

곡관덕트의 입구영역에서 천이비정상유동의 속도분포와 임계딘수에 관한 연구

박길문* · 이행남* · 조병기** · 봉태근***

A Study on Velocity Profiles and Critical Dean Number of
Developing Transitional Unsteady Flows in a Curved Duct

G.M. PARK* · H.N. LEE* · B.K. CHO** · T.G. BONG***

Key words : Unsteady Flow(비정상유동), Critical Dean number(임계딘수), Transitional Pulsating Flow(천이진동유동), Secondary Flow(2차유동), Entrance Length(입구길이)

Abstract

In this paper, an experimental investigation of characteristics of developing transitional unsteady flows in a square-sectional 180° curved duct are presented. The experimental study using air is carried out to measure axial velocity profiles, secondary flow velocity profiles and entrance length by using Laser Doppler Velocimeter (LDV) system. The flow development is found to depend upon Dean number, dimensionless angular frequency, velocity amplitude ratio and curvature ratio. Of special interest is the secondary flow generated by centrifugal effects in the plane of the cross-section of the duct. The secondary flows are strong and complicate at entrance region. The entrance length of transitional pulsating flow is obtained to 120° of bended angle of duct in this experimental conditions.

기호설명

A_1 : Velocity amplitude ratio $\left(= \frac{|\bar{u}_{m, os, 1}|}{\bar{u}_{m, ta}} \right)$

cr : Critical value

De : Dean number

$$\left(= Re\sqrt{a/R} = Re = \sqrt{\frac{D_h}{2R}} = D_h/2R \cdot (D_h \cdot \bar{u}_m / \nu) \right)$$

D_h : Hydraulic diameter $(= 4ab/(a+b))$

f : Frequency of oscillation

Le : Entrance length

Rc : Curvature ratio $\left(= \frac{a}{R} = \frac{D_h}{2R} \right)$

* 조선대학교 공과대학 기계공학과(원고접수일 : 98년 6월)

** 조선대학교 병설 공업전문대학 기계설계과

*** 목포해양대학교 기관공학부

- Re : Reynolds number
- ta : Time - averaged value
- u, v, w : Velocity components in x, y and z - axis, respectively
- \bar{u}_m : Cross - sectional mean velocity
- x' : ($=vx/ab \bar{u}_m$)
- y' : ($=y/a$)
- z' : ($=z/b$)
- $| |$: Amplitude of oscillatory velocity
- $-$: Time - averaged value

그리스 문자

- ϕ : Deflection angle of duct
- ω : Angular frequency($=2\pi f$)
- ω^+ : Dimensionless angular frequency
 $(= \frac{Dh}{2} \sqrt{\omega/\nu})$

1. 서 론

유체유동 중에서 층류유동에 대한 연구는 학술적인 면에서 2차유동과 압력손실의 이론해석과 실험이 많이 행해졌고, 난류유동에 대한 연구는 실용상의 점에서 압력손실에 관한 실험적인 연구가 많이 행해졌다. 그러나, 천이유동에 관한 연구는 층류유동이나 난류유동의 연구에 비해 그리 많지 않은 실정이다. 비정상유동에 대한 해석은 유체기계의 설계에 기초자료가 될 뿐 아니라 공조덕트설비, 열교환기, 가스터빈, 압축기, 제트엔진 및 로켓트의 맥동 연소와 맥동제트 등의 유체기계 내부에 대한 유동을 해석하는데 아주 중요하게 응용될 수 있기 때문에 이에 대한 유동해석이 절실하게 요구되고 있다.

관로유동에 대한 연구는 최근에는 관심이 곡관로의 유동에 모아지고 있고, 곡관로 중에서도 원형 단면의 관로에 대한 연구⁽¹⁻²⁾로부터 시작되어 비원형 단면 관로의 연구도 많아지고 있다.

곡관로 2차유동에 관한 연구⁽³⁻⁵⁾와 맥동유동의 이론적 연구⁽⁶⁾, 입구영역에서의 유동⁽⁷⁻¹⁰⁾에 관한 연구, 맥동유동의 혈액유동특성에 관한 연구⁽¹¹⁾ 등이

발표되었다.

본 연구에서는 정4각단면을 갖는 180° 곡관덕트내에서 유동영역을 분류하여 임계딘수를 결정하였고, 천이비정상유동인 천이맥동유동을 LDV로 속도분포를 측정하고, 그 실험결과를 비교검토하여 입구길이를 결정하였으며, 천이맥동유동의 속도진폭비, 딘수, 무차원 각진동수 등이 맥동유동의 유동특성에 미치는 영향과 2차유동의 특성을 규명하였다.

