

정사각단면 180° 곡관덕트의 입구영역에서 비정상층류유동의 유동특성에 관한 연구

박길문·모양우*·조병기**

= Abstract =

A Study on Characteristics of Unsteady Laminar Flows in Square-Sectional 180° Curved Duct

G.M. Park, Y.W. Mo, and B.K. Cho

The flow characteristics of developing unsteady laminar flow in a square-sectional 180° curved duct are experimentally investigated by using laser doppler velocimetry (LDV) system with data acquisition and processing system of rotating machinery resolver(RMR) and PHASE software.

The major flow characteristics of developing laminar pulsating flows are presented by mean velocity profiles, velocity distribution of secondary flow, wall shear stress distributions, entrance lengths according to dimensionless angular frequency(ω^+), velocity amplitude ratio(A_1), and time-averaged Dean number(De_{ta}).

The velocity profiles and wall shear stress distribution of laminar pulsating flow with dimensionless angular frequency show the flow characteristics of the quasi-steady laminar flow in a curved duct. The developing region of laminar pulsatile flows in a square-sectional 180° curved duct is extended to the curved duct angle of approximately 120° under the present experimental condition.

Key words : Unsteady laminar flow, Curved duct, Entrance length, Velocity profile, Shear stress distribution

서 론

인체순환기계통은 심장과 혈관으로 구성되어 있으며 혈액유동은 비정상유동(Unsteady Flow)인 맥동유동(Pulsating Flow)이다. 이러한 맥동유동의 유동특성을 규명하는 생체유체역학적 연구는 의공학분야에서 매우 중요하고 혈류 유동해석에 응용될 수 있으므로, 덕트내에서 맥동유동의 유동특성에 대한 연구의 필요성이 요구된다.[1~2] 또한 왕복동기관에 연결된 배기관로의 유동은 곡관과 직관으로 구성되어 있고 관로의 유동은 비정상유동이다. 자동차의 배기계통에서 비정상유동 특성에 대한 해석은 배기계통의 최적설계뿐만 아니라 자동차 왕복동기관의 성능과 효율을 향상시키는데 중요한 기초자료가 된다. 특히 곡관덕트는 직관덕트와는 달리 원심력에 의하여 덕트의

축방향에 수직인 단면방향으로 2차유동이 발생하므로 곡관덕트내의 유동은 혈액유동이나 유체공학을 연구하는 자들에게 많은 관심의 대상이 되어왔다. Sumida등[3]은 층류에서 난류까지의 넓은 범위에서 곡관내 유동에 대한 실험적 연구를 하였고, Nakano등[4]은 원형관내에 있어서 비정상유동에 대한 유동특성 결과를 발표하였으며, Akiyama등[5]은 원형곡관의 입구영역에서 3차원 운동방정식을 2계 편미분방정식으로 표현하여 유동변수를 변화시켜 수치해석한 연구와 Sudo등[6]은 원형곡관에서 열선풍속계를 이용하여 실험적 연구를 하였으며 그 외의 유사한 연구등[7~11]을 정리하여 보면 이들의 곡관유동이 생리학적인 응용분야와 혈액유동 등에 직접적인 관련이 있을 뿐만 아니라 아직까지 정사각단면을 가진 곡관덕트내의 입구유동영역에서 층류비정상유동인 층류맥동유동에 대한

*조선대 기계공학과

*Dept. of Mechanical Eng, Chosun Univ.,

**조대공전 기계설계과

**Dept. of Mechanical Design, Chosun Univ. Tech. Junior College

통신저자 : 박길문, (501-759) 광주시 동구 서석동 375, Tel.(062)230-7057, Fax.(062)230-7075

Nomenclature

- A_1 : Velocity amplitude ratio $\left(= \frac{\overline{u_{m,os}}}{u_{m,ta}} \right)$
- De : Dean number
 $\left(= Re\sqrt{a/R} = Re\sqrt{\frac{D_h}{2R}} = \sqrt{D_h/2R} \cdot (D_h \cdot \bar{u}_m / \nu) \right)$
- D_h : Hydraulic diameter $(= 4ab/(a+b))$
- f : Frequency of oscillation
- Le : Entrance length
- R : Radius of curvature
- Rc : Curvature ratio $\left(= \frac{a}{R} = \frac{D_h}{2R} \right)$
- Re : Reynolds number $(= D_h \cdot u_m / \nu)$
- T_w : Dimensionless wall shear stress
 $\{ = \tau_w \cdot (D_h/2)^2 / \rho \nu^2 \}$
- u, v, w : Velocity components in x, y and z -axis, respectively
- u_{ci} : Velocity in center of duct
- \bar{u}_{mta} : Time-averaged cross-sectional mean velocity of pulsating flow
- x, y, z : Rectangular coordinates of test section
- x' : $(= \nu x / ab \bar{u}_m)$
- y' : $(= y/a)$
- z' : $(= z/b)$
- z_t : Peak value on z -direction in velocity amplitude

Greeks and others

- τ_w : Wall shear stress
- ϕ : Deflection angle of duct
- ω : Angular frequency $(= 2\pi f)$
- ω' : Dimensionless angular frequency
 $\left(= \frac{D_h}{2} \sqrt{\omega/\nu} \right)$
- $—$: Time-averaged value

연구가 이루어지지 않은 것으로 사료된다. 따라서 길이가 충분하게 긴 직관덕트에 연결된 곡관덕트의 입구영역에서 비정상유동의 유동특성에 관한 연구의 필요성이 있다.

