

正四角斷面 180° 曲덕트에서 層流振動流動의 流動 特性에 關한 研究

박길문* · 조병기** · 봉태근***

(1997년 2월 21일 접수)

A Study on Flow Characteristics of Laminar Oscillatory Flows in a Square-Sectional 180° Curved Duct

Gill Moon Park, Byung Ki Cho and Tae Geun Bong

Key Words : Unsteady Flow(비정상유동), Velocity Distribution(속도분포), Laminar Oscillatory Flow(층류진동유동), Secondary Flow(2차유동), Wall Shear Stress Distribution(벽면전단응력분포)

Abstract

In the present study, the flow characteristics of developing laminar oscillatory flows in a square-sectional 180° curved duct are investigated experimentally. The experimental study using air in a square-sectional 180° curved duct is carried out to measure velocity distributions with a data acquisition and LDV(Laser Doppler Velocimetry) processing system. In this system, Rotating Machinery Resolver(RMR) and PHASE program are used to obtain the results of unsteady flows. The major flow characteristics of developing oscillatory flows are found by analyzing velocity curves, mean velocity profiles, time-averaged velocity distribution of secondary flow, wall shear stress distributions, and entrance lengths. In a lower dimensionless angular frequency, the axial velocity distribution of laminar oscillatory flow in a curved duct shows a convex shape in a central part and axial symmetry. The maximum value of wall shear stress in a lower dimensionless angular frequency is located in an outside wall, but according to increasing the dimensionless angular frequency, the maximum of wall shear stress is moved to inner wall. The entrance lengths of laminar oscillatory flows in a square-sectional 180° curved duct is obtained to 90° of bended angle of duct in this experimental conditions.

기 호 설 명

A_p : 피스톤 운동의 진폭
 a : 덕트의 반폭(mm)
 b : 덕트의 반높이(mm)

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

D_n : 수력직경 $(= 4ab / (a + b))$

f : 진동주파수

Le : 입구길이

L_p : 유체입자의 이동거리

*회원, 조선대학교 공과대학 기계공학과

**회원, 조선대학교 공업전문대학 기계설계과

***회원, 목포해양대학교 기관공학부

- R : 곡률반경
 R_c : 곡률반경비 $\left(= \frac{R}{a} = \frac{2R}{D_h} \right)$
 Re : 레이놀즈수 $(= D_h \cdot \bar{u}_m / \nu)$
 Re : 진동유동의 레이놀즈수
 T_w : 무차원 벽면전단응력 $\{ = \tau_w \cdot (D_h/2)^2 / \rho \nu^2 \}$
 u, v, w : x, y, z 축에서 각각의 속도성분
 u', v', w' : x, y, z 축에서 각각의 무차원 속도성분
 \bar{u}_m : 단면평균속도
 $\bar{u}_{m,os}$: 진동유동의 횡단면 평균속도

그리스문자

- μ : 점성계수
 ν : 동점성계수
 ρ : 밀도
 ϕ : 덕트의 굽힘각
 ω : 각진동수 $(= 2\pi f)$
 ω^+ : 무차원 각진동수 $\left(= \frac{D_h}{2} \sqrt{\omega / \nu} \right)$

첨자

- cl : 덕트중심선에서의 값
 cr : 입계값
 os : 진동유동
 ta : 시간평균값

기타

- $—$: 평균값
 $| |$: 진동유동의 속도진폭
 \angle : 진동유동의 위상각

1. 서 론

1.1 연구배경

산업현장에 많이 응용되고 있는 곡덕트내의 유체 유동은 직덕트와는 다르게 원심력이 작용하게 되어 덕트의 내벽측과 외벽측에 압력차가 존재하게 된다. 이 원인으로 축방향에 수직인 단면내에 2차유동이 발생하므로 곡덕트 내의 유동은 새로운 유동현상으로 변화되고, 특히 직덕트에서 곡덕트로 변하는 유동영역에 있어서의 비정상유동은 아주 복잡한 현상을 나타내므로 이 유동영역에서의 유동특성은 지금까지 거의 연구가 이루어지지 않는 것으로 사료된다. 이러한 비정상유동에 대한 해석은 유체 기계의 설계에 기초자료가 될 뿐 아니라 공조 덕트

설비, 열교환기, 가스터빈, 압축기, 제트엔진 및 로켓의 맥동연소와 맥동제트 등의 유체기계 내부에 대한 유동을 해석하는데 아주 중요하게 응용되며, 또한 의용생체공학 분야인 혈액순환계내의 혈액유동에 대한 특성을 규명하는데 있어서도 공학적 해석방법을 도입한 비정상유동인 진동유동과 맥동유동의 응용해석에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있는 실정이다.

곡덕트에서 유체유동이 공학적으로 연구되기 시작한 것은 19세기 말이며, 1910년에 Eustice^(1, 2)는 곡덕트 내의 유동은 직덕트에 비하여 압력손실이 크며 또한 나선형 유동을 한다는 것을 지적 하였으며, 1927년에 Dean^(3, 4)은 원형단면인 곡관내에서 관축방향으로 나선형 운동을 하는 유체의 유동을 관축방향의 주류와 관축에 수직인 단면내의 2차유동으로 구별하고 곡관유동을 지배하는 특성 파라메타로 딘수를 정의하였다.

McConalogue⁽⁵⁾는 프리에급수를 이용하여 딘수가 90~600의 범위에서 성립하는 해를 얻었고, 수치해석법으로는 Truesdell,⁽⁶⁾ Austins,⁽⁷⁾ Collins⁽⁸⁾ 등의 연구가 있으며 그중에서도 Collins⁽⁸⁾의 차분법을 이용한 연구는 관마찰계수 뿐만 아니라, 축방향의 속도가 최대가 되는 위치 및 2차유동의 중심위치에 대한 결과가 실험결과와 아주 잘 일치함을 보여주고 있다.

입구유동을 취급하는 경우는, 곡관내 입구의 속도분포가 직관내의 충분히 발달한 유동이 유입되는 경우^(9~12)와 일정한 속도분포의 유동이 유입하는 경우^(13~15)의 2가지로 구별할 수 있다. 전자의 경우에 대한 대표적인 연구는 Austin⁽⁹⁾의 것으로서 그는 곡률반경비가 7~24의 곡관유동에 대해서 관로 중심축을 포함 수평, 수직단면내의 관축방향 속도를 측정하였고 곡관내 층류유동에 대한 입구길이로서 $\phi = 49(De/Rc)^{1/3}$ 를 제안하였다.

다음에는 유체가 일정 속도분포로 유입하는 경우 Agrawal⁽¹⁶⁾의 LDV를 이용한 주류 및 2차유동에 대한 연구결과를 보면 입구에서의 일정한 속도분포로 유입된 유동은 유입직후 2차유동의 속도분포를 형성한 후 2차유동의 성장때문에 유동은 점차적으로 발달된 유동으로 진행된다고 하였다. Lyne⁽¹⁷⁾은 곡률반경비가 충분히 큰 원형단면 내에서 축방향으로 $\partial p / \partial z = \rho \omega W_a \cos \omega t$ 되는 정현파의 압력구배가 가해지는 유동에 대하여 이론적인 연구를 행하여 정상류에서 볼 수 있는 2차유동 이외에 관로

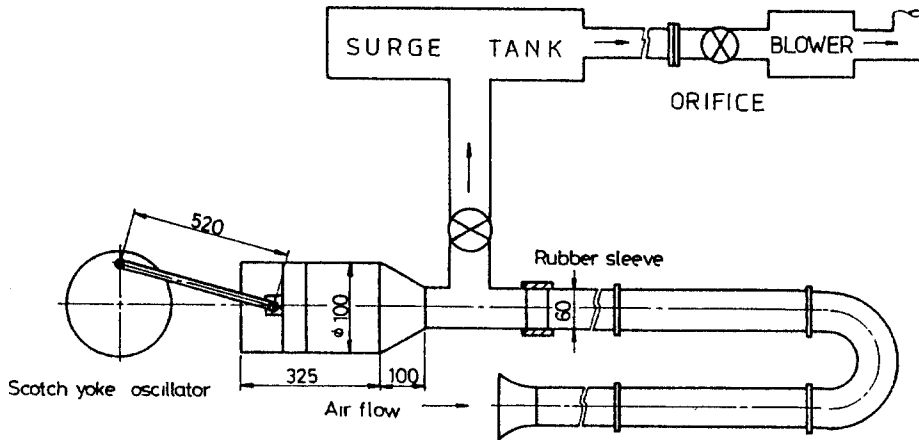


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

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 [N_{FR}]	12.9	13

Table 2 Experimental conditions of laminar oscillatory flow.

