

가진 펌프에 연결된 곡관 출구의 직관에서 난류진동유동의 속도분포와 전단응력분포

손현철[†] · 이형남^{*} · 박길문^{*}
(2002년 2월 18일 접수, 2002년 8월 1일 심사완료)

Velocity Profile and Wall Shear Stress Distributions of Developing Turbulent Oscillatory Flows in an Oscillator Connected to Straight Duct Located in Exit Region of a Curved Duct

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

Key Words : Turbulent Oscillatory Flow(난류진동유동), Velocity Profile(속도분포), Wall Shear Stress (벽면전단응력), Laser Doppler Velocimeter(레이저 유속계)

Abstract

In the present study, velocity profile and wall shear stress distributions of developing turbulent oscillatory flows in an oscillator connected to straight duct located in exit region of a curved duct was investigated experimentally. The experimental study for air flows was conducted to measure axial velocity profiles, shear stress distributions by using the Laser Doppler Velocimetry(LDV) system with the data acquisition and processing system of Rotating Machinery Resolver(R.M.R) and PHASE software. The results obtained from experimental studies are summarized as follows. The critical Reynolds number for a change from transitional oscillatory flow to turbulent flow was about 7500, in the 60region of dimensionless axial position which was considered as a fully developed flow region. The turbulent oscillatory flow, velocity profiles of the inflow period in the entrance region were gradually developed, but those of the outflow period were not changed nearly. Velocity profiles of inflow and outflow were shown as a symmetric form in a fully developed flow region. The wall shear stress distributions of turbulent oscillatory flow increase rapidly as the flow proceeds to downstream and flow was in good agreement with the theoretically.

기호설명

A_p : 가진 펌프 피스톤의 진폭

a : 덕트 중앙에서 가로폭

b : 덕트 중앙에서 세로폭

De : 단수 ($= Re\sqrt{a/R} = Re\sqrt{D_h/2R}$)

D_h : 수력직경 ($= 4ab/(a+b)$)

f : 피스톤의 진동수

R : 곡률반경

R_c : 곡률비 ($= a/R = D_h/2R$)

Re : 레이놀즈수 ($= D_h \cdot \bar{u}_m/\nu$)

Re_{os} : 레이놀즈수에 따른 단면평균 속도진폭

u, v, w : x, y, z 축에 따른 속도성분

$\bar{u}_{m,os}$: 진동유동의 단면평균속도

$\bar{u}_{m,os,1}$: 진동유동의 단면평균 속도진폭

ω : 각진동수 $= 2\pi f$

ω^+ : 무차원 각진동수 ($= D_h/2\sqrt{\omega/\nu}$)

ν : 동점성계수

1. 서론

기계설비, 건축설비산업 등 유체기계에 연결된 설비 관로망은 공조설비를 포함한 유체수송 설비 등 계획상의 불가결한 일로 기계공학뿐만 아니라 건

[†] 책임저자, 회원, 순천제일대학 건축설비과

Email: farmersohn@hanmail.net

TEL: (016)254-5816 FAX:(062)230-7055

* 회원, 조선대학교 기계공학과

축, 토목, 화학분야 등 많은 산업분야에 널리 사용되고 있으며 특히 관로망의 설계에 따라서 시스템을 관리하고 유지하는데 경제적인 요소 등 2차 산업에도 큰 영향을 미칠 수 있다.⁽¹⁾ 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 배관내의 압력차로 새로운 입구길이가 형성되면서 유체유동의 비정상성은 더욱 뚜렷이 나타나는데 이런 현상은 유동입자와 고체입자의 충돌로 수격 현상이 나타나며 건축물 배관계 및 플랜트의 수명을 단축시킬 뿐 아니라 소음과 진동을 유발하여 경제적인 부담을 증가시키기도 한다.⁽³⁻⁵⁾

종합설비의 덕트 내에서 나타나는 비정상적 유동의 한 형태인 진동유동의 현상은 각종 플랜트의 배관계통 및 대형건축물의 구조설비장치, 원심펌프나 터빈의 날개 통로, 화학반응장치, 압축성 유체의 수송라인, 열교환기 등 설비산업에서 많이 찾아볼 수 있으며 이러한 공업목적의 필요성 및 학술적인 관심에 의해서 덕트내의 유동에 관한 연구는 오래 전부터 많은 연구가 이루어져왔으며 지금에 이르러서도 연구는 계속되고 있다.⁽⁶⁾ 최근 들어 난류진동유동 및 맥동유동에 바탕을 둔 생체공학 분야에서 심장 및 혈관계의 유동에 관계되는 유동해석을 기계공학적인 방법을 도입하여 해석하고 있으며 의료용기기의 설계 및 제조에도 유체유동의 특성에 바탕을 두고 있다.⁽²⁾

