

180° 곡관덕트에 연결된 출구 영역에서 난류 진동유동의 유동특성

김대욱* · 손현철** · 이행남*** · 박길문***

Flow Characteristics of Turbulent Oscillatory Flows in the Exit Region Connected to 180° Curved Duct

D-W Kim* · H-C Sohn** · H-N Lee · G-M Park***

Key words : Turbulent oscillatory flow(난류진동유동), Velocity profiles(속도 분포), Shear stress distributions(전단응력 분포), L.D.V(레이저 도플러 유속계)

Abstract

In the present study, flow characteristics of turbulent oscillatory flows in the exit region connected to the square-sectional 180° curved duct was investigated experimentally. The experimental study for air flows was conducted to measure velocity profiles, shear stress distributions by using the Laser Doppler Velocimetry(L.D.V) system with the data acquisition and processing system of Rotating Machinery Resolver(R.M.R) and PHASE software.

The results obtained from the experimentation were summarized as follows :

The critical Reynolds number for a change from transitional oscillatory flow to turbulent oscillatory flow was about 7500, in the 90 region of dimensionless axial position (x/D_h) which was considered as a fully developed flow region.

In 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.

Shear stress distributions of turbulent oscillatory flow was gradually increased as the flow proceeds to downstream.

* 조선대 대학원(원고접수일 : 2000년 11월)

** 순천제일대학

*** 조선대 기계공학부

1. 서 론

산업현장에서 유체기계와 연결된 관로망의 최적설계는 공업의 발달로 인하여 대형화, 초정밀화, 고성능화를 요구하고 덕트내의 유체유동은 대부분 비정상유동을 이루고 있다. 비정상유동 중에서 곡관덕트에 연결된 직관덕트에서 난류진동유동의 해석은 유체기계의 설계에 기초자료가 될 뿐만 아니라 유체기계 내부유동을 해석하는데 아주 중요하게 응용될 수 있기 때문에 이에 대한 유동해석이 절실히 요구되고 있다.

난류진동유동의 응용분야로는 유체기계와 연결된 덕트 내의 유동, 특히 송풍기 및 팬의 시동과 정지시 연결된 관로의 유체유동, 왕복운동기관의 배기관 유동, 항공기의 연소기에서의 연소와 노즐에서의 제트유동, 유압관로에서의 파동현상에 의한 유동, 동물의 혈액순환계통의 혈액유동 등이 있다.

관로에 대한 연구는 19세기 말부터 본격적으로 유체공학상에 제기되었고 1920년대의 주로 이론적인 연구로부터 최근에 이르러서는 컴퓨터와 전자계산기의 대용량화 및 고속화에 따라 비정상유동에 관한 연구가 활발히 이루어졌고 Navier-Stokes 방정식의 비선형성이 검토되기 시작하였다.

진동유동의 유동특성에 대한 기존의 연구들을 살펴보면 Lyne¹⁾이 곡률반경비(Rc)가 충분히 큰 원형곡관내에서 축방향으로 $-dp/dz = \rho\alpha\omega_0 \cos \omega t$ 되는 정현파의 압력구배가 가해지는 이론적인 연구를 하여, 정상유동에서 볼 수 있는 2차유동 이외에 관로 중앙부의 외벽측에서 내벽측으로 향하는 2차유동이 유기되는 것을 발견하였다.

Mullin 등²⁾은 곡관내에서 발달하고 있는 진동유동일 때 LASER 유속계를 이용하여 속도분포를 실험적으로 구했는데 유동의 발달은 주파수 변화와 진동진폭에 의존함을 알았고 주파수의 변수, α 가 적은 경우는 정상상태로 간주할 수 있다고 하였다.

Ohmi 등³⁾은 운동량의 식을 기초로하여 층류해석해와 난류 수치해를 구하고, 통계적 실험으로 U자관내에 자유진동유동의 감쇄특성을 규명하였다.

Sudou 등⁴⁾은 레이저유속계를 이용하여 $De=30 \sim 180$, 무차원 각진동수(ω^+)=2~18의 범위에서 곡률반경과 관축을 포함한 관내의 주류방향의 속도분포를 측정하였다.

Singh⁵⁾는 속도진폭비(A_1)가 0.8인 경우의 이론 해석을 하였는데, 관로의 굽힘에 대한 영향과 역압력구배로 인한 벽면전단응력의 영향 때문에 경계층이 성장하는 감속영역 중의 벽면전단응력에서 관축방향의 성분이 음의 값을 가짐을 조사하여 발표하였다.