Angle	f (Hz)	R (mm)	ω^+	A_p (mm)	De_{os}
0°	0.17	400	5.15	20	150
	0.33		7.18	20	290
30°	0.17	400	5.15	20	150
	0.33		7.18	20	290
60°	0.17	400	5.15	20	150
	0.33		7.18	20	290
90°	0.17	400	5.15	20	150
	0.33		7.18	20	290
120°	0.17	400	5.15	20	150
	0.33		7.18	20	290
150°	0.17	400	5.15	20	150
	0.33		7.18	20	290
180°	0.17	400	5.15	20	150
	0.33		7.18	20	290

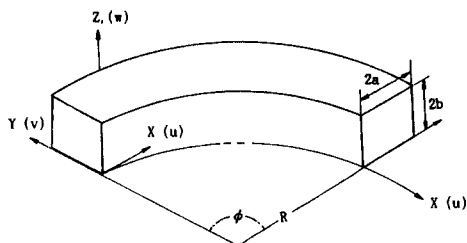


Fig. 2 Coordinate system and components in a curved duct.

중앙부에서는 외측벽에서 내측벽으로 2차유동이 성장되는 것을 발견하였는데 이것이 소위 린(Lyne)형의 2차유동이다.

Zalosh 등⁽¹⁸⁾과 Mullin 등,⁽¹⁹⁾ Uchida⁽²⁰⁾ 등은 정현상(正弦狀)의 압력구배가 가해지는 유동에 대하여 연구하였는데 이 중에서 Zalosh는 2차유동의 방향이 외벽측에서 내벽측으로 변화되는 「린형의 2차

유동」의 무차원 각진동수로 9~10을 제안하고 있으며, Mullin은 10~11이라는 값을 제안하였다. 이러한 높은 무차원 각진동수에 있어서 발생하는 2쌍의渦인 린형의 2차유동은 진동류에 정상성분이 약간 가해지는 맥동류(속도진폭비 $A_1 \gg 1$)에서도 존재한다는 것이 Smith,⁽¹²⁾ Simon⁽²¹⁾의 연구에서

볼 수 있다.

또한 입구길이에 대한 실험적인 연구로, Mullin⁽²²⁾은 긴 직관부를 양단에 부착한 U자관로의 $Re=7$ 인 경우에 있어서 무차원 각진동수가 $0.9\sim 5.0$, 진동턴수가 $6\sim 64$ 의 범위에서 속도분포를 LDV로 측정하고 점성효과가 비교적 큰 $\omega^+ < 5$ 의 유동에서 입구길이(각도)는 $\theta \leq 90^\circ$ 라고 제안하였으며, Bertelsen⁽²³⁾은 $Re=4, 6$ 의 관로에서 무차원 각진동수가 $18\sim 22$ 일 때 관성 효과가 현저한 경우 직관내 유동 및 곡관내 유동의 입구길이는 각각 입구로부터 관내 반경에 해당하는 길이라고 하였다.

한편 Park,⁽²⁶⁾ Iguchi⁽²⁷⁾ 등은 정사각단면 직덕트에서의 입구길이 등을 제안하고 있으며, Park^(28, 29) 등은 정사각단면 180° 곡덕트에서의 유동특성을 계속적으로 발표하고 있다.

본 연구에서는 정4각단면 ($40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$)을 갖는 180° 곡덕트(곡률반경 : 400 mm)를, 동일단면에 길이 4000 mm 인 직덕트를 입구 및 출구에 연결한 다음, 곡덕트의 입구영역에서 층류진동유동을 대상으로, 턴수(De), 무차원각진동수(ω^+)를 유동변수로 하여, 축방향의 위치변화에 따라 LDV, 이송장치 및 회전각표시기(Rotating Machinery Resolver : RMR)와 PHASE⁽³⁰⁾의 자료획득 및 처리 프로그램을 이용하여 속도분포를 측정할 실험결과를 비교검토하여 입구길이를 결정하고 층류비정상유동의 턴수, 무차원 각진동수가 비정상유동 특성에 미치는 영향과 2차유동 특성을 규명하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

아크릴로 제작된 정사각단면을 갖는 180° 곡덕트내의 입구영역에서 층류진동유동의 속도 분포를 측정하기 위하여 LDV로 실험을 수행하였는데, 작동유체로는 공기를 사용하였으며, 실험 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었고 곡덕트의 좌표계는 Fig. 2를 이용하였다.

본 실험에 사용한 LDV 시스템은 최대출력 2와트인 알곤-이온 레이저이고, 광학계의 배치는 2중빔모드(Dual Beam Mode)이며 2색 3빔 방식의 후방산란형(Back Scattered type)이다.

청색빔과 녹색빔의 2개의 파장을 이용하여 속도의 수평성분과 수직성분을 측정할 수가 있으며, 브래그셀(Bragg Cell)을 사용함으로써 주파수 편이

를 행하여 유속의 正·負방향의 판별이 가능하며, 도플러신호의 처리는 카운터타입 신호처리기(Counter Type Signal Processor)를 사용하였고, 측정체적에 대한 세부내용을 Table 1에 나타내었다.

층류진동유동을 발생시키기 위하여 스카치-요크형 가진기를 사용하였는데 가진기에 연결된 변속모터를 조절하여 진동유동의 각진동수를 조절할 수 있도록 하였으며, 진동유동의 진폭은 회전원판의 중심으로부터 회전원판상에 뚫려있는 구멍의 위치 변화에 따라 피스톤의 연결봉을 핀으로 조절할 수 있도록 제작하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 단면의 크기가 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 이고 길이가 4000 mm 인 직덕트에, 곡률반경이 400 mm 이며 직덕트와 단면크기가 같은 180° 곡덕트를 연결한 다음 곡덕트내의 입구유동영역에서 곡덕트의 축방향 및 횡방향의 변화된 위치에서 LDV와 이송장치, 회전각표시기와 PHASE의 자료획득 및 처리 프로그램을 이용하여 실험결과를 분석하였다.

또한 실험에 사용한 산란입자는 모기향 연기를 사용하였는데 입자직경은 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 로써 Table 1에 나타낸 것과 같이 측정체적의 크기면에서도 적당하고 일정량의 연기를 계속하여 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

본실험에서 LDV와 LDV이송장치를 이용하여 비정상유동인 층류진동유동에 대하여 곡덕트부에서 굽힘각이 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$, 그리고 180° 위치에서 덕트횡단면 위치변화에 따라 속도 분포를 측정후 유동해석하였다.

이들의 층류진동유동에 대한 측정값은 LDV를 통하여 얻은 실험값을 회전각표시기와 스카치-요크형 가진기의 회전축에 부착시킨 엔코더(Encoder)의 신호에 따라 360° 의 전 위상에서 실험자료를 받아들이어 PHASE 프로그램에서 처리할 수 있도록 하였다.

