

LDV에 의한 곡관덕트에서 난류맥동유동의 유동특성에 관한 실험적 연구

이흥구* · 손현철** · 이행남*** · 박길문***

An Experimental Study on Flow Characteristics of Turbulent Pulsating Flow in a Curved Duct by using LDV

Honggu Lee, Hyunchul Son, Haengnam Lee and Gilmoon Park

Key Words: turbulent pulsating flow(난류맥동유동), axial velocity distributions(축방향 속도분포), wall shear stress distributions(벽면 전단응력분포), entrance length(입구 길이)

Abstract

In the present study, flow characteristics of turbulent pulsating flow in a square-sectional 180° curved duct were experimentally investigated. Experimental studies for air flows were conducted to measure axial velocity and wall shear stress distributions and entrance length in a square-sectional 180° curved duct by using the LDV with the data acquisition and the processing system.

The experiment was conducted in seven sections from the inlet ($\phi = 0^\circ$) to the outlet ($\phi = 180^\circ$) at 30° intervals of the duct.

The results obtained from the experimentation were summarized as follows ;

(1) When the ratio of velocity amplitude (A_i) was less than one, there was hardly any velocity change in the section except near the wall and any change in axial velocity distributions along the phase. When the ratio of velocity amplitude (A_i) was 0.6, the change rate of velocity was slow.

(2) Wall shear stress distributions of turbulent pulsating flow were similar to those of turbulent steady flow. The value of the wall shear stress became minimum in the inner wall and gradually increased toward the outer wall where it became maximum.

(3) The entrance length of turbulent pulsating flow reached near the region of bend angle of 90°, like that of turbulent steady flow. The entrance length was changed by the dimensionless angular frequency (ω^+).

1. 서론

산업이 발달함에 따라 기계장치에 관련된 각종 관로계도 점차 대형화되고 복잡한 양상을 갖게 되어 곡관로의 유동에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.

곡관내에서 난류맥동유동에 관한 연구는 유체 기계에 연결된 덕트내의 유동, 항공기연소기에서

맥동연소와 노즐에서의 맥동제트유동, 유압관로에서의 파동현상, 동물의 혈액순환계통의 혈액유동 등이 있다. 이러한 난류맥동유동의 해석은 유체기계의 설계에 기초자료로 이용되기 때문에 유동해석이 절실하게 요구되고 있다.

최근 들어, 의용생체공학 분야인 혈액순환계 내 혈관계도 많은 곡관부를 가지고 있으므로 혈액유동에 대한 특성을 규명하는데 있어서 공학적 해석방법을 도입하여 연구가 진행중이다.

곡관로에 대한 연구는 19세기 말부터 본격적으로 유체공학상에 제기되었고 1920년대의 주로 이론적인 연구로부터 최근에 이르러서는 전자계산

* 동아인재대학 기계과

** 순천제일대학 건축설비과

*** 조선대학교 기계공학과

기의 대용량화 및 고속화에 따라 비정상유동에 관한 연구가 활발히 이루어졌고 Navier-Stokes 방정식의 비선형성이 검토되기 시작하였다.

맥동유동은 진동유동에 정상유동이 더해진 유동으로 이에 관한 연구를 살펴보면 Simth¹⁾가 대칭인 임의의 단면형상의 곡관내에서 관측방향으로 $-\partial p/\partial z = \rho \omega w_0 \cos \omega t + G$ 로 된 맥동압력구배가 가해진 유동을 이론해석적으로 조사한 연구가 행해졌다.

입구영역에 대한 연구로는 Singh²⁾는 속도진폭비(A_1)가 0.8인 경우의 이론해석을 하였는데, 관로의 굽힘에 대한 영향과 역압력구배로 인한 벽면 전단응력의 영향 때문에 경계층이 성장하는 감속영역 중의 벽면 전단응력에서 관측방향의 성분이 음의 값을 가짐을 조사하여 발표하였다.

Naruse³⁾등은 내부경동맥의 동맥에서, 굽힘이 큰 관에서 발달하는 맥동유동의 혈액유동특성을 LDV로 측정하였다.

Sumida⁴⁾ 등은 LDV로 $R_c=1/9\sim 1/33$, 무차원 각진동수(ω^+)= $2\sim 28$, $De=30\sim 300$, 속도진폭비(A_1)= $0.5, 1$ 의 범위에서 축방향 속도분포를 측정하였다.

