

## Velocity Profiles and Entrance Length of Transitional Oscillatory Flows in the Entrance Region of a Square Duct

최주호\*                      최병민\*                      유영태\*\*  
J. H. Choi                      B. M. Choi                      Y. T. Yoo

### Summary

The flow characteristics of the transitional oscillatory flows are investigated analytically and experimentally in the entrance region of a square duct. The systems of conservation equations are analytically solved by linearizing the non-linear convective terms for the developing transitional oscillatory flows in a square duct. The analytical solutions are obtained in the form of infinite series for the velocity profiles. The experimental study for the air flow in a square duct is carried out to measure the velocity profiles and waveforms by using a hot-wire anemometer with the data acquisition and processing systems. The theoretical and experimental results provide the major characteristics of the developing transitional oscillatory flows, such as velocity profiles, velocity waveforms, and entrance length. The velocity profiles in the decelerating phase are larger than those in the accelerating phase for the developing transitional oscillatory flows. The correlations of the entrance length of the transitional oscillatory flows in a square duct are found to be  $Le/Dh = K \cdot Re_{os}/2(\omega^+)^2$ , where  $K$  is 1.23 of an experimental constant.

### 1. 緒論

덕트내의 入口領域(entrance region)에서 流動特性和 入口길이는 流體工學의 응용분야에 있어서 많이 활용되고 있으며, 덕트設計에서 중요한 資料가 될 뿐만 아니라, 産業現場에서 流體機械의 고성능화, 安定性 및 經濟性에 커다란 影響을 미친다(박 등, 1990). 따라서 산업기계의 정밀화와 最適設計를 위한 유체기계의 설계에 있어서 유체의 흐름에 관계되는 變數들이 時間에 따라 變化하는 非定常流動(unsteady flow)에 대

한 研究가 필요하게 되었다. 非定常流動은 流動의 형태에 따라 流動場에서 짧은 시간에 급격히 변화하는 유동인 過渡流動과 유동장에서 속도의 변화가 週期的으로 반복되는 유동인 振動流動(oscillatory flow) 및 脈動流動이 있다(유, 1989). 이러한 비정상유동은 유체기계와 동력기계의 열 및 물질전달, 壓力降下, 속도분포, 유체의 혼합 그리고 분산에너지 손실 등에 영향을 미치게 되어 유체기계와 熱機關에서 시동과 정지할 때, 로켓트와 제트 航空機의 연소기에서 유동과 연소 그리고 왕복동기관의 흡배기관, 유압 관로

\* 순천대학교 농과대학 농업기계공학과

\*\* 조선대학교 공과대학 정밀기계공학과

등에서의 유동해석은 경제성과 효율성에 매우 중요한 요인으로 되어 있다(박 등, 1989; 박 등, 1991). 그리고 농업기계분야의 곡물건조기나 공기컨베이어, 농산물 저장고와 농업시설 내의 덕트에서의 송풍저항 등의 분석 역시 최적설계의 하나의 요인이다. 특히 공기나 기름을 이용한 유압기계의 동력을 제어하는 요소에서는 流量과 壓力과의 곱은 동력을 제어하는 중요한 요인이므로, 유압 관로를 이용하여 동력을 제어할 때는, 관로내의 유동이 非常常流動일 경우 유동이 임의 유동장에서 時間에 따라 변하므로 유동특성을 정확히 규명하여야만 한다. 流量은 관로내의 속도분포와 관계가 있으며, 덕트의 입구 流動領域에서 速度分布는 壁面에서 점성의 영향 때문에 생기는 境界層流動과 벽면의 粘性的 영향을 받지 않는 중심부 유동 즉 포텐셜 流動으로 되어 있다. 입구길이 내의 속도분포와 완전히 발달된 유동영역의 속도분포는 다르므로 입구 유동영역 내에서 流量과 壓力을 기준으로 동력을 제어하는 것과, 완전히 發達된 유동 영역(fully developed flow region)의 속도분포값을 기준으로한 流量과 壓力을 이용하여 동력을 제어하는 것과 는 분명히 다르다.