Fig. 3에 나타낸 실험자료획득 및 처리과정을 통하여 얻어진 실험자료를 PHASE 프로그램을 이용하여 실험자료를 처리한 다음 KALEIDA GRAPH⁽³¹⁾ 프로그램에서 최종 그래프화하였다.

Table 2에는 본 실험을 수행한 층류진동유동의 실험조건을 나타내었다.

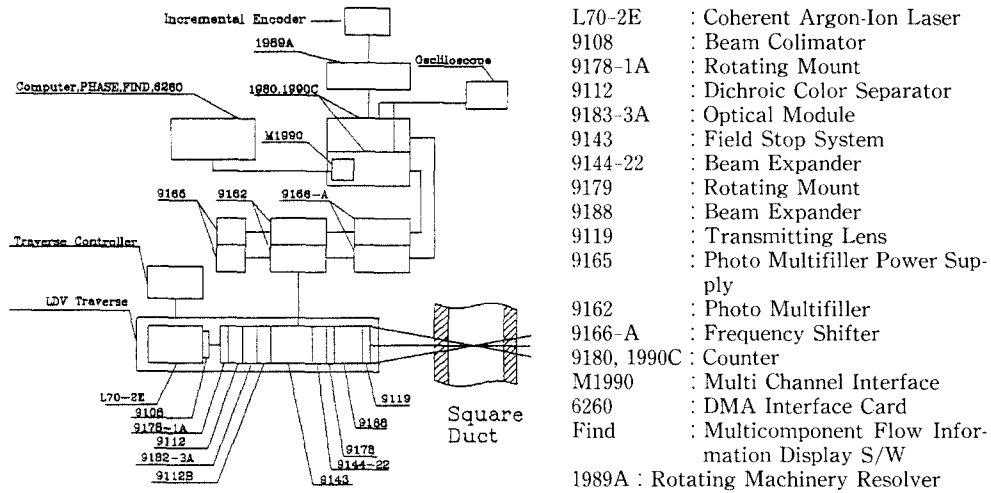


Fig. 3 Schematic diagram of LDV system and associated data acquisition and processing equipments.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동영역 분류

직덕트부 입구영역 유동에서 진동유동의 단면 평균 속도 $\bar{u}_{m,os} = |\bar{u}_{m,os,1}| \cdot \cos(\omega t + \angle \bar{u}_{m,os,1})$ 가 $\bar{u}_{m,os} > 0 (0 \leq \omega t < \pi)$ 일 때는 유체입자가 입구로부터 덕트안으로 들어오는 유입유동(Inflow)이고, $\bar{u}_{m,os} < 0 (\pi \leq \omega t < 2\pi)$ 일 때는 유체입자가 최대 이동지점에서 다시 입구영역쪽으로 나오는 유출유동(Outflow)으로 정의하고 Fig. 4에 나타내었다.

유동이 완전 발달되었다고 생각되는 180° 부근에서의 진동유동에 대하여 LDV를 이용하여 얻은 속도값을 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 LDV 시스템에 회전각포시기와 PHASE 프로그램을 이용하여 얻은 데이터는 열선풍속계를 이용하여 데이터를 얻었던 방법과는 다르게 360°의 모든 위상각에 대해서도 얻고자 하는 데이터를 얼마든지 세밀하게 얻을 수 있었다.

진동유동의 단수 및 무차원 각진동수의 계산식은 다음식을 이용하였다.

$$De_{os} = \sqrt{D_h/2R} \cdot (D_h \cdot |\bar{u}_{m,os,1}|) / \nu \quad (1)$$

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

곡덕트내에서 비정상유동인 진동유동은 급힘효과와 시간에 따라 주기적으로 변화되는 비정상성의 효과가 존재하기 때문에 진동유동의 유동특성은 덕

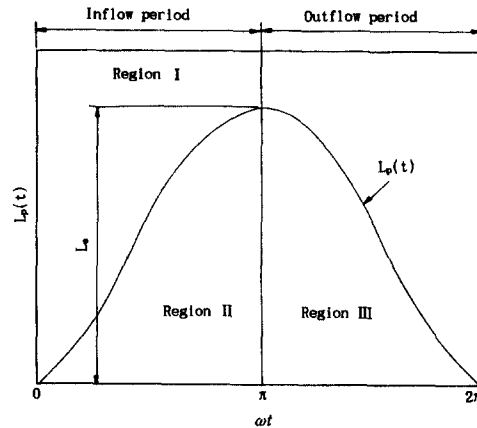


Fig. 4 Three flow regions near duct entrance.

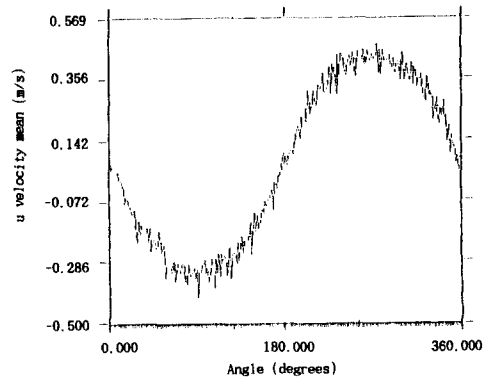


Fig. 5 LDV measurement of velocities of laminar oscillatory flow in a curved duct.

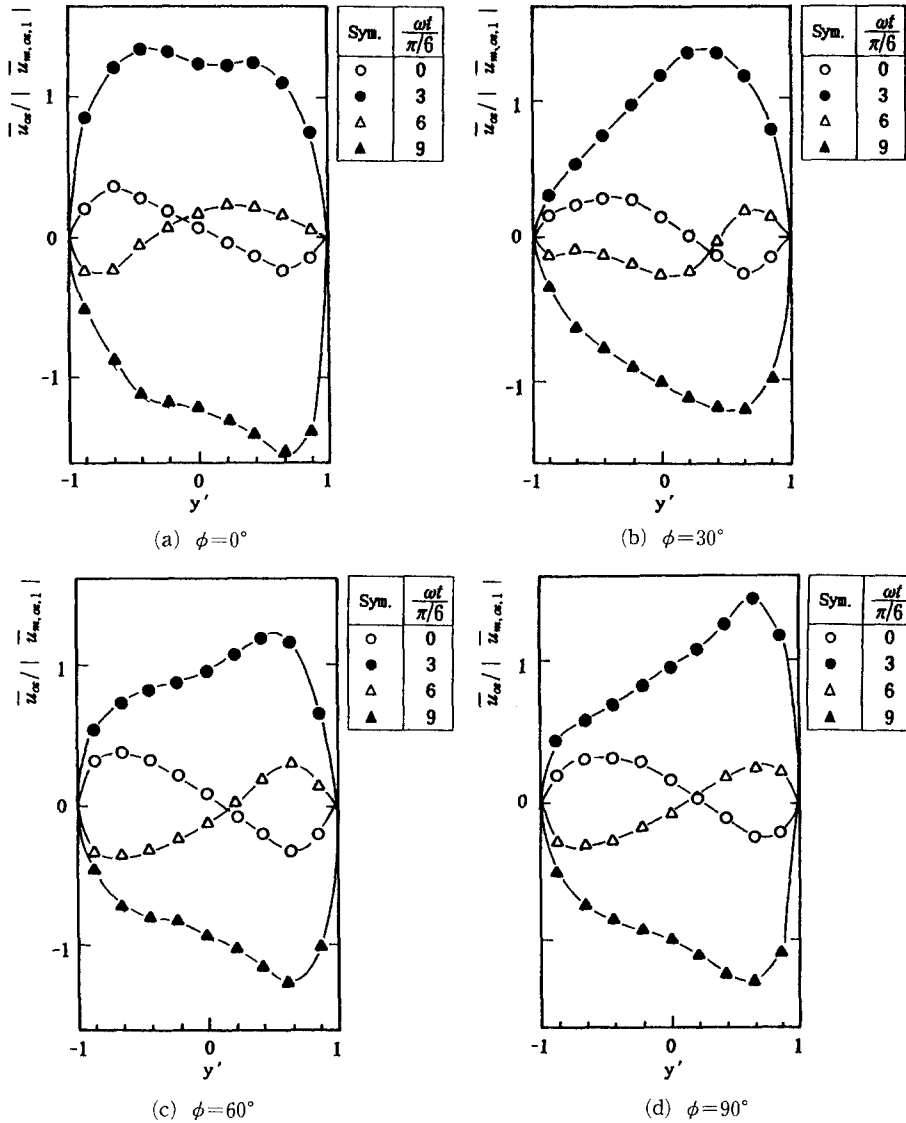


Fig. 6 Dimensionless axial velocity distribution along y' variation for laminar oscillatory flow at $\omega^+ = 5.15$.

