하는 유동은 직관부(3000mm)로 유입되어 surge tank 및 orifice를 통과한 후 대기중에 방출된다. 본 실험은 합류점을 중심으로 실험하였고 Reynolds수, 축방향 및 횡 방향을 이동시키면서 실험하였다. Fig. 2는 합류지점에서의 유동을 나타내었고 Fig. 3은 본 실험에 사용된 좌표계를 나타내었다.

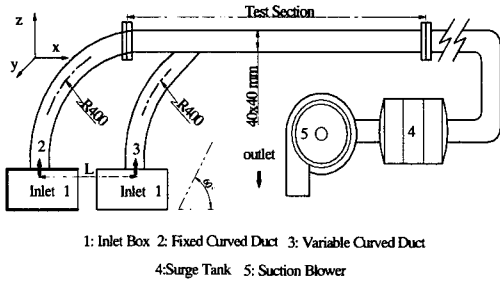


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus



Fig. 2 Fluid flow in the join stream

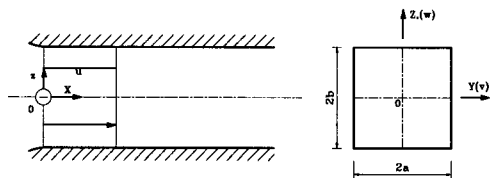


Fig. 3 Coordinate system and velocity component in the straight duct

2.2 실험방법

유동의 발생은 송풍기를 작동시켜 작동유체를 덕트내로 유입하도록 하였고 유속의 조절은 가변모터를 사용하였다. 덕트 내에서 정상유동에 대한 자료 측정을 위하여 덕트 내에 X형 열선을 삽입하고 여기서 얻어지는 신호를 oscilloscope에 기록하여 유동영역을 규정한 후 정상유동의 Reynolds수와 덕트 입구로부터 덕트의 축방향위치 및 상하 방향 위치에 따라 유동 특성이 변화한다고 판단하여 본 실험에서는 완전히 발달되었다고 생각되는 무차원 축방향 위치  $x/D_h = 50$  지점

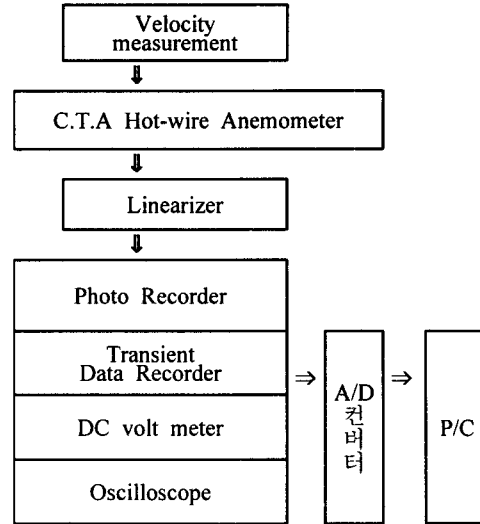


Fig. 4 Diagram of data acquisition and processing system

인 곳의 덕트 중앙에 열선을 삽입하고 열선 센서로부터 얻어진 속도 파형을 광기록계에 기록하여 분석하였다. 합류관에서 난류정상유동의 실험은 Reynolds수를 변화시켰고 축방향의 위치를 이동하면서 덕트 z축에 대하여 0부터 0.95 지점까지 덕트의 윗면 방향으로 17등분하여 측정하였다. 또한 벽면에서는 점성의 영향으로 유동특성이 변화하므로 보다 조밀하게 측정하였고, 덕트의 중심을 기준으로 축방향의 속도변화가 거의 없는 지점까지 측정하였다. 이러한 방법으로 두 채널에서 측정되는 열고자 하는 신호는 열선유속계의 선형기와 신호안정기 및 상관기(Corrector)를 거쳐 속도와 출력전압을 선형화 시킨 후 광기록계에 기록하여 자료를 처리하였다. 또한 아날로그 신호로 연산한 값을 RMS 전압계에서 얻고 A/D 변환기를 거쳐 디지털 값으로 변화시킨 다음 컴퓨터에 보내지고 측정값을 분석하였다. Fig. 4는 자료처리과정을 나타내었다. 실험에서 사용한 열선 유속계의 보정은 유체의 유동조건 중, 온도와 밀도를 일정하게 하고 출력전압과 유속과의 관계만을 고려하였다. 작동저항은 15Ω 으로 하였고 과열비는 1.3으로 하였으며 측정 가능한 범위를 40m/s 가 되도록 하였고 열선 유속계의 최대전압은 10 volt가 되게 하였다. 이때 최대오차율은 약 1.8% 정도였다.

