

LDV에 의한 곡관 후류에 연결된 직관에서 난류맥동유동의 유동특성

손 현 철[†], 이 행 남^{*}, 박 길 문^{*}

순천제일대학 건축설비과, ^{*}조선대학교 기계공학과

Flow Characteristics of a Turbulent Pulsating Flow in a Straight Duct Connected to a Curved Duct by using an LDV

Hyun-Chull Sohn[†], Haeng-Nam Lee^{*}, Gil-Moon Park^{*}

Department of Building Services, Suncheon First Collage, Junnam 740-060, Korea

^{}Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 509-759, Korea*

(Received August 20, 2002; revision received January 20, 2003)

ABSTRACT: In the present study, the flow characteristics of developing turbulent flows are investigated at the exit region of a square cross-sectional 180° curved duct with dimensions of 40 mm×40 mm×4000 mm (height×width×length). Smoke particles produced from mosquito coils were used as seed particles for the LDV measurement. Experiments were carried out to measure axial velocity profiles, shear stress distributions and entrance lengths by using an LDV system and Rotating Machinery Resolver RMR with PHASE software. Experimental results clearly show that the time-averaged Reynolds number does not affect oscillatory flow characteristics because the turbulent components tend to balance the oscillatory components in the fully developed flow region. Also, the velocity profiles are in good agreement with 1/7 power law such as the results of steady turbulent flows. The turbulent intensity linearly increases along the walls and is slightly higher, especially in the period of deceleration. On the other hand, the LDV measurements show that shear stress values in slightly higher in the period of deceleration due to the flow characteristics in the exit region. The entrance length where flows become stable appears at the point that is 40 times the length of hydraulic diameter.

Key words: Laser doppler velocimeter(레이저 도플러 유속계), Turbulent pulsating flow(난류맥동유동), Square duct(정사각 덕트), Entrance region(입구영역), Axial velocity(축방향 속도) Shear stress(전단응력)

기 호 설 명

a : 시험덕트의 폭 [mm]

A_p : 피스톤의 행정 [mm]

A_1 : 속도진폭비, $|\overline{u}_{m,os,1}| / \overline{u}_m$

b : 시험덕트의 높이 [mm]

D_h : 수력 직경, $4ab/(a+b)$

Re : Reynolds 수

Re_{os} : 난류진동유동의 레이놀즈수

[†] Corresponding author

Tel.: +82-61-740-1255; fax: +82-61-740-1262

E-mail address: farmersohn@hanmail.net

Re_{la} : 난류맥동유동의 시간 평균 레이놀즈수
 t : 시간 [sec]
 u, v, w : x, y, z 방향에 대한 속도성분
 z' : 무차원 z 축 변위 ($= z/b$)

그리스 문자

ν : 동점성계수 [m^2/s]
 τ : 전단응력 [Kgf/m^2]
 ω : 각진동수 [rad/s]
 ω^+ : 무차원 각진동수, $(D_h/2)/\sqrt{\omega/\nu}$

상첨자

- : 시간 평균값

하첨자

cl : 덕트 중심속도
 m : 단면 평균속도
 os : 진동유동
 pu : 맥동유동

1. 서 론

산업 발달기에 도입된 플랜트를 포함한 설비기술에 바탕을 둔 관로망 설비의 구성기능 중에서 건축설비 및 공조설비 등을 포함한 유체수송 설비는 재실자의 건강과 가장 밀접한 관계를 맺고 있는 환경조절수단이며,⁽¹⁾ 설비계획상의 반드시 필수적인 과정으로 여러 기술인들의 노력에 힘입어 큰 발전을 이루었다.⁽²⁾ 현재의 건축기계설비 분야에서는 지난 수십년 동안 많은 변화가 이루어져 왔으며 외국에서 발달된 설계 및 이론을 우리 실정에 맞게 수정·적용하려는 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽³⁾ 유체수송에 사용된 관로망 설비는 직관과 곡관으로 이루어져 있으며 그 용도는 기계공학을 포함하여 건축, 토목, 환경, 화학 분야 등 많은 산업 분야에 널리 사용되고 있으며 관로망의 설계는 이후 시스템을 관리하고 유지하는 데 경제적인 요소 등 2차 산업에도 큰 영향을 미칠 수 있다.⁽⁴⁾ 곡관 내부에서의 흐름은 직관과