트의 곡률반경비, 진동유동의 단수와 무차원 각진동수의 3가지 무차원 변수에 의하여 지배된다고 생각된다.

여기서, 진동유동의 단수는 원심력에 의하여 발생한 2차유동의 관성력과 점성력의 비를 나타낸 무차원 수로 원심력에 의한 2차유동의 강도를 나타내는 대표적인 변수이다.

또한, 무차원 각진동수는 유동의 비정상성에 의한 관성력과 점성력의 비의 평방근으로 관성의 크기, 비정상성의 강도를 나타내는 무차원수이다.

또한, 곡덕트내의 진동유동에서는 무차원 각진동수와 진동단수 외에 제3의 변수로 곡률반경비가 있는데 기존의 연구를 살펴보면 본 실험의 범위에서는 곡률반경비가 유동에 미치는 영향은 아주 작고 또한 본 실험조건에서는 곡률반경비를 20으로 고정하고 있기 때문에 곡률반경비에 대한 언급은 더 이상 하지 않겠다. 따라서, 진동유동의 단수와 무차원 각진동수에 주된 영향을 받을 것으로 생각하여 얻어진 기존의 실험결과를 참고로 하면 층류진동유동에서 천이진동유동으로 변화하는 임계 레이놀즈

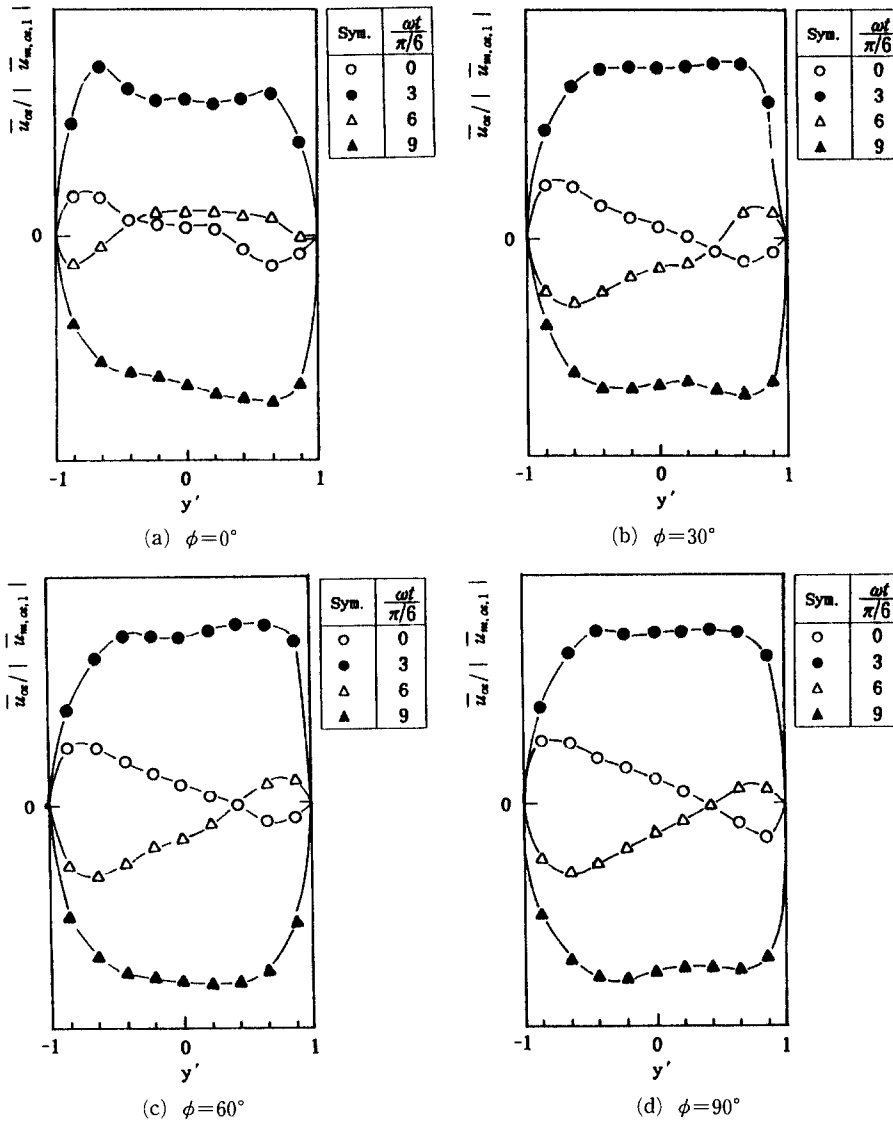


Fig. 7 Dimensionless axial velocity distribution along y' variation for laminar oscillatory flow at $\omega^* = 7.18$.

수 ($Re_{os,cr}$)가 무차원 각진동수에 관계됨을 알 수 있었고, 본 실험조건에서는 굽힘각도가 180° 부근인 곡덕트부에서 층류진동유동의 임계 단수는 $De_{os,cr} \approx 100\omega^*$ 이었다.

3.2 속도분포

진동유동의 단면평균속도를 푸리에급수 전개하여 얻어진 기본 진동속도로 나누어 무차원속도 $\bar{u}_{m,os} / |\bar{u}_{m,os,1}|$ 를 얻었는데, 주기적으로 교번되어지는 운동에 의하여 얻어지는 단면평균속도, $\bar{u}_{m,os}$ 는 다

음 식을 이용하였다.

$$\bar{u}_{m,os} = \sum_{n=1}^{\infty} |\bar{u}_{m,os,n}| \cos(n\omega t + \angle \bar{u}_{m,os,n}) \quad (3)$$

Fig. 6과 Fig. 7에는 층류진동유동의 덕트의 횡단면 변화에 따른 축방향 속도분포를 단면평균속도의 속도진폭 ($|\bar{u}_{m,os,1}|$)으로 나누어 곡덕트의 굽힘각도의 변화에 따라 나타내었다.