3장 결과 및 고찰

3.1 축방향속도분포

정상유동에 대한 속도분포의 실험은 Table 1과 같은 조건에서 90° 곡관에 연결된 직관 덕트의 입구부에서 합류점 ( $x/D_h=10$ )과 하류 방향으로 진행하면서 각 위치에서의 z방향을 17등분하여 Reynolds수 및 위치변화에 따른 유동특성을 나타내었다. 또한 Table 2에는 90° 고정덕트와 60° 합류덕트에서 공급유량을 나타내었는데 Table 1과 약간의 차이가 발생하는 것은 유량측정기의 보정 오차 또는 송풍기의 성능에 대한 오차라고 판단된다. Fig. 5에는 유동이 완전히 발달되었다고 생각되는 지점인 무차원 축방향 위치 50 지점에서 Reynolds수의 증가에 따른 속도파형을 나타내었는데 임계점 이후 Reynolds수가 증가할수록 난류 eddy motion이 많이 발생하였다. Fig. 6에는 Reynolds수를 15000에 고정하고 덕트의 중심에 열선을 삽입한 후 축방향을 이동시키면서 난류유동의 형태를 나타내었는데 합류지점에서 eddy motion이 상대적으로 크게 발생하였으며  $x/D_h=50$  이후부터 완전한 난류 유동의 형태를 나타내었다. Fig. 7에는  $x/D_h=50$  지점에서 Reynolds수를 15000에 고정하고 z축을 변화시키면서 측정하였는데 덕트의 벽면을 향할수록 많은 eddy motion이 발생하였다. 덕트내 난류의 흐름은 Reynolds수의 증가, 축방향 위치가 하류방향 일수록 그리고 벽면부근에서 많은 난류성분이 나타났다. 이와 같은 영향은 정상유동의 압력구배와 점성력 때문에 덕트 입구로부터 균일한 속도를 가진 작동유체가 유입되어 덕트의 축방향을 따라 하류방향으로 진행될 때 경계층의 발달로 인하여 potential 유동영역은 작아지고 덕트의 중심속도는 Reynolds가 증가할수록 증가하며<sup>(9)</sup> 벽면부근의 속도도 증가하여 1/7승 법칙의 속도분포 형상을 보이기 때문이다.

Table 1 Experimental conditions of turbulent steady flow at  $x/D_h=50$

Reynolds. No	$\bar{u}_m$ (m/s)	Q (ℓ/min)
15,000	5.67	540
30,000	11.3	1080
65,000	24.5	2352

Table 2 Experimental conditions of supply flowrate at both curved duct (ℓ/min)

Reynolds. No	90° fixed duct	60° join duct
15,000	280	280
30,000	545	545
65,000	1180	1180

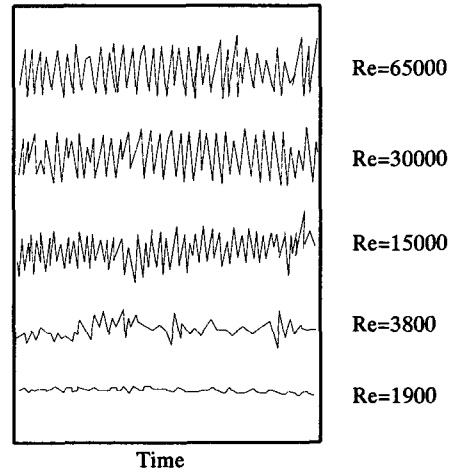


Fig. 5 Variation waveforms of the steady flow along the Reynolds number at  $x/D_h=50$