덕트의 振動流動에서 亂流로의 遷移는 관로망으로 구성된 왕복동 펌프 및 壓縮機의 設計에 매우 중요한 요소 중의 하나로 되어 왔다.(Christiansen 과 Lemon, 1965). Ohmi 와 Iguchi(1982 a)는 원관내에서 空氣가 振動流動을 할 경우에 대하여 연구한 결과 유동형태를 3영역으로 구분하여 발표하였다. 최(1988)는 완전히 발달된 流動領域에서 진동유동의 레이놀즈수를 증가시켜 가면서 속도파형(velocity waveforms)과 속도분포(velocity profiles)의 변화를 實驗하였는데 振動流動을 層流, 遷移 및 亂流流動으로 분류하였고, 박(1987)은 4각덕트 입구영역에서 振動流動 중 층류유동의 속도파형을 열선풍속계(hot wire anemometer)를 이용하여 실험하고 입구길이를 결정하였다.

본 연구에서는 正4角덕트의 입구길이 내에서 遷移 振動流動의 축방향 속도성분의 속도파형과

속도분포를 구명하며, 그 결과를 이론해석과 비교 검토하고, 遷移 振動流動의 입구길이에 대한 실험식을 제안하고자 하였다.

기호의 뜻

- A : 斷面積(m<sup>2</sup>)
- A<sub>p</sub> : 加振器의 피스톤 行程(m)
- A<sub>piston</sub> : 가진기의 피스톤 단면적(m<sup>2</sup>)
- A<sub>duct</sub> : 덕트의 단면적(m<sup>2</sup>)
- a : 덕트의 橫半幅(m)
- b : 덕트의 縱半幅(m)
- b\* : 무차원 덕트의 높이(=bu\*/v)
- Dh : 수력 직경(=4ab/(a+b))
- f : 週波數(Hz)
- Le : 入口 길이(m)
- M<sub>n</sub>(ω<sup>+</sup>), θ<sub>n</sub>(ω<sup>+</sup>) : 제 1 종 n차 Bessel 함수
- N<sub>n</sub> : (2n+1)π/2, (n=0, 1, 2, 3, ...)
- P : 壓力(Kg/m<sup>2</sup>)
- Re : Reynolds 수
- T : 週期
- t : 시간(s)
- u,v,w : x, y, z 方向에서 速度成分
- u\* : 摩擦速度(=√τ<sub>w</sub>/ρ) 또는 덕트 코너에서 摩擦速度(u\* = u<sub>m,sl</sub>√λ/8)
- x, y, z : 직교좌표계(그림 1)
- y<sup>+</sup> : 무차원 縱斷面 座標(y/a)
- z<sup>+</sup> : 무차원 橫斷面 座標(=z/b)
- ρ : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- τ : 剪斷應力(kg/m<sup>2</sup>)
- v : 動粘性係數(m<sup>2</sup>/s)
- ω : 角速度(=2πf)
- ω<sup>+</sup> : 무차원 角振動數(=b√ω/v)
- φ : 位相角
- η\* : (b-z)u\*/v
- λ : 마찰계수

아래첨자

- m : 橫斷面 平均값
- os : 振動成分

- st : 定常流動
- w : 壁面에서의 값
- 1 : Fourier 급수에서 기본파

2. 理論解析

본 研究에 적용한 직교좌표계(cartesian coordinate system)는 그림 1과 같으며 그림 2는 振動流動의 기본속도 파형을 나타낸 것이다. x, y 및 z 축의 速度成分을 각각 u, v 와 w 로 하였다. 入口길이를 決定하기 위한 방정식에서 y 와 z 方向의 운동방정식은 x 방향에 비하여 그 속도 성분값이 매우 작으므로 무시하였다(최,1988 ; 유,1989). 遷移流動領域은 층류성분과 난류성분이 공존하므로 천이 및 난류유동영역에서 천이 성분을 고려하면  $u = \bar{u} + u'$ 이므로 運動方程式은 다음과 같다.