여기서, 횡축인 y' 는 y 축을 무차원화한 것인데 곡률반경이 작은쪽의 덕트벽을 덕트의 내측벽 (In)으로 나타내고, 곡률반경이 큰쪽의 덕트벽을 외측

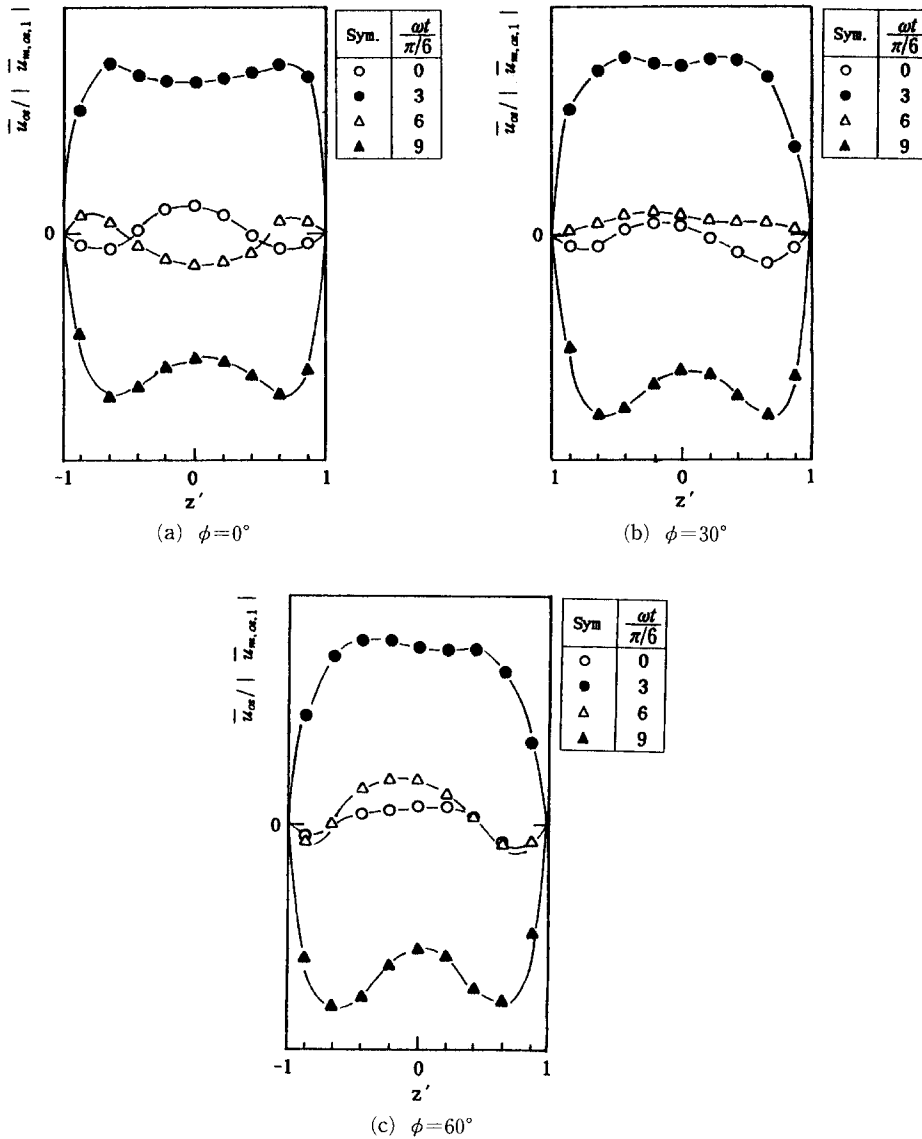


Fig. 8 Dimensionless axial velocity distribution along z' variation for laminar oscillatory flow at $\omega^+=5.15$.

벽(Out)으로 나타내었다. 그리고 위상각($\omega t/\pi/6$)이 0~3, 9~11은 가속영역을 의미하며, 위상각($\omega t/\pi/6$)이 3~9는 감속영역을 의미하고 있다.

Fig. 6에서는 무차원 각진동수($\omega^+=5.15$)가 적은 경우인데 유동의 가속기에서는 전체적으로 내측벽쪽 유체부터 가속되고 있다는 점이 특이하다. 그리고 위상각($\omega t/\pi/6$)이 3인 가속종료기에는 직덕트에서 곡덕트로 유입한 유체는 강력한 원심력을 받아 유속의 최대값이 외측벽에 위치하는 속도분포

형이 되고 굽힘각이 90° 이후에는 발달한 곡덕트내 유동으로 된다.

Fig. 7은 Fig. 6과 비교하였을 때 속도구배가 커지고 있는데 이것은 무차원각진동수가 5.5에서 7.18로 증가되므로서 점성력보다 상대적으로 관성력이 점점 커지고 있는 결과로 사료된다. 또한 Fig. 6에서는 외측벽쪽으로만 커졌던 속도가 Fig. 7에서는 내측벽쪽으로 속도가 커지고 있는데 이것은 위상차의 분포의 비대칭성에 기인한 것으로서 외측

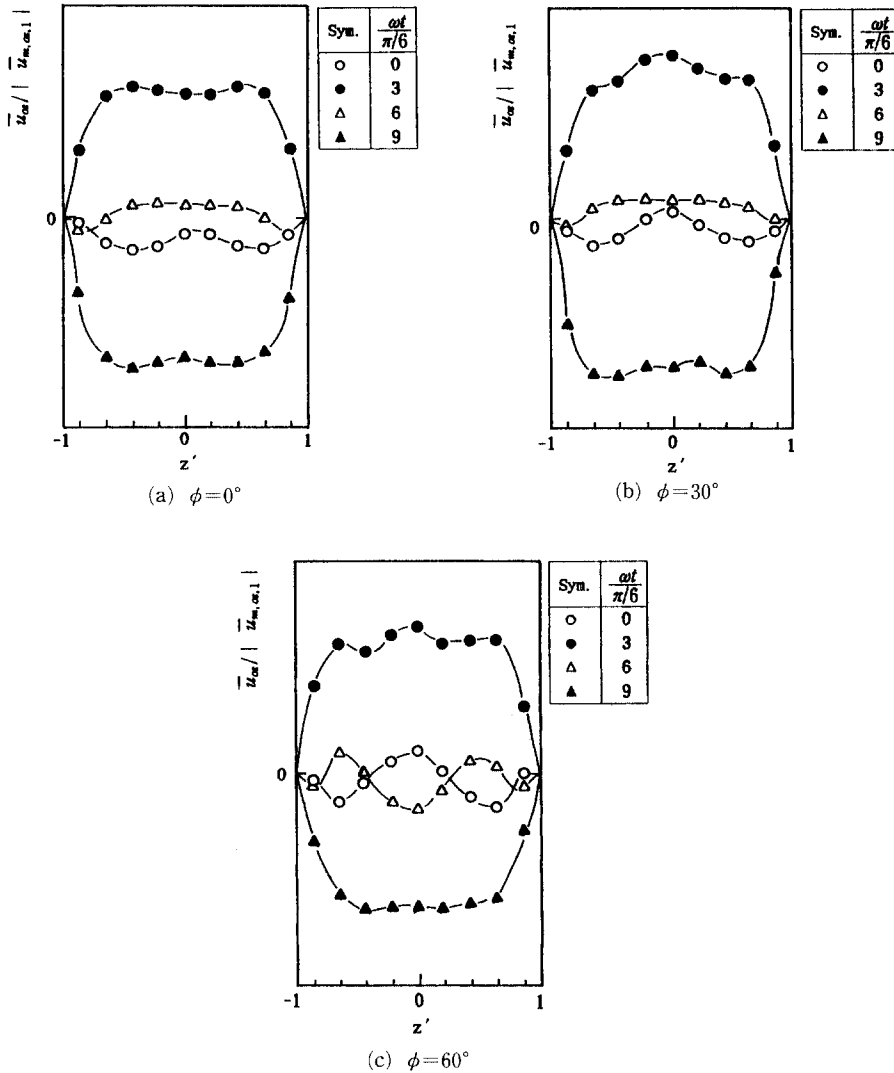


Fig. 9 Dimensionless axial velocity distribution along z' variation for laminar oscillatory flow at $\omega^+ = 7.18$.