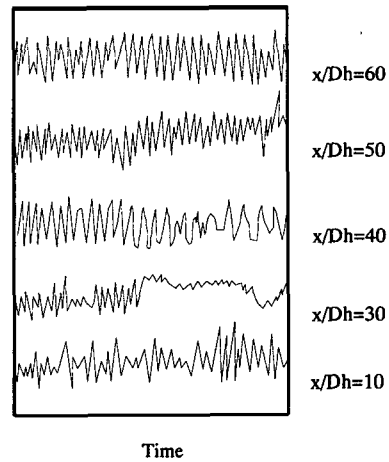


Fig. 6 Variation waveforms of the steady flow along the axial direction in the Re No.=15000 ( $y'=0$  and  $z'=0$ )

Fig. 8은 90° 고정덕트를 통과하는 반경방향( $r'$ )의 유속이 직관과 접해지기 직전인 곡률반경 90°에 대한 반경 방향에 대한 속도분포를 나타내었다. 속도분포의 형태는 Reynolds수가 증가할수록 곡관의 원심력의 작용으로 외벽쪽의 속도가 크게 나타나고 Reynolds수에 관계없이 덕트의 반단면 중심에서 속도분포가 크게 나타남을 알 수 있다.

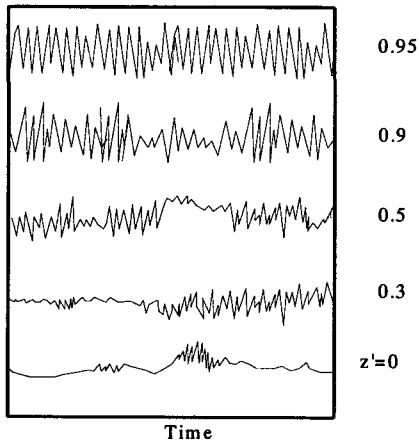


Fig. 7 Velocity waveforms of developed steady flow by using a hot-wire anemometer at the Re No=15000,  $x/D_h=50$  and  $y'=0$

Fig. 9에는 합류덕트인 60° 곡관을 통과하는 곡률 반경( $r'$ )의 유동이 직관과 합류되기 직전의 속도 분포를 나타내었다. 속도분포의 형태를 90° 고정 덕트와 비교하여 보면 속도분포의 형태가 비교적 완만한 분포의 형태를 이루고 있으며 최대속도의 위치가 덕트의 중심에 접근하고 있다. 속도의 세기는 고정덕트위치에서 보다 적어짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 60° 지점부터 나타나는 2차유동의 효과에 의해서 3차원 유동의 발생이 활발한 영역이므로 주유동과 2차유동의 에너지 상쇠에 의한 것으로 판단된다.<sup>(3)</sup>

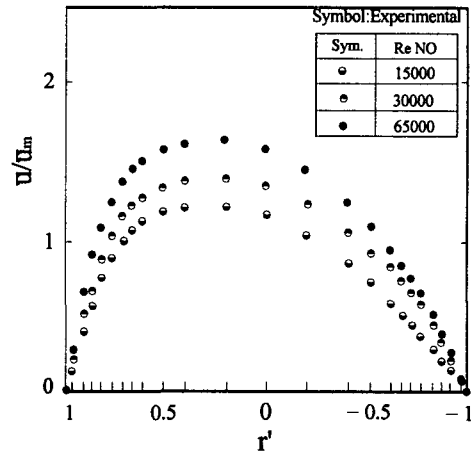


Fig. 9 Velocity distributions along the  $r'$ -axis in the joint stream 60° curved duct for turbulent steady flow