본 연구에서는 정사각단면을 갖는 180° 곡관덕트에서 유동영역을 분류하여 임계 Dean수를 결정하고 LDV를 이용하여 축방향 속도분포 및 벽면 전단응력분포를 구한 후 실험결과를 비교·검토하여 입구길이를 결정하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

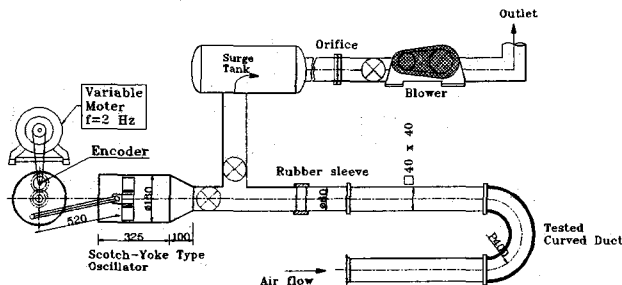


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험장치의 주요구성부를 살펴보면 매끄러운 아크릴로 제작된 덕트로 시험덕트는 정사각단면을 갖는 180° 곡관덕트로서 $2a \times 2b=40 \times 40$ (mm), 길이가 4000mm인 입구측의 직관덕트와 곡률반경이 400mm인 180° 곡관덕트 및 출구측에는 입구측과 같은 직관덕트로 구성되어있다.

입구측에는 벨마우스형 유입구를 설치하였고 출구측에는 정상유동을 발생시키기 위한 흡입형 Blower 및 360° 전 위상에 따른 특성을 파악하기 위해 R.M.R(Rotating Machinery Resolver)을 변속모터 축에 연결하고 Encoder를 Scotch-yoke형 가진기에 설치하였다. 실험에 사용한 자동유체의 산란입자는 정류상자를 통과한 모기향을 사용하였다.

곡관덕트내의 축방향 속도분포와 벽면 전단응력은 LDV를 이용하였는데 LDV시스템은 최대출력 2W인 Ar-Ion Laser이고 광학계의 배치는 2색 3빔 방식의 후방산란형이며 이 시스템을 장착하여 이동할 수 있는 3차원 이송장치가 설치되어 있다.

실험장치의 개략도는 Fig.1에 나타내었고 곡관덕트의 좌표계는 Fig. 2에 나타내었다.

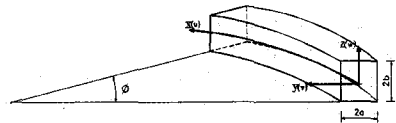


Fig.2 Coordinate system and velocity component in a curved duct

2.2 실험 방법

맥동유동은 정상과 진동유동의 합성으로 이루어진 유동으로 정상유동은 송풍기에 의하여 시험덕트에 유입된 유동으로 주어지고 진동유동은 Scotch-yoke형 가진기에 의하여 발생시켰다.

정상유동의 유속조절은 Blower를 구동하는 변속모터의 회전수나 유량제어밸브로 조절하였고 진동유동은 Scotch-yoke형 가진기에 부착된 크랭크판의 위치조절에 의하여 피스톤 진폭을 조절하여 실험하였다.

본 실험에서는 각진동수(f)는 2.0Hz, 피스톤 진폭(A_p)은 80mm, 진동 Dean 수를 4470으로 하고, 시간평균 Dean 수(De_{ta})는 3350과 7380으로 변화시켰을 때, 속도진폭비(A_1)는 0.6과 1.3이었다.

난류맥동유동의 유동 형태를 고찰하기 위해 무차원 각진동수(ω^+)를 18.5로 고정하고 시간평균 Dean 수를 변화시키면서 곡관덕트의 측정부를 30° 등간격으로 변화시키면서 측정하였다.

난류맥동유동의 시간평균 레이놀드수는 $Re_{ta} =$

$$\frac{u_{m,t} \cdot D_h}{\nu} \text{ 으로부터 계산하여 } De_{ta} = 3350, 7380$$

으로 하였고 무차원 각진동수는 $\omega^+ = \frac{D_h}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$,

속도진폭은 $A_1 = |\bar{u}_{m,os,1}| / \bar{u}_{m,t}$ 으로부터 계산하였다.