곡관내의 유동은 19세기 말 곡관로에서 유체유동이 공학적으로 연구되기 시작하여 1910년에 Eustice⁽⁷⁾는 곡관내의 유동은 압력손실이 크며 나선형 유동을 한다는 것을 지적하였으며, 1927년에 Dean⁽⁸⁾은 단면이 원형인 곡관내에서 관축방향으로 나선형 운동을 하는 유체의 유동을 관축방향의 주류와 관축에 수직인 단면내의 2차유동으로 구별하고 곡관유동을 지배하는 특성 파라메타로 Dean 수 ($Re\sqrt{a/R} = Re\sqrt{D_n/2R}$)에 의존한다는 것을 발표하였다. 곡관내의 비정상유동에 관한 연구는 대부분 1970년대부터 시작되었고 Mullin⁽⁹⁾ 등은 곡관내에서 발달하고 있는 진동유동일 때 Laser 유속계를 이용하여 속도분포를 실험적으로 구했는데 유동의 발달은 진동수 변화와 진동진폭에 의존한다고 발표하였으며 Komai⁽¹⁰⁾ 등은 유한차분법과 SIMPLER법을 이용하여 곡관내 진동유동에서 무차원 각진동수 및

곡률반경비를 여러 조건으로 변화하여 실험한 결과 각진동수가 큰 유동에서 축방향 속도분포는 곡률비가 증가함에 따라 2차유동이 강해짐을 수치해석적으로 연구하였다. Sumida⁽¹¹⁾ 등은 정사각단면에서 수치해석으로 축방향속도, 2차유동의 유선 및 전단응력의 분포를 명확히 하였다. 관로에 대한 연구는 1970년대에는 수치해석법의 진보, 유동계측과 실험기술의 발전에 따라 연구가 급속도로 진전하였고 1980년대 이후 최근에는 컴퓨터의 발달과 전자계산기의 대용량화 및 고속화에 따라 비정상유동의 연구가 활발하게 이루어졌고, Navier-Stokes 방정식의 비선형성이 검토되기 시작하였다. 이러한 비정상유동의 진동유동해석에 대한 연구의 필요성이 높아지면서 각종 유동장을 가진 덕트의 유동특성에 대하여 많은 연구⁽¹²⁻¹⁷⁾들이 발표되고 있다. 따라서 본 연구에서는 곡관부에서 직관부로 변하는 유동영역에서 나타나는 비정상성의 복잡한 현상을 규명하고자 하였다.

본 연구에서는 가진 펌프에 연결된 곡관과 직관의 조합 덕트에서 직관만을 시험대상으로 덕트내의 속도분포를 Reynolds 수와 위상차에 따라 축방향과 횡방향의 위치를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 곡관덕트에 연결된 직관덕트에서 난류진동유동의 유동변수들은 곡관내에서 발생하는 2차유동 및 유동변수들의 영향으로 직관에 미치는 속도분포 및 전단응력의 변화, 압력구배의 변동주기 및 진동유동의 관성효과에 의한 직관내의 압력분포변화와 유동의 입구길이를 변화시켜 또 다른 특성을 나타낼 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 직관내부의 속도분포와 벽면전단응력을 규명하여 직관내부의 유동특성이 미치는 영향을 고찰하고 객관적인 정확성을 얻어 공조덕트설계 및 관로망 설계에 유체공학적인 기초 자료를 제공함에 본 연구의 목적이 있다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 실험에서 작동유체는 모기향을 연소시킨 공기 산란입자를 사용하였다. 모기향 입자의 크기는 0.1~0.3 μm 로서 본 실험 측정기인 LDV fringe의 크기에 적합하였고 작동유체를 연속적으로 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 장치의 주요구성은 축방향 및 횡방향의 속도분포측정을 위한 곡관덕트에 연결된 직관덕트, 진동유동 발생을 위한 Scotch-Yoke형

가진기 및 변속모터 등으로 구성되어 있고 Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었고 Fig. 2는 시험에 사용된 덕트의 좌표계를 나타내었다. 시험덕트에서 속도분포를 측정하기 위한 LDV(제작사:COHERENT 모델:INNOVA 70)의 광학계 배치는 이중 빔 모드(Dual beam mode)이며 2 color 3 beam 방식의 후방산란형 최대출력 2 W의 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 전송 받고 field stop을 거치면서 산란광 이외의 잡광은 제거되며 color separator에 의해 488.0nm와 514.5nm의 2개의 파장으로 분리되며 이때 투과율은 92% 이고 반사율은 88%이다. 분리된 산란광은 후방산란광 수광기에 의해서 color filter를 거쳐 투과한 후 photo multiplier에서 광전 변환된다. 이후의 자료처리과정은 Fig. 3에 나타내었다. 광학계가 비치된 LDV system은 측정위치를 정확하게 하기 위해서 3차원 이송기구(Traverse system)를 설치하였다. 또한 신호 처리기, Personal Computer, 오실로스코프가 있으며 자료처리는 PHASE software를 사용하였다.