본 연구는 정4각단면을 갖는 180° 곡관덕트의 입구영역에서 층류맥동유동(Laminar Pulsatile Flow)을 Dean수(\bar{De}), 무차원각진동수(ω') 및 속도진폭비(A_1) 등의 유동변수에 따라 유동영역분류, 속도분포, 전단응력분포 및 입구길이 등의 유동특성을 레이저유속계(LDV)를 이용하여 실험적으로 연구하였다. 곡관덕트내의 입구영역에서 발달과정에 있는 비정상유동(Developing Unsteady Flows

in Curved Duct)의 유동특성을 실험적으로 연구하기 위하여 대부분의 생리학적 응용분야에서 연구되고 있는 혈액유동은 거의 층류유동에 해당하므로 층류유동 범위내에서 각 실험조건에 따라 속도분포를 측정된 실험결과로부터 층류맥동유동의 Dean수(\bar{De}), 무차원각진동수(ω') 및 속도진폭비(A_1) 등의 유동변수가 비정상유동 특성에 미치는 영향을 검토하여 곡관덕트의 입구길이(Entrance Length)를 결정하였다.

실 험

1. 실험장치

아크릴로 제작된 정사각단면을 갖는 180° 곡관덕트내의 입구영역에서 층류비정상 유동의 속도분포를 측정하기 위하여 LDV로 실험을 수행하였는데, 작동유체로는 공기를 사용하였으며, 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었고 곡관덕트의 좌표계는 Fig. 2를 이용하였다.

본 실험에 사용한 LDV system은 Ar-Ion Laser이며 광학계의 배치는 二重 빔 모드(Dual Beam Mode)이며 2 Color 3 Beam 방식의 후방산란형(Back Scattered type)이다. Blue Beam 과 Green Beam의 2개의 파장을 이용하므로써 속도의 수평성분과 수직성분을 측정할 수가 있으며 Bragg Cell를 사용함으로써 주파수 편이를 행하여 유속의 正 負 방향의 판별이 가능하며 Doppler Signal의 처리에는 Counter Type Signal Processor를 사용하였다.

Laser 출력은 최대 2W이며 파장은 488.0nm(Blue)와 514.5nm(Green)이며 수직성분의 측정에는 488.0nm를, 수평성분의 측정에는 514.5nm를 이용하였으며, 측정체적에 대한 세부내용은 Table 1에 나타내었다.

층류맥동유동을 발생시키기 위하여 Scotch-yoke형 가진기를 사용하였는데 가진기에 연결된 변속모터를 조절하여 맥동유동의 각진동수(ω')를 조절할 수 있도록 하였고, 진동 유동의 진폭은 회전원판의 중심으로부터 회전원판상에 뚫려있는 구멍의 위치변화에 따라 피스톤의 연결

Table 1. Detailed contents of measuring volume

Item	Green Beam	Blue Beam
Fringe Spacing [d_f]	1.8 μm	1.7 μm
Measuring Volume Distance [d_m]	23.3 μm	22.11 μm
Length of measuring Volume [l_m]	0.16 mm	0.15 mm
Number of Fringe [NFR]	12.9	13

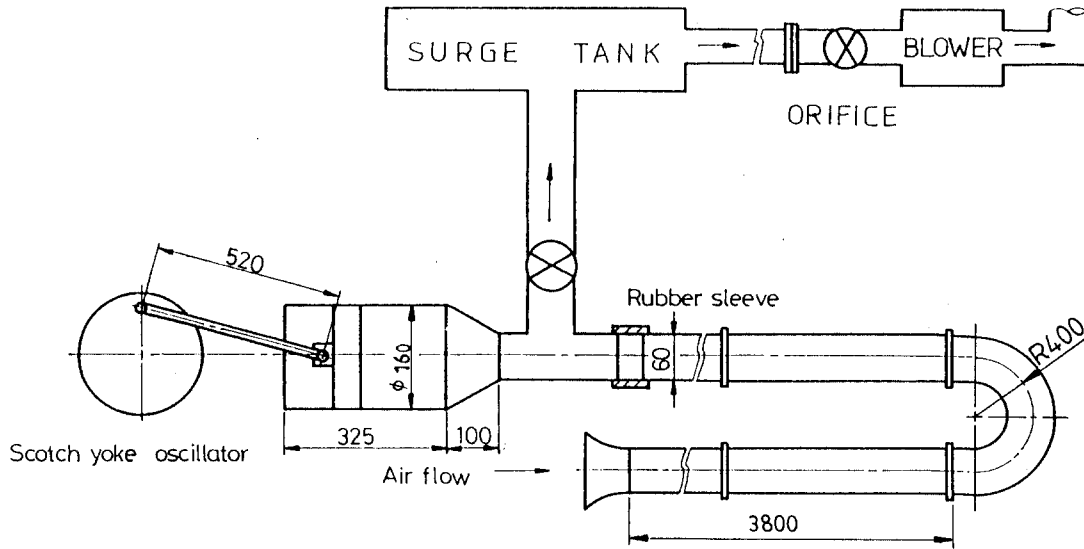


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

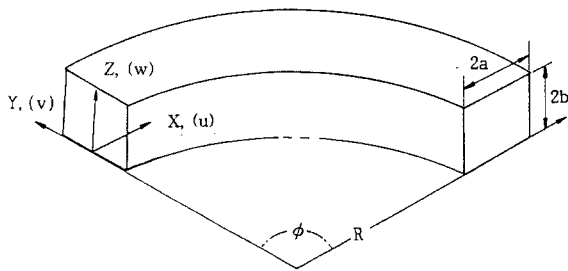


Fig. 2. Coordinate system and components in a curved duct

봉을 핀으로 고정하여 조절할 수 있도록 제작하였다.