2. 실 험

2.1 실험장치

실험장치의 주요부는 180° 곡관덕트, 변속모터에 연결된 스코치-요크형 가진기, 송풍기 등으로 구성되어 있다. 180° 곡관덕트는 아크릴로 제작하였고, 입구측에는 단면의 크기가 40mm×40mm이고 길이가 4000mm인 직관덕트에 곡률반경이 400mm이고 직관덕트와 단면크기가 같은 180° 곡관덕트를 연결한 다음, 출구측에는 입구측과 같은 직관덕트를 연결하였다. 곡관덕트내의 축방향 유동과 2차유동을 측정은 LDV를 이용하였는데, 이 LDV 시스템은 최대출력 2W인 Ar-Ion 레이저이고, 광학계의 배치는 이중빔 형식이며 2색 3빔 방식의 후방산란형이다. LDV 시스템을 적재하여 이동할 수 있는 3차원 이송장치가 설치되어 있다. 변속모터와 스코치-요크형 가진기를 연결하는 회전축에 엔코더를 설치하여 맥동유동의 속도에 대한 위상을 Rotating Machinery Resolver (RMR)에서 분석하였다.

실험장치의 개략도는 Fig. 1에, 곡관덕트의 좌표

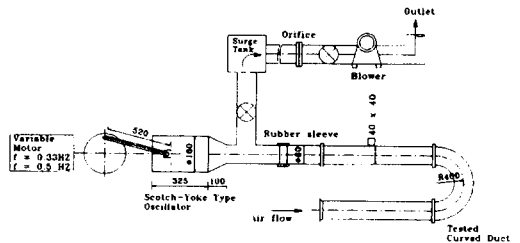


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

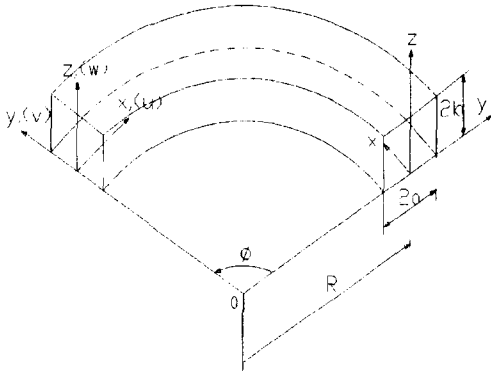


Fig. 2 Coordinate system of the curved duct

계는 Fig. 2에 각각 나타내었다.

2.2 실험방법

맥동유동은 정상유동과 진동유동이 합성되어 이루어진 유동으로서 정상유동은 송풍기에 의하여 시험덕트에 유입된 유동으로 주어지고, 진동유동 성분은 스코치-요크형 가진기에 의하여 발생시켰다. 정상유동은 송풍기의 회전수를 조절하거나, 스톱밸브의 개도를 조절함으로써 변화시켰고, 진동유동은 스코치-요크형 가진기의 변속모터에 의하여 주파수를 변화시킬 수 있으며, 크랭크판의 위치를 조절하여 피스톤의 진폭을 조절할 수 있다. 먼저, 유동이 완전발달된 굽힘각 150° 되는 지점의 중앙에 삽입한 열선으로부터의 신호를 열선유속계를 통하여 광기록계에 기록하여, 그 파형으로부터 천이맥동유동영역을 구분하였다. 가진기에 연결된 변속모터에 의하여 진동유동의 각진동수(f)를 0.33Hz으로, 피스톤의 진폭(A_p)을 40mm로 고정하였을 때의 진동진폭을 320으로 하고, 시간평균 진폭($Delta$)는 460과 530으로 변화시키면서 실험을 하였다. 이 때의 속도진폭비(A_1)는 각각 0.68과 0.59였다. 실험에 사용한 산란입자는 입자직경은 0.1~0.3 μ m의 모기향 연기를 사용하였다.

본 실험에서 LDV와 LDV이송장치를 이용하여 비정상유동인 맥동유동에 대하여 곡관부에서 30° 등간격으로 덕트 횡단면 위치 변화에 따라 속도분포를 측정한 후 유동해석 하였다.