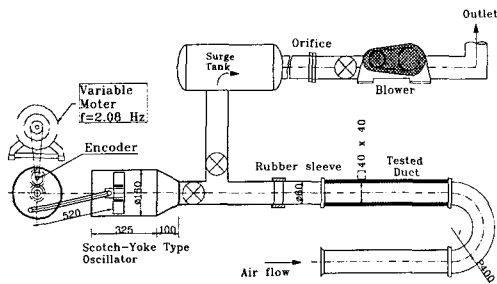


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

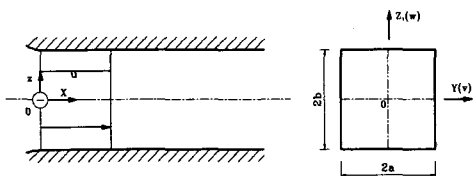


Fig. 2 Coordinate system and velocity components in a straight duct

실험덕트는 40 × 40 mm이고 길이가 4000 mm이며 덕트입구에는 정류상자 및 벨마우스형 유입관 (inlet bell mouth)을 설치하였으며 곡관의 출구측 직관덕트도 입구부의 직관 덕트와 동일한 규격이며 곡관부 덕트 또한 직관부와 동일단면이고 곡률반경이 400 mm인 곡관덕트로서 U자형을 형성하고 있다. 시험덕트의 대칭벽 사이의 거리는 40 mm ± 0.5 mm가 유지되도록 하였고 벽의 인접각은 90° ± 0.4° 가 되도록 하였으며, 밀면은 전길이에 걸쳐 ± 0.5 mm 이내에서 수평이 되도록 하였다. 정확한 실험을 위하여 LDV를 적재한 Traverse는 수평기를 이용하여 수평 상태를 유지하였다.

2.2 실험방법

난류진동유동의 생성은 무단변속기가 연결된 Scotch-Yoke형 가진 펌프만을 작동시켜 발생시켰다. 무단변속모터에 의해 진동주파수(f)를 조절하였고 회전원판의 위치에 의한 피스톤의 진폭(Ap)을 조절하여 레이놀즈 수(Reos)와 무차원 각진동수(ω+)를 Table 1과 같은 조건에서 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 또한 측방향 위치(x/Dh)를 곡관이 끝나는 지점(180°)을 0으로 하고 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90으로 위치를 변화시키면서 덕트 중심으로부터 z'방향으로 17등분하여 각 지점에서 난류진동유동의 순간속도를 측정하였다.

진동유동의 단면평균속도 |u_{m,os}|는 다음 식 (1)로 부터 계산하였다.

$$(A_p/2) \omega \times \frac{A_{piston}}{A_{duct}} \tag{1}$$

진동유동은 scotch-Yoke형 가진기의 교번주기에 의한 왕복운동으로 인하여 덕트 내의 속도를 유입과 유출유동으로 나누어서 Fourier 급수에 의하여 6차의 고주파 성분까지의 진폭과 위상각을 계산하였다. 진동유동의 레이놀즈 수와 무차원 각진동수는 다음의 식 (2)와 식 (3)으로부터 계산하였다.

Table 1 Experimental conditions of turbulent oscillatory flow

f (Hz)	ω ⁺	A _p (mm)	Re _{os}
2.08	18.79	50	20000
		75	30000

$$Re_{os} = |u_{m,os}| \cdot D_h / \nu \quad (2)$$

$$\omega^+ = \frac{D_h}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (3)$$

LDV에 의해 획득한 난류진동유동에 대한 실험값을 R.M.R과 Scotch-yoke형 가진기의 회전축에 부착시킨 Encoder의 신호에 의해서 1회전당 360°의 전위상에서 신호를 받아들여 PHASE software에서 처리한 다음 유동, 굽힘각(bend angle), Dean 수, y/a, z/b 위치별로 computer에 기록된 자료는 graphic 프로그램인 ORIGIN에 의하여 plotting된다. Fig. 3은 실험자료 획득 및 처리과정을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 축방향 속도분포

난류진동유동의 유동영역을 분류하기 위하여 실험 덕트내에 열선유속계에 연결된 열선 센서를 유동이 충분히 발달되었다고 생각되는 무차원 축방향 위치(x/Dh)=60 지점의 덕트중심에 삽입하여 Reynolds 수를 변화시켜가면서 최초의 난류 burst가 생성된 이후를 난류 진동 유동의 영역으로 규정하였다. 본 실험에서는 난류 진동유동의 특성상 곡관덕트에 연결된 직관덕트에서 감속위상의 초기에 최초로 난류성분이 나타나기 시작할 때의 단면평균 Reynolds 수에서 진동유동의 단면평균 Reynolds수가 증가함에 따라 가속위상과 감속위상에서 역류되는 순간을 제외하고 난류성분이 증가하여 전 구간에 걸쳐서

난류성분이 나타날 때를 난류진동유동으로 규정한 후 실험하였다. 본 실험에서 사용한 열선유속계는 2채널을 가진 TSI제작의 1050-2c 모델로서 측정용 I형 열선 센서를 지지봉에 삽입하여 각 채널에서 센서의 저항을 보상하고 오실로스코프에 연결해서 각 채널에 대한 테스트 시그널을 찾은 후 공기보정기와 경사마노메타를 이용하여 선형계수값을 얻어 속도에 대한 전압의 보정 곡선을 얻었고 이때 발생한 속도는 photo-corder에 의해 속도 파형을 획득할 수 있게 하였다. Fig. 4는 실험덕트내에서 Reynolds 수의 상승에 따라 열선 유속계에 의한 photo-corder로부터 획득한 순간 속도파형의 출력신호를 정리하여 실험덕트내에서 유동의 변화과정을 나타내었다.