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

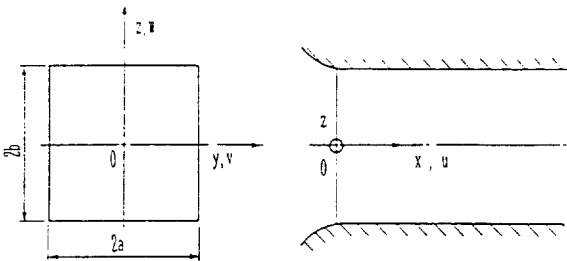


Fig. 1 Cartesian coordinate system and velocity components.

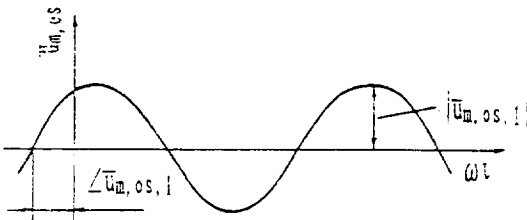


Fig. 2 Velocity curves of oscillatory flow.

여기에서  $u'$ 는 波動速度(fluctuating velocity) 성분이고  $\bar{u}$ 는 時間平均速度成分이다(이하 문장 위의  $\bar{\quad}$ 는 時間평균값(short time-averaged value)을 의미함). 식(1)의 비선형 대류항은 박(1987)의 研究方法를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + |u_{m,os}| \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} \dots \dots \dots (2)$$

壓力기울기  $\partial P/\partial x$ 는 週期的인 函數이므로 다음과 같다.

$$\partial P/\partial x = (|\Delta P_{os,i}/L|) \cos \omega t \dots \dots \dots (3)$$

와동점성계수  $\epsilon$ 을 이용하여  $\overline{uv}$ ,  $\overline{uw}$ 를 정리하면 다음과 같다.

$$\overline{uv} = -\epsilon \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \dots \dots \dots (4)$$

$$\overline{uw} = -\epsilon \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \dots \dots \dots (5)$$

이들 式을 식(2)에 代入하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + |u_{m,os}| \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\epsilon}{\nu} \left( \nu_x \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\epsilon}{\nu} \left( \nu_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (6)$$

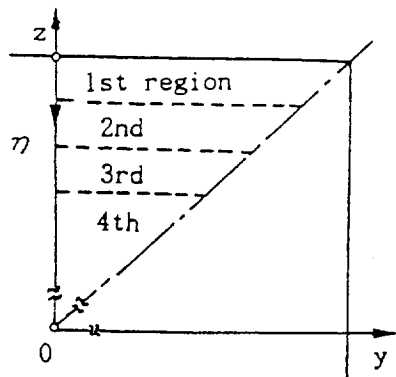


Fig. 3 Schematic representation of four-region model.

Table 1. Four-region model for  $v_z$ .

$\eta^*$	region	$v_z/v$
0		
5	1	1
30	2	$0.2\eta^*$
$0.175b^*$	3	$0.4\eta^*$
$b^*$	4	$0.07b^*$

위 식에서  $v_z$ 는 다음과 같이 수정 와점성계수로 정의하였다.

$$v_z = v + \varepsilon \dots\dots\dots (7)$$

덕트 벽면의 점성에 의한 영향을 알기 위하여 그림 3에 나타낸 것처럼 정4각 덕트 橫斷面의 4 領域을 1/8씩 구분하였다. 난류 발생지역은 주로  $yu^*/v \approx 5 \sim 70$ 부근이다. 이 領域이 덕트의 壁面에서 층류유동이 난류유동으로 변화하는 遷移領域이다(Ohmi 와 Iguchi, 1982b). 이 4영역의 경계와  $v$  값은 표 1에 나타내었으며 4 領域에서 속도분포에 대한 식은 다음과 같다(최, 1988 ; Ohmi 와 Iguchi, 1982b).