Takami 등⁶⁾은 수치해석적으로 속도분포, 2차유동의 유선, 벽면전단 응력분포 등의 유동의 내부구조를 규명하고 무차원 각진동수(ω^+) 및 속도진폭비(A_1)가 유동에 미치는 영향에 대하여 연구 발표하였다.

본 연구에서는 정사각단면을 갖는 180° 곡관덕트에 연결된 출구영역인 직관덕트에서 유동영역을 분류하고 난류진동유동의 유동영역에서 LDV를 이용하여 속도분포와 전단응력 분포를 규명하였다.

2. 실 험

2.1 실험장치

본 실험에서는 작동유체로서 모기향을 연소시킨 공기를 사용하였고 Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다.

실험장치의 주요 구성은 180° 곡관덕트에 연결된 직관덕트로서 본 실험에서는 직관덕트부에서

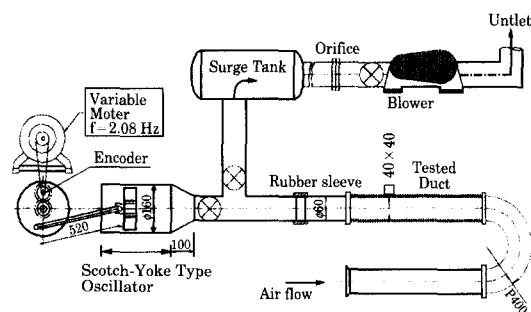


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

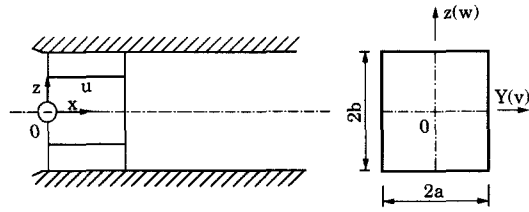


Fig. 2 Coordinate system and velocity components in a straight duct

속도분포와 전단응력분포를 측정하였다. 진동유동을 발생시키기 위해 Scotch-yoke형 가진기 및 변속모터 등 부속장치를 구성하였고 시험덕트에서 속도분포를 측정하기 위하여 최대출력 2W인 Ar-Ion Laser로 2색 3빔 방식의 후방산란형 LDV와 LDV System을 적재하여 이동시킬 수 있는 3차원 이송기구로 구성되어 있다. 본 실험에서 사용된 주요 측정기는 LDV에서 신호를 받아 처리하는 신호처리기(Signal Processor), PC, oscilloscope가 있고 진동유동의 자료 처리를 위해 PHASE software를 사용하였다.

Fig. 2는 곡관덕트에 연결된 직관덕트의 좌표계를 나타내었다.

2.2 실험방법

난류진동유동은 무단변속기가 연결된 Scotch-yoke형 가진기만을 작동시켜 발생시켰다. 무단변속모터에 의해 진동주파수(f)를 조절하였고 회전원판의 위치에 의한 피스톤의 진폭(A_p)을 조절하여 레이놀즈 수(Re_{os})와 무차원 각진동수(ω⁺)를 Table 1과 같은 조건에서 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한 측정항 위치(x/D_h)를 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90으로 변화시키면서 덕트 중심으로부터 무차원 횡방향 위치인 z' 방향으로 17등분하여 각 지점에서 난류진동유동의 순간속도를 측정하였다.

난류진동유동의 단면평균속도 |u_{m,os,1}|는 (A_p/2)ω × $\frac{A_{piston}}{A_{duct}}$ 으로 하여 피스톤 진폭으로부터 계산하였고 진동유동 속도를 유입과 유출유동으로 나누어서 Fourier 급수에 의하여 6차의 고주파 성분까지의 진폭과 위상각을 계산하였다. 진동유동

Table 1 Experimental conditions of turbulent oscillatory flow

x/D _h	f(Hz)	ω ⁺	A _p (mm)	Re _{os}
5	2.08	18.79	50	20000
			75	30000
10	2.08	18.79	50	20000
			75	30000
20	2.08	18.79	50	20000
			75	30000
30	2.08	18.79	50	20000
			75	30000
40	2.08	18.79	50	20000
			75	30000
50	2.08	18.79	50	20000
			75	30000
60	2.08	18.79	50	20000
			75	30000
90	2.08	18.79	50	20000
			75	30000

의 레이놀즈 수는 Re_{os} = |u_{m,os,1}| · D_h/ν로부터 계산하였으며, 무차원 각진동수는 ω⁺ = $\frac{D_h}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ 로부터 계산하였다.