Fig. 5와 Fig. 6는 난류진동유동의 각 주기에 대한 덕트의 무차원 축방향 속도분포를 측정하여 나타내었다. Fig. 5~8까지 사용한 기호는 각각 Scotch-Yoke형 가진기의 회전원판의 위치에 따른 위상[$\omega t / (\pi/6)$]변화의 위치를 나타내었으며 덕트의 중앙 횡축을 중심으로 윗 부분은 덕트내로 유입유동이며 아랫부분은 유출유동으로 이는 각각 가속유동과 감속유동을 나타낸다. 또한 덕트중앙의 종축을 중심으로 덕트 상하방향(z)을 17지점 측정하였다. 여기서 진동유동의 Reynolds 수가 증가할수록 유입유동을 나타내는 속도분포 값이 증가하고, 또한 유동이 완전히 발달하지 않은 입구영역에서 덕트의 무차원 축방향 위치(x/Dh)가 하류쪽으로 진행할수록 속도분포 값이 증가함을 알 수 있었으며 완전 발달된 유동영역에서는 유입과 유출유동의 횡방향 속도

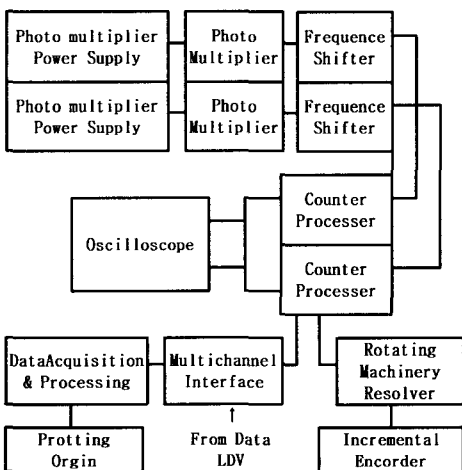


Fig. 3 Schematic diagram of associated data acquisition and processing system

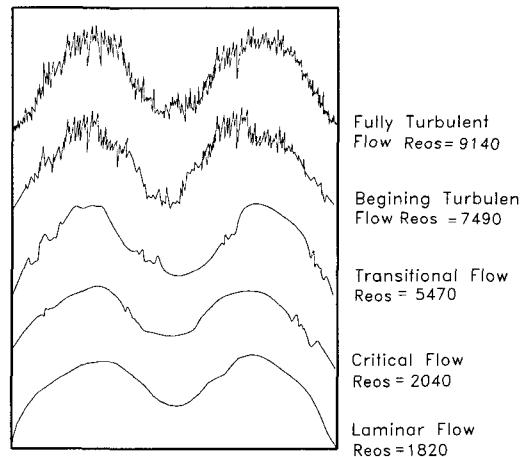


Fig. 4 Waveforms of turbulent oscillatory flow in a straight duct from hot-wire anemometer

분포형이 거의 대칭적인 형태를 이루고 있음을 고찰할 수 있다.

곡관의 끝부분에 직관이 연결되어 유동이 발달하지 않는 직관의 입구 유동영역에서는 벽면의 점성에 의한 영향으로 경계층이 생성되어 진동유동의 Reynolds 수가 증가할수록, 덕트의 무차원 축방향 위치가 하류쪽으로 진행할수록 경계층영역이 성장되어가다가 완전발달된 유동영역에서는 축방향 속도분포의 변화가 거의 없어지고 벽면쪽의 속도값도 입구에서의 속도값보다 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 입구의 영향을 받지 않는 완전 발달되었다고 사료되는 덕트의 무차원 축방향의 위치(x/Dh)가 90인 지점에서 난류진동유동의 속도분포를 나타냈는데 이는 Fig. 5와 Fig. 6의 (c)와 유사한 분포를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 본 실험조건에서 완전 발달된 유동 위치는 무차원 축방향 위치(x/Dh)=40 정도임을 또한 알 수 있다. 무차원 각진동수를 고정한 상태에서 ($|\bar{u}_{os,1}|/|\bar{u}_{m,os,1}|$)와 ($\angle \bar{u}_{os,1} - (\angle \bar{u}_{os,1})_{cl,fd}$)에 대한 진동유동의 Reynolds 수(Reos)를 변화시키면서 얻은 실험결과 횡단면 속도분포가 덕트의 무차원 축방향이 하류방향으로 진행할수록 점점 발달해서 완전 발달된 유동으로 되어 Sohn⁽⁶⁾과 Koh⁽¹²⁾ 등이 제시한 결과와 비교하여볼 때 비교적 1/7승 법칙에 잘 일치하고 있음을 고찰할 수 있다. 따라서 난류진동유동에서는 무차원 각진동수가 일정한 경우 입구길이가 진동유동의 레이놀즈수에 비례함을 알 수 있었고 가속영역의 속도값보다 감속영역의 속도값이 약간 크게 나타남을 알 수 있다.