Scotch-yoke형 가진기의 회전축에 Encoder 와 Decoder를 설치하여 각 회전위상에 따라 속도를 측정할 수 있도록 Rotating Machinery Resolver (RMR)를 설치하였으며, 여기에서 얻어진 신호가 LDV신호와 동시에 PC에 입력되어 PHASE software에서 자료처리된 후 정리된 실험결과를 Kaleida Graph 에서 Plotting 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 단면의 크기가 40mm×40mm 이고 길이가 4000mm인 직관덕트에 곡률반경이 400mm이고, 직관덕트와 단면크기가 같은 180° 곡관덕트를 연결한 다음 곡관덕트 내의 입구유동영역에서 곡관덕트의 축방향 및 횡방향의 변화된 위치에서 LDV와 이송장치, Rotating Machinery Resolver(RMR)와 PHASE의 자료획득 및 처리 Software를 이용하여 실험결과를 분석하였다.

특히, 2차유동을 수반한 곡관내 유동의 덕트 축방향 속도 u를 LDV system을 이용하여 측정하였는데 LDV 측

정은 측정관로 내에 센서를 넣는 일이 없기 때문에 비정상유동인 맥동유동에서 유입 및 유출유동에 대한 유동방향의 변화에 따른 유동을 혼란시키는 일이 없으며 점성의 영향을 크게 받는 경계층유동까지 측정하는 것이 가능하였다.

또한 실험에 사용한 산란입자는 모기향 연기를 이용하였는데 입자직경은 0.1~0.3μm 로써 Table 1에 나타난 것과 같이 Fringe Spacing의 크기면에서도 적당하고 일정량의 연기를 계속하여 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

본실험에서 LDV와 LDV이송장치를 이용하여 각 측정 위치에서 덕트 횡단면 위치를 변화시켜 가면서, 비정상유동인 맥동유동에 대하여 곡관부의 굽힘각이 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 그리고 180° 위치에서 덕트 횡단면 위치변화에 따라 속도분포를 측정후 유동해석하였다.

Fig. 3에 나타난 실험자료획득 및 처리과정을 통하여 얻어진 실험자료를 PHASE Software를 이용하여 실험자료를 처리한 다음 Kaleida Graph Software에서 plotting 하였다.

층류맥동유동은 층류정상유동과 층류진동유동이 합성되어 이루어진 유동으로서 정상 유동은 송풍기에 의하여 시험덕트에 유입된 유동으로 주어지고 진동유동은 Scotch-yoke형 가진기에 의하여 이루어 지도록 하였다. 정상유동의 유속조절은 송풍기를 구동 하는 변속모터의 회전과 유량조절밸브를 변화시키므로서 조절하였고, 진동유동은 변속모터의 회전수와 Scotch-yoke형 가진기에 부착된 크랭크판의 위치 조절에 의하여 피스톤 진폭을 변화시키면서 실험하였다.

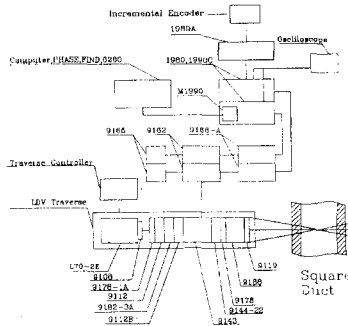


Fig. 3. The schematic diagram of LDV system and data acquisition and processor system

이들의 층류맥동유동에 대한 측정값은 LDV를 통하여 얻은 실험값을 RMR과 Scotch-yoke형 가진기의 회전축에 부착시킨 Encoder의 신호에 따라 360°의 원위상에서 실험자료를 받아들이며 PHASE software에서 처리할 수 있도록 하였다.

Table 2에는 본 실험을 수행한 층류맥동유동의 실험조건을 나타내었다.

결과 및 고찰

1. 유동영역 분류

덕트내에서 맥동유동의 단면평균속도는 $\bar{u}_{m,ps} = \bar{u}_{m,ta} + |\bar{u}_{m,os}| \cos \omega t$ 로 Fourier 근사식에서 기본파만을 취하여 얻었고, 맥동유동에 대한 속도곡선은 LDV와 열선유속계(Hot-wire Anemometer)에서 얻어진 속도파형을 비교 검토하면서 고찰하였다. 덕트 곡관부의 완전 발달되었다고 생각되는 굽힘각도가 180° 부근의 덕트 중앙부분에서 LDV와 RMR 및 PHASE software를 이용하여 얻은 층류맥동유동에 대한 대표적인 속도값을 Fig. 4에 도시하였다.

그리고 층류맥동유동에서 천이맥동유동으로 변화되는 순간적인 난류성분이 나타나기 시작한 입계 맥동유동의 시간평균 Dean수를 결정하였으며, 다음식을 이용하였다.

$$\bar{D}e_{cr} = \left(\frac{u_{mta} \cdot D_h}{\nu} \right) \sqrt{D_h/2R} \quad (3-1)$$

이때 입계 시간평균 Dean수는 $\bar{D}e_{cr} = 450$ 정도이었고, 시간평균 Dean수와 무차원 각주파수(ω^+)와의 관계식으로 나타내면 $\bar{D}e_{cr} = 90\omega^+$ 이었다.