난류진동유동에 대한 측정값은 LDV를 통하여 얻은 실험값을 R.M.R과 Scotch-yoke형 가진기의 회전축에 부착시킨 Encoder의 신호에 의해서 1회전당 360°의 전 위상에서 신호를 받아들여 PHASE software에서 처리한 다음 ORIGIN graphic software에서 plotting하였다.

Fig. 3은 실험자료 획득 및 처리과정을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동영역의 분류

진동유동은 유입과 유출을 반복하여 이루어지는 유동이므로 곡관덕트를 지나 입구부를 통하여 직관덕트 내로 들어오는 유체입자의 이동거리는 입구영역의 부근에서 한계에 이르게 되는데 이때 유체입자가 최대 이동되는 거리를 입구길이라 정의하였다.

본 실험의 유동영역을 분류하기 위하여 충분히 완전 발달된 무차원 측정항 위치(x/D_h) 90의 덕

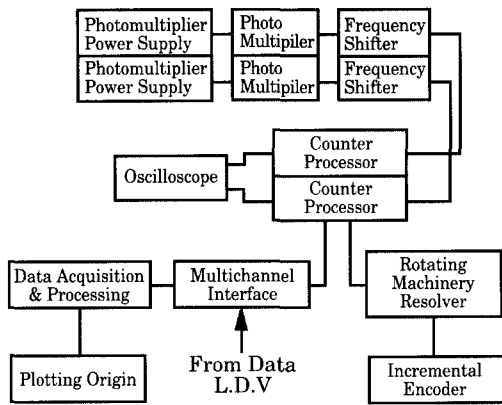


Fig. 3 Data acquisition and processing system

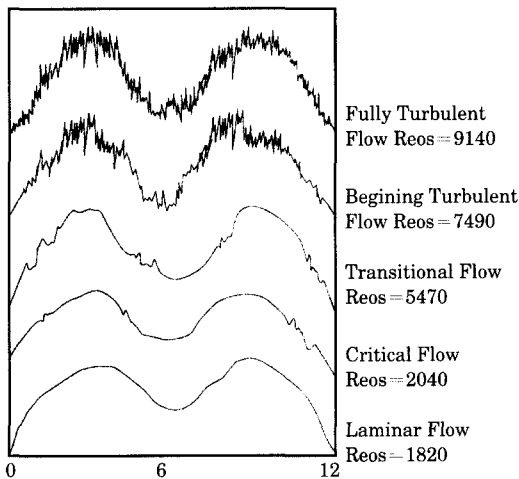


Fig. 4 Waveforms of turbulent oscillatory flow from the hot-wire anemometer

트 중심에 열선유속계에 연결된 열선 센서를 삽입하고 레이놀즈 수를 변화시켜가면서 얻어지는 순간 속도파형의 출력 신호를 오실로스코프에 기록하여 얻어진 속도파형의 실험결과를 분석하여 층류, 천이, 난류 유동영역을 규정하고 이들 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

이때 최초의 난류 *bursting* 이 나타난 유동을 임계유동으로 정의하고 전 영역에 걸쳐 *bursting*이 발생하는 유동영역인 레이놀즈수 7500 이상인 영역을 난류유동영역으로 규정하고 난류유동의 범위를 결정하였다.

3.2 속도 분포

곡관덕트에 연결된 직관덕트 영역에서 감속위상의 초기에 최초로 난류성분이 나타나기 시작할 때의 레이놀즈 수에서 진동유동의 레이놀즈 수가 증가함에 따라 가속위상과 감속위상에서 역류되는 순간을 제외하고 난류성분이 증가하여 전 구간에 걸쳐서 난류성분이 나타날 때를 난류진동유동으로 규정하였다. 속도분포의 실험은 하류방향으로 진행하면서 각각의 축방향 위치(x/D_h)에서 무차원 횡방향(z')을 17등분하여 실험하였다.