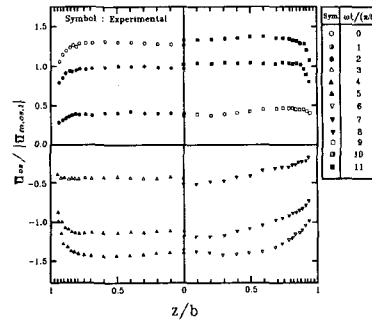
3.2 전단응력분포

곡관덕트에 연결된 직관덕트 입구유동영역에서 난류진동유동의 전단응력분포는 다음의 식을 이용하여 Fig. 9과 Fig. 10에 난류진동유동의 Reynolds수와 덕트의 무차원 축방향 위치(x/Dh) 및 덕트의 무차원 횡단면 위치(z)의 변화에 따라 도시하였고 난류진동유동에 대한 전단응력은 식(4)에 의하여 구하였다.

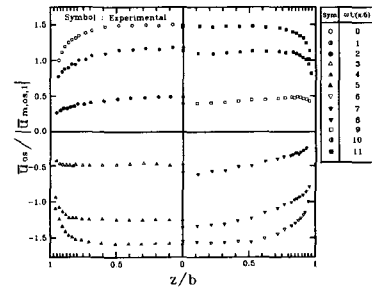
$$\bar{\tau}_{w,os} = \lambda_{q,tu} \cdot \rho \bar{u}_{m,os}^2 / 8 \quad (4)$$

여기서, $\lambda_{q,tu}$ 는 준 정상상태(quasi-steady state)의 판마찰계수를 나타낸다.

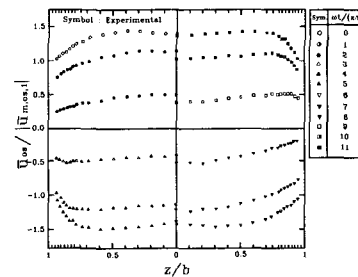
여기에서 좌측부분은 가속유동의 위상이고 우측부분은 감속유동의 위상이다. 감속유동의 초기위



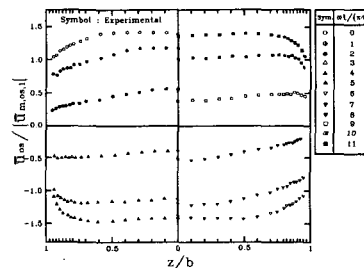
(a) x/Dh = 5



(b) x/Dh = 20

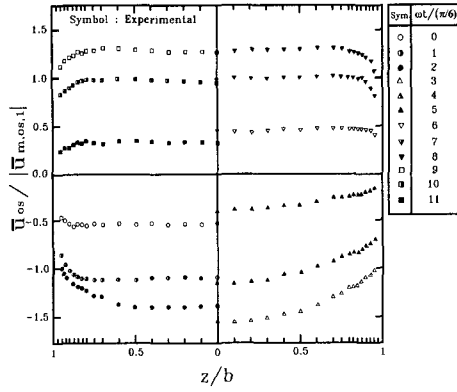


(c) x/Dh = 40

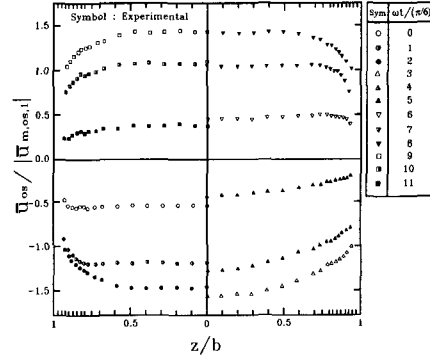


(d) x/Dh = 60

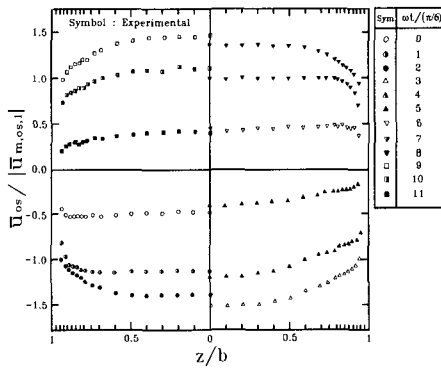
Fig. 5 Velocity profiles of developing turbulent oscillatory flow at the Reos = 20000



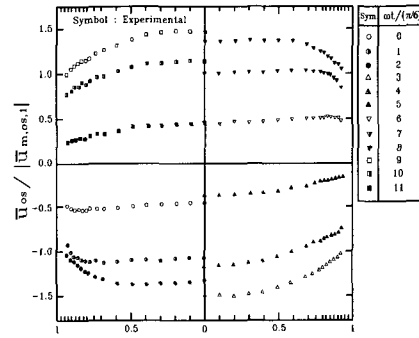
(a) $x/D_h = 5$



(b) $x/D_h = 20$



(c) $x/D_h = 40$



(d) $x/D_h = 60$

Fig. 6 Velocity profiles of developing turbulent oscillatory flow at the $Re_{os} = 30000$