벽에서 늦은 상태, 내벽에서의 진전상태가 다른 유동에 비교하여 극히 현저하다는 점이다. 진폭값의 분포와 위상차의 분포에서 판단하면 이 특이유동은 2개로 나누어 생각할 수 있는데 그 하나는 확실하게 진폭값이 외벽측보다 내벽측에서 크게되는 유동이고 또 하나는 내벽측의 진폭이 크게되는 것이 아니고 내벽측과 외벽측의 위상의 어긋남에 의해서 생기는 유동으로 사료된다.

그리고, 무차원 각진동수가 더욱더 커짐에 따라 Fig. 7에서 처럼 비정상성에 기인한 관성력과 원심력이 거의 같게 작용되면 내벽의 속도가 외벽

의 속도보다 크게 되는 경우가 있고, 굽힘효과가 더해진 비정상성의 효과가 지배적인 유동이 된다.

그리고, 본 실험조건에서 처럼 무차원 각진동수가 아주 크지도, 작지도 않을 경우는 가속의 중간 영역에서나 가속이 끝나는 영역에서는 내벽의 속도가 외벽의 속도보다도 크게되는 현상이 나타나고 있다.

즉 외벽에서 지연되는 상태, 내벽에서 진전되는 상태가 다른 유동에 비해서 현저하게 나타난다.

굽힘각도가 0° 에서나 180° 에 있어서도 내벽측

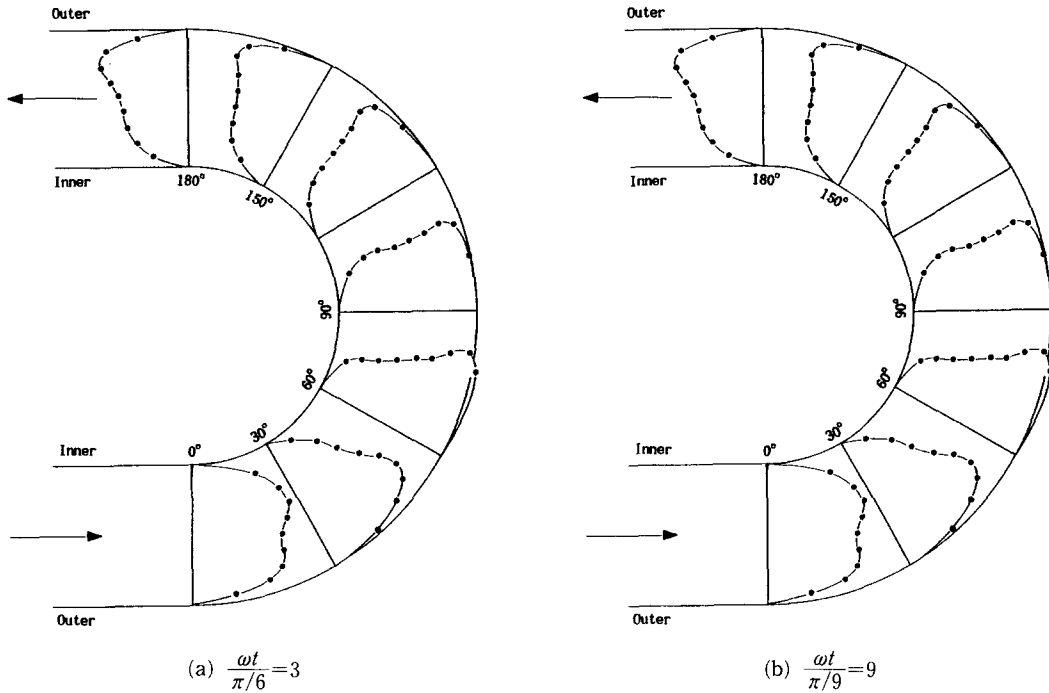


Fig. 10 Variation of axial velocity distribution for lamiar oscillatory flow in a curved duct at $\omega^+ = 5.15$.

로부터 외벽측으로 운동량이 운반되기 때문에 내측 단면의 유체는 압력구배와 함께 증속되고, 가속이 끝나는 영역에서는 최대속도의 위치가 외벽측으로 크게 이동하게 된다.

덕트의 무차원 축방향 위치에 따른 축방향 속도는 단수가 증가함에 따라 가속의 중간영역에서는 내벽측에서 덕트 중앙부분을 거쳐 외벽측으로 이동하고, 가속이 끝나는 영역에서는 덕트 중앙부분에서 돌출하는 분포형을 이루며, 감속이 시작하는 영역에서는 오목한 분포형을 이룬다.

Fig. 8와 Fig. 9에는 덕트의 무차원 종단면위치 (z')에 따른 층류진동유동의 축방향 속도분포를 나타내었다.

이들의 분포에서 덕트의 무차원 횡단면위치에 따른 속도분포가 오목한 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 가속이 끝나는 영역에서는 단면의 외측영역에 있던 큰 운동량을 가진 유체유동이 2차유동에 의하여 덕트 윗면과 아래의 벽면을 따라 덕트 내측영역으로 운반되면서 다시 덕트 중앙으로 운반되기 때문에 덕트 중앙부분에서 속도값이 큰 분포형을 이루게 된다.

Fig. 10은 위에서 언급되었던 내용이 곡덕트에서

어떻게 진행되는가를 쉽게 알아보기 위하여 곡덕트에서 굽힘각의 변화에 따른 층류진동유동에 대한 속도분포를 대표적인 가속유동인 $\omega t/\pi/6$ 가 3인 경우와 대표적인 감속유동인 $\omega t/\pi/6$ 가 9인 경우에 대해서 나타낸 것이다.

3.3 벽면전단응력 분포

벽면전단응력 분포를 알아보기 위해서 벽면전단응력 τ_w 를 무차원화 하면 다음과 같다.

$$T_w = \tau_w \cdot \left(\frac{D_h}{2}\right) / (\rho \nu^2) \tag{4}$$

Fig. 11에는 완전 발달되었다고 생각되는 굽힘각이 150° 지점에서 측정된 층류진동유동의 벽면전단응력의 최대값에 따른 무차원 값 $T_{w,max}$ 에 대한 임의의 벽면전단응력의 무차원 값 T_w 의 분포를 나타내었다.

여기서 횡축은 덕트 단면의 위치를 나타내고 있는데 좌측은 내측벽으로부터 덕트 중앙부분까지를, 우측은 외측벽으로부터 덕트의 중앙부분까지를 나타낸다.

진동유동의 단수가 작은 경우는 유동에 미치는

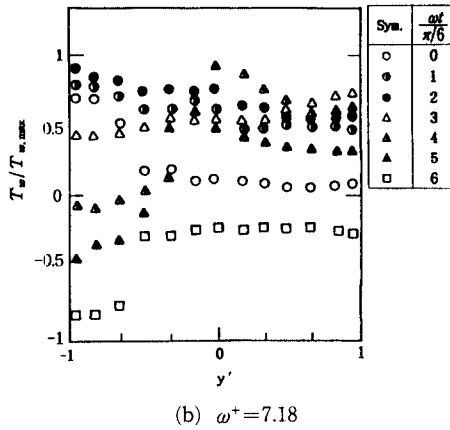
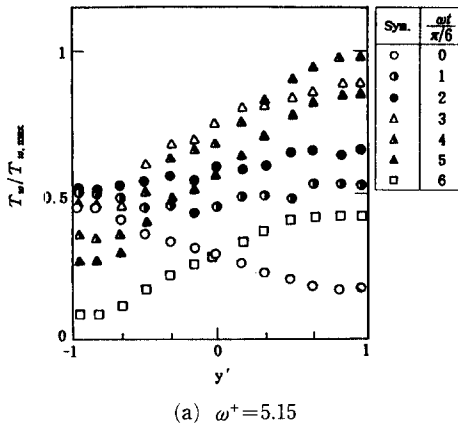


Fig. 11 Wall shear stress distribution for laminar oscillatory flow.