달리 원심력이 작용하여 곡관 내의 유동은 직관에서 찾아볼 수 없는 복잡한 유동의 현상을 동반하며 이후 연결된 직관에서는 곡관의 원심력에 의한 배관 내의 압력차로 새로운 입구길이형성되면서⁽⁵⁾ 유체유동은 새로운 형태를 나타낸다. 이런 현상은 유동입자의 충돌로 수격현상이 나타나며 배관계 구조물 및 플랜트의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 소음과 진동을 유발하는 원인이 되기도 한다.⁽⁶⁾ 관로계에 대한 연구는 각종 플랜트의 배관 계통 및 대형 건축물의 공조설비장치, 유체의 수송라인, 열교환기 등 많은 설비산업에 적용할 수 있으며 이러한 공업목적의 필요성 및 학술적인 관심에 의해서 덕트 내 유동에 관한 연구는 오래 전부터 많은 연구가 이루어져 왔다. 최근에는 유동해석을 폐 및 기도 등 생체에 적용한 공학적 방법을 도입하여 해석하고 있다.⁽⁷⁾ 관내 유동에 대한 연구는 오래 전부터 연구되어져 왔으며 곡관 내의 유동은 19세기 말 곡관로에서 유체유동이 공학적으로 연구되기 시작하여 1927년에 Dean⁽⁸⁾은 단면이 원형인 곡관 내에서 관측방향으로 나선형 운동을 하는 유체의 유동을 관측방향의 주류와 관측에 수직인 단면 내의 2차유동으로 구별하고 곡관유동을 지배하는 특성 파라메타로 Dean 수 ($Re\sqrt{a/R} = Re\sqrt{D_h/2R}$)에 의존한다는 것을 발표하였다. Cho et al.⁽⁹⁾은 180° 단면 곡관에서 층류진동유동의 특성을 발표하였고, Park et al.⁽¹⁰⁾은 180° 곡관 덕트에서 정상유동과 비정상유동의 임계진수에 대해서 발표하였으며, Sohn et al.⁽¹¹⁾은 곡관 덕트에서 진동유동과 맥동유동에 대하여 압력분포를 규명하였다.

본 연구에서는 기존에 연구된 직관 또는 곡관에 대한 개별적인 연구를 벗어나 아직은 많은 연구가 이루어지지 않는 곡관에 연결된 직관에서의 비정상유동인 난류맥동유동의 특성을 연구하였다. 연구는 곡관 덕트 이후의 직관부만을 시험대상으로 덕트 내의 맥동유동에 대해서 속도분포를 Reynolds 수 및 속도 진폭비를 변화시켜 실험을 수행하여 곡관 이후 직관 내부의 속도분포와 전단응력을 규명하고자 하였다. 연구의 결과는 덕트 내부의 기류분포를 고려하여 급기, 환기 및 배연 등을 포함한 유체수송 계획을 세울 수 있도록 하며 보다 정확성을 얻어 덕트 및 관로망 설계에 실제 적용될 수 있도록 하고자 한다.

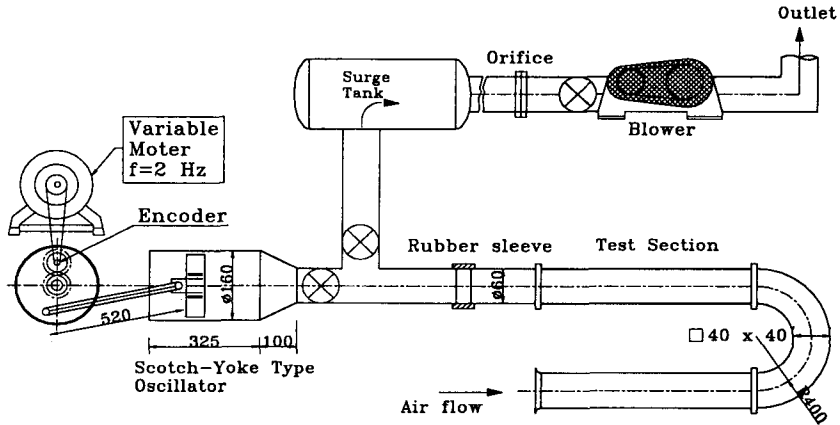


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

2. 실험

2.1 실험장치

정사각단면 180° 곡관 덕트에 연결된 직관 덕트 입구영역에서 난류맥동유동의 축방향 속도분포 및 전단응력 속도분포를 측정하기 위한 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에서 작동유체는 모기향을 연소시킨 공기 산란입자를 사용하였고 모기향 입자의 크기는 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 로서 본 실험 측정기인 LDV fringe의 크기에 적합할 뿐만 아니라 작동유체를 연속적으로 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 장치의 주요구성은 축방향 및 횡방향의 속도분포 측정을 위한 곡관 덕트에 연결된 직관 덕트, 맥동유동 발생을 위한 흡입형 송풍기, Scotch-Yoke형 가진기 및 변속모터 등으로 구성되어 있다. 시험 덕트에서 속도분포를 측정하기 위한 LDV(제조사: COHERENT, 모델: INNOVA 70)의 광학계 배치는 이중 빔 모드(Dual beam mode)이며 2 color 3 beam 방식의 후방산란형 최대출력 2W의 Ar-Ion Laser로서 관벽에 가까운 부근의 유속을 정확히 측정하기 위하여 Laser의 beam 교차각을 가능한 범위에서 크게 하여 측정체적을 최소로 하였으며, 본 실험에서는 beam의 교차각을 5.48° 를 사용하였다. 집광렌즈에 의해 모아진 산란광은 2×10^5 의 통과 입자로부터 속도를 전송받고 field stop을 거치면서 산란광 이외의 잡광은 제거되며, color separator에 의해 488.0 nm와 514.5 nm의 2개의 파장으로 분리되며, 이때 투과율은 92%이고 반사