제 1 영역,

$$\frac{u}{u_m} = \sqrt{\frac{\lambda}{8}} - \frac{\eta^{*2}}{b^*} + \eta^* \dots\dots\dots (8)$$

제 2 영역,

$$\frac{u}{u_m} = 5\sqrt{\frac{\lambda}{8}} \left[ \ln\left(\frac{\eta^*}{5}\right) - \frac{2\eta^*}{b^*} + \frac{5}{b^*} + 1 \right] \dots\dots\dots (9)$$

제 3 영역,

$$\frac{u}{u_m} = 5\sqrt{\frac{\lambda}{8}} \left[ -\frac{\eta^*}{b^*} + \frac{1}{2} \ln(1.2\eta^*) - \frac{25}{b^*} + 1 \right] \dots\dots\dots (10)$$

제 4 영역,

$$\frac{u}{u_m} = \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \left\{ 0.732 \left[ 1 - \left( \frac{\beta^*}{0.825} \right)^2 - 4 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{Nn^3} \frac{\cos(Nn y'/0.825)}{\cos h Nn} \right] \right\}$$

$$\times \cos(Nn b^*/0.825)] + 2.5 \ln(0.21b^*) - 125/b^* + 4.125] \dots\dots\dots (11)$$

振動流動에 있어서 入口領域附近에서 流體粒子는 週期的으로 流入流動과 流出流動이 반복되는 流動으로 입구길이를 決定하는데 주로 影響을 미치는 流動은 流入流動 期間이므로 振動流動의 流入流動의 速度分布만을 適用하였다(Ohmi 와 Iguchi, 1982a).

$$\frac{u_{os}}{|u_{m,os}|} = 2 \left[ 1 - \left( \frac{z}{Dh} \right) \right] \sin \phi + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{4}{aj^2} \frac{1}{aj^4 + (\omega^+)^4} \times \left\{ \frac{Mo(aj)(z/Dh)}{Mo(aj)} - 1 \right\} \times [(\omega^+)^4 \sin \phi + aj^2(\omega^+)^2 \cos \phi + [aj^2 \sin(\phi - \varphi) - aj^2(\omega^+)^2 \cos(\phi - \varphi)] \times \exp [-aj^2 vx/Dh^2 | u_{m,os}|] \dots\dots\dots (12)$$

여기에서  $\varphi = \omega x / |u_{m,os}|$  이다. 위 식에서  $Mo$ 는 제1종 Bessel함수이고,  $j$ 는 제1종 2차 Bessel함수  $M_2$ 의  $j$ 번째 0점이며,  $j$ 는 100까지를 이용하였다.

압력기울기( $\Delta p/L$ ), 橫斷面 平均速度( $u_m$ ) 및 壁面剪斷應力( $\tau_w$ )과의 관계식은 층류유동과 난류유동에 적용할 수 있는 다음식을 적용하였다.

$$\Delta p/L = \rho du_m/dt + 4\tau_w/Dh \dots\dots\dots (13)$$

식 (13)에서  $\Delta p/L$ 는 압력기울기항,  $\rho \cdot du_m/dt$ 는 慣性項,  $4\tau_w/Dh$ 은 粘性項이며, 덕트내에서 振動流動에 대한 剪斷應力  $\tau_w$ 는 식 (14)와 같고 여기에서  $u_m$ 과  $v$ 는 각각 식 (7)에서 식 (11)에 유도되어 있다(Ohmi 와 Iguchi, 1982c).

$$\tau_w = -\frac{4\rho v}{b} \left[ \eta_1(\omega^+) u_m + \frac{\xi_1(\omega^+)}{\omega^+} \frac{du_m}{dt} \right] \dots\dots\dots (14)$$