Fig. 5는 난류진동유동의 레이놀즈 수가 20000일 때 각 주기에 대한 덕트의 무차원 축방향 속도분포를 측정하여 나타냈는데 윗부분은 유입유동이며 가속유동을 나타내고 아랫부분은 유출유동이며 감속유동을 나타낸다. 여기에서, 입구영역에서 덕트의 무차원 축방향 위치(x/D_h)가 하류쪽으로 진행할수록 속도분포 값이 증가함을 알 수 있었으며 완전 발달된 유동영역에서는 유입과 유출유동의 횡방향 속도분포형이 거의 대칭적인 형태를 이루고 있음을 고찰할 수 있었다.

덕트입구 유동영역에서는 벽면의 점성에 의한 영향으로 경계층이 생겨서 덕트의 무차원 축방향 위치가 하류쪽으로 진행할수록 경계층영역이 성장되어가다가 완전발달된 유동영역에서 축방향 속도분포의 변화가 거의 없어지고 벽면쪽의 속도값도 입구에서의 속도값보다 증가함을 알 수 있었다.

무차원 각진동수(ω^+)를 고정한 상태에서 무차원 속도분포($|\bar{u}_{os,1}| / |\bar{u}_{m,os,1}|$)와 위상차($\angle \bar{u}_{os,1} - (\angle \bar{u}_{os,1})_{cl,fd}$)에 대한 진동유동의 레이놀즈 수를 변화시키면서 얻은 이론 및 실험결과를 Fig. 6에 나타냈는데, 횡단면 속도분포가 덕트의 무차원 축방향이 하류방향으로 진행할수록 점점 발달해서 완전발달된 유동으로 되어 1/7승 법칙에 잘 일치하였다.

3.3 전단응력 분포

난류진동유동의 전단응력 분포는 아래의 식을 이용하여 레이놀즈 수가 20000일 때 덕트의 무차원 축방향 위치(x/D_h) 및 무차원 횡단면 위치(z')의

