

정4각 덕트 入口領域에서 遷移脈動流動의 速度分布와 入口길이에 關한 研究

A Study on Velocity Profiles and Inlet Length of Developing Transitional Pulsating Flows in the Entrance Region of a Square Duct.

유 영 태*, 모 양 우**, 홍 성 삼***
Y. T. Yoo, Y. W. Moh, S. S. Hong

ABSTRACT

In the present study, the velocity profiles and entrance length of developing transitional pulsating flows are investigated both analytically and experimentally in the entrance region of a square duct. The systems of conservation equations for transitional pulsating flows in a square duct are solved analytically by linearizing the non-linear convective terms. Analytical solutions are obtained in the form of infinite series for velocity profiles.

The experimental study for the air flow in a square duct(40mm×40mm×4000mm) is carried out to measure velocity profiles and other parameters by using a hot-wire anemometer with a data acquisition and processing system.

The distribution of velocity profiles($u_{ps}/u_{m, in}$) in the decelerating period is higher than in the accelerating period. The distribution of the axial component of the axial component of velocity in the transitional flow is nearly uniform in the central region of the duct, and decrease rapidly near the wall. The entrance length correlation of the transitional pulsating flows in a square duct is obtained to be $L_e/D_h = 0.83 A_1 Re_{in}/(\omega^+)^2$

주요기술용어 : Pulsating Flow(맥동유동), Oscillatory Flow(진동유동), Inlet Length(입구길이), Entrance Region(입구영역), Velocity Profile(속도분포), Velocity Wave Form, Transitional Flow(천이유동), Velocity Amplitude ratio(속도증폭비)

기 호 설 명	b : 덕트 높이(m)
A_1 : 속도진폭비($A_1 = u_{m, os} / u_{m, ta}$)	D_h : 수력 직경(=4ab/(a+b))
a : 덕트 폭(m)	f : 주파수(Hz)
	L_e : 입구길이(m)

* 조선대학교 공과대학 정밀기계공학과(Dept. of Precision Mechanical Engineering)
 ** 정회원 조선대학교 공과대학 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering)
 *** 조선대학교 공과대학 기계공학과대학원(Dept. of Mechanical Engineering)

- $M_n(\omega^+), \theta_n(\omega^+)$: 제1종 n차 Bessel 함수
- P : 壓力(Kgf/m²)
- Re : Reynolds number
- T : 振動 週期
- t : 시간(s)
- u, v, w : x^-, y^-, z^- 방향에서 속도성분(m/s)
- x, y, z : Fig 1에서 직각좌표
- z^+ : 무차원 z축(=z/b)
- λ_q : 준정상 마찰계수
- δ : 경계층 두께
- ρ : 밀도(Kg/m³)
- μ : 점성계수
- τ : 전단응력(Kgf/m²)
- ν : 동점성계수(m²/s)
- ω : 각속도(=2 π f)
- ω^+ : 무차원 주파수(= $b\sqrt{\omega/\nu}$)
- \angle : 위상각
- | | : 진동유동의 속도진폭

〈Subscripts and others〉

- cl : 덕트 중심선에서 값
- cr : 임계값
- la : 층류유동
- m : 횡단면 평균값
- os : 振動流動
- ps : 맥동유동
- st : 정상유동
- q : 준정상상태값(Quasi-steady value)
- ta : 시간평균값
- tr : 遷移流動
- tu : 난류유동
- I : Fourier 급수에서 기본파 값

1. 緒 論

관로의 流動은 時間의 함수로 표시되는 비정상유동과 시간의 변화와는 관계가 없는 정상유동으로 크게 분류 할 수 있는데, 流體機械를 구성하고 있는 관로망의 流動은 비정상유동으로 흐르는 경우가 많다. 그러므로 관로내에서 흐르는 비정상유동 特性을 정확하게 해석한다는 것

은 기계 效率과 매우 밀접한 관계가 있다. 비정상유동은 정상유동과 달리 시간에 따라 변화하는 유동이므로 관로내를 통과하는 非定常流動의 속도분포를 정확하게 측정한다는 것은 유체를 이용한 유량제어 및 동력제어 해석에 매우 중요하다.

덕트내에서 非定常流動 중 脈動流動의 亂流에 대한 遷移는 왕복동펌프와 압축기(compressor) 등을 구성하고 있는 관로망설계와 자동차 배기계통의 유동해석에 있어서 중요한 要因이 되고 있다.¹⁾ 그러므로 덕트의 入口領域에서 비정상유동에 대한 연구는 광범위한 연구분야로 되어있다.

비정상유동에 대한 연구를 살펴보면 Ohmi et al.²⁾가 원관에서 脈動流動(pulsating flow)일 경우 시간평균 레이놀즈수를 증가시켜가면서 속도파형과 速度分布을 연구하여 층류유동, 천이유동과 난류유동에 대하여 연구하였다. Iguchi et al.³⁾는 4각 덕트에서 脈動流動일 경우 난류에 대한 천이형상과 재층류화 현상에 대하여 연구하였다. 최⁴⁾는 덕트의 완전히 발달된 領域에서 時間平均 레이놀즈수를 증가시켜가면서 속도파형과 속도분포를 연구하여 층류유동, 천이유동 및 난류유동을 분류하였다.

맥동유동의 臨界 레이놀즈수(critical Reynolds number)는 무차원 각 진동수(ω^+)와 속도진폭비(A_1)와의 함수이므로 본 연구에서는 무차원 角振動數(ω^+)를 8.94로 고정하고 時間平均 레이놀즈수(Re_m)와 속도진폭비(A_1)를 變化시켜가면서 實驗하였다. 속도분포는 열선풍속계(hot-wire anemometer)로 測定하여 광기록계에 기록된 속도파형(velocity waveforms)을 기준으로 하여 시간평균 레이놀즈수(Re_m)를 증가시켜가면서 천이유동영역을 확인하였다. 본 연구의 目的은 속도파형과 속도분포를 기준하로하여 遷移脈動流動의 입구길이에 대한 실험식을 제안하는데 있다.

2. 理論解析

본 研究에서는 Fig.1과 같은 직각좌표계를 이

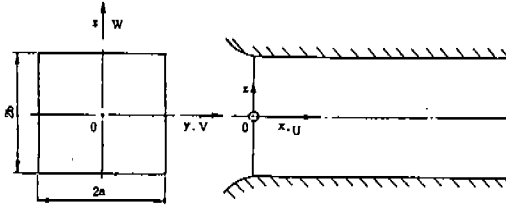


Fig.1 Cartesian coordinate system and velocity components.