굽힘의 영향이 약하고 축방향속도는 \bar{u}_{os} 의 분포나 $|\bar{u}_{os,1}|$ 및 $\angle \bar{u}_{os,1}$ 의 분포가 덕트축에 대하여 거의 대칭이므로 T_w 의 분포가 위상각의 방향에 따른 의존성이 작다.

무차원 각진동수가 증가함으로써 유동의 관성력이 덕트 중심부에서 지배적이고, 축방향 속도분포는 환상(環狀)형으로 되며 최대속도의 위치는 내벽측으로 이동한다. 벽면전단응력 값은 내벽측에서 큰값을 갖고, 그 외의 부분에서는 일정한 값을 갖는다.

진동유동의 단수가 큰 경우는 굽힘의 효과가 무차원 각진동수의 증가와 더불어 복잡한 분포를 보이고, 벽면전단응력은 주위 방향으로의 의존성이 현저하게 나타난다. 무차원 각진동수가 낮은 경우는 덕트의 축방향 위치가 가속중간영역을 제외하고 외벽측쪽으로 휨쓸리기 때문에 벽면전단응력 분포

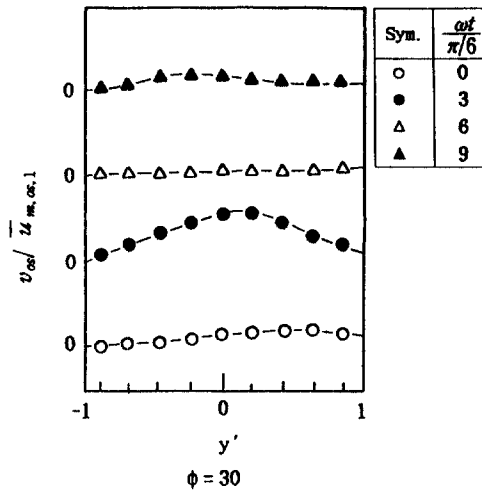


Fig. 12 Secondary flow velocity distribution for laminar oscillatory flow at $\omega^+ = 5.15$ $\phi = 30$.

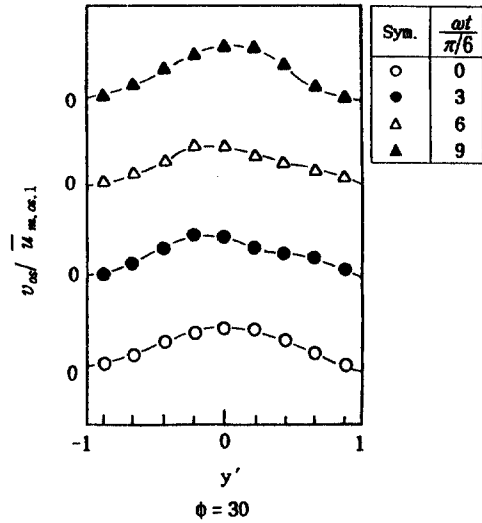


Fig. 13 Secondary flow velocity distribution for laminar oscillatory flow at $\omega^+ = 7.18$ $\phi = 30$.

도 내벽측에 비해서 외벽측에서 큰 값을 갖게 된다. 또한 축방향 속도분포에서의 마찬가지로 무차원 각진동수가 증가하게 되면 내벽측에서는 크게 변동하고 외벽측에서는 거의 변화가 없어지는 분포를 관찰할 수 있다.

3.4 2차유동

Fig. 12와 Fig. 13에는 y' 의 변화에 따른 2차유동

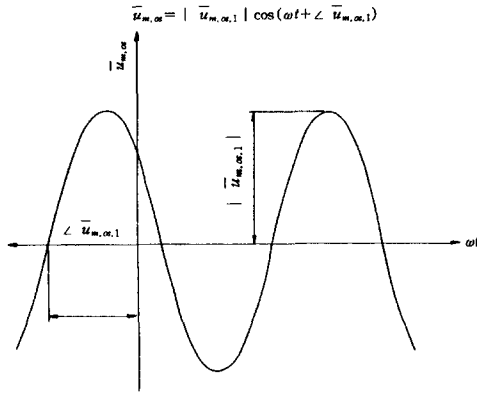


Fig. 14 Oscillatory velocity curve.

$$\bar{u}_{m,os} = |\bar{u}_{m,os,1}| \cos(\omega t + \angle \bar{u}_{m,os,1})$$

의 속도분포를 나타내었다. Fig. 12는 덕트의 외벽 쪽으로 향하는 2차유동의 최대 속도값이 덕트 중앙부근에서 얻은 속도값(\bar{u}_{cl})의 약 20% 정도 되었으며 위상이 감속영역에서는 외벽측의 순압력구배가 더해지는 영향으로 외벽측에서는 속도가 빨라지고 내벽측에서는 늦어지는 분포를 확인할 수 있었다.

Fig. 13에서는 강한 2차유동이 생성되어 감속말기에 외벽측의 큰 운동량을 가진 유체유동이 내측 단면으로 운반되고 있는 형태를 확인할 수 있다.

일반적으로 2차유동의 중심은 무차원 각진동수가 증가함에 따라 덕트중심 방향에 있어서 외벽측으로 이동한 다음 감속처럼 내벽측으로 움직인 후 방향을 바꾸어 덕트상하 벽부근에서 혼란된 형태를 보이다가 단형의渦에서 링형의渦로 변한다.

3.5 入口길이

덕트내의 직덕트부에서는 진동유동의 속도가 Fig. 14에 나타낸 것처럼 기본 진동속도로 바뀌어 질 때 입구의 영향을 받지 않는 덕트입구로부터 유체입자가 이동 가능한 최대거리로 입구길이를 정의하였는데 반드시 유입유동에 대한 입구길이 이론식은 $Le/D_n \gg 1$ 의 필요조건을 만족하여야 한다.

Fig. 4에서 처럼 직덕트에서는 유입유동과 유출유동이 매주기 마다 반복되고 있으므로 진동유동의 입구영역에서 유체입자가 덕트 입구에서 축방향으로 가장 먼곳까지 이동한 유체입자의 최대 이동거리를 입구길이라고 규정하면 이 입구길이까지의 유동영역을 입구영향을 받는 발달과정에 있는 유동영역이라고 할 수 있고, 입구길이 이상의 자유 유동영

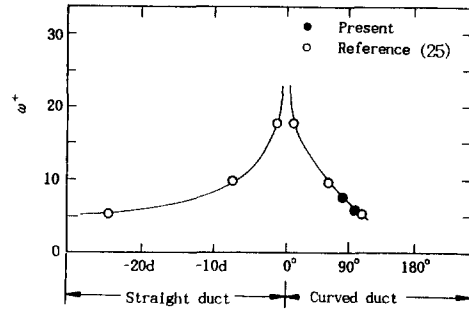


Fig. 15 Entrance length laminar oscillatory flow.

역은 입구의 영향을 받지 않는 완전 발달된 유동영역이라고 할 수 있다.

직덕트에 접속된 곡덕트내의 진동류에서는 덕트내의 속도분포는 덕트의 덕트축방향으로 복잡하게 변화하면서 발달한 유동에 가깝게 된다. 공업적으로는 속도분포가 덕트의 덕트축방향으로 변화하지 않게되는 위치까지를 곡덕트가 시작되는 위치에서부터 계산된 거리가 아주 중요한 의미를 지닌다. 그렇지만 교번되는 진동유동에서는 이렇게 정의한 입구거리는 위상에 따라 다르다고 생각되므로 일반적으로는 위상에 따라 변하지 않는 속도분포가 덕트축방향으로도 변화하지 않게 되는 거리를 입구길이라고 결정하는 것이 타당하다.