2. 速度分布

정사각형 곡관 덕트내의 맥동유동에서 주요한 무차원 변수로는 곡률반경비와 시간평균 Dean수 ($= Re\sqrt{D_h/2R}$) 및 무차원 각주파수, 속도진폭비 $A_1 (= |\bar{u}_{m,os}| / \bar{u}_{m,ta})$

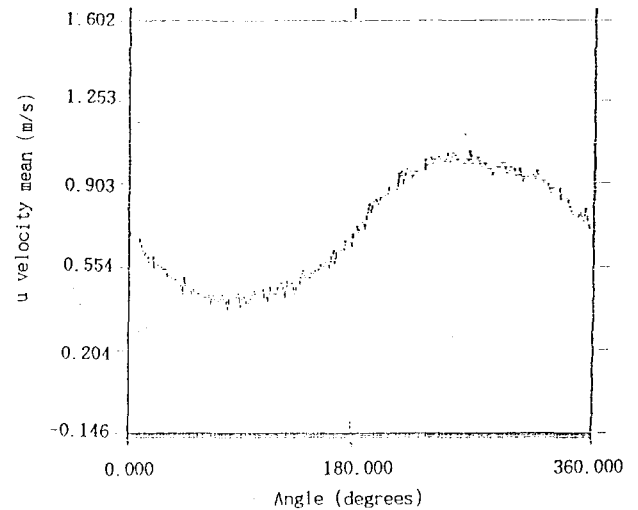


Fig. 4. LDV measurement of velocities of laminar pulsating flow in a curved duct

등이 전체적으로 유동에 크게 영향을 미칠것으로 생각되나, 기존 연구결과(3)를 살펴보면 곡률반경비는 그다지 영향을 미치지 않는것으로 판명되었기 때문에 맥동유동의 특성은 주로 시간평균 Dean수와 무차원 각주파수 및 속도진폭비에 지배된다고 가정하고 무차원 각주파수의 변화에 대한 실험을 수행하였다.

Fig. 5와 Fig. 6에는 층류맥동유동의 덕트의 무차원 횡단면위치(y')의 변화에 따른 축방향 속도분포를 곡관덕트의 굽힘각(ϕ)의 변화에 따라 도시하였다. 이들의 속도분포는 속도진폭비가 0.33과 0.65인 경우에 무차원 각주파수가 $\omega^+ = 5.15$ 와 $\omega^+ = 7.18$ 일때의 실험결과를 표시하고 있다. Fig. 7에서 무차원 각주파수, $\omega^+ = 7.18$ 이고, 무차원 속도진폭비가 $A_1 = 0.65$ 인 경우에 곡관덕트의 굽힘각(ϕ)의 위치에서 덕트 무차원횡단면위치(y') 변화에 따른 축방향의 속도분포를 위상각 ($\frac{\omega t}{\pi/6}$)의 변화에 따라 도시하여 곡관덕트의 입구영역에서 층류맥동유동의 발달과정을 고찰하였다. Fig. 5는 층류맥동유동의 거의 대부분이 정상유동의 발달과정과 비슷한 형태를 이루고 있는 준정상유동(quasi-steady flows)으로 가정할 수 있는데 이는 층류맥동유동에서는 관성력의 영향보다는 점성력이 상대적으로 커지기 때문이다. 또한 곡관의 속도가 큰 부분이 이들의 분포에서 덕트 중앙부분으로 부터 외측벽쪽으로 정상유동에서 처럼 이동하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 6은 무차원 각주파수가 증가하여 유동이 가속되기 시작하면서 덕트의 굽힘 시작점에서 내측벽쪽으로 강한 압력구배가 작용되어 내측단면의 유체는 크게 가속되게 되고 관로 중앙부분에서 큰 속도를 가진 유체가 외측벽쪽에서 서서히 이동하였으며 굽힘각 120° 부분부터는 거의 변화되지 않고 완전 발달된 유동(fully developed flow)이 되