율은 88%이다. 분리된 산란광은 후방산란광 수광기에 의해서 color filter를 거쳐 투과한 후 photo multiplier에서 광전 변환된다. 광학계가 비치된 LDV system은 측정위치를 정확하게 하기 위해서 3차원 이송기구(Traverse system)를 설치하였다. 또한 신호처리기, Personal Computer, 오실로스코프가 있으며 자료처리는 PHASE software를 사용하였다. 실험 덕트는 40×40 mm이고 길이가 4000 mm이며 덕트 입구에는 정류상자 및 벨마우스형 유입관(inlet bell mouth)을 설치하였으며 곡관의 출구측 직관 덕트도 입구부의 직관 덕트와

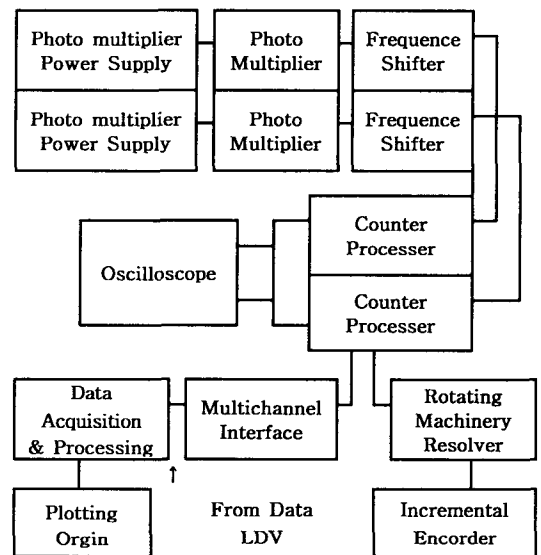


Fig. 2 Schematic diagram of associated data acquisition and processing system.

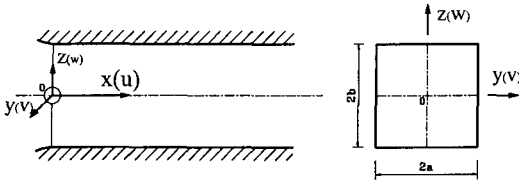


Fig. 3 Coordinate system and velocity components in a straight duct.

동일한 규격이며 곡관부 덕트 또한 직관부와 동일단면이고 곡률반경이 400 mm인 곡관 덕트로서 U자형을 이루고 있다. 본 실험에서 자료처리는 Frequency Shifter에서 페데스탈 신호가 제거되어 Signal processor에 입력되며, 최종적으로 oscilloscope에 나타나게 되는데 oscilloscope상의 파형을 육안으로 확인한 후 정확한 Doppler signal을 검출하여 Scotch-yoke형 가진기의 구동축에 부착된 Encoder에서 발생하는 위상각의 신호와 합하여져 Personal computer에 의해 비정상 유동인 맥동유동의 자료를 PHASE Program에서 정리 보관된다. 레이놀즈수, 속도진폭비에 대한 $z'(z/b)$ 을 위치별로 computer에 기록된 자료는 graphic 프로그램인 ORIGIN에 의하여 plotting된다. 본 실험에 사용자료 처리방법을 Fig. 2에 나타내었고 좌표계를 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 실험방법

맥동유동은 정상유동과 진동유동이 합성되어 이루어진 유동으로서 정상유동의 발생은 흡입형 송풍기에 의하여 시험 덕트에 작동유체를 유입하였고 진동유동은 Scotch-yoke형 가진기 및 변속모터를 사용하여 발생시켰다. 정상유동의 유속조절은 Blower를 구동하는 변속모터의 회전수를 조절하였고, 진동유동은 Scotch-yoke형 가진기에 부착된 크랭크판의 위치(A_p) 조절 및 변속모터의 회전수를 조절하여 발생시킬 수 있으나 본 실험에서는 피스톤 진폭을 조절하고 회전수를 일정하게 하여 맥동유동을 발생시켰다. 진동유동의 레이놀즈수를 20000에 고정하였으며, 시간 평균 레이놀즈수를 16600과 33200으로 조정하였다. 이때의 속도 진폭비는 진동 레이놀즈수에 대한 시간 평균 레이놀즈수의 비로 0.6과 1.2이다. 난류맥동유동에 대한 유동특성을 고찰하기 위하여 축방향

Table 1 Experimental conditions of turbulent pulsating flow

f (Hz)	ω^+	A_p (mm)	Re_{os}	Re_{ta}	A_1
2.0	18	75	20000	16600	1.2
				33200	0.6

위치(x/D_h)를 곡관이 끝나는 지점(180°)을 0으로 하고 무차원 축방향 위치를 10등 간격으로 60까지 변화시키면서 덕트 중심으로부터 $z'(z/b)$ 방향으로 17분할하여 각 지점에서 난류맥동유동의 순간속도를 측정하였다. 난류맥동유동의 시간 평균 레이놀즈수는 식(1)로부터 계산하였다.