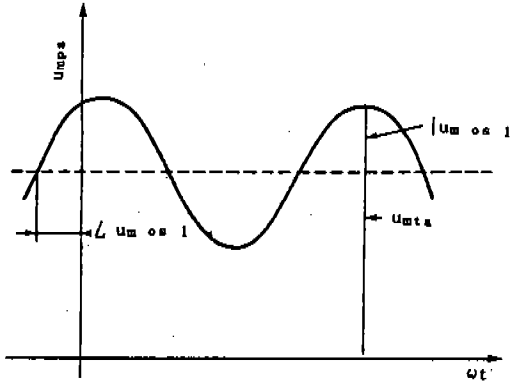


Fig.2 Velocity curves of pulsating flow.

용하였다. 脈動流動은 振動流動과 定常流動이 합성되어 이루어진 유동이며 Fig.2는 脈動流動의 기본속도곡선이다. 입구길이를 결정하기 위한 방정식에서 y방향과 z방향의 運動方程式의 速度成分은 x방향의 운동방정식에 비하여 그 영향이 매우 적으므로 무시할 수 있다. 그러므로 x방향에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

入口領域에서 非定常流動에 대한 Navier-Stokes 방정식 중 비선형항은 최⁴⁾, Atabek⁵⁾과 박⁶⁾이 비선형항을 선형화한 방법을 이용하여 식 (1)의 비선형항을 선형화하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + |u_{m, la}| \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

맥동유동에서 橫斷面 平均 速度는 다음과 같다.

$$u_{m, ps} = u_{m, la} + |u_{m, os, l}| \cos(\omega t + \angle u_{m, os, l}) \quad (3)$$

壓력구배(4P/L)는 定常流動의 압력구배항과 振動流動의 압력구배항의 합이며 다음과 같다.

$$4P/L = 4P_{ld}/L + (|4P_{os, l}|/L) \cos \omega t \quad (4)$$

脈動流動의 속도성분은 定常流動과 振動流動이 합성된 유동이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u_{ps} = u_{la} + u_{os, l} = u_{la} + |u_{os, l}| (\cos \omega t + \angle u_{m, os, l}) \quad (5)$$

식(5)에서 첨자 ps는 脈動流動을 표시하고 있다. 식(3)과 식(5)에서 $\angle u_{m, os, l}$ 속도를 중심으로 한 위상각이다. 유체유동속도가 증가하여 亂流로 될 때 축방향 속도성분 u는 다음과 같다.

$$u_{ps} = u_m + u' = u_{la} + u_{os, l} + u' \quad (6)$$

식(6)에서 u'는 波動速度 성분이고 u_{la}는 時間 平均속도 성분이다. 그러나 진동유동과 정상유동이 합성되어 이루어진 맥동유동은 천이유동 영역에서 맥동유동 중 진동유동의 유동방향이 바뀔 때 점성소산의 영향으로 언제나 亂流가 되지 않고 재층류화(relaminarization)가 발생한

다.³⁾ 그러므로 본 연구에서는 파동속도성분인 u' 무시할 수 있다.

脈動流動의 斷面평균속도는 (3)식을 (2)식에 대입하여 정리한 다음식을 적용하였다.⁷⁾

$$u_{m, ps} = \frac{b^2}{\mu} \frac{4P_w}{\ell} + \frac{1}{\omega^+} \frac{b^2}{\mu} \left| \frac{4P_{os, 1}}{\ell} \right| \frac{M_2(\omega^+)}{M_0(\omega^+)} \quad (7)$$

$$X \cos(\omega t + \theta_2(\omega^+) - \theta_0(\omega^+) - \frac{3}{2}\pi) \quad (7)$$

위식에서 M_2 , M_0 및 θ_2 , θ_0 는 제1종 베셀함수이다. 맥동유동의 입구길이를 결정하기 위하여 중심속도성분값을 다음과 같이 시간평균속도와 진동유동이 속도성분과 분리하여 나타낼 수 있다.⁹⁾

$$u_{cl, tu} = \left[1 + \frac{\lambda}{D_h} X \right]^{\frac{1}{2}} U_{m, tu} \quad (8)$$

$$u_{cl, us} = u_{m, tu} A_j [F_r \cos \omega t - F_s \sin \omega t] \quad (9)$$

윗식에서 사용변수들은 다음과 같다.

$$F_r = 1 + \frac{7\Omega^2}{4X} - \frac{7\Omega^2}{4X} \cos \frac{1-X}{\Omega} - \frac{3\Omega}{4X} \sin \frac{1-X}{\Omega}$$

$$F_s = -\frac{7}{4} \Omega + \frac{\Omega}{X} + \frac{3\Omega}{4X} \cos \frac{1-X}{\Omega} - \frac{7\Omega^2}{4X} - \frac{1-X}{\Omega}$$

$$X = 1 + \lambda \frac{X}{D_h}$$

$$\Omega = \lambda \frac{R_{tu}}{8\omega^+}$$

식(7), (8)과 (9)식을 이용하여 덕트입구로부터 유체가 하류방향으로 이동해감에 따라 경계층이 성장하기 때문에 단면평균 속도에 대한

덕트의 중심속도로 경계층의 크기에 대한 식을 정리하면 다음과 같다.⁹⁾

$$\frac{\delta}{b} = \frac{15 - [15 \left\{ \frac{64u_{mps}}{u_{cbs}} \cdot 49 \right\}^{1/2}]}{8} \quad (10)$$

맥동유동에서 압력구배는 층류유동과 난류유동에 동시에 적용할 수 있는 다음식을 이용하였다.

$$4p/l = \rho \, du_m/dt + 4\tau_w/D_h \quad (11)$$

식(11)에서 $4p/l$ 는 압력구배항, $\rho \, du_m/dt$ 는 관성항, $4\tau_w/D_h$ 는 점성항이며, 맥동유동에서 압력항, 점성항과 관성항에 대한 상관관계식을 특성함수로 유도하여 이 3항이 맥동유동에서 미치는 影響에 대해서는 이미 연구 발표되었다.⁷⁾ 遷移脈動流動領域에서 덕트내의 전단응력 τ_w 는 식(12)을 적용할 수 있으며 식(12)에서 λ_q 는 준정상상태(quasi-steady state)에서 마찰계수 값으로 층류유동일 경우에는 $57/Re^{0.19}$ 이고 천이유동일 경우에는 $4.4 \times 10^{-5} Re^{0.894}$ 의 값이다.⁴⁾

$$\tau_w = \lambda_q \rho \, u_m \, |u_m| / 8 \quad (12)$$

덕트내에서 천이맥동유동의 剪斷應力은 준정상유동의 전단응력과 무차원 각진동수로 표현되는 진동유동의 전단응력의 합으로 나타나는 다음식으로 표현된다.⁹⁾

$$\tau_w = \lambda_q \frac{\rho}{8} u_m^2 + \frac{4\mu}{D_h} \left[\{ \eta_1(\omega^+) - 1 \} (u_m - u_{m, tu}) + \frac{\xi_1(\omega^+) du_m}{\omega^+ dt} + \frac{\xi_2(\omega^+) du_m}{\omega^+ dt} \right] \quad (13)$$

$$\eta_1(\omega^+) = \frac{\omega^+}{4} \frac{M_1(\omega^+)}{M_2(\omega^+)} \cos[\theta_1(\omega^+)]$$

$$-\theta_2(\omega^+) + 3\pi/4]$$

$$\xi_1(\omega^+) = \frac{\omega^+}{4} \frac{M_1(\omega^+)}{M_2(\omega^+)} \sin[\theta_1(\omega^+) - \theta_2(\omega^+) + 3\pi/4]$$

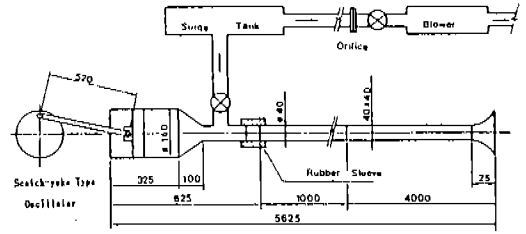


Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus.