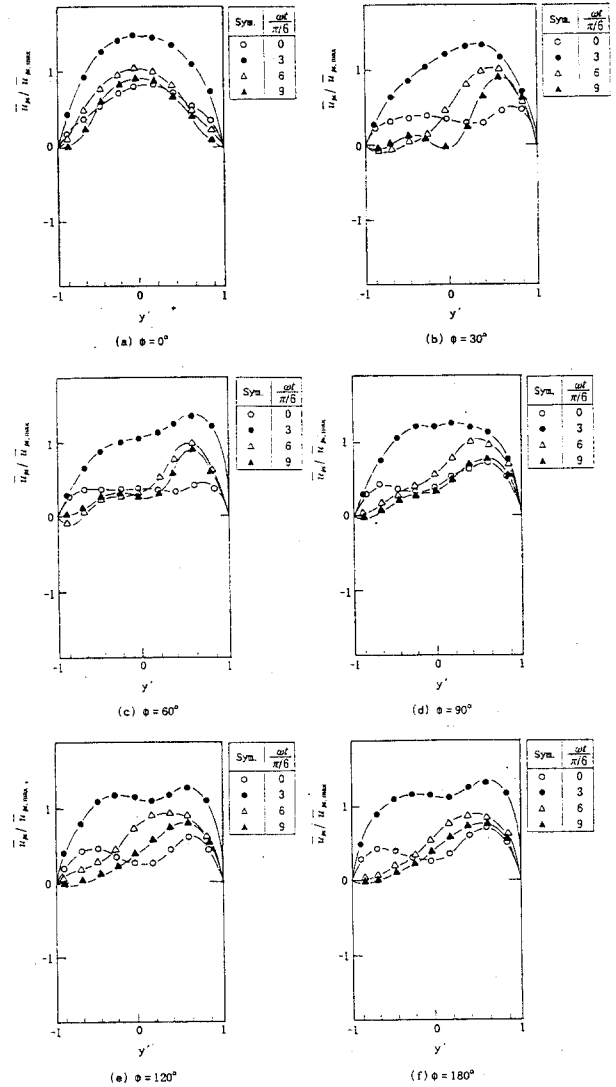
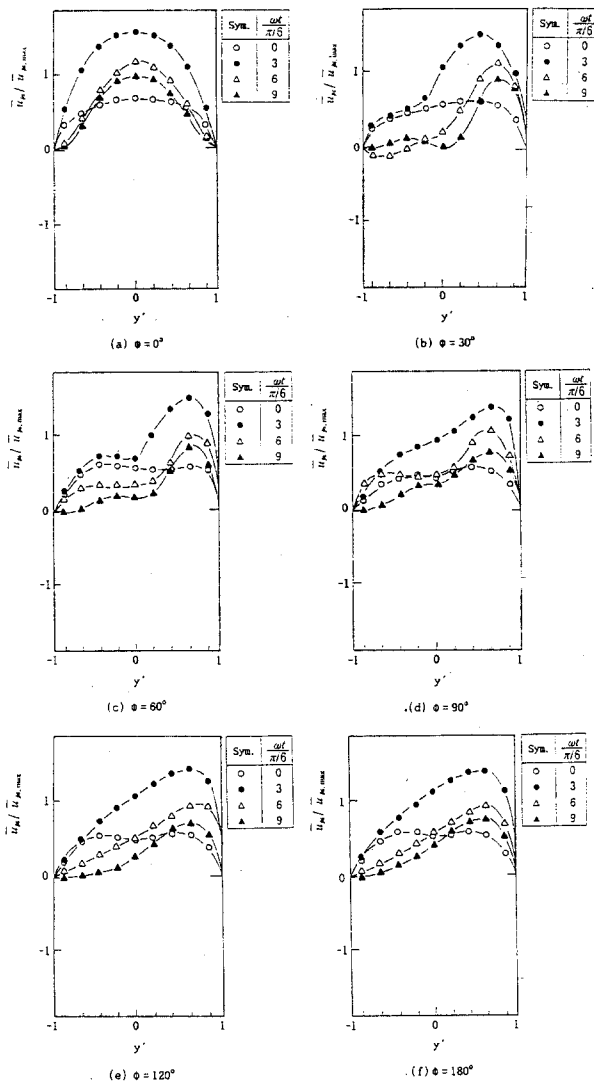


Fig. 5. Dimensionless axial velocity distribution along y' variation for laminar pulsating flow at $\omega^+ = 5.15$ and $A_1 = 0.33$

Fig. 6. Dimensionless axial velocity distribution along y' variation for laminar pulsating flow at $\omega^+ = 7.18$ and $A_1 = 0.65$

었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 덕트의 무차원 횡단면위치(z')에 따른 층류맥동유동의 축방향 속도분포를 나타내었다. Fig. 8은 감속유동에서 곡관부에 유입된 층류맥동유동이 하류로 진행하다가 굽힘각도가 90°를 넘어서면 거의 변화가 없는 형태를 보이고, Fig. 9는 가속 중간부분이나 감속 중간부분을 제외하고 덕트 중앙부분에서 거의 변화가 없는 형태를 고찰할 수 있으며, 또한 이들의 분포는 층류 정상유동의 속도분포와 유사함을 고찰할 수 있다.

Fig. 10은 무차원 각주파수가 7.18이고 속도진폭비가 0.65인 경우의 2차유동에 대한 곡관덕트의 속도분포를 덕트 횡단면의 위치(y')의 변화에 따라 나타내었다. 이들의

분포에서 곡관덕트의 굽힘 개시점에 유입된 층류맥동유동이 강한 원심력의 작용으로 주유동속도의 약 30% 정도에 이르는 강한 2차유동이 발생하며, Fig. 6에서는 유동이 하류로 진행함에 따라 축방향속도의 최대값 위치가 덕트의 중앙부분에서 외측벽쪽으로 이동하고, Fig. 8에서는 덕트의 중앙부분에서 거의 변화가 없는 유동형태를 보여주고 있다. 또한 운동량이 작은 유체는 내측벽쪽으로 이동하여 가속 중간영역에서는 이들의 분포에서 2차유동에 영향을 주는 가속효과가 거의 없게된다. 이들 결과로부터 덕트 중앙영역에 있어서 맥동유동의 속도분포가 오목한 형태로 보이는 것은 덕트 중앙영역에서 위상지연과 $|u_{os}|$ 의 분포가 내측단면에서 비교적 크게 나타나기 때문이라

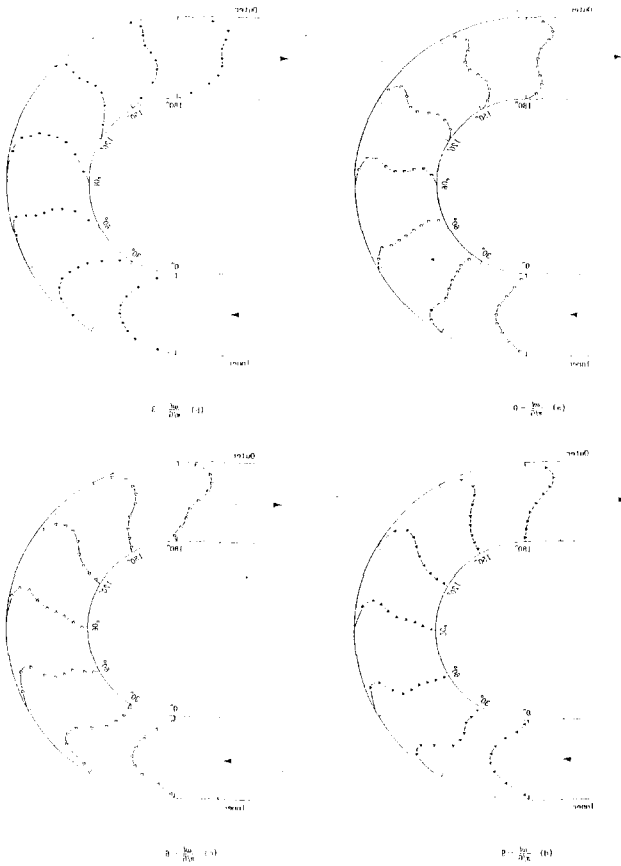


Fig. 7. Variation of velocity distribution for laminar pulsating flow in a curved duct at $De_{ta} = 450$, $\omega^+ = 7.18$ and $A_1 = 0.65$

고 생각된다.