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

무차원 각진동수(ω^+)는 식(2)로부터 계산하였다.

$$\omega^+ = \frac{D_h}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (2)$$

LDV를 통하여 얻은 난류맥동유동의 실험값은 Rotating Machinery Resolver와 Scotch-yoke형 가진기의 회전축에 부착시킨 Encoder의 신호에 의해서 1회전당 360° 전 위상에서 신호를 받아들여 PHASE software에서 처리하였다. Table 1은 난류맥동유동의 실험조건을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 축방향 속도분포

본 연구에서는 정4각 덕트의 입구영역에서 덕트 축방향의 위치(x/D_h)를 변화시키고, 각각 위치에서 덕트의 상하 위치(z/b)를 변화시켜 가면서 실험을 진행하였다. 난류맥동유동에서 덕트 입구로부터 유체유동이 하류방향으로 진행함에 따라 덕트 벽면의 점성력으로 인하여 경계층이 발달하게 되고, 축방향 임의 위치에 도달하게 되면 속도분포 및 난류강도는 일정한 분포를 이루게 되는데, 이 지점에서부터의 유동이 완전 발달된 난류맥동유동으로 정의할 수 있다.

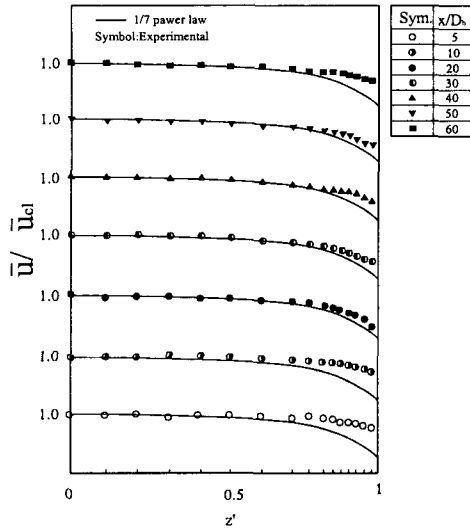


Fig. 4 Cross-sectional velocity distribution of the time-averaged for developing turbulent pulsating flow at $Re_{la}=16600$, $\omega^+=18$, $A_1=1.2$.

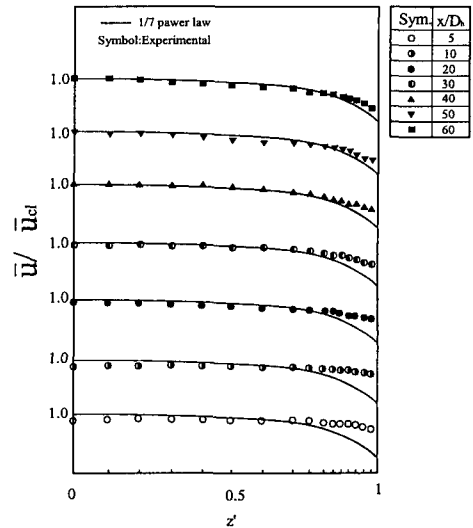


Fig. 5 Cross-sectional velocity distribution of the time-averaged for developing turbulent pulsating flow at $Re_{la}=33200$, $\omega^+=18$, $A_1=0.6$.

Fig. 4와 Fig. 5는 덕트의 무차원 축방향 위치에 대하여 시간 평균 레이놀즈수(Re_{la})를 변화시키면서 난류맥동유동의 속도 진폭비 0.6과 1.2에 대한 시간 평균성분의 분포를 나타낸 것으로 z' 에 따른 속도분포는 상하가 대칭적 분포를 이루고 있음을 알 수 있고 벽쪽으로 갈수록 덕트 벽면에서 속도값이 현저히 적어짐을 알 수 있다. 두 결과를 고찰해 보면 덕트 중앙에서는 축방향 위치에 관계없이 대부분 이론곡선과 일치하였으나 입구영역의 벽 부근에서는 이론분포와 차이를 나타내었는데 이는 곡관부에서 발생하는 원심력 및 벽면의 점성에 의한 영향으로 불안정한 상태의 유동으로 생각된다. Fig. 4와 Fig. 5를 비교하여 볼 때 속도 진폭비가 클수록 유동의 발달이 약간 빨라짐을 알 수 있다. 유동의 결과 속도 진폭비의 크기에 관계없이 입구영역의 벽면 부근 속도분포는 이론곡선과 차이를 나타내었고 무차원 축방향 위치가 증가할수록 이론곡선에 접근하였다. 이는 유동의 발달이 시간 평균 레이놀즈수에 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다. 본 실험범위 내에서 난류맥동유동의 시간 평균 레이놀즈수가 맥동유동의 특성에 영향을 주지 못하는 것은 난류정상성분이 난류진동성분을 안정화시키는 작용을 하기