3. 실험

實驗장치에 대한 계략도를 Fig.3에 나타내었으며 先行 研究의 실험장치와 같은 실험장치로 실험하였다.^{4,6,7,9-11)} 맥동유동은 정상유동과 진동유동이 합성되어 이루어진 유동으로서, 정상유동은 송풍기에 의하여 시험덕트에 흡입유동으로 주어지고, 振動流動은 스코트-요크(scotch-yoke)형 加振器를 V.S. 모터에 연결하여 振動流動의 무차원 각진동수(ω^+)를 調節할 수 있도록 하였다. 여기에서 무차원 각진동수(ω^+)는 $b\sqrt{\omega\nu}$ 값으로 8.94로 固定하였으며, 본 실험에서 사용한 作動流體는 空氣를 사용하였으며, 시험덕트에서 속도분포는 열선유속계로 測定하였다. 진동유동의 振幅은 무단변속기에 연결된 回轉圓板의 중심에서 회전원판상에 놓여있는 구멍에 피스톤의 연결봉을 편으로 고정해서 조절할 수 있도록 하여 회전원판으로 행정(Ap)를 조절하였다. 즉 속도진폭은 피스톤 행정을 10mm간격으로 10mm에서 270mm까지 變化시켜 피스톤 행정을 조절할 수 있도록 하였다. 시험부의 덕트는 아크릴(acryl)로 만들었으며, 덕트의 길이는 4000mm, 덕트의 斷面은 40mm×40mm이고 덕트입구는 벨마우스(bell mouth)형으로 설치하였다. 가진기에 의해 發生된 機械的인 振動이 시험부인 덕트에 傳達되지 않도록 가진기와 시험덕트 연결부에 고무슬리브(rubber sleeve)로 연결하였다. 횡방향의 速度를 측정하기 위하여 횡방향의 移送기구를 設置하여 열선풍속계(hot-wire anemometer)로 17 지점을 移動하면서 測定하였다. 속도과형으로 천이유동영역을 확인한 다음 입구길이를 결정하기 위하여 속도과형과 속도분포를 무차원 橫斷面位置(z/b)가 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 1.65,

1.70, 1.75, 1.80, 1.85, 1.90와 1.95인 지점에서 測定하였으며, 無次元 軸方向의 位置(x/D_h)는 5, 10, 15, 20, 30, 35 및 40으로 移動해 가면서 軸방향의 속도변화가 거의없는 部分까지 測定하였다. 실험條件은 Table 1에 나타내었다.

정상유동과 진동유동이 합성되어 이루어진 맥동유동 중 振動流動 레이놀즈수를 決定하는 속도진폭 $|u_{m, os}|$ 은 $(A_p/2) \times \omega \times (A_{piston}/A_{duct})$ 를 利用해서 計算한 값이다. 振動流動의 속도진폭을 基礎로한 진동유동의 레이놀즈수는 $Re_{os} = |u_{m, os}| D_h/\nu$ 이며, 시간평균레이놀즈수(Re_{ta})는 $u_{m, ta} D_h/\nu$ 의 계산값이다. 遷移流動領域은 橫斷面에서의 속도과형을 觀察하여 遷移流動領域을 確認하였으며, 空氣의 압축성 影響은 위에서 說明한 振動周波數에서는 무시할 수 있다. 열선풍속계의 信號를 광기록계에 記錄된 實驗結果를 基準로 하여 실험조건이 천이유동영역인지 아닌지를 확인하였다. 본 실험에서는 진동유동의 레이놀즈수 Re_{os} 를 3020으로 고정하였고, 진동주파수는 0.517 Hz, 행정(Ap)를 30mm로 고정하였다. 정상유동과 진동유동이 합성되어 이루어진 맥동유동은 각진동수를 變化시키거나 시간평균레이놀즈수를 變化시켜 실험조건을 조절할 수 있으므로, 본 연구에서는 진동유동의 레이놀즈수를 고정하고 시간평균레이놀즈수를 증가시켜 가면서 실험을 하였다. 속도 진폭비(A)는 진동유동의 속도진폭성분과 시간평균속도비($|u_{m, os}|/|u_{m, ta}|$)이다.

4. 結果 및 考察

4.1 遷移脈動流動 領域의 구분

遷移流動 領域을 구분하기 위하여 시간평균

Table.1 Experimental condition of developing transitional pulsating flow.

x/D_h	$f(\text{Hz})$	$A_p(\text{mm})$	ω^+	Re_{in}	Re_{ns}	A_1
5	0.517	30	8.94	1800	3020	1.67
				2100		1.43
				2700		1.11
				3100		0.97
10	0.517	30	8.94	1800	3020	1.67
				2100		1.43
				2700		1.11
				3100		0.97
15	0.517	30	8.94	1800	3020	1.67
				2100		1.43
				2700		1.11
				3100		0.97
20	0.517	30	8.94	1800	3020	1.67
				2100		1.43
				2700		1.11
				3100		0.97
25	0.517	30	8.94	1800	3020	1.67
				2100		1.43
				2700		1.11
				3100		0.97
30	0.517	30	8.94	2100	3020	1.43
				2700		1.11
				3100		0.97
35	0.517	30	8.94	2700	3020	1.11
				3100		0.97
40	0.517	30	8.94	2700	3020	1.11
				3100		0.97

레이놀즈수(Re_w)를 변화시켜가면서 層流에서 遷移流動, 또 遷移流動에서 亂流流動 상태를 최⁴⁾가 완전히 發達된 領域에서 實驗한 結果와 比較해 가면서 實驗하였다. 덕트의 入口流動領域에서 덕트의 軸方向 位置(x/D_h)를 變化시키고, 그 각각의 位置에서 덕트의 無次元 횡방향의 位置(z/b)를 變化시키면서 얻어진 속도파형의 實驗結果를 분석하였다. 遷移脈動流動의 덕트 入口領域에서 流體流動이 下流로 進行함에 따라 壁面の 점성 影響 때문에 境界層이 發達하면서 完全히 發達된