3. 壁面 剪斷應力 分布

Fig. 11에는 층류맥동유동의 벽면 전단응력분포를 굽힘 각도의 변화에 따라 나타 내었는데 여기에서 종측은 1주기 중에서 T_w 값을 T_w 의 최대값으로 나눈 $T_w/T_{w,max}$ 값을 의미하고 횡측은 층류진동유동에서 나타낸 방법과 동일하게 좌측은 내측벽으로부터 덕트 중앙부분까지를, 우측은 외측벽으로부터 덕트 중앙부분까지를 나타낸다.

또한 1주기에 걸친 벽면 전단응력분포 (T_w)는 외측벽에서 최대가 되고 내측벽으로 갈수록 점점 감소되어 내측벽에서 최소의 값이 된다.

그러나 무차원 각주파수가 증가함에 따라 벽면 전단응력분포는 가속영역에서는 내측벽에 비하여 외측벽에서 훨

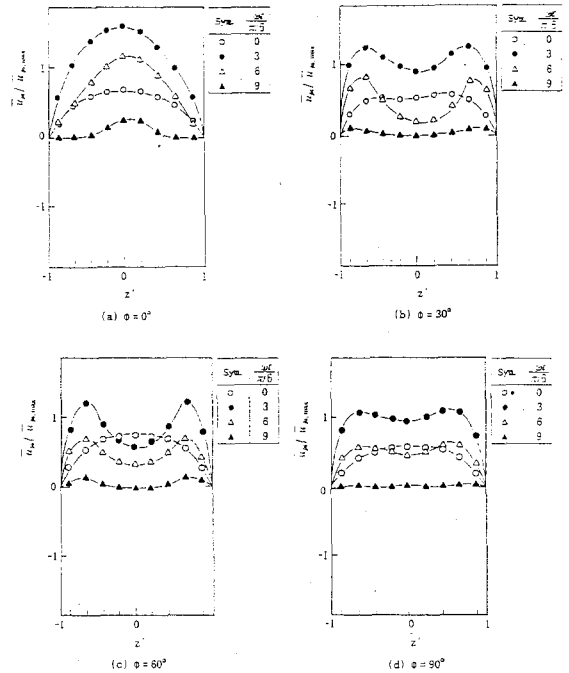


Fig. 8. Dimensionless axial velocity distribution along z' variation for laminar pulsating flow at $\omega^+ = 5.15$ and $A_1 = 0.33$

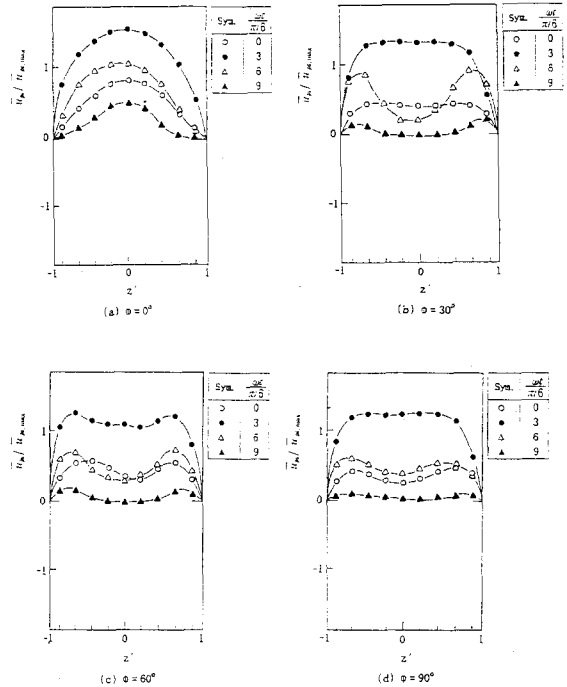


Fig. 9. Dimensionless axial velocity distribution along z' variation for laminar pulsating flow at $\omega^+ = 7.18$ and $A_1 = 0.65$

씬 큰값을 나타내고 있으며 감속영역에서는 가속영역에 비하여 작은값을 나타내지만 내측벽과 외측벽의 차는 거의 볼 수 없다.