난류맥동유동에 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

180° 곡관의 완전 발달된 영역인 굽힘각 $\phi = 150^\circ$ 의 덕트 중앙에서 진동 Dean 수를 고정하고 시간평균 레이놀드수를 변화시키면, 유동은 층류 맥동유동으로부터 천이맥동유동, 난류맥동유동으로 변화시켜 Fig. 4와 같이 속도파형을 열선신호

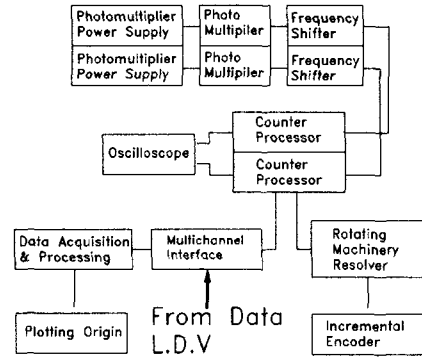


Fig.3 Data acquisition and processing system

로부터 획득하여 광기록계에 기록하여 그 파형을 분석하여 난류맥동유동의 범위를 결정하였다. 곡관덕트의 입구부에서 하류쪽으로 진행할수록, 덕트의 중심에서 벽면쪽으로 갈수록 감속위상에 난류성분이 많이 나타나게 됨을 알 수 있다. 또한, 시간평균 Dean 수가 증가함으로써 전위상에 난류성분이 나타나게 됨을 알 수 있다.

정사각단면 덕트내에서 완전한 난류성분이 나타나기 시작한 임계 맥동유동의 시간평균 Dean 수를 결정하기 위해 다음 식을 이용하였다.

$$De_{t,cr} = \left(\frac{u_{m,t} \cdot D_h}{\nu} \right) \sqrt{D_h / 2R}$$

본 실험에서는 진동유동의 Dean 수를 4470으로 고정하였을 때, 시간평균 Dean 수가 3350이상의 난류유동영역 상태에 있음을 확인하였다.

맥동유동의 유동특성은 시간평균 Dean 수와 정상유동⁵⁾의 Dean 수가 일대일로 비례함을 알 수 있다.

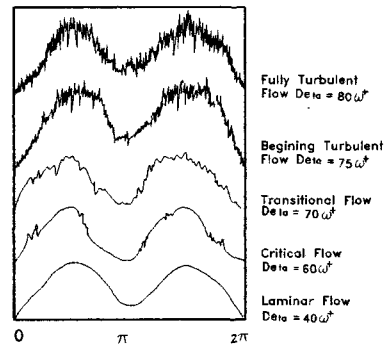


Fig. 4 Waveforms of pulsating flow in a curved duct by hot-wire anemometer

3.2 축방향 속도분포

정상각단면을 갖는 곡관덕트내의 맥동유동의 유동특성에서 곡률반경은 유동에 큰 영향을 미치지 않으므로 주로 시간평균 Dean 수와 속도진폭비에 의해 지배된다.

Fig 5와 6은 곡관덕트에서 굽힘각의 변화에 따른 난류맥동유동의 축방향 속도분포를 y' 의 변화에 따라 나타낸 것으로 속도의 최대값의 위치가 덕트의 중심부에서 외측벽으로 이동하고 있음을 알 수 있다.

먼저, Fig 5는 무차원 각진동수 (ω^*)가 18.5이고, De_{ta} 가 3350, 속도진폭비(A_1)가 1.3인 경우인데, 난류맥동유동의 거의 대부분이 정상유동의 발달과정과 비슷한 형태를 이루고 있음을 알 수 있다.⁵⁾ 곡관의 속도가 큰 부분이 이들의 분포에서 덕트 중앙부분으로부터 외벽측으로 정상유동에서와 같이 이동하는 것을 볼 수 있으며 속도구배는 내벽측에서는 완만하고 외벽측에서는 크게 된다.

속도간 위상의 벗어남이 크게 됨에 따라 축방향 속도분포는 점차적으로 관로 중앙부에서 오목형으로 되는 현상이 나타나기 시작한다.

위상이 진전하여 가속이 시작되면 ($\omega t/\pi/6 \approx 9 \sim 0$), 내벽측의 유체는 강한 순압력구배에 의해 가속되고 유동은 급속하게 반전하여 순방향으로 변한다. 그래서, 축방향 속도의 최대값은 외벽측에 생긴다.