流動으로 成長해간다. 피스톤 행정을 고정하고 시간평균레이놀즈수를 증가시켜가면서 얻은 속도 파형을 Fig4~Fig7에 나타내었다. Fig4~Fig7의 속도파형은 진동유동의 레이놀즈수(Re_w)가 3020일 경우의 천이맥동유동의 유동영역을 시간평균레이놀즈수(Re_w)가 1800과 3100사이의 속도 파형중 대표적인 것을 나타내어었다. 亂流 burst를 속도파형에서 觀察할 수 있는데, 減速位相에서 最初로 發生하며 덕트의 下流方向으로 進行할수록 減速位相에 亂流成分이 더 많이 나타나고 있

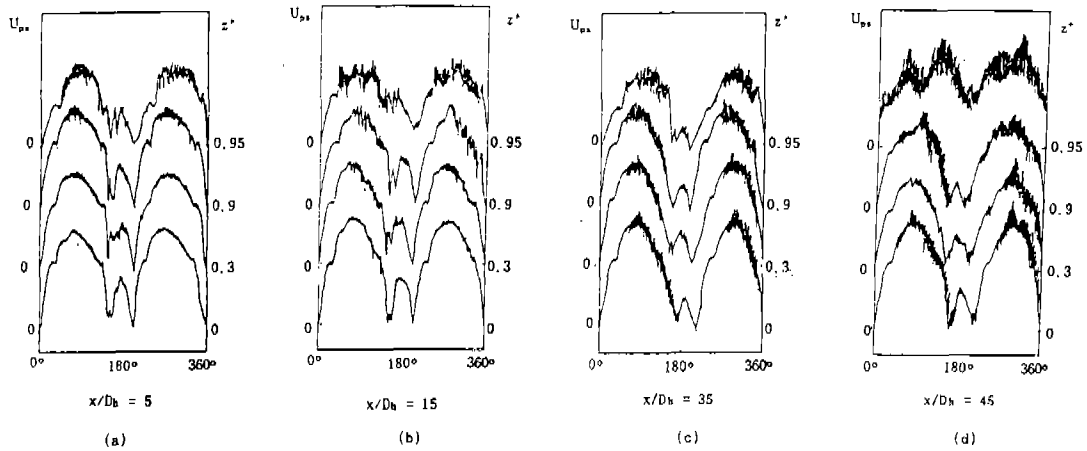


Fig.4 Velocity waveforms of developing transitional pulsating flow at $Re_{\tau} = 1800$.

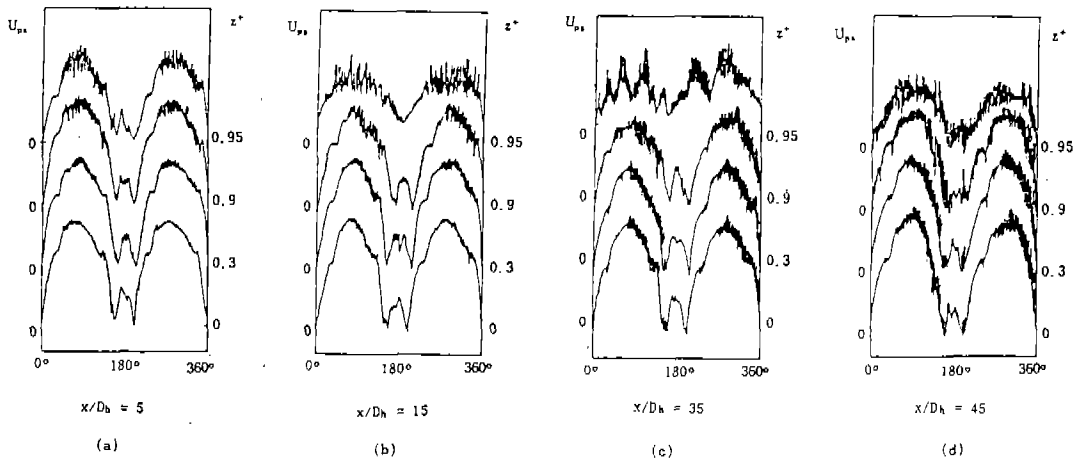


Fig.5 Velocity waveforms of developing transitional pulsating flow at $Re_{\tau} = 2100$.

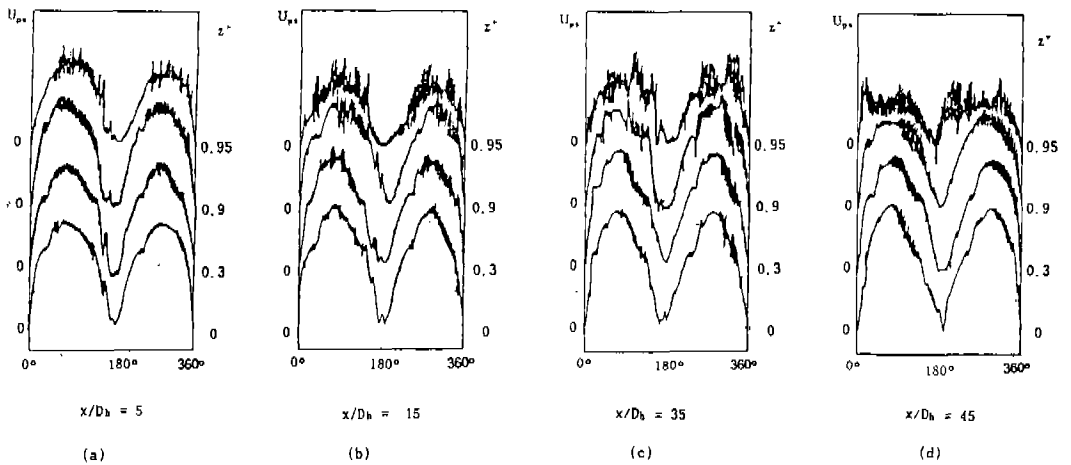


Fig.6 Velocity waveforms of developing transitional pulsating flow at $Re_{\tau} = 2700$.