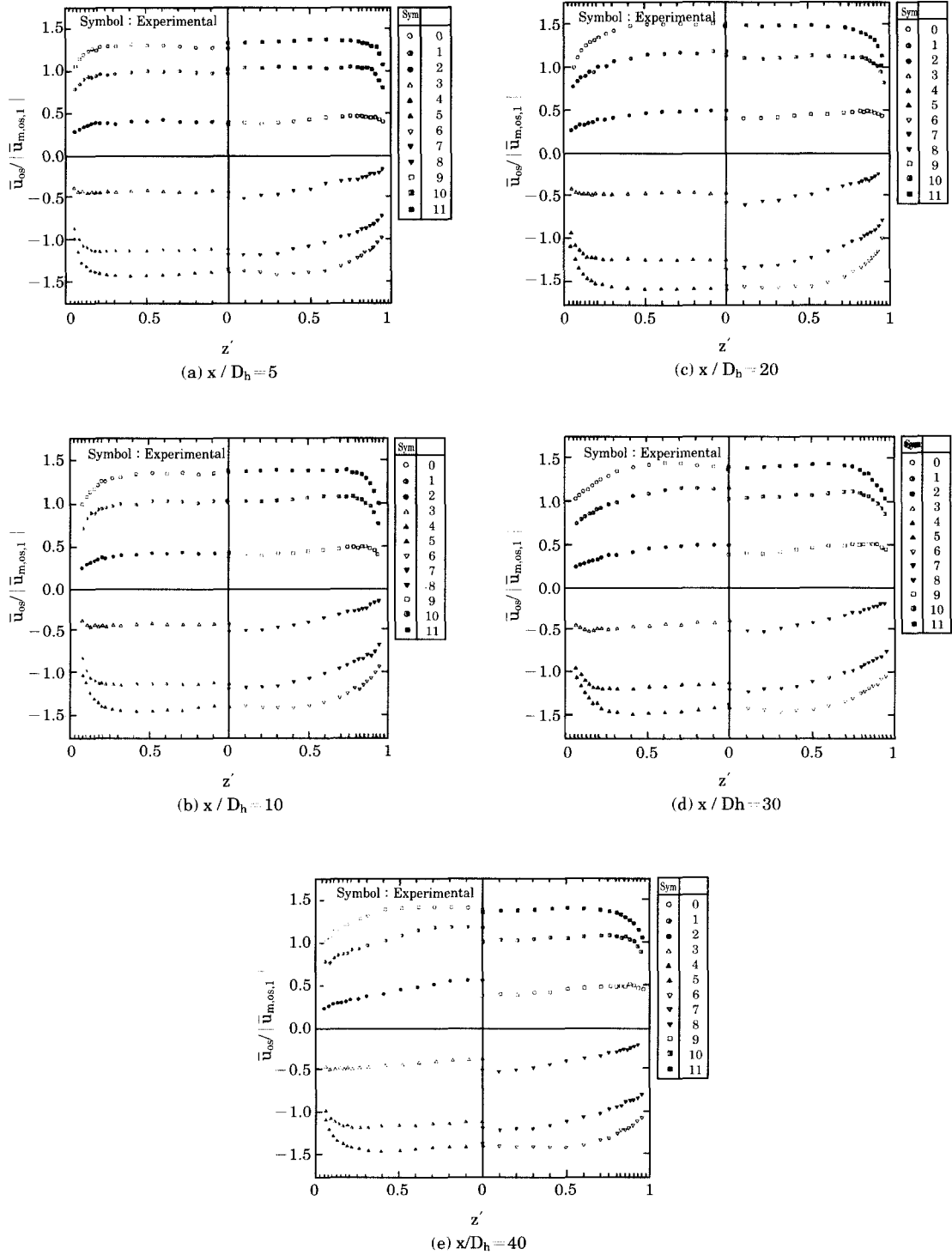


Fig. 5 Velocity profiles of developing turbulent oscillatory flow at the $Re_{os}=20000$