때문으로 사료된다. 또한 난류맥동유동에서는 속도 진폭비에 관계없이 무차원 축방향 위치(x/D_h) 40지점에서 이후부터 완전 발달된 난류정상유동의 1/7승 법칙에 벽면을 제외하고는 비교적 일치하고 있음을 알 수 있고 벽면에서의 불일치는 출구영역에 설치된 가진기의 주기적인 교번의 영향과 아울러 실험덕트 벽면의 점성으로 인한 유동의 소용돌이 현상으로 판단된다.⁽⁵⁾

Fig. 6과 Fig. 7에는 무차원 축방향 위치 및 위상에 따라 덕트 중심의 속도분포를 나타내었는데 속도 진폭비가 1.2인 경우 가속유동의 범위에서 직선적 분포를 나타내고 있으며 정상유동에서의 분포⁽⁶⁾와 비교적 일치하였고 감속구간에서 가속구간으로 위상이 바뀌는 $\omega t/(\pi/6)=10\sim 0$ 인 위치에서는 정상유동에서의 유동형태와 다르게 나타났는데 이는 정상유동과 진동유동의 합성에 의한 유동입자의 상쇄 및 입자의 소용돌이 운동으로 경계층 발달의 지연현상이 나타나는 것으로 판단된다. 속도 진폭비가 0.6인 경우 전 위상에 걸쳐 무차원 축방향 위치 20지점에서 overshoot 현상이 나타났으며, 이때의 위상은 감속위상의 끝지점 및 가속위상의 끝지점에서 overshoot 현상이 보다 심하게 나타났으며 감속 및 가속영역의

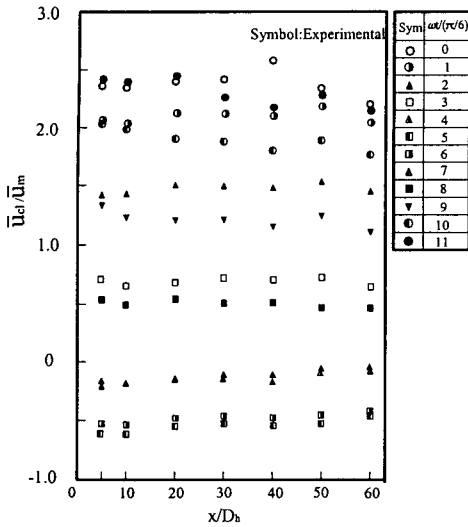


Fig. 6 Velocity distribution at the center of a duct over dimensionless axial position, in case of $A_1=1.2$.

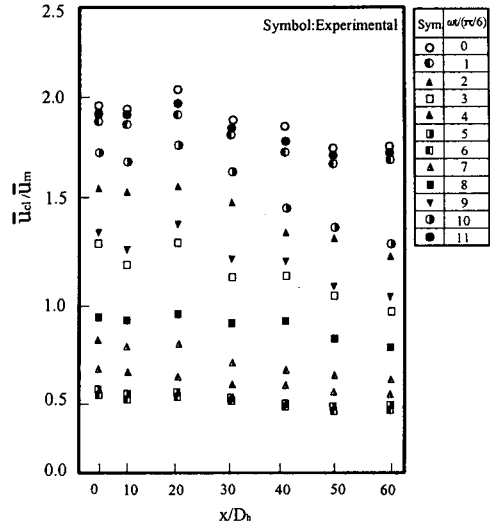


Fig. 7 Velocity distribution at the center of a duct over dimensionless axial position, in case of $A_1=0.6$.

발달영역에서는 그다지 크지 않고 정상유동의 분포와 유사하였다. 이와 같은 overshoot 현상은 시험덕트 입구에 곡관이 설치되어 있어 비정상유동인 난류맥동유동의 재층류 저층화 현상에 있어서 장소적 가속도 및 시간적 가속도의 영향⁽⁹⁾으로 판단된다. 그 Peak 위치는 감속유동과 함께 상류로 이동하여 덕트 중심속도가 점차 발달하여 점근점이 하류로 이동함을 알 수 있다. 여기에서 Peak의 위치가 상류로 이동함은 감속유동에 의한 불안정화 작용으로 난류 경계층의 발달을 서두르기 때문이고, 점근점의 하류로의 이동은 가속유동에 의한 안정화 작용으로 난류 경계층이 점점 발달되기 때문으로 생각된다.