이들의 천이맥동유동에 대한 측정값은 LDV를 통하여 얻은 실험값을 RMR과 Scotch-yoke 형

Table 1. Experimental conditions of transitional pulsating flow

Angle	f(Hz)	R(mm)	ω^*	A_p (mm)	De_{os}	$Delta$	A_1
0°	0.33	400	7.48	40	320	460 530	0.68 0.59
30°	0.33	400	7.48	40	320	460 530	0.68 0.59
60°	0.33	400	7.48	40	320	460 530	0.68 0.59
90°	0.33	400	7.48	40	320	460 530	0.68 0.59
120°	0.33	400	7.48	40	320	460 530	0.68 0.59
150°	0.33	400	7.48	40	320	460 530	0.68 0.59

가진기의 회전축에 부착시킨 엔코더의 신호에 따라 360°의 전위상에서 실험자료를 받아들여 PHASE 소프트웨어에서 처리였다. 측정위치는 y' 방향은 15 지점을 측정하였고, z' 방향은 7 지점을 측정하였다.

Table 1에는 본 실험을 수행한 천이맥동유동의 실험조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동영역 분류 및 임계진폭의 결정

천이맥동유동의 유동영역은 덕트의 굽힘각도가 90° 이후인 완전 발달된 지점인 150°의 덕트 중앙에서 분류하였다. 우선 진동진폭을 고정하고, 시간평균 레이놀즈수를 변화시키면, 유동은 층류맥동유동으로부터 천이맥동유동, 난류맥동유동으로

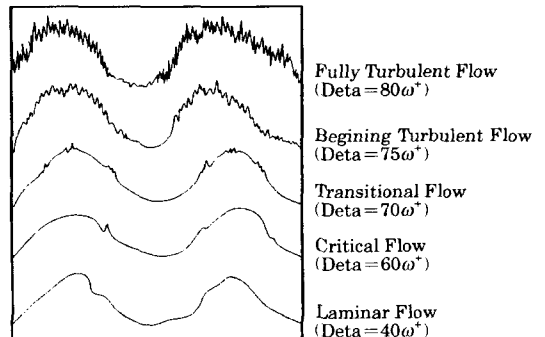


Fig. 3 Waveforms of pulsating flow in a curved duct from hot-wire anemometer

변화된다. 열선유속계의 열선센서로 부터 얻어진 속도파형을 광기록계에 기록하여 Fig. 3에 나타내었고, 그 파형을 분석하여 유동영역을 구분하고 임계단수를 구하였다.

맥동유동의 단 수의 계산은 다음식을 이용하였다.

$$Delta_{cr} = \left(\frac{u_{m,ta} \cdot Dh}{v} \right) \sqrt{Dh/2R} \quad (1)$$

본 실험조건에서 유동이 완전 발달된 굽힘각도가 150° 부근인 곡관부에서 층류맥동유동에서 천이맥동유동으로 옮겨가는 시간평균 임계단 수는 60ω' 정도였고, 천이맥동유동에서 난류맥동유동으로 옮겨가는 시간평균 임계단수는 75ω' 정도였다.

3.2 軸方向 速度分布

Fig. 4와 Fig. 5에는 천이맥동유동의 y' 의 변화

에 따른 축방향 속도분포를 곡관덕트의 굽힘각도의 변화에 따라 나타내었다. 이들의 분포는 진동단수가 320, 무차원 각진동수(ω')가 7.48이고, 속도진폭비(A1)가 0.68과 0.59일 때의 결과를 보여주고 있다.

Fig.4는 무차원 각진동수ω'가 7.48이고, Delta=460, 속도진폭비(A1)가 0.68인 경우인데 천이맥동유동의 거의 대부분이 정상유동의 발달과정과 비슷한 형태를 이루고 있음을 알 수 있었고, 이는 유동의 비정상성으로 인해서 관성력이 약해지고 점성력이 상대적으로 커지기 때문으로 사료된다. 또한 곡관의 속도가 큰 부분이 이들의 분포에서 덕트 중앙부분으로부터 외벽측으로 정상유동에서와 같이 이동하는 것을 볼 수 있으며 속도구배는 내벽측에서는 완만하고 외벽측에서는 크게 된다.