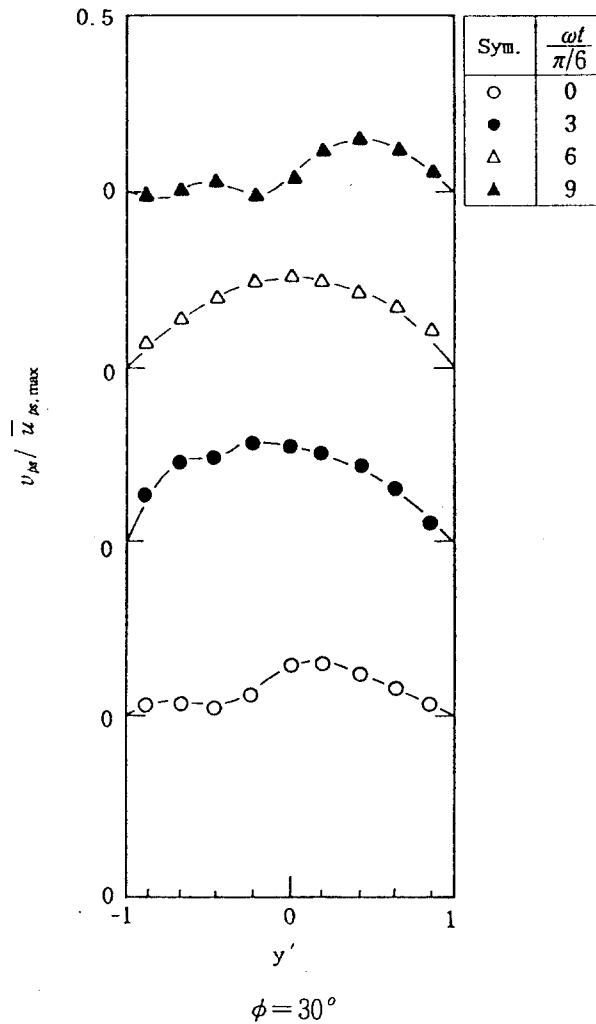


Fig. 10. Velocity distribution of secondary flow for laminar pulsating flow at $\omega^* = 7.18$ and $A_1 = 0.65$

4 入口길이

곡관덕트의 충류맥동유동에서 무차원 각주파수가 적은 경우에는 유동의 발달과정 현상이 준정상유동(quasi-steady flow)으로 가정할 수 있다. 속도분포의 실험결과를 정리한 Fig. 5에서 Fig. 10으로부터 곡관덕트에서 충류맥동유동의 발달과정을 고찰하였다.

곡관덕트의 시작점에서 곡관덕트의 주유동 속도분포는 2차유동의 영향을 받아 주유동 속도분포의 외측벽면쪽 속도가 증가되어 지면서 곡관덕트의 굽힘각 120° 부근부터는 거의 변화되지 않는 유동으로 되어지는 지점까지를 곡관덕트의 입구길이(Entrance Length of Curved Duct)로 결정하였다. 그러므로 본 실험조건에서 곡관덕트의 충류맥동유동에 대한 입구길이는 충류정상유동의 입구길이보다 약간 짧은 120° 부근으로 사료된다.

결론

180° 정사각단면 곡관덕트의 입구영역에서 비정상유동인 충류맥동유동의 유동특성에 대한 LDV와 RMR 및 PHASE 자료획득 및 처리 system에서 얻어진 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 곡관덕트의 충류맥동유동에서 얻은 임계 Dean수는 $De_{l.c.} = 90\omega^*$ 정도 이었으며 직관덕트만 설치되어 있을 때 얻은 임계 Dean수 보다 곡관덕트에서 얻은 임계 Dean수가 크다는 것을 알 수 있었다.
2. 충류맥동유동에서는 무차원 각진동수가 낮은 경우는 거의 정상유동과 같은 속도 분포의 형태를 이루는 준정상유동으로 가정할 수 있다.
3. 본 실험조건하에서 곡관덕트 2차유동의 최대속도는 강한 원심력의 영향으로 주유동 속도의 20~30%에 도달하였다.
4. 1주기에 있어서 벽면 전단응력분포는 외벽측에서 최대가 되고 내벽측으로 갈수록 감소되어 내측벽에서 최소값이 된다.
5. 본 실험조건에서 180° 정사각단면 곡관덕트의 충류맥동유동의 입구길이는 곡관덕트의 굽힘각이 120° 지점이었다.

후기

본 연구는 1993년도 교육부 학술연구조성비(ME93-B-01)에 의하여 수행되었으며 이에 대하여 감사의 뜻을 포함합니다.

Table 2. Experimental conditions of laminar pulsating flow

Angle	f(Hz)	R	ω^*	A_p	De_{in}	De_{ex}	A_1
0°	0.17	400	5.15	20	150	450	0.33
	0.33		7.18	20	290	450	0.65
30°	0.17	400	5.15	20	150	450	0.33
	0.33		7.18	20	290	450	0.65
60°	0.17	400	5.15	20	150	450	0.33
	0.33		7.18	20	290	450	0.65
90°	0.17	400	5.15	20	150	450	0.33
	0.33		7.18	20	290	450	0.65
120°	0.17	400	5.15	20	150	450	0.33
	0.33		7.18	20	290	450	0.65
150°	0.17	400	5.15	20	150	450	0.33
	0.33		7.18	20	290	450	0.65
180°	0.17	400	5.15	20	150	450	0.33
	0.33		7.18	20	290	450	0.65