단,

$$\eta_1(\omega^+) = \frac{\omega^+}{4} \frac{M_1(\omega^+)}{M_2(\omega^+)} \cos[\theta_1(\omega^+) - \theta_2(\omega^+) + 3\pi/4]$$

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

3. 實驗

그림 4는 본 연구의 實驗장치의 개략도이며 先行 研究(유, 1989; 박 등, 1989; 최, 1988; 박, 1987)의 實驗장치와 같이 스코치-요크(sco-tch-yoke)형 加振器를 V.S. 모터에 연결하여 振動流動을 발생시켰는데 무차원 각진동수는 8.94로 고정하여 實驗하였다. 진동유동의 振幅은 무단 변속기에 연결된 回轉圓板의 중심에서 회전 원판상에 뚫려있는 구멍에 피스톤의 연결봉을 편으로 고정해서 조절할 수 있도록 하였으며 회전 원판으로 행정을 조절하였는데 속도진폭은 10 mm에서 270mm까지 10mm 간격으로 變化시켜 피스톤 행정을 조절할 수 있도록 하였다. 시험부의 덕트는 아크릴판으로 만들었으며, 길이가 4,000mm인 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 시험 덕트 연결부에 고무 슬리브로 연결하였다. 작동 유체는 공기를 사용하였으며 측방향의 速度를 측정하기 위하여 횡방향의 자동移送기구를 設置하여 열선풍속계를 이용하여 17지점을 移動하면서 測定하였다.

振動流動의 레이놀즈수를 增加시켜 가면서 진동유동의 속도파형과 速度分布의 變化를 實驗하

Table 2. Experimental conditions of developing transitional oscillatory flows.

$x/D_h$	$f(H_z)$	$A_p$ (mm)	$\omega^+$	$Re_{os}$
5	0.517	20	8.94	2100
		30		3020
		40		4030
		60		6050
10	0.517	20	8.94	2100
		30		3020
		40		4030
		60		6050
15	0.517	20	8.94	2100
		30		3020
		40		4030
		60		6050
20	0.517	20	8.94	2100
		30		3020
		40		4030
		60		6050
25	0.517	30	8.94	3020
		40		4030
		60		6050
30	0.517	30	8.94	3020
		40		4030
		60		6050
35	0.517	40	8.94	4030
		60		6050
40	0.517	60	8.94	6050
45	0.517	60	8.94	6050

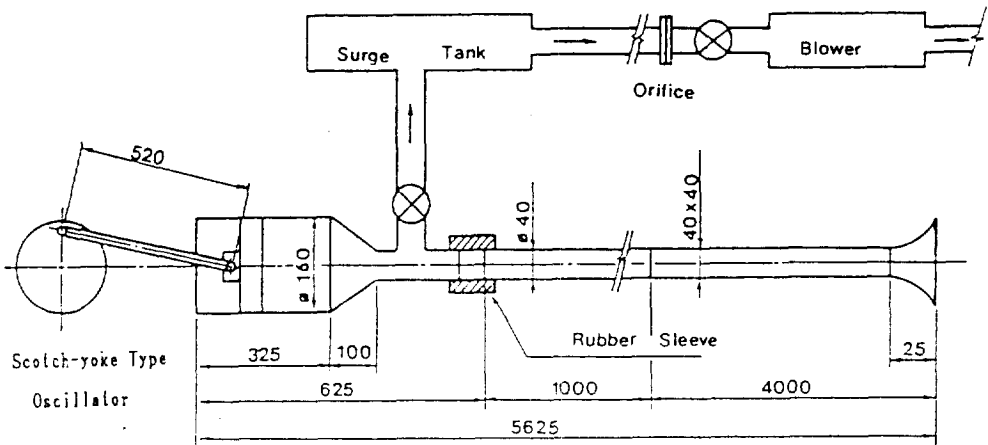


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus.