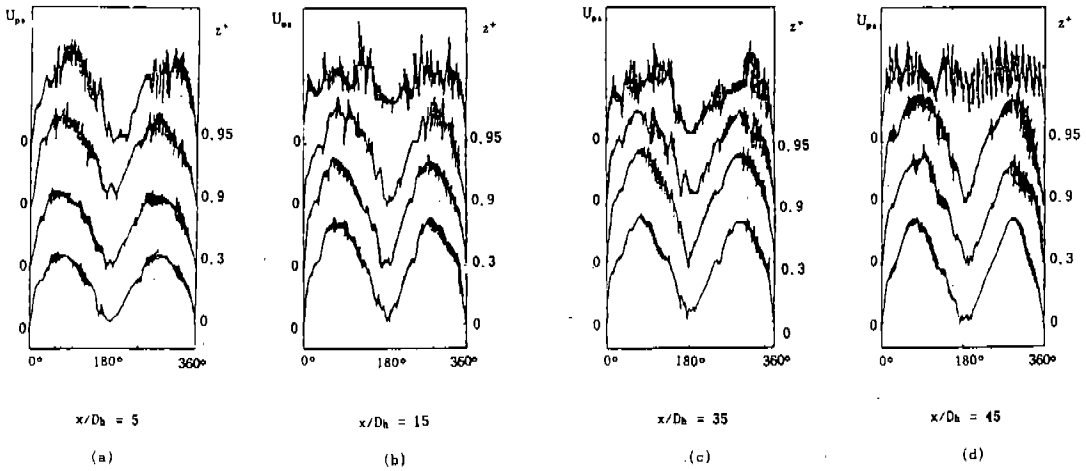
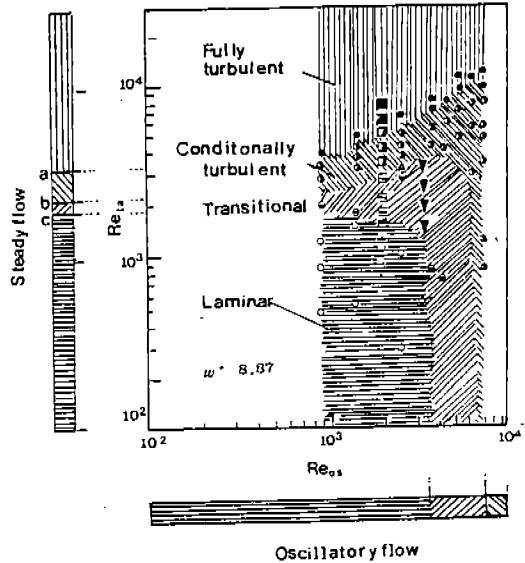


Fig.7 Velocity waveforms of developing transitional pulsating flow at $Re_w = 3100$.

다. bust에 의한 변동 성분은 流動方向이 바뀔 때 粘性消散 影響 때문에 변동 성분이 없어져서 가속 위상영역에서 再層流化가 이루어졌다.

즉 본 연구에서 설정한 실험조건이 加速位相 領域에서는 層流成分, 減速位相領域에서는 亂流成分만이 나타나 亂流成分과 層流成分이 共存하는 遷移流動領域에 있음을 確認할 수가 있다. 천이 유동의 壁面부근에서 bursting phenomena라고 하는 과정에 의하여 亂流가 發生하는데, 덕트 壁面에서 發生한 난류는 덕트의 中心쪽으로 전파되고 入口領域에서 下流方向으로 進行할 수록 亂流成分이 增加하고 있다. 이 實驗結果는 先行 연구결과와 比較하여 확인한 결과 본 實驗의 結果가 遷移流動領域에 있음을 알 수 있고,⁸⁾ Fig.8의 삼각형표시는 遷移振動流動에 대한 본 研究의 實驗範圍를 표시하고 있다.

정사각 덕트의 입구유동영역에서 정상유동과 진동유동의 합성으로 표시되는 천이맥동유동은 속도진폭비(A_1)가 1.67과 1.43인 경우에는 진동유동의 역류현상으로 Fig.4와 Fig.5에서처럼 불룩한 현상이 나타났다. 그러나 속도진폭비가 감소할수록 불룩한 부분이 줄어들어 속도진폭비(A_1)가 1.1인 부근에서는 없어진다. 이 불룩한 부분은 속도진폭비가 감소하면 가속위상에서 다시 층류로 합성되어 본 실험조건에서 천이맥동유동영역의 가속위상영역에서는 층류, 감속위상영역에서



	choi	circular	Present
Laminar	□	○	
Transitional	≡	⊙	▽
Conditionally turbulent	⊠	⊡	
Fully turbulent	■	●	

Fig.8 Classification of pulsating flow.

는 난류성분을 나타내어 층류와 난류가 공존하는 천이유동영역상태를 유지하고 있다. 여기에서 맥동유동의 속도파형을 기준으로 판단한 천이유동영역의 시간평균레이놀즈수(Re_w) 범위는 1800에서 3100까지로 하였다. 진동유동의 성분과 정상

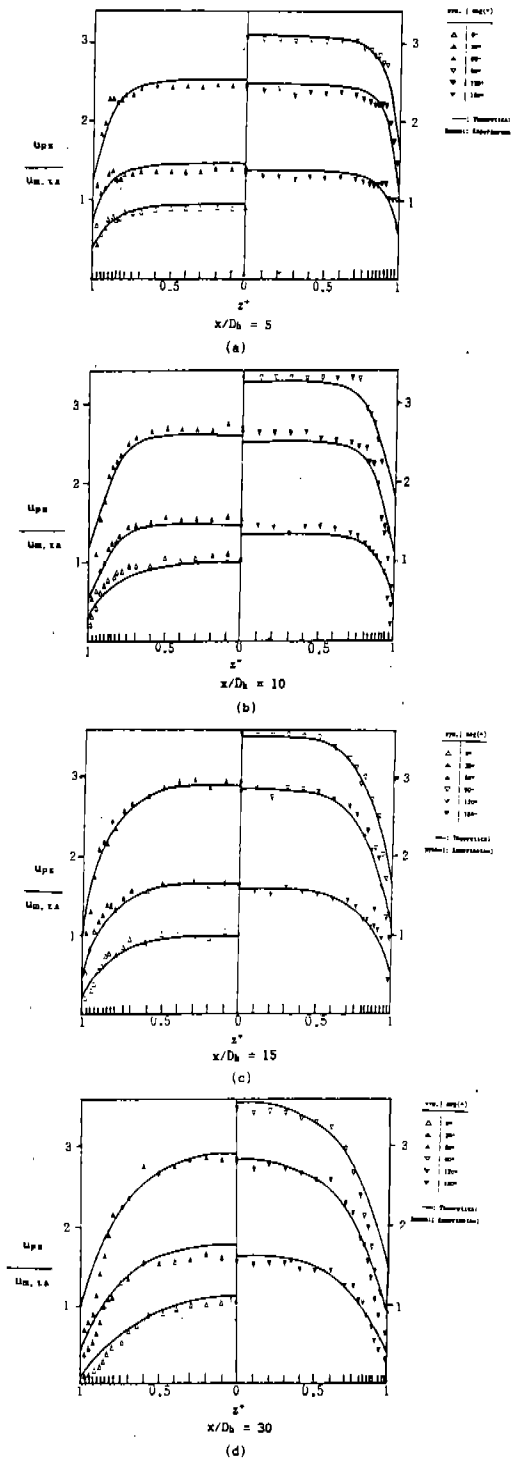


Fig.9 Cross-sectional velocity profiles of developing transitional pulsating flow at $Re_{\tau_0} = 1800$.