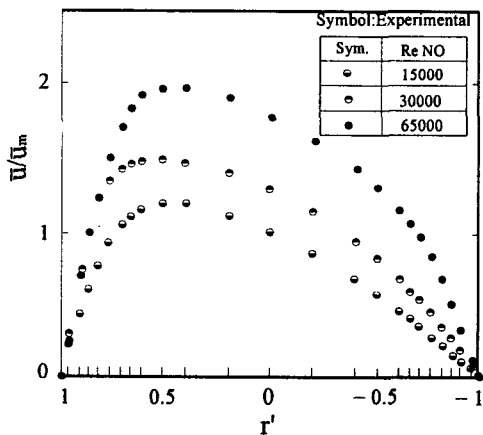


Fig. 8 Velocity distributions along the  $r'$ -axis in the joint stream 90° curved duct for turbulent steady flow

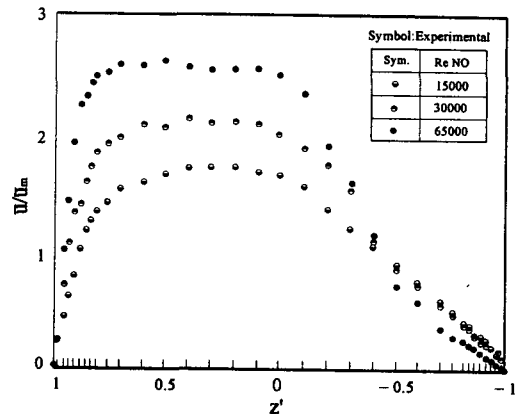


Fig. 10 Velocity distribution of the turbulent steady flow in the joint stream ( $x/D_h=10$ ,  $y'=0$ )

Fig. 10은 합류관 출구영역에서 난류유동의 속도분포를 나타낸 것으로 Reynolds수가 클수록 무차원 속도분포가 크게 나타났으며 Reynolds수에 관계없이 합류영역에서는 덕트의 상벽면 쪽에서 최대속도가 나타났으며 하벽면 쪽에서는 합류의 영향으로 인하여 부가와류가 발생함을 알 수 있다. 이러한 부가 와류는 Reynolds수가 증가함에 따라 덕트의 하벽면쪽의 합류가 시작되는 지점에서 와류의 발생이 더욱 커짐을 알 수 있으며 Reynolds수가 커짐에 따라 최대속도가 불안정해짐을 알 수 있다. Fig. 11은 합류관 출구영역의 중심부근 속도분포를 나타낸 것으로 합류관의 중심부근에서 eddy motion이 크게 발생하는 것은 유동 입자들의 충돌 및 유량의 증가에 따른 것으로 이것은 덕트 입구로부터 경계층 내의 속도분포가 충분히 발달되기 전의 경계층 외부 유동 속도와의 차이로 인하여 국소적인 가속도에 의해서 발생하며 이 위치는 Reynolds수에 관계없이 축방향의 위치 ( $x/Dh$ ) 30부근에서 가장 크게 발생하였다.

Fig. 12부터 Fig. 14에는 덕트 입구영역에서 덕트내 유동의 축방향에 따른 중심부근의 속도분포를 나타내었는데 이들을 고찰해보면 직관 입구부 초기영역 ( $x/Dh=5$ )에서는 곡관부 원심력과 이로 인한 덕트의 표면 마찰에 의한 2차 유동의 영향<sup>(3,7)</sup>으로 이론 분포곡선과 약간의 차이가 발생하나 Reynolds수의 증가와 관계없이 비교적 일정한 유동의 형태를 나타내고있다. 주 유동과 합류영역인 무차원 축방향 위치 10부터 복잡한 거동을

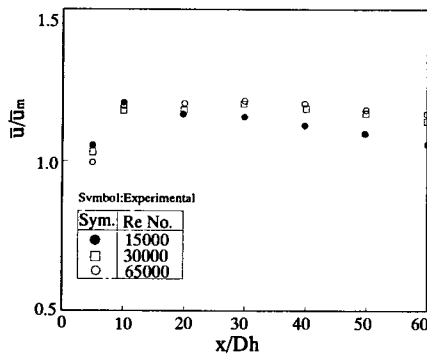


Fig. 11 Velocity distribution along the change in the axial direction and Reynolds number for turbulent flow in the exit region of join stream