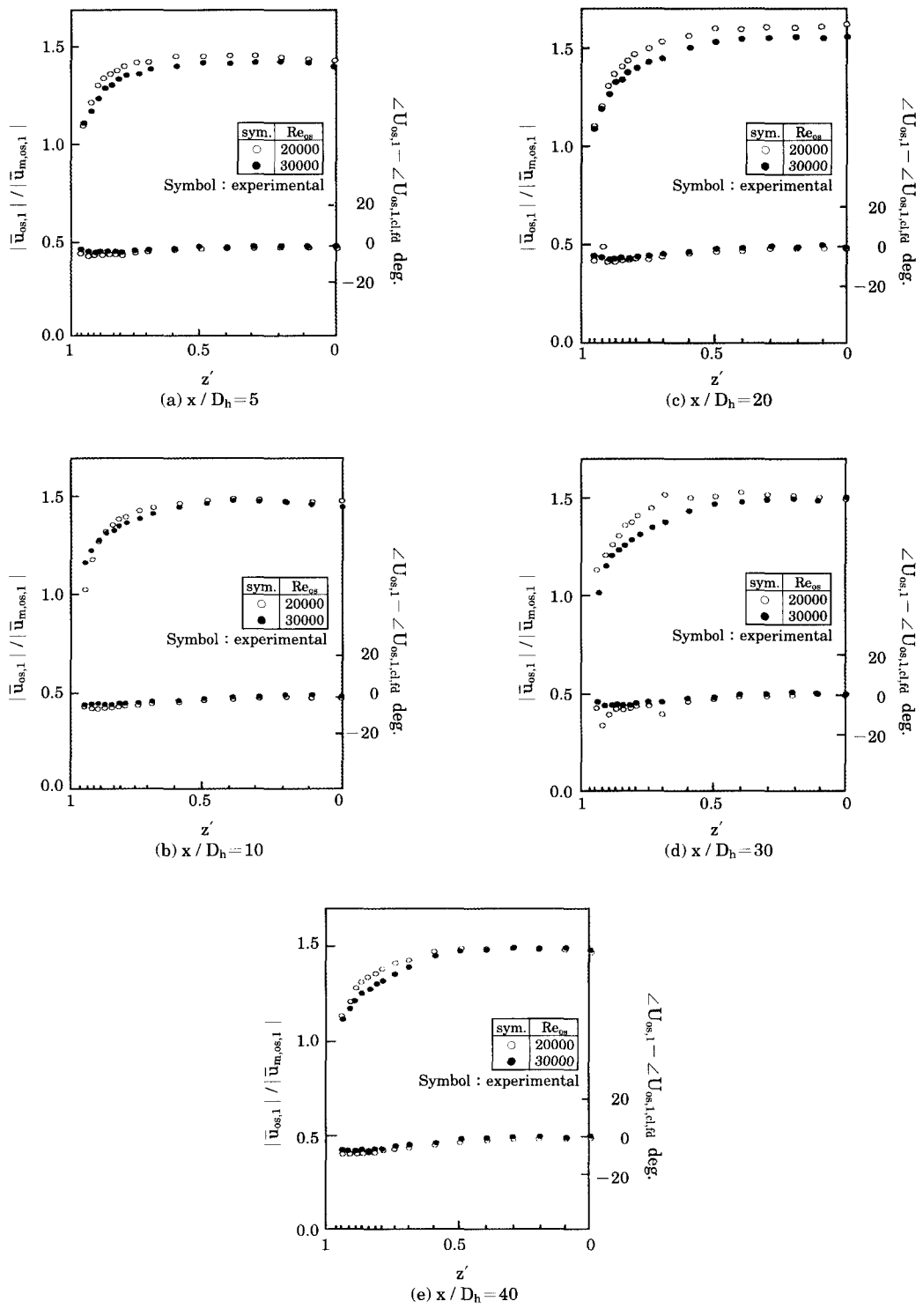


Fig. 6 Velocity profiles and phase difference of turbulent oscillatory flow

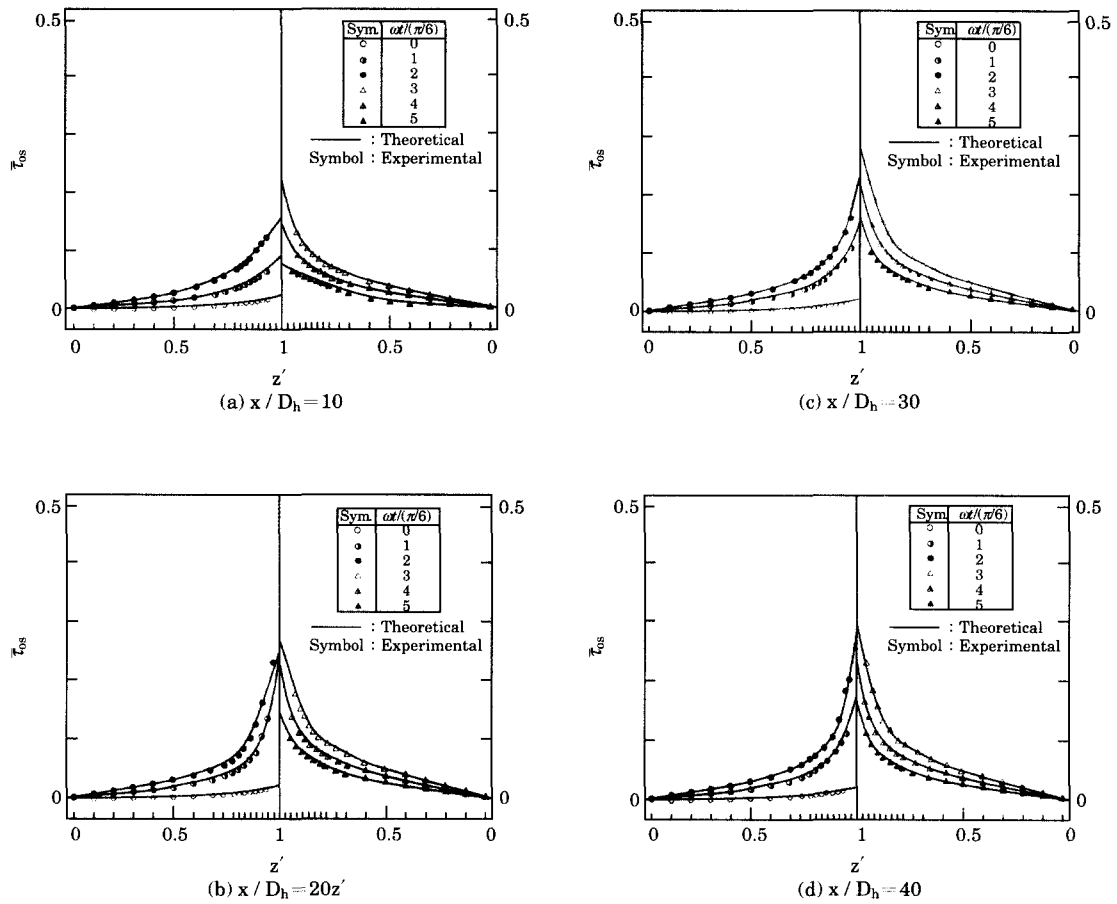


Fig. 7 Shear stress distributions for developing turbulent oscillatory flow at the Reos=20000

변화에 따라서 Fig. 7에 도시하였다.