맥동유동의 시간 평균 레이놀즈수 (Re_{α})를 변화시키고 각 시간 평균 레이놀즈수에서 무차원 축방향 위치를 변화시키면서 Fig. 8에 z' 의 위치에 따른 난류 burst의 발생을 나타내었다. Burst의 세기에 따라 얻은 난류의 강도를 Fig. 9과 Fig. 10에 도시하였다. 맥동유동에 대한 난류강도는 축방향의 위치변화에 따른 평균 속도분포로 나누어서 나타내었는데 속도 진폭비가 1 이상인 ($A_1 > 1$) 경우 덕트의 입구영역에서는 평행한 분포를 나타내고 벽면 부근에서 세기가 크게 나타났다. 이후 무차원 축방향의 위치가 증가하여 30 부근부터의 분포는 벽면을 향하는 직선적 분포에

접근하였다. 하지만 속도 진폭비가 1보다 작은 ($A_1 < 1$) 경우 입구영역에서는 덕트의 중앙부와 벽면의 변화가 크게 나타났으며 무차원 위치가 하류방향으로 증가하면서 벽면 근접 부분에서 난류의 강도가 약간 크게 나타났으나 무차원 축방향 위치 30 이후 부근부터 직선적인 분포에 접근하였다. 속도 진폭비에 따른 난류강도를 고찰하여

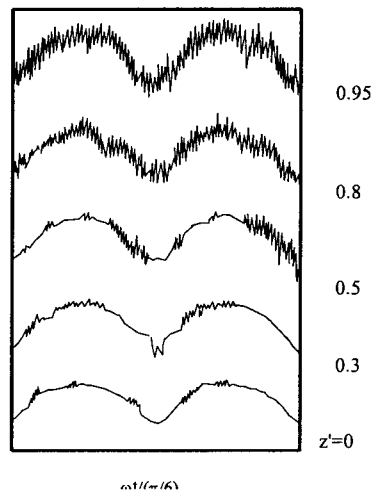


Fig. 8 Velocity Waveforms of turbulent pulsating flow by using a hot-wire anemometer along z' at the $A_1=1.2$.

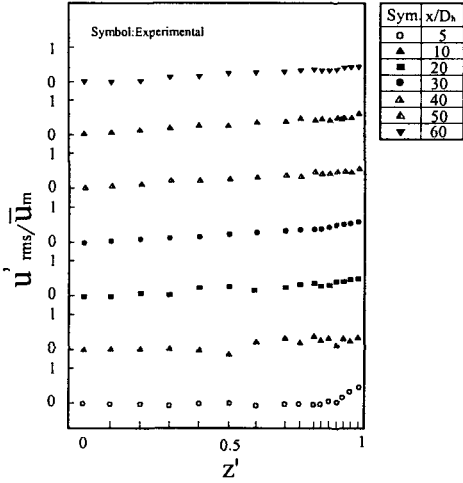


Fig. 9 Distribution of time-average root mean square values for developing turbulent pulsating flow at the $A_1=1.2$.

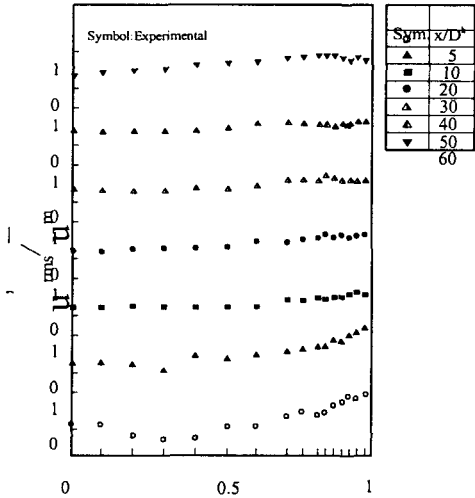


Fig. 10 Distribution of time-average root mean square values for developing turbulent pulsating flow at the $A_1=0.6$.

보면 입구영역인 무차원 축방향 위치가 곡관과 접해지는 20 이전까지의 유동영역에서는 직선적 분포를 벗어나고 있으나 이는 곡관 내부에서의 맥동유동의 특성⁽²⁾이 직관에 영향을 주는 것으로 생각된다. 또한 속도 진폭비가 1 이상일 때는 입구영역에서 비교적 안정적인 분포를 이루고 있으나 이는 속도 진폭비가 1 이상인 경우와 비교하

여 정상유동의 성분보다 진동유동의 성분이 더 많은 영향을 미치고 있기 때문이다.

이러한 분포형태는 속도 진폭비가 1 이하인 경우 불안정한 속도분포가 약간 먼 축방향 지점까지 나타남을 알 수 있고 무차원 축방향 위치 40 부근에서 안정되었다.

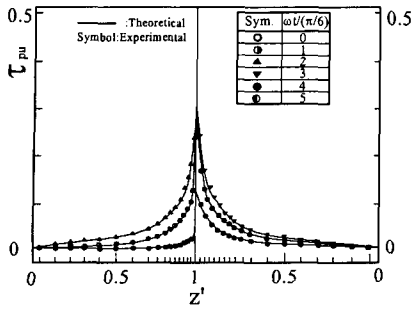
3.2 전단응력분포

Fig. 11과 Fig. 12에는 시간 평균 레이놀즈수 (Re_w)와 덕트의 무차원 상·하방향 위치(z') 및 축방향 위치에 따라 벽면전단응력 분포를 도시하였다. 그림에서 좌측 부분은 가속위상에서의 전단응력 분포값을 나타낸 것이고 우측 부분은 감속위상에서의 전단응력 분포값을 나타낸 것인데 난류맥동유동에 대한 벽면전단응력은 Koh⁽¹²⁾의 식(3)을 사용하여 정리하였다.