무차원 각진동수가 7.48정도의 유동에서는 관로

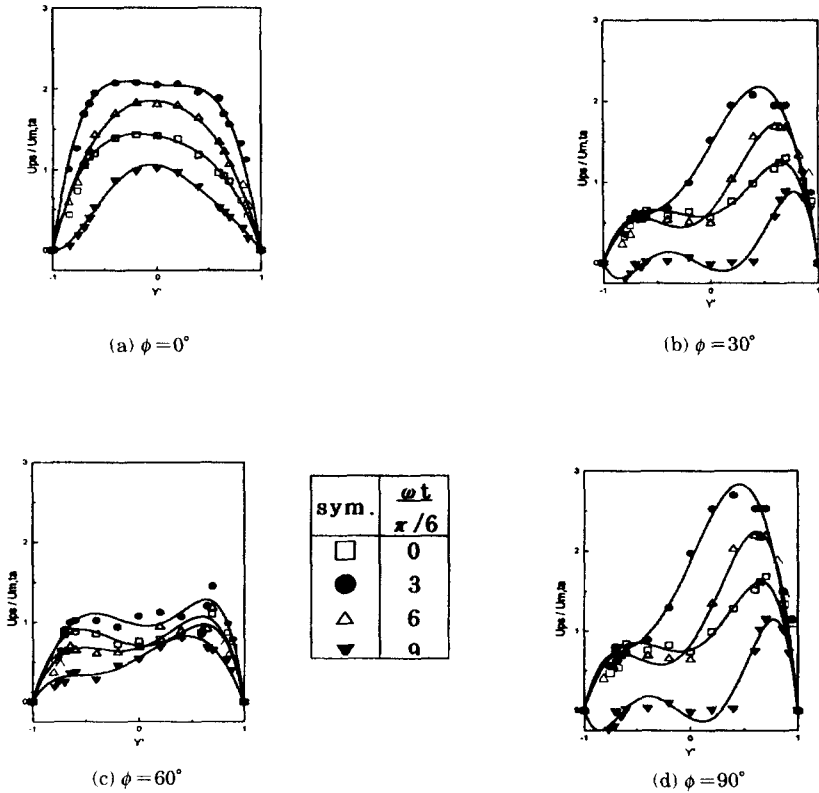


Fig. 4 Axial velocity distributions along y' variation in a curved duct for transitional pulsating flow at Delta=460, ω'=7.48, A1=0.68

의 급힘에 의한 영향에 대하여 무차원 각진동수의 증가에 의한 비정상성의 영향이 현저하게 되기 때문에 유동은 아주 복잡한 거동을 나타낸다. 속도간의 위상의 벗어남이 크게 되기 때문에 축방향 속도 분포는 점차적으로 관로 중앙부에서 오목형으로 되는 현상이 나타나기 시작한다. 위상이 진전하여 가속이 시작되면 (위상각($\omega t/\pi/6$)= $9\sim 0$), 내벽측의 유체는 강한 순압력구배에 의해 가속되고 유동은 급속하게 반전하여 순방향으로 변한다. 그래서 축방향 속도의 최대값은 외벽측에 생긴다.

속도진폭비(A_1)가 0.68인 유동에서, 축방향 속도는 곡관의 입구측인 ϕ (급힘각)가 0° 인 지점에서는 거의 좌우가 대칭인 속도분포를 나타내다가 ϕ 와 $\phi=90^\circ$ 에서 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 모양으로 나타난다.

Fig. 5는 무차원 각진동수(ω^+)가 7.48이고 $Delta=530$, 속도진폭비(A_1)가 0.59인 경우인데 역시 정상성분의 영향으로 축방향 속도분포는 정상유동과 비슷한 속도분포형을 보이고 있다. 축방향 속도의 관로 중앙부에 있어서 오목한 현상은 단수가 더욱 더 크게 되면, 원심력의 극대값은 내벽측과 외벽측의 2개소에서 생기게 된다. 그러나 위상의 진전과 관로 중앙부의 유체는 가속되어서 축방향 속도의 분포가 평탄하게 되므로 부가적인 와는 소멸한다. 시간평균 단수가 증가하면 중앙부의 볼록한 부분이 대칭에 가까운 분포형으로 된다. Fig. 4와 비교하여 시간평균 단수($Delta$)가 높아져 속도