속도진폭비가 1.3인 유동에서, 축방향 속도분포는 곡관의 입구측인 $\phi=0^\circ$ 에서는 거의 좌우가 대칭인 속도분포를 나타내다가 $\phi=30^\circ$ 와 $\phi=90^\circ$ 에서는 원심력에 의해 가장 큰 속도가 외벽측으로 이동하여 내벽과 외벽과의 속도차가 크게 나타나고, 평균속도가 양의 값임에도 불구하고 $\omega t/\pi/6=9$ 에서 내벽측에서 역류하고, $\phi=60^\circ$ 되는 지점에서는 주유동과 2차유동의 속도에너지가 거의 평형을 이루어 2차유동의 영향으로 주유동의 속도가 상쇄되어 진폭이 작은 형태로 나타난 것으로 생각되며, $\phi=150^\circ$ 되는 지점부터는 점차적으로 안정된 유동을 보이고 있다.

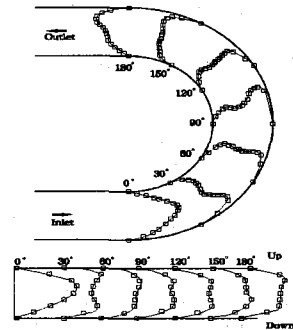
Fig 6는 무차원 각진동수 (ω^*)가 18.5이고, De_{ta} 가 7380, 속도진폭비(A_1)가 0.6인 경우인데, 축방향 속도의 관로 중앙부에 있어서 오목한 현상은 Dean 수가 더욱 크게 되면, 원심력의 극대값은 내벽측과 외벽측의 2개소에서 생기게 된다.

그러나 위상의 진전과 관로 중앙부의 유체는 가속되어서 축방향 속도의 분포가 평탄하게 되므로 부가적인 와는 소멸된다. 시간평균 Dean 수가 증가하면 중앙부의 볼록한 부분이 대칭에 가까운 분포형으로 된다.

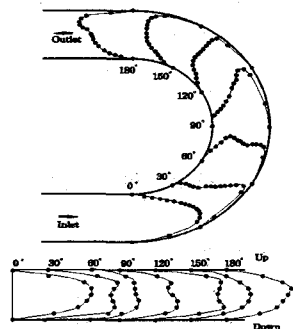
Fig 5와 비교하여 시간평균 Dean 수가 높아져 속도진폭비가 낮아지기 때문에 벽면의 점성력에 비하여 관성력이 상대적으로 증가하여 곡관내 내측과 외측의 속도구배는 비교적 완만하고 속도의 변화가 작아지는 것을 관찰할 수 있다.

전 위상에 걸쳐 굽힘각이 30° 인 지점을 지나면서 축방향의 완만한 속도분포가 형성되며, 90° 부근에서는 annular 분포가 나타난다.

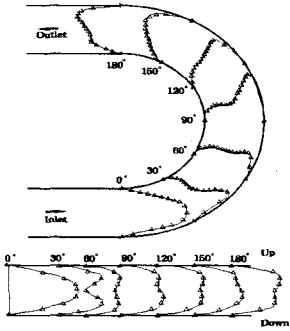
1주기 중 작용하는 원심력의 크기가 같으므로 외벽측에서 축방향 속도가 큰 형태로 되며 발달한 곡관내 유동으로 된다.



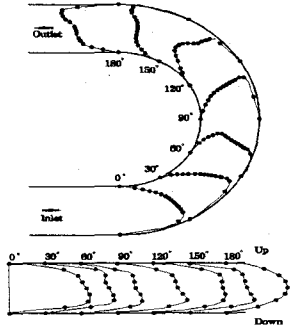
(a) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 0$



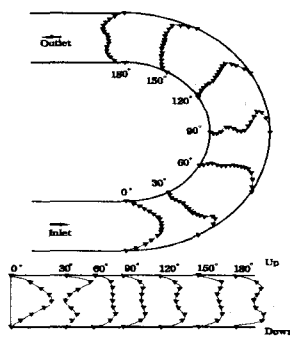
(b) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 3$



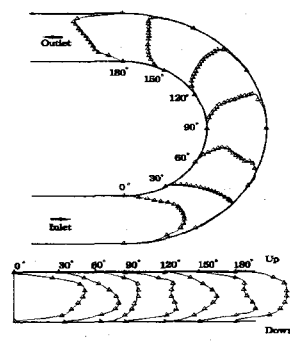
(c) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 6$