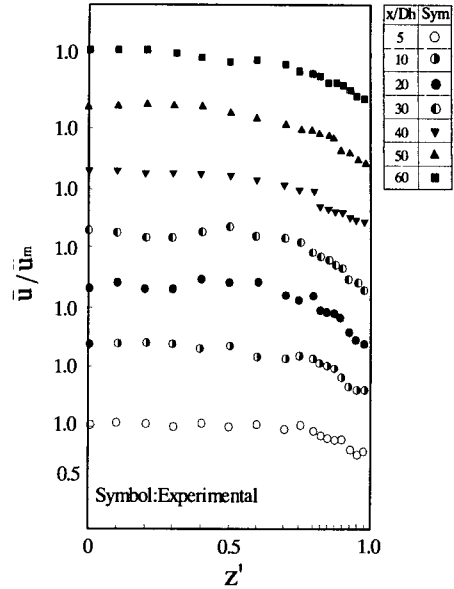


Fig. 12 Cross-sectional velocity distribution along the axial direction of turbulent steady flow in the exit region of the join stream at Re=15000

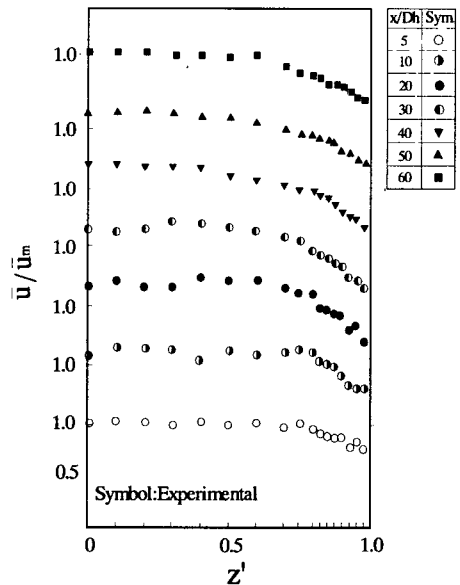


Fig. 13 Cross-sectional velocity distribution along the axial direction of turbulent steady flow in the exit region of the join stream at Re=30000

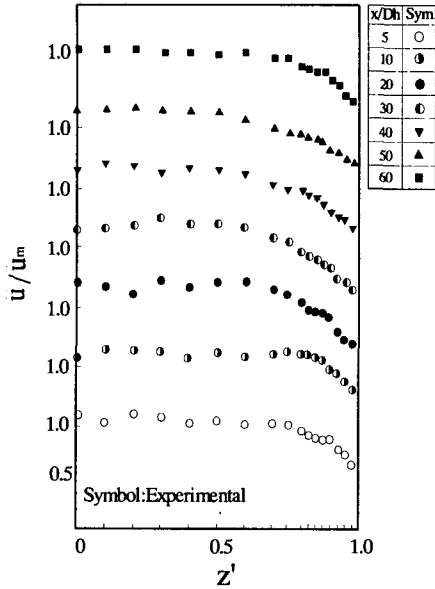


Fig. 14 Cross-sectional velocity distribution along the axial direction of turbulent steady flow in the exit region of the joint stream at Re=65000

나타내는데 이는 합류에 의한 축방향의 속도증가, 합류점에서 소용돌이 및 곡관의 영향으로 인한 유동 현상으로 생각된다. 이러한 복잡한 거동은 Reynolds수가 증가할수록 합류영역에서 멀리 떨어진 부근까지 나타났으며 (x/Dh=50)인 지점부터 안정화되었다. 이것은 경계층의 두께가 덕트의 중심부까지 성장하여 완전히 발달된 유동 형태가 되었기 때문이다.

3.2 전단응력분포

덕트내의 정상유동에서 축방향으로부터 두 점간의 압력차를 측정하여 마찰계수( $\lambda_{st}$ )를 식 (1)을 사용하여 계산하였다.<sup>(13)</sup>

$$\lambda_{st} = \frac{Dh^2}{\nu} \frac{du_{cl}}{dx} \quad (1)$$

덕트의 입구영역에서는 앞서 설명한 바와 같이 점성이 미치는 영역과 점성이 미치지 않는 영역으로 구별되므로 Pohlhausen의 압력구배 변수를 변형하면 식 (2)와 같다.