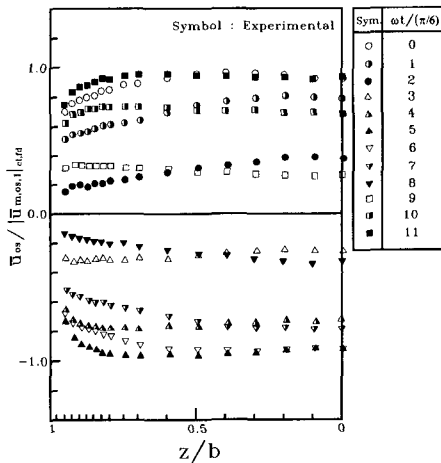


Fig. 7 Velocity profiles with respect to fully developed central velocity amplitude for developing turbulent oscillatory flow at the $Re_{os} = 20000$

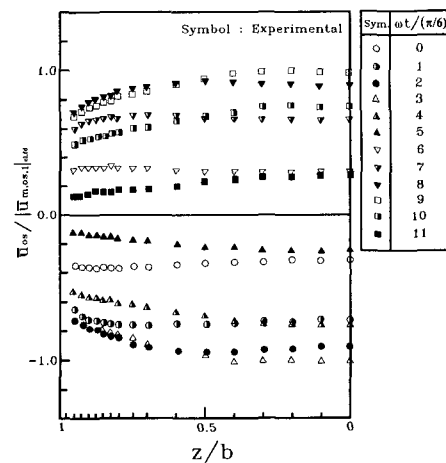


Fig. 8 Velocity profiles with respect to fully developed central velocity amplitude for developing turbulent oscillatory flow at the $Re_{os} = 30000$

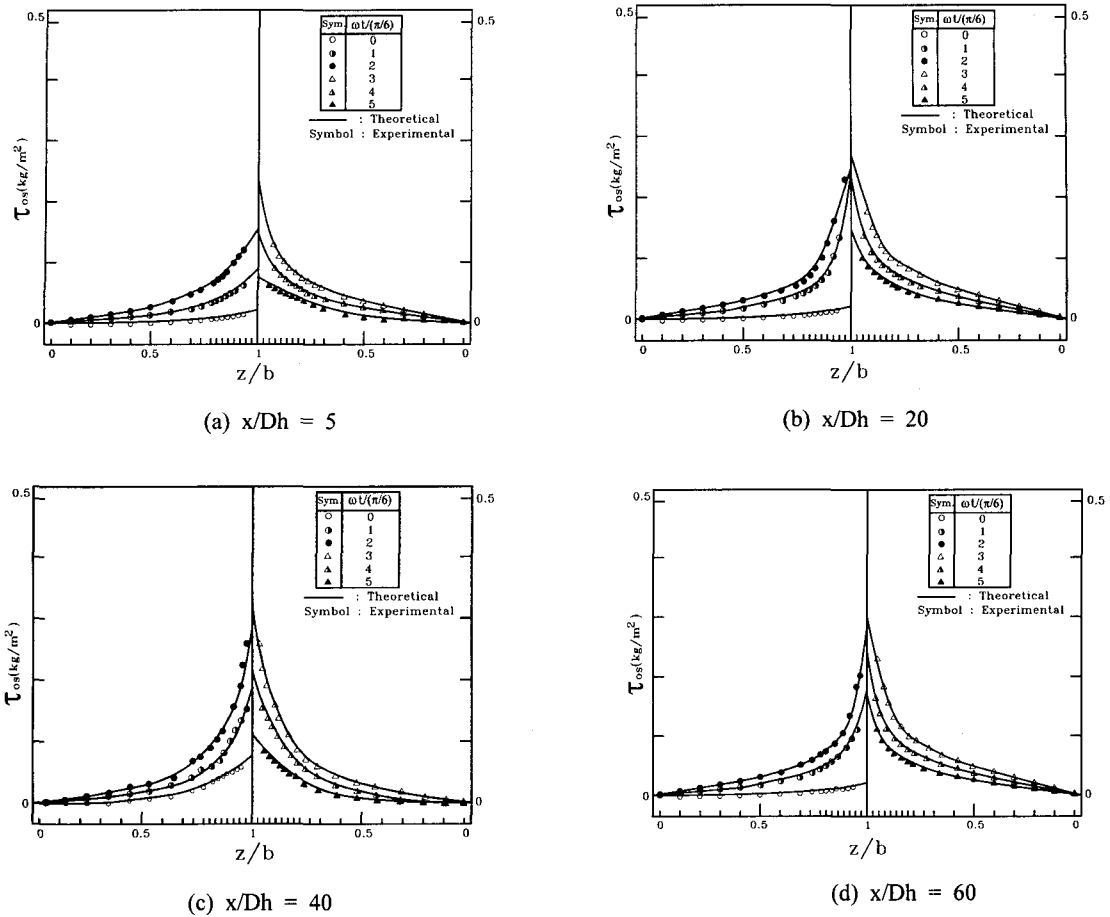


Fig. 9 Shear stress distribution of developing turbulent oscillatory flow at the $Re_{os} = 20000$