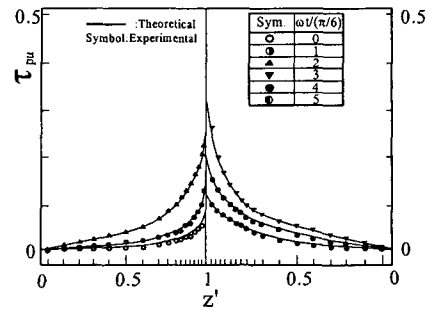
$$\tau_w = \frac{\rho a_1}{8} \left(\frac{\nu}{D_h} \right)^{b_1} \times \frac{1}{u_m^{2-b_1}} (1 + A_1 \cos \omega t)^{2-b_1} \quad (3)$$

Fig. 11을 살펴보면 감속의 $\omega t(\pi/6)=0$ 에서는 전단응력이 거의 수평적 분포를 보이다가 덕트 벽면 부근에서 약간 상승하였다. 곡관의 영향을 받는 무차원 축방향 위치 5인 지점에서 벽면에서 전단응력이 비교적 큰 분포를 보이고 있으며 벽면 부근을 제외하고는 대부분 이론곡선과 일치하였다. 또한 무차원 축방향 위치가 증가할수록 벽면에서의 전단응력 분포는 크게 나타났으며, 그 세기는 축방향 위치가 하류로 증가할수록 점차 적어지고 있음을 알 수 있고 가속 위상에서 벽면 전단응력이 약간 크게 나타남을 알 수 있다.

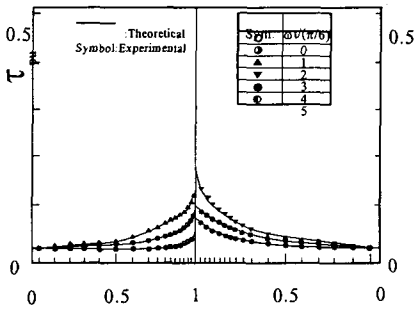
Fig. 12는 속도 진폭비가 1보다 적은 경우의 전단응력 분포를 나타낸 것으로 속도 진폭비가 1 이상인 경우와 비교할 때 벽면에서 전단응력의 세기가 크게 나타났고 덕트 중앙에서 벽면에 이르기까지 전단응력의 기울기가 크게 나타났으며 속도 진폭비가 1.2인 경우와 같이 무차원 축방향 위치가 증가할수록 점차 적어짐을 알 수 있다. 전단응력 분포에 대해서 정리하여 보면 곡관과 연결된 입구영역인 축방향 위치 5인 지점에서 전단응력 분포값은 크게 나타나고 있는데 이는 곡관의 영향으로 판단되며 속도 진폭비에 관계없이



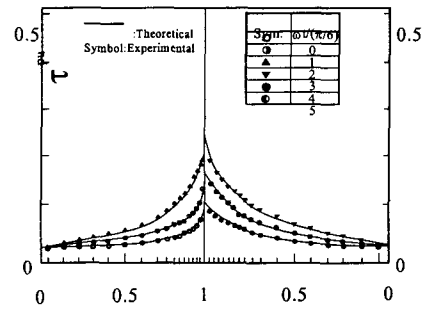
(a) $x/D_h=5$



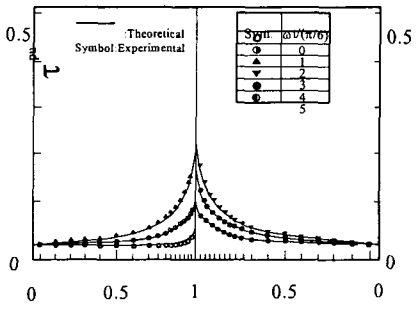
(a) $x/D_h=5$



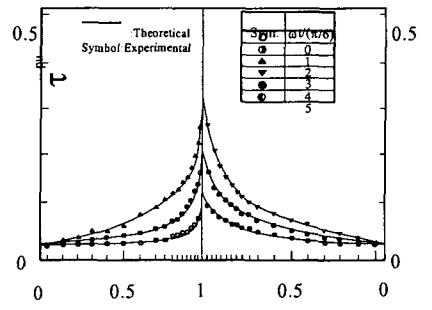
(b) $x/D_h=20$



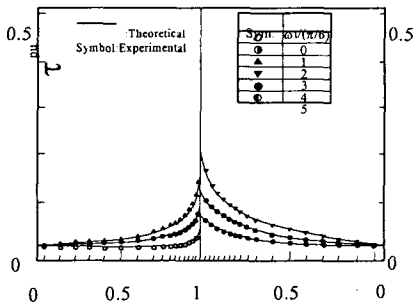
(b) $x/D_h=20$



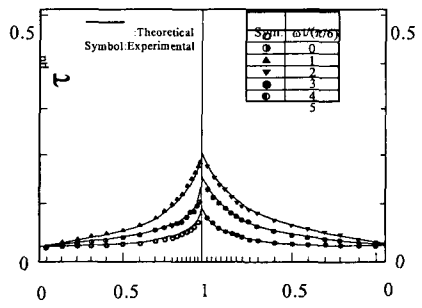
(c) $x/D_h=40$



(c) $x/D_h=40$



(d) $x/D_h=60$



(d) $x/D_h=60$

Fig. 11 Shear stress distribution for developing turbulent pulsating flow at $A_1=1.2$.