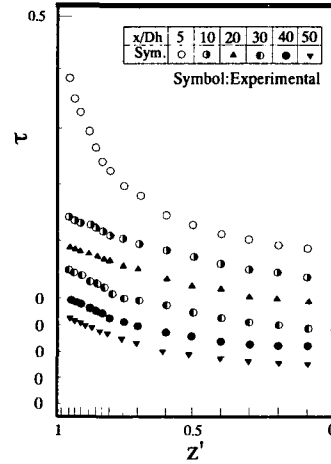


Fig. 15 Shear stress distribution of developing turbulent steady flow at Re=15000

$$\lambda_{st} = \frac{2Dh^2}{u_{cl}} \left( \frac{\partial u^2}{\partial z^2} \right) - \frac{Dh^2}{\mu u_{cl}} \frac{du}{dx} \quad (2)$$

식 (2)와 같이 마찰계수 값을 구한 후 정상유동에 대한 전단응력 값은 식 (3)을 이용하였다.

$$\tau = \lambda_{st} \cdot \rho u_m^2 / 8 \quad (3)$$

Fig. 15부터 Fig. 17에는 덕트의 무차원 축방향 변화와 함께 무차원 횡방향 변화에 따른 난류정상유동의 전단응력분포를 나타내었는데 이를 고찰하여 보면 Reynolds수의 증가와 관계없이 덕트의 무차원 축방향 위치가 5인 지점에서 곡선의 기울기가 가장 커짐을 알 수 있다. 이 현상은 덕트입구 유동영역에서 입구의 영향을 받음을 알 수 있으며 합류영역에서 전단응력값은 급격히 적어지고 합류영역 이후 직관부에서의 전단응력은 단일 직관덕트에서와 유사한 형태를 나타낸다. 즉, 유동이 덕트의 하류방향으로 진행함에 따라 벽면전단응력의 변화가 적어짐을 알 수 있다. 또한 난류정상유동에서는 레이놀즈수가 적을수록 덕트의 무차원 축방향 위치가 덕트의 입구부에 가까워질수록 전단응력분포의 변화가 심하였고 Reynolds수가 증가할수록, 덕트의 입구로부터 유체유동이 하류방향으로 진행할수록 전단응력분포의 경사가 완만해짐을 고찰하였다.

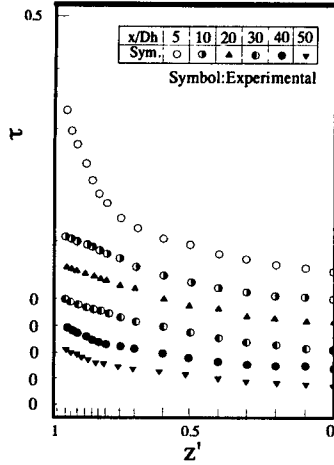


Fig. 16 Shear stress distribution of developing Turbulent steady flow at Re=30000

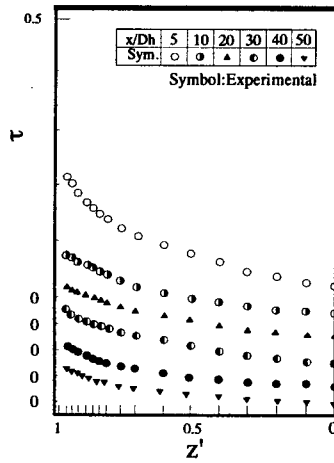


Fig. 17 Shear stress distribution of developing Turbulent steady flow at Re=65000

이는 국소 포텐셜 코어부근에서 가속도는 양(+)의 값에 영향을 주고 입구영역에서는 유체유동이 하류로 진행하면서 경계층이 성장하고 중심속도가 점점 증가하여 경계층의 두께와 중심속도의 합수로 나타내는 마찰계수의 값은 덕트 하류방향으로 진행하면서 증가시키지만 발달된 영역에서의 가속도는 (-)의 값으로 상회 됨을 알 수 있다.