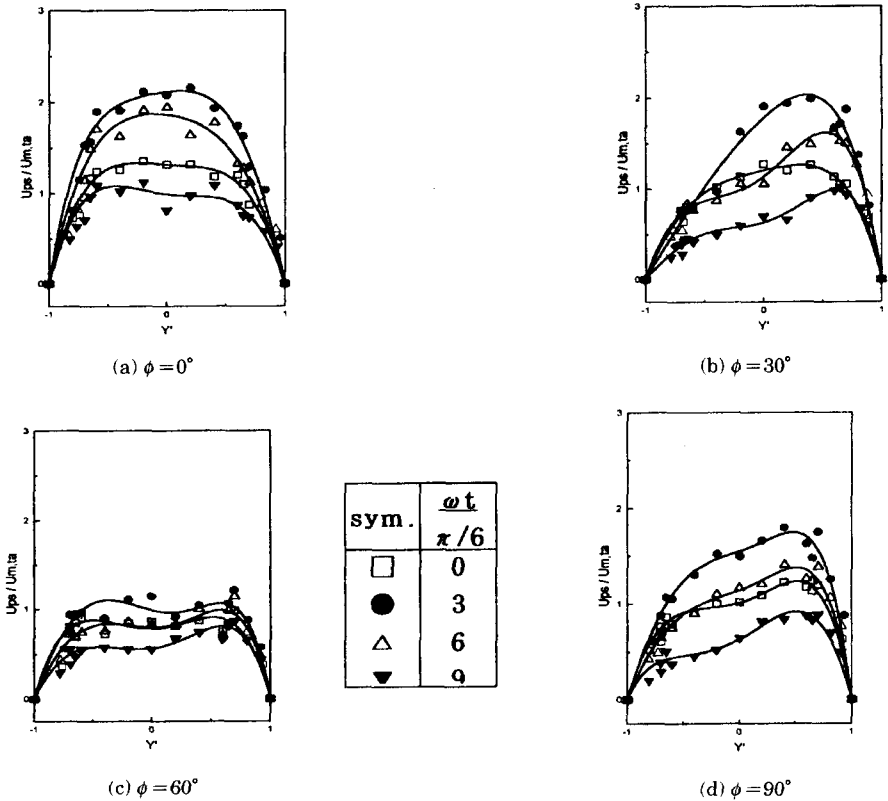


Fig. 5 Axial velocity distributions along y' variation in a curved duct for transitional pulsating glow at $Delta=530$, $\omega^+=7.48$, $A_1=0.59$.

진폭비(A_1)가 낮아지기 때문에 벽면의 점성력에 비하여 관성력이 상대적으로 증가하여 곡관내의 내측과 외측의 속도구배는 비교적 완만하고 속도의 변화가 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 전위상에 걸쳐 굽힘각이 30° 인 지점을 지나면서 축방향의 속도분포가 애뉴라(annular)형이 되며, 1주기 중 작용하는 원심력의 크기가 같으므로 외벽측에서 축방향속도가 큰 형태로 되며 발달한 곡관내 유동으로 된다. ϕ 가 30° 부터는 덕트 중심부분이 옅은 속도분포형인 소위 애뉴라 형을 보이고 있는데 이는 Austin⁽¹²⁾의 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

정4각단면 곡관덕트에서의 맥동유동의 주요한 무차원 변수인 곡률반경비(Rc), 시간평균 단수(= $Re_{ta} Dh/2R$), 무차원 각진동수(ω^*), 속도진폭비(A_1)가 전체적으로 유동에 큰 영향을 미치나, 곡률

반경비는 본 실험조건에서는 그다지 영향을 미치지 않으므로 주로 시간평균 단수와 무차원 각진동수 및 속도진폭비에 의해 지배된다.

3.3 2次流動

Fig. 6, 7에는 천이맥동유동의 2차유동에 관한 결과를 덕트의 중앙에서 z' 의 변화에 따라 나타내었다. 횡축은 Fig. 2의 좌표계에서와 같은 z 축을 무차원한 값이고, 종축은 2차유동의 단면평균속도로 나눈 무차원값으로 $V_{ps}/U_{m,ta}$ 로 나타내었다. 무차원 각진동수(ω^*)가 7.48 정도의 유동에서는 관로의 굽힘의 영향에 따른 무차원 각진동수(ϕ^*)의 증대에 의해서 비정상성의 영향이 현저하게 되기 때문에 2차유동은 아주 복잡한 거동을 나타낸다. Fig. 6($De_{ta}=460, A_1=0.68$)에 나타난 유동은 곡관덕트의 입구영역에서 덕트의 상