(b) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 3$

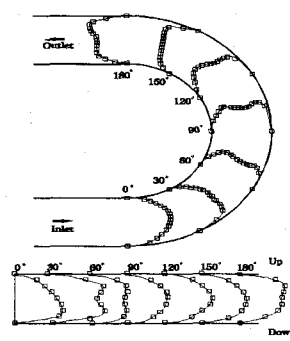


(d) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 9$

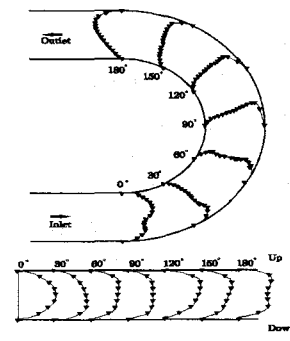


(c) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 6$

Fig. 5 Variation of axial velocity distributions of turbulent pulsating flow at the $De_{ta}=3350, \omega^+=18.5, A_1=1.3$



(a) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 0$



(d) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 9$

Fig. 6 Variation of axial velocity distributions of turbulent pulsating flow at the $De_{ta}=7380, \omega^+=18.5, A_1=0.6$

3.3 벽면 전단응력분포

완전 발달되었다고 생각되는 곡관의 굽힘각이 150° 되는 지점에서 위상각에 따라 측정된 난류 맥동유동의 벽면 전단응력(τ_w)을 벽면 전단응력의 최대값($\tau_{w,max}$)으로 나누어 무차원화한 분포를 Fig.7에 나타내었다.

그림의 종축은 1주기중의 τ_w 의 값을 $\tau_{w,max}$ 으로 나눈값을 나타냈고 횡축은 y' 의 위치를 나타냈는데 좌측은 관의 내측을 우측은 관의 외측을 나타내었다.

시간평균 Dean수가 작은 경우 축방향 속도 변동은 2차유동을 일으켜서 관벽 부근의 속도구배를 크게 한다. 이 원인은 진동 경계층내의 유동이 2차유동의 영향을 받고 그 결과 관벽의 속도구배가 완만하게 되고 있음을 알 수 있다. 또한, 시간평균 Dean 수가 증가하여도 관벽 부근에서의 유동상태가 무차원 각진동수에 의해 지배됨을 알 수 있다.

벽면 전단응력 분포는 축방향 속도의 변동이 내벽 단면에서 심하기 때문에 내벽에서의 값은 가속 후기(위상각 $(\omega t/\pi/6) = 0 \sim 3$)에 외벽에서와 같은 정도의 값을 갖고 감속 후기(위상각 $(\omega t/\pi/6) = 6 \sim 9$)에서는 내벽 근처의 반원주상에서 낮은 값을 나타낸다.

Fig. 7과 같이 속도진폭비가 1.3인 경우 감속위상에 한정하여 내측 벽면에서 낮은 전단응력값을 나타내고 가속구간인 경우 큰 전단응력 분포를 나타냄을 알 수 있다. 또한, 1주기에 걸친 벽면 전단응력분포(τ_w)는 외벽측에서 최대가 되고 내벽측으로 갈수록 점점 감소되어 내벽측에서 최소값이 된다. 그러나 속도진폭비(A_1)이 감소함에 따라 벽면 전단응력분포는 위상각에 관계없이 점점 일정한 값을 나타내고 있다.

두 그림을 비교하여 보면 난류맥동유동의 벽면 전단응력분포는 속도진폭비에 관련됨을 알 수 있고 이는 유동의 비정상성에 의해서 관성력이 약해지고 점성력이 커지기 때문이다.

3.4 입구 길이

곡관덕트의 입구유동영역에서 난류맥동유동은 덕트입구로부터 유체유동이 무차원 축방향의 하류로 진행함에 따라 덕트 벽면의 점성력으로 인해 경계층이 형성되면서 횡방향과 축방향의 속도

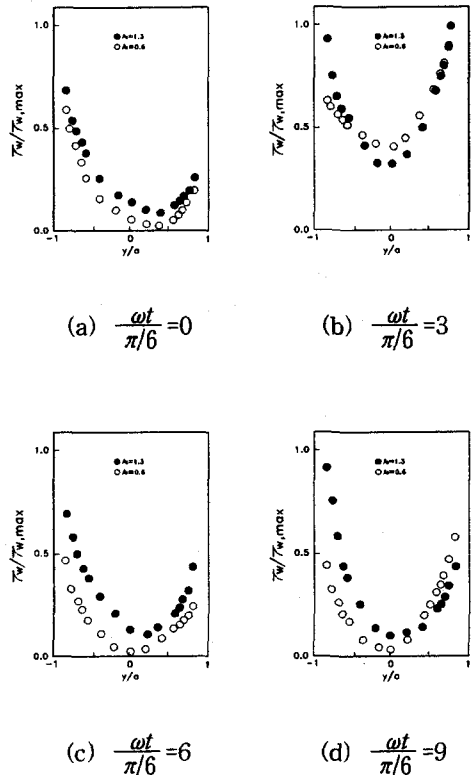


Fig. 7 Comparison of wall shear stress distributions of turbulent pulsating flow at the $\omega^+ = 18.5$, $A_1 = 1.3$ and 0.6