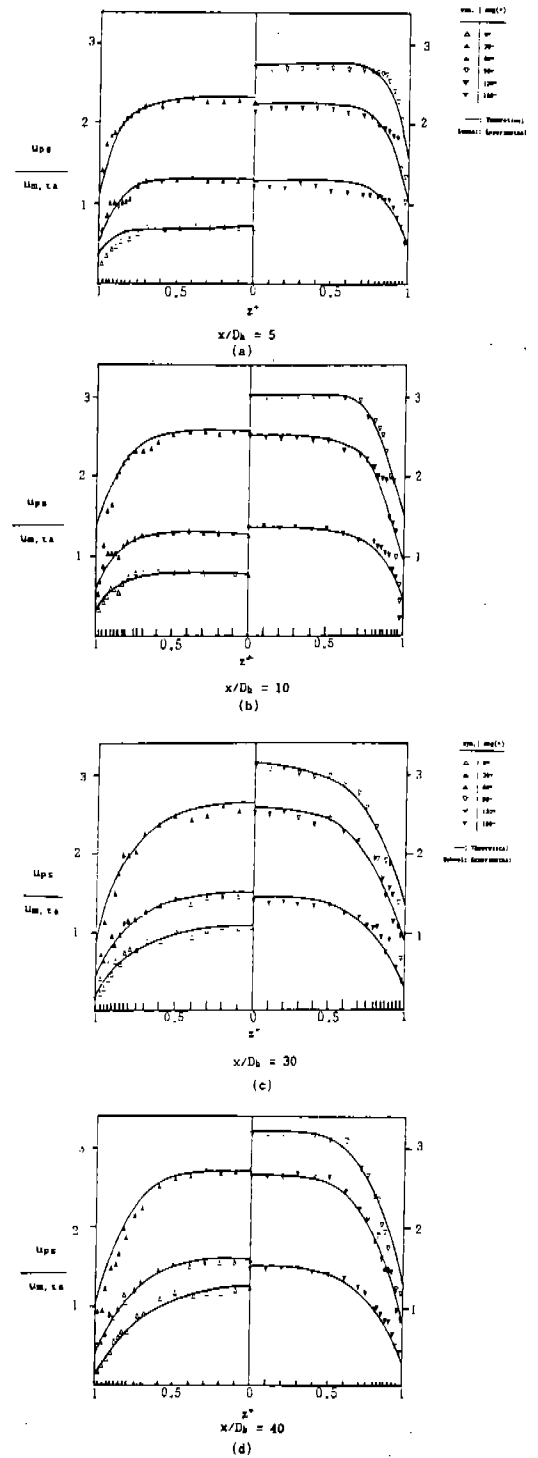


Fig.10 Cross-sectional velocity profiles of developing transitional pulsating flow at $Re_{\tau_0} = 2100$.

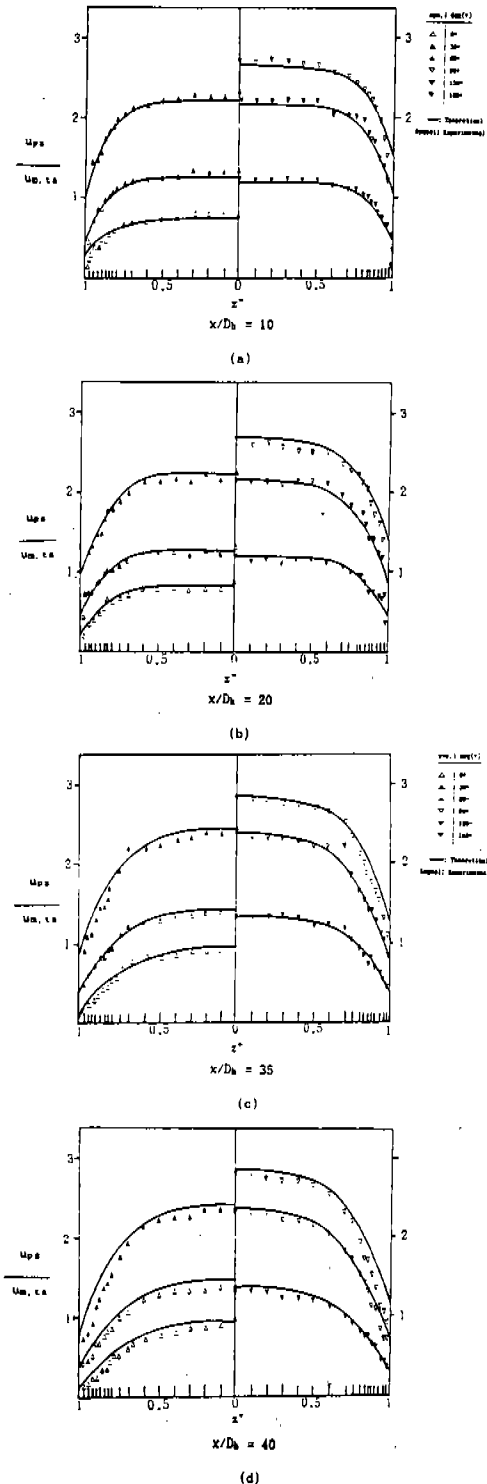


Fig.11 Cross-sectional velocity profiles of developing transitional pulsating flow at $Re_t = 2700$.