본 실험의 조건에서 많은 무차원 각진동수에 대하여 실험이 수행되지는 않았지만, 기존의 문헌에서 발표된⁽²⁵⁾ 무차원 각진동수에 대한 입구길이와 비교하여 Fig. 15에 나타내었는데 잘 일치하고 있음을 볼 수 있었고, 진동유동의 입구길이는 정상유동에 비하여 상당히 짧다는 것을 알 수 있다. 또한 입구길이는 무차원 각진동수가 증가할수록 짧게되는데 아주 높은 무차원 각진동수에 있어서는 직덕트부, 곡덕트부의 유동은 함께 곡덕트부 시작점 부근의 범위에서 거의 발달한 유동이 되기도 한다는 발표⁽²⁵⁾도 볼 수 있다. 또한 입구길이는 곡덕트가 직덕트 보다도 짧고 동일한 단수를 갖는 정상유동보다 진동유동 쪽이 짧게 나타났다.

4. 결 론

정사각단면 180° 곡덕트에서 층류진동유동에 대하여 LDV 유속계를 이용한 실험적 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 정사각단면 곡덕트의 층류진동유동에서는 입

제딘수가 $De_{os,cr} \approx 100\omega^+$ 이며,

(2) 속도분포의 경우 층류진동유동에서는 무차원 각진동수가 작은 경우 가속말기와 감속말기에 외측벽 쪽으로 속도가 큰 분포형을 이루나, 무차원 각진동수가 증가함에 따라 2차유동의 영향으로 환상(環狀) 형의 분포형태를 이룬다.

(3) 벽면전단응력은 층류진동유동에서는 무차원 각진동수가 낮은 경우에 외벽측에서 큰 값을 갖고 무차원 각진동수가 증가함에 따라 내벽측으로 벽면전단응력의 최대값이 이동한다.

(4) 층류진동유동의 입구길이는 무차원 각진동수에 따른 영향을 보였는데 층류진동유동은 층류정상유동에 비교하여 입구길이가 짧게 나타났으며 본 실험조건에서는 굽힘각이 90°에서 100° 지점이었다.

참고문헌

- (1) Eustice, J., 1910, "Flow of Water in Curved Pipes," *Proc. R. Soc. Ser. A.* 84-568, pp. 107~118.
- (2) Eustice, J., 1911, "Experiments on Stream-line Motion in Curved Pipes," *Proc. R. Soc. Ser. A.* 84-576, pp. 119~131.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Mullin, T. and Gerated, C. A., 1980, "Oscillatory Flow in Curved Pipes. Part. 1. The Developing Case," *J. Fluid Mech.* Vol. 98, part. 2, pp. 383~395.
- (6) Uchida, S., 1956, "The Pulsating Viscous Flow Superposed on the Steady Laminar Motion of Incompressible Fluid in a Circular pipe," *Z. Angew. Math. Phys.* Vol. 7, pp. 403~423.
- (7) Austin, L. R. and Seader, J. D., 1973, "Fully Developed Viscous Flow in Coiled Circular Pipes," *AICHE. J.* Vol. 19, No. 1, pp. 85~93.
- (8) Collins, W. M. and Dennis, S. C. R., 1974, "The Steady Motion of Viscous Fluid in a Curved Tube," *Q. J. Mech. Appl. Math.* Vol. 28, No. 1, pp. 133~156.
- (9) 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.
- (10) Rabadi, N. J., Chow, J. C. F., and Simon, H. A., 1982, "Heat Transfer in Curved Tubes with Pulsating Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, No. 2, pp. 195~203.
- (11) Rabadi, N. J., Simon, H. A. and Chow, J. C. F., 1980, "Numerical Solution for Fully Developed Laminar Pulsating Flow in Curved Tubes," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 3, pp. 225~239.
- (12) Stewartson, K., Cebeci, T., and Chang, K. C., 1980, "A Boundary-Layer Collision in a Curved Duct," *Q. J. Mech. Appl. Math.* Vol. 33, pp. 59~75.
- (13) Humphery, J. A., Iacovides, H. and Launder, B. E., 1985, "Some Numerical Experiments on Developing Laminar Flow in Circular-Sectioned Bends," *J. Fluid Mech.* Vol. 154, pp. 357~371.
- (14) Stewartson, K. and Simpson, C. J., 1982, "On a Singularity Initiating a Boundary-Layer Collision," *Q. J. Mech. Appl. Math.* Vol. 35, pp. 1~16.
- (15) Sudou, K., Sumida, M., Takami, T. and Yamane, R., "Oscillatory Flow in Curved Pipes (2rd Report, Axial Velocity Profile)," *B. of the JSME*, Vol. 51, No. 463, pp. 811~819.
- (16) Agrewal, Y., Talbot, L. and Gong, K., 1978, "Laser Anemometer Study of Flow Development in Curved Circular Pipes," *J. Fluid Mech.* Vol. 85-3, pp. 497~518.
- (17) Mcconalogue, D. J. and Srivastava, R. S., 1968, "Motion of a Fluid in a Curved Tube," *Proc. Roy. A.* 307, pp. 37~53.
- (18) Zalosh, R. G. and Nelson, W. G., 1973, "Pulsating Flow in a Curved Tube," *J. Fluid Mech.* Vol. 59, part 4, pp. 693~705.
- (19) Munson, B. R., 1976, "Experimental Results for Oscillating Flow in a Curved Pipe," *Phys. Fluids*, Vol. 18, No. 12, pp. 1607~1609.
- (20) Utsumi, H. and Kawata, M., 1972, "Flow Velocity Measurement in Entrance Region of Capillary Using a Laser Doppler Velocimeter," *日本計量研究報告*, Vol. 19, No. 2, pp. 51~57.

- (21) 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.
- (22) Muraoka, M. and Kumagai, T., 1993, "On the Motion of a Tracer Particle in Unsteady Flows (1st Report, Numerical Analysis of the Motion of a Spherical Particle in Oscillatory Flows at Low Reynolds Numbers)," *B. of the JSME*, Vol. 59, No. 559, pp. 713~720.
- (23) Bertelsen, A. F., 1975, "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.
- (24) Sumida, M., Sudou, K. and Takami, T., 1984 "Pulsating Flow in Curved Pipes (2nd Report, Experiments)," *Bul. of the JSME*, Vol. 27, No. 234, pp. 2714~2721.
- (25) Sumida, M., Sudou, K. 1994, "Oscillatory Flow in Curved Pipes(4rd Report, Velocity Distribution in Entrance Region)," *日本機械學會論文集(B編)*, 60卷 569號, pp. 63~70.
- (26) Park, G. M. and Koh, Y. H., 1990, "A Study on Characteristics of Developing Laminar Steady Flows in a Square Duct," *KSME Journal*, Vol. 14, No. 6, pp. 927~936.
- (27) Iguchi, M., Park, G. M. and Koh, Y. H., 1993, "The Structure of Turbulence in Pulsatile Pipe Flows," *KSME Journal*, Vol. 7, No. 3, pp. 185~193.
- (28) 박길문, 조병기, 양광열, 1994, "정사각단면 덕트입구영역에서 난류맥동유동의 속도분포와 난류강도," *대한기계학회*, 94년도 춘계학술발표회 논문집 II권, pp. 290~293.
- (29) 박길문, 조병기, 1994, "180° 정사각단면 곡관덕트의 입구영역에서 층류비정상 유동의 유동특성에 관한 연구," *대한기계학회*, 94년도 추계학술발표회 논문집 II권, pp. 401~405.
- (30) TSI Incorporated, 1992, Phase Resolved Software, Instruction Manual.
- (31) Synergy Software, Kaleida Graph Learning Guide, Third Edition.