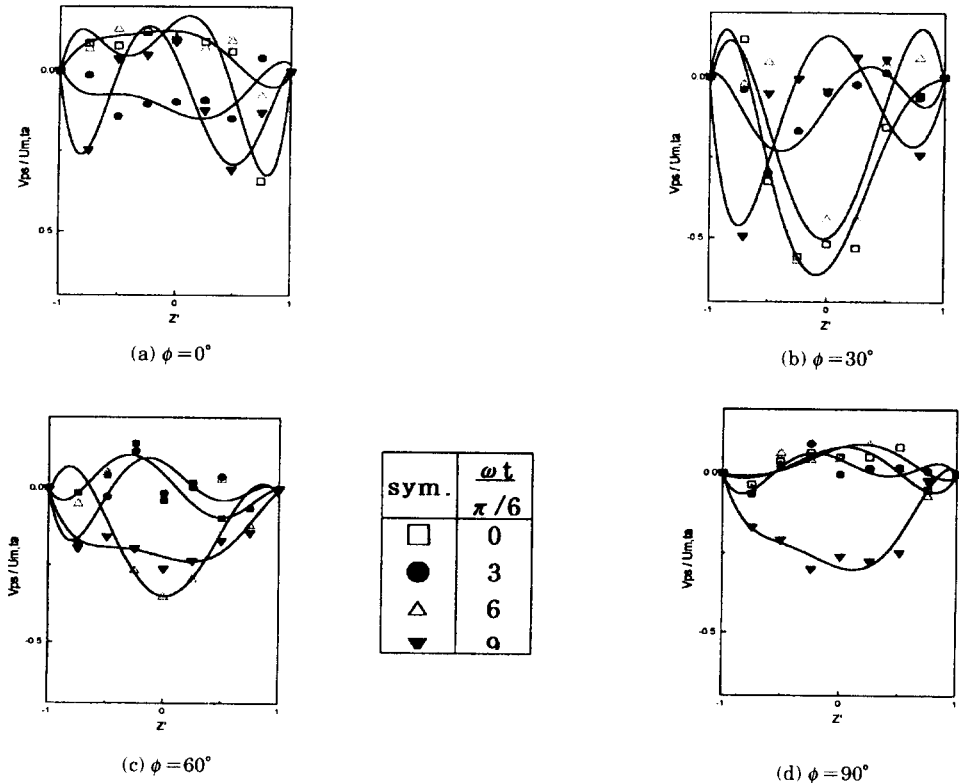


Fig. 6 Secondary velocity distributions along z' variation in a curved duct for transitional pulsating flow at $De_{ta}=460, \omega^*=7.48, A_1=0.88$

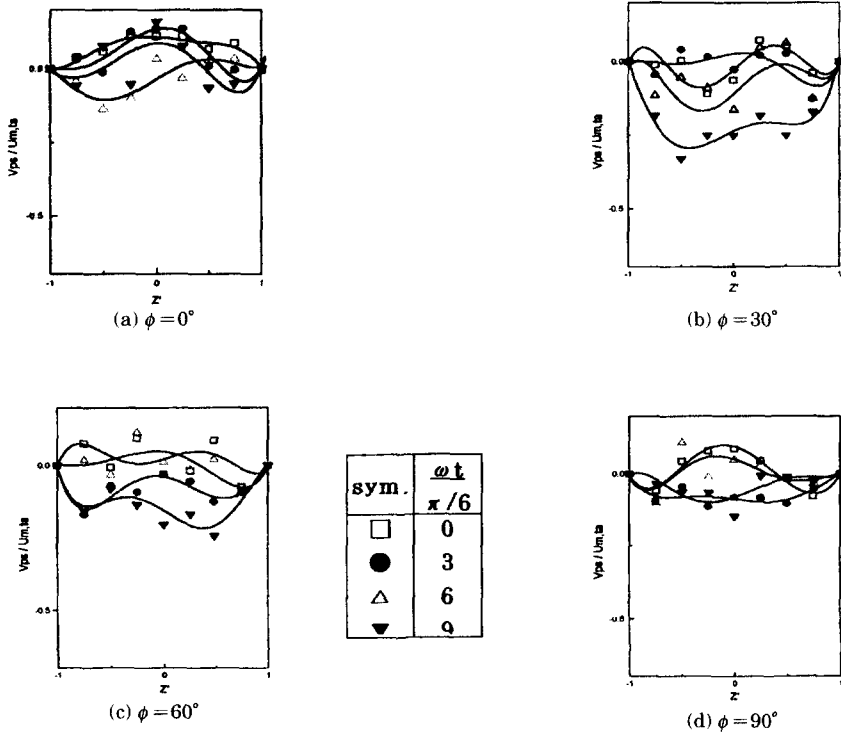


Fig. 7 Secondary velocity distributions along z' variation in a curved duct for transitional pulsating flow at $De_{ta}=460$, $\omega^+=7.48$, $A_1=0.68$