상에서 전단응력 값이 약간 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 난류진동유동의 전단응력분포는 유동이 덕트입구부에서 축방향의 유동하류방향으로 진행함에 따라 점점 증가함을 알 수 있었고 입구영역을 벗어난 완전 발달된 난류진동유동에서는 벽면전단응력 분포($\tau_{w,os}$)의 변화가 거의 없음을 고찰하였다. 또한 입구의 영향을 받지 않는 난류진동유동의 레이놀즈수가 증가할수록 Fig. 11와 같이 정현파 파형과 위상차이가 발생하여 벽면전단응력은 정현파에서 이탈되는 현상이 나타남을 알 수 있다. 난류진동유동에 대한 덕트중심에서의 전단응력값을 무차원 축방향 위치의 변화와 레이놀즈수 증가에 따른 할수록 전단응력값이 증가하여 난류진동유동 영역에서는 무차원 축방향의 위치가 수력직경의 약 40 배 부근에서 일정한 벽면전단응력이 나타남을 알

변화를 살펴보면 진동유동의 레이놀즈수가 증가수 있는데 이는 완전 발달된 난류진동 유동영역이 이루어지고 있음을 고찰할 수 있다.

4. 결 론

정사각단면을 갖는 곡관덕트의 출구영역에 연결된 직관덕트에서 난류진동유동에 대한 속도분포 및 전단응력 분포의 특성에 대한 실험적인 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 곡관에 연결된 직관에서 난류진동유동의 임계 Reynolds 수는 약 7500 부근이었으며, 덕트의 축방향 위치가 하류쪽으로 진행할수록 속도분포값이 증가함을 알 수 있다.
- (2) 속도분포는 가속위상보다 감속위상에서 약간

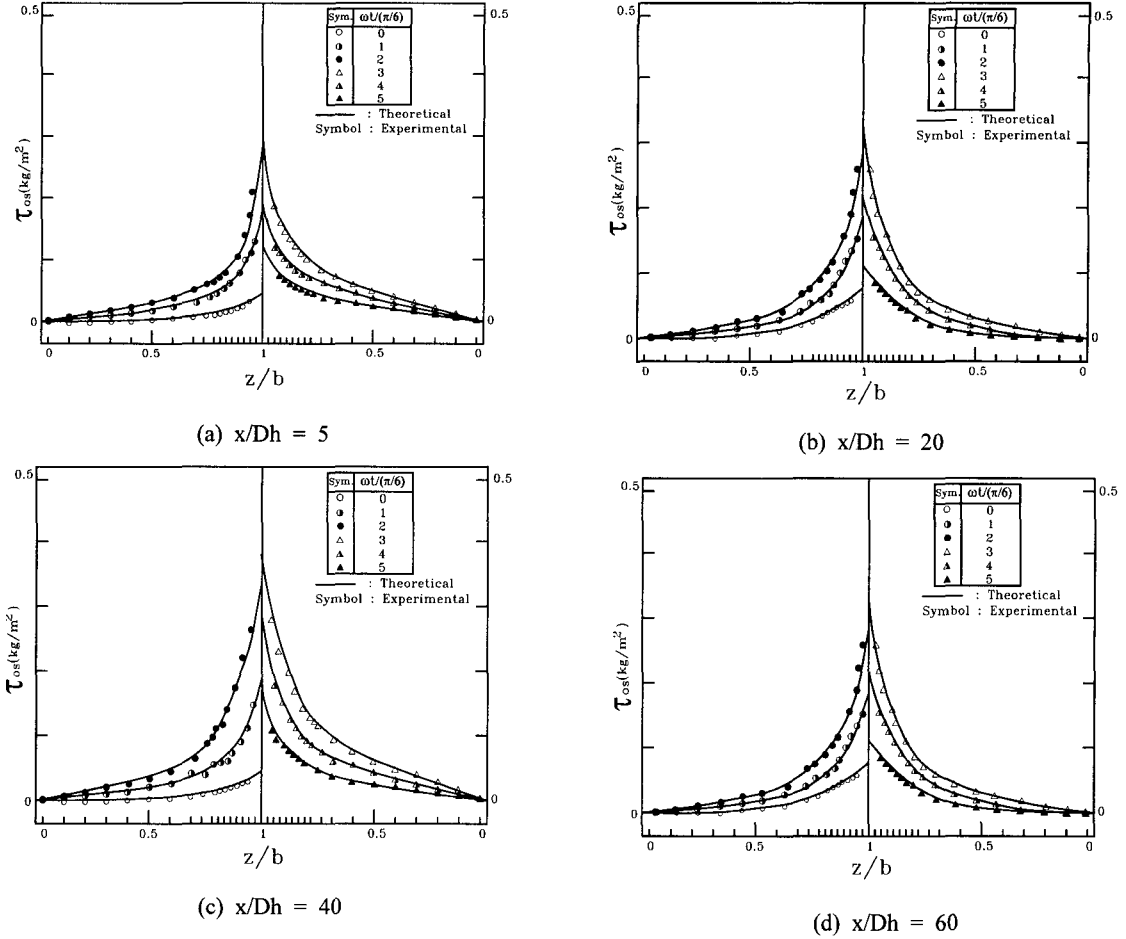


Fig. 10 Shear stress distribution of developing turbulent oscillatory flow at the $Re_{os} = 30000$