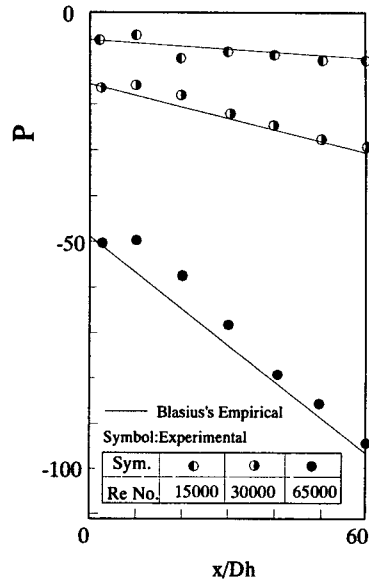


Fig. 18 Pressure distribution along the dimensionless axial distance in turbulent flow

3.3 압력분포

덕트의 입구영역은 유동이 발달하고 있는 영역이므로 완전히 발달된 유동영역보다 압력강하가 크게 나타날 것으로 예측할 수 있다. 그러므로 입구에서의 압력강하는 식 (4)와 같이 표현하였다.

$$\frac{\Delta p}{1/2\rho u_m^2} = C(\lambda) \frac{x}{D_h} + K(\lambda) \frac{x}{D_h} \quad (4)$$

여기서  $C(\lambda)$ 는 유동이 완전히 발달된 유동에서 압력강하 계수이며  $K(\lambda)$ 는 유체유동이 하류방향으로 진행할 때 압력강하 계수 값이다. Fig.18에는 90° 곡관의 끝에 연결된 직관과 합류영역 이후의 직관에 대한 압력분포를 나타내었다. 본 연구에서는 Han<sup>(14)</sup>의 실험식 곡선을 사용하여 측정한 결과  $K(\lambda)$ 는 0.8 정도 나타났다. 또한 완전히 발달된 유동영역에서의  $C(\lambda)$ 는  $\{54.9/Re \times x/Dh\}$ 로 원관 $\{64/Re \times x/Dh\}$ 인 경우보다 다소 적게 나타나고 있다. 측정구간 전영역에 걸쳐 Reynolds수에 관계없이 합류영역 ( $x/Dh=10$ )에서 압력분포가 크게 나타났으며 이 영향은 무차원 축방향위치  $x/Dh=30$  지점까지 영향을 주었고 이후 직선적 분포가 나타남을 알 수 있다.



합류영역이 압력분포에 미치는 영향은 Reynolds 수가 클수록 심한 변화를 나타내었으며 이는 합류영역 및 합류가 미치는 범위에서는 Blasius의 직관에 대한 압력 경험식에 상당량 벗어나고 있으며  $x/Dh=30$ 영역까지는 대략 곡관에서의 압력 강하<sup>(3)</sup>와 유사한 형태를 보이고 있다. 또한 압력의 영향은 합류 덕트의 입구형상, 접합조건 및 유동 상태 등에 대해서도 많은 영향을 미칠 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

합류덕트의 출구영역에서 난류유동의 유동특성을 규명하기 위해 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Eddy motion의 변화는 Reynolds수가 증가할수록, 무차원 축방향 거리가 멀어질수록 또한 덕트의 벽면에 접근할수록 증가하였다.

(2) 합류 곡관에서 속도분포는 합류지점 이전에는 이론분포와 유사하나 합류지점에서는 덕트의 윗 방향에서 속도 분포가 크게 나타났고 덕트의 아래 부분에서는 부가적인 와가 발생하였다. 와의 크기는 Reynolds수의 증가에 따라 크게 나타났으며 합류지점부터는 Reynolds수에 관계없이 유량증가, 소용돌이 및 합류관에서 2차 유동 등으로 아주 복잡한 유동을 나타내며 이후 무차원 축방향 위치가 증가할수록 안정된 흐름을 보였다.