하면에서 2차유동의 거동이 복잡하여, 30° 되는 지점의 중심부에서는 2차유동이 강해지는 것을 관찰할 수 있었다. 굽힘각이 30° 되는 지점에서는 위상각($\omega t/\pi/6$)이 0, 6에서 외벽으로부터 내벽으로 강한 2차유동이 발생하고 굽힘각이 90° 되는 지점에 이르러서는 최소유속시에만 외벽으로부터 내벽으로 강한 유동이 발생하였다. Fig. 7($De_{ta}=530$, $A_1=0.59$)에서는 A_1 이 상대적으로 감소하여 관성력에 비해 점성력이 증가하고 Fig. 6에 비해 2차유동의 진폭이 작은 형태를 나타내고 있다. 이는 진동유동의 성분에 비하여 정상유동의 성분이 강해져서 정상유동의 형태와 더욱 유사해지는 것으로 생각된다. 천이맥동유동의 경우, 전체적으로 30° 지점에서 강한 2차유동이 발생하였다.

3.4 입구길이

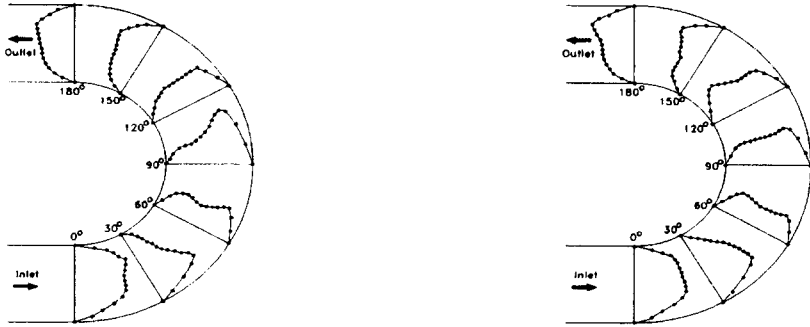
천이맥동유동의 입구길이는 속도분포가 덕트의

관측방향으로 위상에 관계없이 변화하지 않게 되는 위치까지를 의미한다. 무차원 각진동수(ω^+)가 증가함에 따라 입구길이는 짧아지는데, Fig. 8에는 무차원 각진동수 7.48이고, 속도진폭비($A_{sub 1}$)

0.68, 0.59의 경우, 곡관덕트에서 굽힘각의 변화에 따른 천이맥동유동의 축방향 속도분포를 y' 의 변화에 따라 나타낸 것이다. 본 실험조건에서 곡관덕트의 천이맥동유동에 대한 입구길이는 천이정상유동의 입구길이에 비 비슷한 120° 부근이었다. Fig. 9에는 천이맥동유동에 대하여 Sumida^[13] 등이 발표한 무차원 각진동수에 따른 입구길이에 대한 분포와 본 실험조건에서 얻어진 입구길이를 비교한 바, 비교적 잘 일치하고 있음이 확인되었다.

4. 결 론

정사각단면 180° 곡관덕트에서 천이비정상유동



(a) $De_{ta} = 460, A_1 = 0.68$

(b) $De_{ta} = 530, A_1 = 0.59$

Fig. 8 Variation of axial velocity distributions for transitional pulsating flow in a curved duct ($\omega' = 7.48, \omega t/\pi/6 = 3$)