였으며 실험條件은 표 2와 같다.

표 2에서 振動流動 레이놀즈수를 決定하는 속도진폭  $|U_{m.os.1}|$  은 가진기 행정, 각진동수, 덕트에 대한 피스톤의 단면적비로 표시되는 식  $(Ap/2) \omega(Apiston/Aduct)$  를 利用해서 計算한 값이다. 振動流動의 속도진폭을 基礎로 한 진동유동의 레이놀즈수는  $Re_{os} = |U_{m.os.1}| Dh/\nu$  이다. 속도파형으로 천이유동영역을 확인한 다음 입구 길이를 결정하기 위하여 덕트의 무차원 중방향의 위치가 중심인 부분에서 속도파형과 속도분포를 측정하였다. 무차원 橫斷面位置는 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, 1.90 와 1.95인 지점에서 測定하였으며, 無次元 軸方向의 位置( $x/Dh$ )는 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 및 40으로 移動해 가면서 축방향의 속도변화가 거의 없는 部分까지 測定하였다. 遷移振動流動의 레이놀즈수( $Re_{os}$ )는 2100, 3020, 4030, 과 6050으로 증가시켜 가면서 實驗하였다. 遷移流動領域은 橫斷面에서의 속도파형을 觀察하여 遷移流動領域을 確認하였으며, 空氣의 압축성 影響은 무시하였다. 열선풍속계의 信號를 광기록계에 記錄된 實驗結果를 基準로하여 실험조건이 천이유동영역인지 아닌지를 확인하였다.

#### 4. 結果 및 考察

##### 가. 遷移 振動流動 領域의 구분

遷移流動 領域을 구분하기 위하여 振動流動의 레이놀즈수를 變化시켜 가면서 최(1988)가 완전히 發達된 領域에서 層流에서 遷移流動 또 遷移流動에서 亂流流動 상태로 變化시켜 얻은 實驗結果와 比較해가면서 實驗하였다. 덕트의 入口 流動領域에서 덕트의 軸方向 位置를 變化시키고, 그 각각의 位置에서 덕트의 無次元 橫방향의 位置를 變化시키면서 얻어진 속도파형의 實驗結果를 분석하였다. 遷移 振動流動의 덕트 入口 領域에서 流體流動이 下流로 進行함에 따라 壁面의 점성에 의한 影響때문에 境界層이 發達하면서 完全히 發達된 流動으로 成長해간다. 振