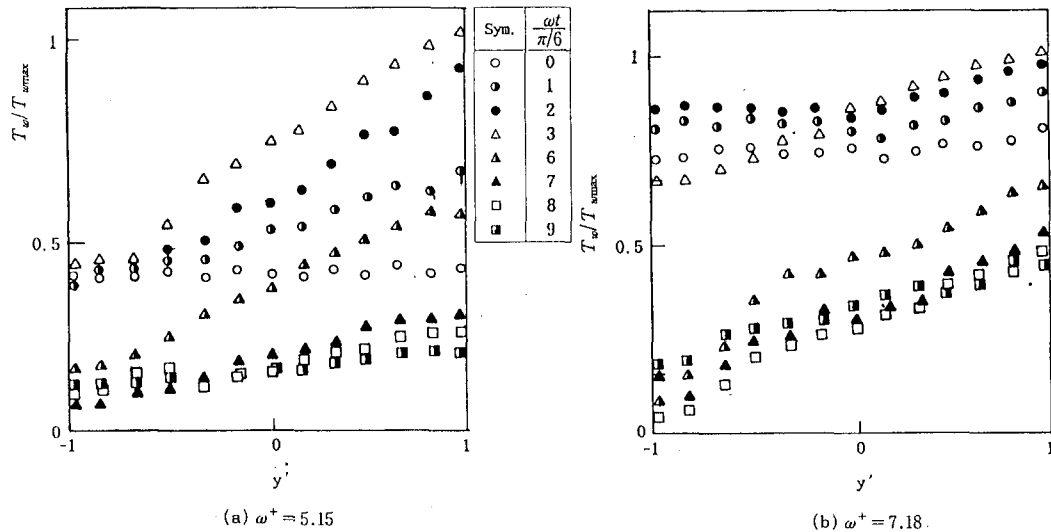


Fig. 11. Wall shear stress distribution for laminar pulsating flow

참 고 문 헌

1. E. O. Attinger, "+Pulsatile Blood Flow", Mc Graw-Hill Book Co., pp. 101~ 261, 1964.
2. T. J. Pedley, "The Fluid Mechanics of Large Blood Vessels", Cambridge University Press, pp. 160~ 234, 1980.
3. M. Sumida, K. Sudou, and T. Takami, "Pulsating Flow in Curved Pipes(2nd Report, Experiments)", Bul. of the JSME, Vol. 27, No. 234, pp. 2714~ 2721, 1984.
4. K. Nakano, and J. Tanino, "Research on Unsteady Flow in a Tube(The 1st Report, On Velocity Profile of Unsteady Flow)", 日本油壓と空気壓 學會論文集, pp. 216~222, 1976.
5. M. Akiyama, S. Takamura, K. C. Cheng, M. Suzuki, and I. Nishiwaki, "曲り圓管内 層流助走區間流れに関する研究 (第一報. 入口速度分布による發達の相違)", 日本機械學會論文集(B編) 50券 452號, pp. 990~998, 1982.
6. K. Sudou, T. Takami, and Miyauchi, "Some Observation on Oscillatory Water Flow in a Straight Pipe", Mem. Fac. Eng. Hiroshima Univ., Vol. 9, No. 3, 1987.
7. W. R. Dean, "Note on the Motion of Fluid in Curved Pipes," Phill Mag, 4, pp. 208~223, 1927.
8. W. H. Lyne, "Unsteady Viscous Flow in a Curved Pipe", J. Fluid Mech., Vol. 45, PT. 1, pp. 13~31, 1970.
9. R. G. Zalosh, and W. G. Nelson, "Pulsating Flow in Curved Tube", J. Fluid Mech., Vol. 59, pp. 693~705, 1973.
10. M. Ohmi and M. Iguchi, "Flow pattern and Frictional Losses in Pulsating Pipe Flow", Bulletin of the JSME, Vol. 24, No. 187, pp. 67~74, 1981.
11. A. F. Bertelsen, "An Experimental Investigation of low Reynolds Number Secondary Streaming Effects Associated with an Oscillating Viscous Flow in a Curved Pipe", J. Fluid Mech, Vol. 70, part. 3, pp. 519~527, 1975.
12. K. B. Chandran, and T. L. Yearwood, "Experinental Study of Physiological Pulsatile Flow in a Curved Tube", J. Fluid Mech, Vol. 111, pp. 59~85, 1981.
13. L. J. Chang and J. M. Tarbell, "Numerical Simulation of Fully Developed Sinusoidal and Pulsatile Flow in Curved Tubes", J. Fluid Mech, Vol. 161, pp. 175~198, 1985.
14. K. C. Cheng, Lin, Ran-Chau, and Ou, Jenn-Wuu, "Fully Developed Laminar Flow in Curved Rectangular Channels", J. Fluid Engineering, pp. 41~48, 1976.
15. W. M. Collins, and S. C. R. Dennis, "The Steady Motion of Viscous Fluid in a Curved Tube", Q. J. Mech. Appl. Math, Vol. 28, No. 1, pp. 133~156, 1974.
16. Y. Kita., R. Korou, K. Hirose, and A. Nakano, "Turbulent Flow in a Curved Duct with a Rectangular Cross-Section (6th Report, Flow in Entrance Region in Pulsatile Flow)", 日本機械學會論文集(B編),

55卷 511號, pp. 585~ 591, 1989.

17. K. N. Ghia and J. S. Sokhey, "Laminar Incompressible Viscous Flow in Curved Ducts of Regular Cross-Sections," Journal of Fluids Engineering, pp. 640~ 648, 1977.

18. R. J. Goldstein and D. K. Kreid, "Measurement of Laminar Flow Development in a Square Duct Using a Laser-Doppler Flowmeter, J. Applid Mech, pp. 813-818, 1967.

=국문초록=

정4각단면 180° 곡관덕트의 입구영역에서 충류매동유동의 속도분포, 전단응력분포와 입구길이 등의 유동특성에 대하여 레이저 도플러 유속계와 이송장치, RMR 및 PHASE software를 이용하여 자료획득 및 처리를 한 후 실험결과를 고찰하였다. 충류매동유동의 시간평균 Dean수(\overline{De}), 무차원 각진동수(ω^+) 및 속도진폭비(A_1) 등의 유동변수들이 유동특성에 미치는 영향을 실험적으로 해석하였다. 본 연구의 실험 범위에서의 충류매동유동은 준정상유동의 유동특성을 보였으며, 180° 곡관덕트에서 충류매동유동의 입구 길이는 굽힘각 120° 부근이었다.