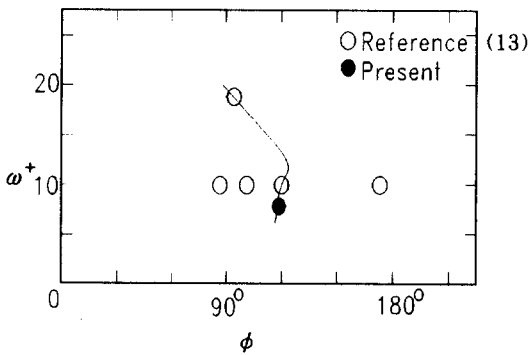


Fig. 9 Entrance lengths of transitional pulsating flow

인 천이맥동유동에 대하여 LDV 를 이용한 실험적 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 정사각단면 곡관덕트의 층류맥동유동에서 천이맥동유동으로 옮겨가는 임계 딘 수는 $60\omega'$ 정도였다.
2. 천이맥동유동에서는 무차원 각진동수가 낮은 경우는 거의 정상유동과 같은 속도분포의 형태를 이루나, 무차원 각진동수가 증가하더라도 속도진폭비가 1보다도 작은 경우는 벽부근을 제외한 단면내 속도변동의 차는 거의 없고 위상에 따른 축방향 속도분포 형상도 거의 변화하지 않았다.
3. 천이맥동유동의 2차유동은 곡관덕트의 입구영역에서는 덕트의 상하면에서 2차유동의 거동이 복잡하고, 입구를 지나면서 $\phi = 30^\circ$ 되는 지점부터는 중심부에서 2차유동이 강해졌다. 속도진폭비가 클수록 2차유동이 강해지고, 입구측에서 2차유동이 강해졌다.

4. 천이맥동유동에 대한 입구길이는 천이정상유동과 비슷한 $\phi = 120^\circ$ 부근이었다.

후 기

이 연구는 한국학술진흥재단 지원으로 수행된 연구의 일부이며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Eustice, J., 1910, "Flow of Water in Curved Pipes," *Proc. R. Soc. Ser. A*.84 - 568, pp. 107~118.
2. Dean, W. R., 1927, "Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe," *Phil. Mag.* S. 7, Vol.4, No. 20, pp. 208~223.
3. Lyne, W. H., 1970, "Unsteady Viscous Flow in a Curved Pipe," *J. Fluid Mech.* Vol. 45, Part. 1, pp. 13~31.
4. Zalosh, R. G., and Nelson, W. G., 1973, "Pulsating Flow in a Curved Tube," *J. Fluid Mech.* Vol. 59, Part 4, pp. 693~705.
5. 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.
6. Smith, F. T., 1976, "Fluid Flow into a Curved Pipe," *Proc. R. Soc. Ser. A*. 351, pp. 71 - 87.
7. Singh, M. P., 1974, "Entry flow in a Curved Pipe," *J. Fluid Mech.* Vol. 65, part. 3, pp.517 -

- 539.
8. Singh, M.P., Sinha, P. C., and Meena Aggarwal, 1978, "Flow in the Entrance of the Aorta," *J. Fluid Mech*, Vol. 87, part. 1, pp. 97 - 120.
 9. Talbot, L., and Gong, K. O., 1983, "Pulsatile Entrance Flow in a Curved Pipe," *J. Fluid Mech*, Vol. 127, pp. 1 - 25.
 10. Kita, Y., Korou, R., Hirose, K., and Nakano, A., 1989, "Turbulent Flow in a Curved duct with a Rectangular Cross - Section (6th Report, Flow in Entrance Region in Pulsatile Flow)," *J. Fluid Mech*, Vol. 55, No. 511, pp. 585 - 591.
 11. Naruse, T., Nishina, Y., Ishihara, K., Tanishita, K., 1991, "内頸動脈における 拍動 流推移," *J. Fluid Mech*. Vol. 57, No. 541, pp. 3018 - 3025.
 12. Austin, L. R, and Seader, J. D., 1974, "Entry Region for Steady Viscous Flow in Coiled Circular Pipes," *AIChE. J*, Vol. 206, No. 4, pp. 821 - 822.
 13. Sumida, M., and Sudou, K., 1995 "Pulsating Flow in Curved Pipes(5th Report, Velocity Distribution in Entrance Region)," *J. Fluid Mech*, Vol. 61, No. 587, pp. 2442 - 2449.

저 자 소 개



박길문(朴吉文)

1946년 3월생. 1974년 조선대학교 공과대 기계공학과 졸업. 1977년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1977년~현재 조선대학교 공과대 기계공학과 교수.



이행남(李行男)

1954년 3월생. 1980년 조선대학교 공과대 기계공학과 졸업. 1982년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1993년 국민대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1985년~현재 조선대학교 기계공학과 교수.



조병기(曹秉岐)

1951년 11월생. 1981년 조선대학교 공과대 기계공학과 졸업. 1984년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1981년~현재 조선대학교 공업전문대학 기계설계과 교수.



봉태근(奉泰根)

1956년 3월생. 1978년 목포해양고등전문학교 기관과 졸업. 1989년 조선대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1982년~현재 목포해양대학교 기관공학부 조교수.