분포가 점점 발달하여 완전히 발달된 유동영역에서는 속도분포의 변화가 거의 없게 되어 일정한 속도분포형을 이루게 된다. 이 지점부터가 유동이 완전히 발달된 난류맥동유동이다.

곡관덕트의 난류맥동유동에서 무차원 각진동수가 낮은 경우에는 유동의 발달상황이 준정상적임을 볼 수 있는데 무차원 각진동수가 증가함에 따라 입구길이도 훨씬 짧아진다.

곡관덕트의 입구영역에서는 상류와 달리 하류 방향으로 진행함에 따라 전단응력분포가 감소하여 완전히 발달된 유동영역에서는 전단응력분포의 기울기가 일정해지는 현상을 고찰하여 입구길이를 결정하였다.

본 실험은 굽힘의 시작점으로부터 y' 에 대한 난류맥동유동의 축방향 속도분포의 형상이 거의 변화가 없고 충분히 발달되었다고 예상되는 굽

힘각 150°인 지점에서 평균유속을 구하고 단면 평균 유속의 최대값($\bar{u}_{m,\omega} + |\bar{u}_{m,os,1}|$)이 이 값을 초과하지 않는 범위에서 실험하였다.

이 지점에서 얻은 결과는 굽힘각이 90°인 위치에서 얻은 결과와 잘 일치하였고 따라서 본 실험 조건에서 입구길이는 난류정상유동의 입구길이와 비슷한 90° 부근이었다. 이들 고찰로부터 난류맥동유동의 입구길이는 시간평균 Dean수에 영향을 받지않고 난류진동성분이 난류정상성분을 상쇄시키는 작용을 함을 알 수 있다.

4. 결론

정사각단면 180° 곡관덕트에서 난류맥동유동의 축방향 속도분포와 벽면 전단응력분포와 입구 길이에 관한 연구를 규명하기 위해 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 천이맥동유동에서 난류맥동유동으로 변화되는 시간평균 임계 Dean수는 $75\omega^+$ 정도이다.
2. 축방향 속도분포는 속도 진폭비(A_1)이 1보다 작은 경우 벽부근을 제외한 단면내의 속도 변동의 차는 거의 없고 위상에 따른 축방향 속도분포 형상도 거의 변하지 않았다. 속도 진폭비가 0.6일 때, 속도변화율은 느렸고 속도분포도 정상유동과 거의 비슷하였다.
3. 벽면 전단응력분포는 난류정상유동과 유사한 형태를 보이고 있으며 일반적으로 내벽측에서 벽면 전단응력이 최소값을 갖고 외벽측으로 이동함에 따라 점차적으로 증가하여 외벽측에서 최대값을 갖는다.
4. 입구길이는 난류정상유동과 비슷한 $\phi=90^\circ$ 부근이었고 이는 무차원 각진동수에 따라 변화됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Smith, F. T. : " Fluid Flow into a Curved Pipe" , Proc.R.Soc.Ser. A. 351: 71-87, 1976.
- (2) Singh, M.P. : " Entry Flow in a Curved Pipe" , J. Fluid Mech, Vol.65, part.3 : 517-539, 1974.

- (3) Naruse, T., et al : " A Study on a View Pulsating Flow in a Cerebral Arterial" ,Journal of JSME(B), Vol.57 No.541: 3018-3025, 1991.
- (4) Sumida, M., and Sudou, K. : " Pulsating Flow in Curved Pipes(5th Report, Velocity Distribution in Entrance Region)" , Journal of JSME(B), Vol.61 No.587 : 2442-2449, 1995.
- (5) Son, et al : " A Study on the Axial Velocity and Wall Shear Stress Distributions of Turbulent Steady Flow in a Curved Duct" , proceedings of the KSME 1999 Autumn Annual Meeting : M64-M69, 1999.