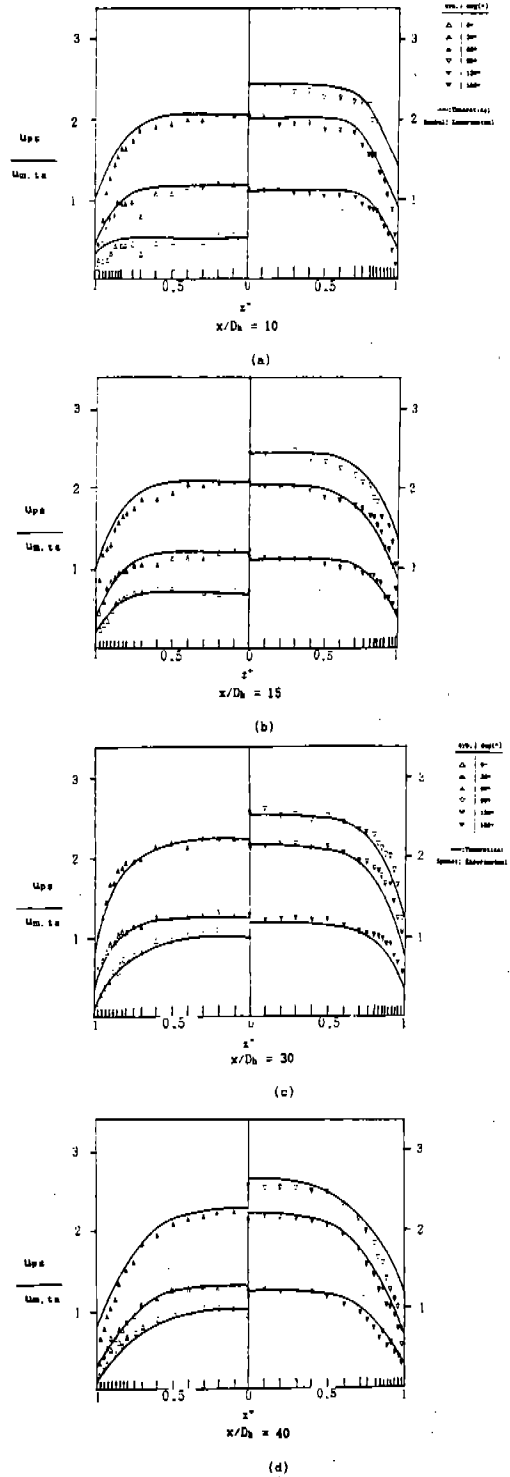


Fig.12 Cross-sectional velocity profiles of developing transitional pulsating flow at $Re_t = 3100$.

유동의 성분을 합성하여 발생시킨 맥동유동은 본 실험에서 진동유동의 레이놀즈수(Re_m)를 3020으로 고정하였기 때문에 선행연구의 결과를 도식적으로 나타낸 Fig.8에서 보는 것처럼 진동유동의 레이놀즈수를 가로축으로 하였을 때 시간평균 레이놀즈수가 1800에서 3100까지는 천이유동영역 상태에 있음을 확인하였다.

4.2 속도분포

덕트 입구유동영역에서 천이맥동유동에 대한 덕트 횡단면 속도분포를 무차원 축방향위치(x/D_n)와 시간평균 레이놀즈수(Re_m)에 따라 Fig.9에서 Fig.12에 나타내었으며 그림의 좌측은 가속위상이고 우측은 감속위상의 영역이다. 이 결과를 고찰하여 보면 遷移脈動流動에서 횡단면속도분포는 가속위상의 속도값이 감속위상의 속도값보다 작게 나타나고 있으며, 감속위상의 초기에서 속도값이 가장 크게 나타나고 있다. 횡단면속도분포는 중심에서 벽면쪽으로 갈수록 壁面으로부터 발생하는 점성의 影響 때문에 벽면쪽에서 속도구배가 크게 되었다. 천이유동영역의 횡방향속도분포 성분이 입구영역의 中心部에서는 균일한 속도분포를 이루고 있고 벽면에서 급격하게 감속하였다. 가속위상영역에서 보다 감속위상영역에서 속도분포값이 큰 이유는 가속위상영역에서 벽면의 점성영향이 감소되기 때문에, 감속위상영역에서의 속도분포값이 가속위상영역의 속도분포값보다 전체적으로 크게 나타나고 있다. 덕트 입구유동영역에서 流體가 하류방향으로 진행함에 따라 덕트 壁面으로부터 성장되어 가고 있는 境界層의 영향으로 인하여 중심부의 균일 유체 유동부분이 없어지며, 무차원 덕트 축방향의 위치(x/D_n)가 약 30부근부터는 속도분포형이 일정한 형태를 이루고 있는 것을 觀察할 수 있다. 속도분포의 變化가 거의 없이 일정한 속도분포 형태를 이루고 있는 完全 發達된 천이맥동유동의 속도분포형은 층류유동의 속도분포인 포물선형 속도분포와 난류유동의 속도분포인 1/7승 법칙의 속도분포형의 중간형태를 이루고 있음을 알 수 있다.

遷移脈動流動의 시간평균 레이놀즈수가 1800인

경우에는 완전히 발달된 천이맥동유동영역에서 횡단면 속도분포가 定常流動과 같은 속도분포형인 포물선 형태와 비슷하게 이루어져 있으나 시간평균 레이놀즈수가 증가할 수록 變化하여 난류유동의 속도분포인 1/7승 법칙의 속도분포형태로 접근함을 고찰할 수 있다. 덕트 입구유동영역에서 천이맥동유동의 축방향속도 분포를 무차원 덕트 축방향 위치에 따라 Fig.13에서 Fig.14에 時間平均 레이놀즈수(Re_m)의 변화에 따라 도시하여 고찰하여 보면, 덕트 입구구간의 초기감속위상에서 overshoot 현상이 발생하였다. 이 현상은 천이맥동유동은 정상유동과 진동유동이 合成되어 이루어진 유동이므로 정상유동의 유동이 입구로부터 진행할 때 입구로부터 발달해가는 境界層의 외부속도가 진동유동의 影響을 받아서 발생하는 것으로 사료된다. 일반적으로 overshoot 위치는 시간평균 레이놀즈수의 변화에 따라 약간 변화되지만 본 實驗條件에서는 덕트 입구 쪽에서 무차원 덕트 축방향의 위치(x/D_n)가 대개 15부근에서 발생하였다. 속도과형과 속도분포에 대한 실험결과를 살펴보면 속도과형이나 속도분포의 감속위상이 가속위상에서의 속도값보다 크게 나타나고 있다. 그 이유는 가속위상영역에서 점성의 영향이 감소하여 감속의 위상에서 가속위상영역의 속도값보다 크게 나타나고 있다.

4.3 入口 길이

덕트의 入口流動영역에서 유체입자가 하류로 진행함에 따라 덕트 벽면의 점성력으로 인하여 경계층이 發達하면서 횡방향과 축방향의 속도분포가 점점 발달하여 완전히 발달된 유동에서는 속도분포가 變化가 거의 없게 되어 일정한 속도분포형을 이루게 되는데 이 부분까지의 거리를 入口길이라고 하였다. 완전히 발달된 流動領域을 考察하기 위하여 횡방향 속도분포에 대한 實驗結果를 Fig.9에서 Fig.12에 도시하여 비교 고찰하였고, 축방향 속도분포에 대한 실험결과는 Fig.13과 Fig.14에 도시한 결과를 고찰하여 보면, 축방향 속도분포에서 무차원 축방향의 위치가 15인 부근에서 overshoot가 發行하며 overshoot가 발생하고 난 후 축방향 속도분포의 변화가 거의 없는