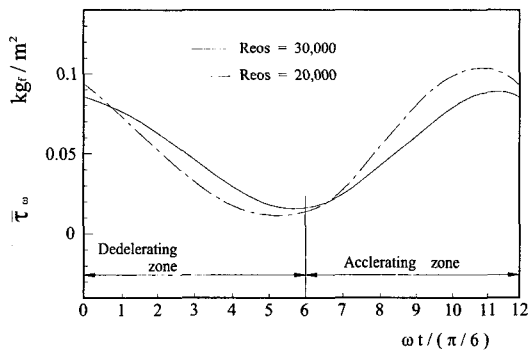


Fig. 11 Shear stress distribution of experimental value in turbulent oscillatory flow

크게 나타났으며, 입구역에서 유입유동의 속도분포는 점점 발달되고, 유출유동은 뚜렷한 변화가 없으며, 완전 발달된 유동영역에서 유입 유동과 유출유동의 속도분포는 비교적 대칭인 분포를 이루고 있다.

(3) 난류진동유동의 전단응력분포는 유동이 하류방향으로 진행함에 따라 지속적인 증가를 이루었고, 난류진동유동의 축방향 위치가 수력직경의 40 배 부근부터는 일정한 벽면전단응력분포 ($\tau_{w,os}$)를 나타내고 있으므로 보아 완전 발달한 난류유동 영역으로 볼 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

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) Cho, M.T., Suh, S.H. and Yoo, S.S., 2000, "Collapsible Phenomena in the Flexible Tube due to the Flow Rate and Transmural Pressure Changer," *Transactions of The KSME, B*, Vol. 20, No. 5, pp. 185~193.
- (3) Iguchi, M., Park, G.M. and Koh, Y.H., 1993, "The Structure of Turbulence in Pulsatile Pipe Flows," *KSME International Journal*, Vol. 7, No. 3, pp. 185~193.
- (4) Kim, B.S., Sohn, C.H. and Shin, S., 1997, "Numerical Heat Transfer in a Rectangular Duct with a Non-Newtonian Fluid with Shear-Rate Dependent Thermal Conductivity," *Transaction of the KSME, B*, Vol. 21, No. 6, pp. 773~778.
- (5) 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," *Proceedings of the KSME 1995 Fall Annual Meeting(B)* pp. 285~289.
- (6) 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.
- (7) Eustice 1910, "Flow of Water in Curved pipe," *Proc. R. Soc. Ser.* pp. 107~118.
- (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) Mullin, T. and Greated, C.A., 1980, "Oscillatory Flow in Curved Pipes. Part 2. The Fully Developed Case," *J. Fluid Mech*, Vol. 98, part 2, pp. 397~416.
- (10) Komai, 1993, "Numerical Analysis Physiological Flow in a Curved tube," *Journal of JSME*, Vol. 59, No. 560, pp. 1079~1086.
- (11) Sumida, M. and Sudou, K., 1986, "Oscillatory Flow in Curved Pipes of Rectangular Cross-Section (2nd Report, Effect of Aspect Ratio of a Pipe)," *Journal of JSME(B)*, Vol. 52 No. 480, pp. 2881~2887.
- (12) Koh, Y.H., 1992, "A Study on Turbulent Characteristics of Developing Turbulent Steady and Unsteady Flows in the Entrance Region of a Square Duct," Ph.D Thesis. University of Chosun, Gwangju.
- (13) Park, G.M., Bong, T.G. and Sohn, H.C., 1997, "Flow Characteristics of a Transitional Oscillatory Flow," *Proceeding of KSME, spring Annual Meeting*, pp. 436~442.
- (14) Bong, T.G., 1996, "A Study on the Flow Characteristics of Developing Transitional Steady, Transitional Oscillatory and Transitional Pulsating Flows in an Entrance Region of a Curved Duct," Ph.D Thesis. University of Chosun, Gwangju.
- (15) Ohmi, M., Iguchi, 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.
- (16) Naruse, T. and Nakano, K., 1991, "Fully Developing Oscillatory Flow in a Curved duct," *Journal of JSME (B)*, Vol. 56, No. 529, pp. 2562~2569.
- (17) Ohmi, M. and Iguchi, M., 1982, "Flow Patterns and Frictional Losses in an Oscillating Pipe Flow," *Bul. of the JSME*, Vol. 25, No. 202, pp. 536~543.