(3) 전단 응력분포는 입구영역에 가까울수록 급격한 기울기를 나타내다가 합류영역부터 유체유동이 하류로 진행함에 따라 점차 유동이 발달할수록 완만한 분포를 나타내었다. 이는 유동이 덕트 하류방향으로 진행하면서 발달된 유동영역에서 유동 가속도가 상쇠 됨을 알 수 있다.

(4) 압력분포의 경우 합류영역이전에는 이론식과 일치했으나 합류영역의 압력거동이 크게 나타났으며 이 영향은 무차원 축방향 위치 30정도까지 그 영향을 미쳤으며, 이 영역에서의 압력분포는 곡관 내부의 압력분포와 비교적 유사한 분포를 나타내었다.

#### 후 기

본 논문은 여수대학교 설비자동화 및 정보시스템 연구개발센터 지원으로 진행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 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
- (2) Ohmi, M., Iguch, M. and Meagawa, K., 1982, "An Analysis of free oscillatory flow in a U bend," *Journal of JSME(B)*, Vol.48, No.425, pp. 50~58
- (3) Sohn, H.C., 2000, "A Study on the Flow Characteristics of Developing Turbulent Steady, Turbulent Oscillatory and Turbulent Pulsating Flows in the entrance Region of a Curved Duct," Ph.D Thesis, University of Chosun, Gwangju, Korea.
- (4) Bong, T.G., 1996 "A Study on the Flow Characteristics of Developing Transitional Steady, Transitional Oscillatory and Transitional Pulsating Flows in entrance Region of a Curved Duct," Ph.D Thesis, University of Chosun, Gwangju, Korea.
- (5) Cho, M.T., Sur, S.H. and Yoo, S.S., 2000, Collapsible Phenomena in the Flexible Tubes due to the Flow Rate and Transmural Pressure Changes," *Proc. of the KSME 2000 Fall annual Meeting(B)* pp. 377~384.
- (6) Leutheusser, H.J., 1963, "Turbulent flow in Rectangular Duct," *J.of the Hydraulics Divition*, Vol.89, No.3, pp1~18
- (7) Dean, W. R., 1928, "The Stream-line Motion of Fluid in a Curved Pipe," *Phil Mag. S. 7*, Vol.5, No. 30, pp. 673~695
- (8) Lee, S.B., Keon, K.R. and Chang, T.H., 1995, "A Study on Swirling Flow Heat Transfer Characteristics in a Circular duct with 180° bend," *Proc. of the KSME 1995 Fall annual Meeting(B)* pp. 285~289.
- (9) Park, G.M., Cho, B.G. and Bong, T.G., 1998, "A Study on Characteristics of Laminar Oscillatory Flow in Square-Sectional 180° Curved Duct," *Transaction of the KSME, B* Vol.22, No.2 pp.139~152

- (10) Kim, D.C., Chun, G.H. and Choi, Y.D., 2000, "Measurement of Inward Turbulent Flow in a Rotating with Square Cross-Section 90° Duct," *Proc. of the KSME 2000 Fall annual Meeting(B)* pp. 627~632.
- (11) Kim, K.C. Shin, D.S. and Lee, B.H., 1998, "Flow Visualization Study on the Turbulent Mixing of Two Fluid Streams(I)," *Transaction of the KSME, B* Vol.22, No.1 pp.139~152
- (12) Lee, S.H., Ryou, H.S. and Choi, Y.K., 1998, "Numerical Analysis Turbulent Boundary Layer with Pressure Gradient Using Reynolds Stress Transport Turbulent Model," *Transaction of the KSME, B* Vol.22, No.2, pp.139~152
- (13) Moin, P. and Kim, J., 1982, "Numerical investigation of turbulent channel flow" *Journal of Mech.*, Vol.148, pp 341~377
- (14) Han, L.S., 1960, "Hydrodynamic Entrance Lengths for Incompressible Laminar flow in Rectangular Ducts" *Journal of Applied Mech.* pp. 403-409