완전히 발달된 流動領域이 이루어지고 있다. 遷移 定常流動의 입구길이는 정상유동의 레이놀즈수가 증가할 수록 入口길이가 증가하고,¹²⁾ 천이진동유동에서는 무차원 각진동수가 일정할 경우 遷移振動流動의 레이놀즈수가 증가할 수록 증가하고 만일 진동유동에서 진동유동의 레이놀즈수가 일정할 경우에는 무차원 각진동수의 제곱에 반비례하였다.¹¹⁾ 그러나 定常流動과 振動流動의 합성으로 이루어진 脈動流動에서 진동유동을 일정하게 고정하고 시간평균레이놀즈수를 변화시켜 가면서 실험을 하였을 경우에는 진동성분이 유동을 안정화시키므로, 천이맥동유동의 입구길이 변화는 시간평균레이놀즈수가 증가할지라도 변화가 거의 없었다. 이런 현상은 천이정상유동의 속도파형 중 천이정상유동의 레이놀즈수가 2700 일때 덕트 유동영역에서 거의 난류상태의 속도

파형을 이루고 있으나^{4,10)} 시간평균 레이놀즈수가 3100이고 振動流動의 레이놀즈수가 3020인 진동성분이 合成 될지라도 가속위상영역에서는 변동성분이 나타나지 않았다. 가속위상영역에서 난류맥동유동이 되지 않는 것은 진동성분이 합성되어, 정상유동성분을 안정화시키는 특성때문에 시간 평균레이놀즈수가 증가할 지라도 천이맥동유동 입구길이의 변화가 거의없게 되는 것으로 고찰하였다. 중횡비가 1인 정사각 단면 덕트에서 천이맥동유동의 입구길이는 수력직경(D_h), 속도진폭비(A_1), 무차원 각진동수(ω^+) 및 시간평균레이놀즈수(Re_w)와의 함수관계가 있으며 실험결과로부터 최소자승법으로 얻은 입구길이식에 대한 실험식은 다음과 같다.

$$Le_N/D_h = K \frac{A_1 Re_w}{(\omega^+)^2}$$

여기에서 실험식의 계수 k 는 0.83을 얻었다.

5. 結 論

덕트 入口領域에서 遷移脈動流動에 대한 속도파형과 속도분포에 대한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 遷移脈動流動의 횡방향속도분포는 가속위상의 속도분포값이 감속위상의 속도분포값보다 작게 나타났으며, 이런 현상은 속도파형에서 감속위상에서 먼저 亂流 burst가 나타나는 것과 일치하고 있다. 이것은 진동유동과 정상유동이 합성되어 이루어진 脈動流動에서 진동유동의 유동방향이 바뀔때 가속위상의 유동에 影響을 주기 때문으로 생각된다.

2) 遷移脈動流動의 횡방향 속도분포에서 입구영역에서는 정상유동처럼 덕트 중심부근에서 거의 균일한 速度分布가 나타나며 壁面附近에서 급격하게 감소하고, 축방향 속도분포에서는 감속위상의 초기위상에서 overshoot가 發生하였다.

3) 遷移脈動流動의 입구길이는 시간평균레이놀즈수(Re_w), 수력직경(D_h), 속도진폭비(A_1) 및 무차원 각진동수(ω^+)와 관계가 있으며 入口길

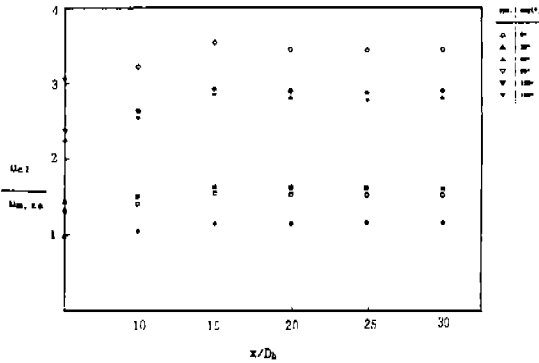


Fig.13 Axial velocity profiles of deloping transitional pulating flow at $Re_w=1800$.

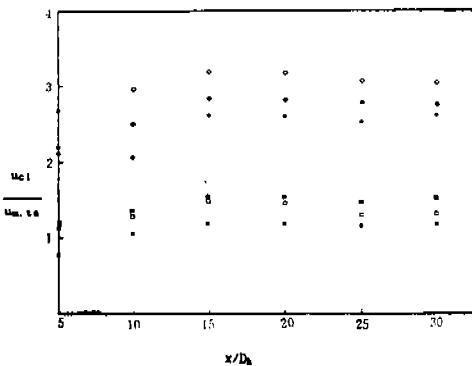


Fig.14 Axial velocity profiles of deloping transitional pulating flow at $Re_w=2100$.

이에 대한 실험식 $Le_p/D_i = 0.83 A_1 Re_w/(\omega^+)^2$ 를 얻었다.

참 고 문 헌

1. 박길문, 유영태, 문영순, "R2엔진의 배기관에서 流量과 壓力損失에 관한 研究" 亞細亞기보 제 10권, p.31~45, 1991.
2. Ohmi, M., Kyomen, S., Iguchi, M and Usui, T. : "Experimental study of eddy viscosity distribution in pulsating pipe flow", Tech. Reports of the Osaka Univ. Vol.33, No.1729, p.359~365, 1983.
3. Iguchi, M., Ohmi, M. and Nishizawa, K. : "Relaminarization of pulsatile turbulent flow in a rectangular duct", Bull. of the JSME, Vol.29, No.247, p.59~66, 1986.
4. 최주호, "정4각 덕트에서 遷移非定常流動 特性에 관한 研究", 조선대학교 박사학위 논문, 1988.
5. Atabek, H.B. and Chang, C.C. : "Measurement of laminar oscillatory flow inlet length of a circular tube", Phys. Med. Biol., Vol.9, No.2, p. 219~227, 1984.
6. 박길문, "정4각 덕트 入口領域에서 遷移非定常流動에 관한 研究", 고려대학교 박사학위 논문, 1989.
7. 近江宗一, 井口學, 確井建夫 : "圓管内脈動流れの流動形態と摩擦損失", 日本機械學會論文 46卷405號, p.846~853, 昭55~5.
8. 박길문, 유영태, 고영하 : "정4각 덕트의 입구 영역에서 천이맥동유동의 유동특성변수에 관한 연구" 한국우주항공공학회 논문집, 제19권, 제2호, p.46~59, 1991.
9. Ohmi, M., Usui, T., Tanaka, O. and Toyama, M. : "Pressure and velocity distributions in pulsation turbulent pipe flow, part 2, Experimental investigations", Bull. of the JSME, Vol.19, No. 187, p.75~81, 1981.
10. 박길문, 박선중, 최주호, 유영태, "정4각 덕트의 遷移非定常流動에 관한 研究", 공기조화·냉동공학회논문, Vol.1, No.3, p.252~262, 1989.
11. Gil-moon Park, Young-tae Yoo and Young-ha Koh : "Flow characteristics of developing transitional oscillatory flows in the entrance region of a square duct" ASME, Vol.106, No.G00594, p.7~13, 1991.
12. 박길문, 유영태, 고영하, "4각 덕트 入口領域에서 遷移定常流動의 入口길이에 관한 研究" 공기조화·냉동공학 논문집 제2권 제1집, p. 1~10, 1990.