Fig. 12 Shear stress distribution for developing turbulent pulsating flow at $A_1=0.6$.

감속위상에서 약간 크게 나타났으며, 또한 덕트의 무차원 위치가 하류로 진행함에 따라 전단응력의 세기가 점차 감소하는 경향을 보이다가 $x/D_h = 40$ 인 지점에서부터 변화하지 않는 일정한 분포를 이루고 있는데 이것은 덕트의 입구영역에서 난류 맥동유동의 전단응력이 덕트의 입구영향과 경계층의 영향으로 발생한 Slug와 Puff의 발생으로 인한 영향으로 사료된다.

4. 결 론

정사각 단면 180° 곡관 덕트에 연결된 직관 덕트에서 난류맥동유동에 대한 속도분포, 난류강도, 전단응력 및 입구길이 등의 유동특성에 대한 실험적인 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 완전발달된 유동영역에서 난류맥동유동의 시간 평균 성분은 완전발달된 영역에서 난류정상유동과 같이 1/7승 법칙에 벽면을 제외하고는 비교적 일치하였고, 시간 평균 레이놀즈수가 맥동유동의 특성에 영향을 주지 못하는 것은 난류정상유동 성분이 진동유동 성분을 안정화시키기 때문이다.

(2) 난류맥동유동의 난류강도는 덕트 중심에서 벽쪽으로 갈수록 선형적인 증가를 보였고, 가속위상대의 난류강도가 감속위상대의 난류강도보다 작게 나타났다.

(3) 속도 진폭비와 무차원 축방향 위치에 관계없이 감속위상에서의 전단응력값이 약간 크게 나타났으며 곡관과 연결된 입구에서 가까운 덕트의 축방향 위치 5인 지점에서 전단응력 분포는 곡관의 출구 영향으로 인하여 가장 크게 나타났다.

(4) 난류맥동유동에서 입구길이는 축방향 속도 분포가 안정화되는 위치까지를 입구길이라고 규정했을 때 축방향 속도분포가 변화하지 않는 위치는 수력 직경의 약 40배 정도의 위치이다. 이는 정상유동의 입구길이인 수력 직경의 50배 정도보다⁽¹²⁾ 약간 짧아짐을 알 수 있으며 같은 조건에서의 곡관의 입구길이는 굽힘각 약 90° 정도보다⁽⁵⁾ 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 난류맥동유동에서 입구길이는 시간 평균 레이놀즈수에 대하여 영향을 받지 않았다.

후 기

본 연구는 2002년 조선대학교 교내연구비에 의

해 지원되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Jeong, K. B. and Cho, D. W., 1999, Personal AVAC system in intelligent buildings, Air-conditioning and Refrigeration, Vol. 28, No. 3, pp. 196-202.
2. 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, Transactions of the KSME(B), Vol. 25, No. 11, pp. 1561-1568.
3. Lee, Y. H., 1999, Methods of estimating load in water supply systems, Air-conditioning and Refrigeration, Vol. 28, No. 4, pp. 265-275.
4. Ohmi, M. and Iguchi, M., 1982, An analysis of free oscillatory flow in a U bend, Journal of JSME(B), Vol. 48, No. 425, pp. 50-58.
5. 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, Chosun University, Gwangju, Korea.
6. Lee, H. G. Sohn, 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 KOSME, Vol. 25, No. 1, pp. 131-138.
7. Suh, S. H., Cho, M. T. and Yoo, S. S., 2000, Viscosity measurements of the non-Newtonian fluid and blood by the unsteady flow concept in the capillary tube, Proceeding of the 1st National Congress on Fluids Engineering, pp. 487-493.
8. 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.
9. Cho, B. G. Park, G. M. and Bong, T. G., 1998, A study on flow characteristics of laminar oscillatory flows in a square-sectional 180°

- curved duct, Transactions of the KSME(B), Vol. 22, No. 2, pp. 139-152.
10. Park, G. M., Bong, T. G. and Sohn, H. C., 1997, A study on critical Dean number of steady, oscillatory and pulsating flows in curved duct, Proceeding of the KOSME Spring Annual Meeting, pp. 93-98.
 11. Sohn, H. C., Lee, H. N. and Park, G. M., 2000, Pressure distributions of turbulent oscillatory and pulsating flow in a curved duct, Proceeding of the 1st National Congress on Fluids Engineering, pp. 339-342.
 12. Koh, Y. H., 1991, A Study on Turbulent Characteristics of Developing Turbulent Steady and unsteady flows in the Entrance region of a Square Duct, Ph.D thesis, Chosun University, Gwangju, Korea.