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

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

상기식에서 좌변은 가속유동의 위상이고 우변은 감속유동의 위상인데 감속유동의 초기위상에서 전단응력 값이 약간 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 난류진동유동의 전단응력분포는 유동이 덕트입구부에서 축방향의 유동하류방향으로 진행함에 따라 점점 증가함을 알 수 있었고 입구영역을 벗어난 완전발달된 난류진동유동에서는 벽면전단응력분포($\bar{\tau}_{w,os}$)의 변화가 거의 없음을 고찰하였다.

4. 결 론

정사각단면 180° 곡관덕트에 연결된 출구영역인 직관덕트에서 난류진동유동에 대한 속도분포, 전단응력 분포의 유동특성에 관한 연구를 규명하기 위해 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열선유속계에 열선 센서로부터 얻어지는 속도파형을 광기록계에 의해 층류유동에서 난류유동까지 구분할 수 있었고, 유동이 충분히 발달된 덕트의 무차원 축방향 위치(x/Dh)가 90인 지점에서 완전한 난류 bursting 발생한 천이진동유동에서 난류진동유동으로

변화하는 임계 레이놀즈 수($Re_{os,cr}$)는 약 7500정도였다.

- (2) 완전 발달된 유동영역에서 난류진동유동의 속도분포는 1/7승 법칙에 잘 일치하였고 감속위상 속도분포가 가속위상의 속도분포 값보다 약간 크게 나타났으며, 입구영역에서 유입유동의 속도분포는 점점 발달되어가나 유출유동은 거의 변화가 없어서 완전 발달된 유동영역에서는 유입유동과 유출유동이 거의 대칭이 되었다.
- (3) 난류진동유동의 전단응력분포는 유동이 하류방향으로 진행함에 따라 점점 증가하였고 완전 발달된 난류진동유동에서는 벽면전단응력분포($\tau_{w,os}$)의 변화가 거의 없었다

후 기

“본 연구는 1999년도 조선대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.”

참고문헌

- (1) Lyne, W. H. : “Unsteady Viscous Flow in a Curved Flow in a Curved Pipe”, J. Fluid Mech, Vol. 45, pare. 1 : 13~31, 1970.
- (2) Mullin, T., and Gerated, C. A. : Oscillatory Flow in Curved Pipes. Part 2. The Fully Developed Case”, J. Fluid Mech, Vol. 98, part 2 : 397~416, 1980.
- (3) Ohmi, M., Iguchi, M., and Maegawa, K. : “A Analysis of free oscillatory flow in a U bend.” Journal of JSME (B) , Vol.48 No. 425 : 50~58, 1982.
- (4) Sudou, K., Sumid, M., Takami, T. and Yamane, R. : “Oscillatory Flow in Curved Pipes(2nd Report, Axial Velocity Profile)”, Journal of JSME(B), Vol 51 No. 463 : 811~819, 1985.

- (5) Singh, M. P. : “Entry Flow in a Curved Pipe”, J. Fluid Mech, Vol.65, part.3 : 517~539, 1974.
- (6) Takami, T., et al : “Flow of Non-Newtonian Fluids in Curved Pipes(5th Report, Turbulent Flow Region)”, Journal of JSME(B), Vol. 55 No. 516 : 2128~2138, 1989.

저 자 소 개



김대욱(金大旭)

1972년 4월생. 1997년 조선대학교 기계공학과 졸업(학사). 2001년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사).



손현철(孫鉉澈)

1965년 9월생. 1990년 금오공과대학 기계공학과 졸업(학사). 1994년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2000년 조선대학교 기계공학과 졸업(박사). 2000년 미래 ESCO기술이사, 순천제일대학 겸임교수



이행남(李行男)

1954년 3월생. 1980년 조선대학교 기계공학과 졸업(학사). 1982년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1993년 국민대학교 기계공학과 졸업(박사). 1983년~현재 조선대학교 기계공학부 교수



박길문(朴吉文)

1949년 3월생. 1974년 조선대학교 기계공학과 졸업(학사). 1977년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1978년~현재 조선대학교 기계공학부 교수