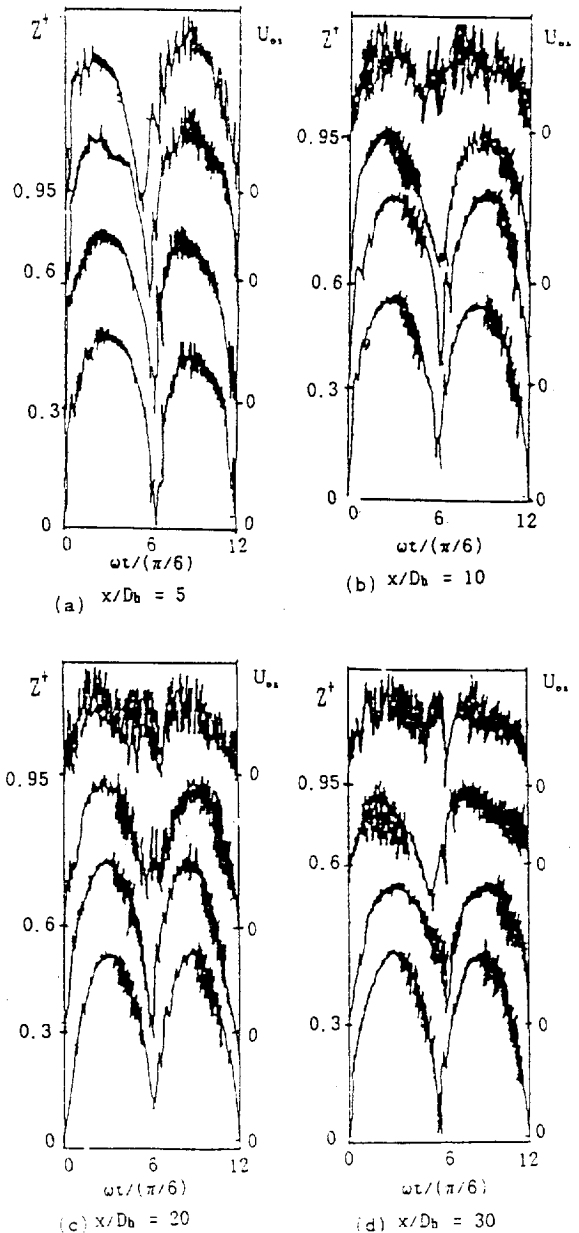


Fig. 5 Velocity waveforms of developing transitional oscillatory flow at  $Re_{os} = 3020$ .

動流動의 레이놀즈수를 증가시키고 下流方向으로 進行하면서, 속도파형을 관찰한 진동유동의 레이놀즈수가 3020 과 6050일 때의 속도파형을 대표적으로 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림 5와 6의 속도파형에서 亂流 burst를 觀察할 수

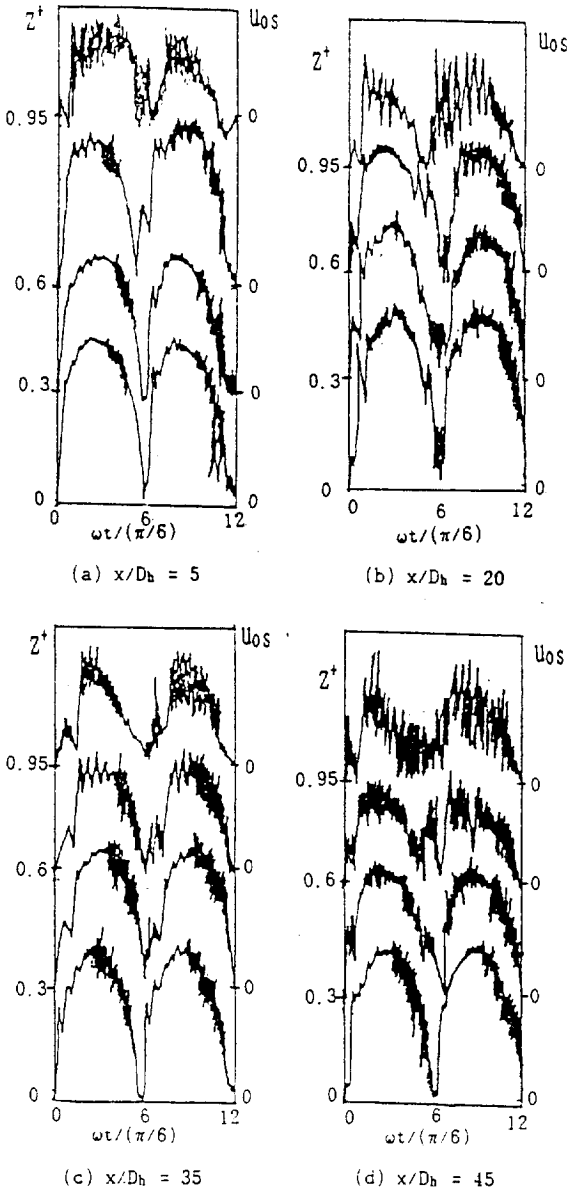


Fig. 6 Velocity waveforms of developing transitional oscillatory flow at  $Re_{ns} = 6050$

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 나타나다가 完全히 發達된 流動領域에서는 流入流動의 速度과형과 流出流動의 速度과형이 거의 對稱的인 형태를 띠고 있음을 알 수 있다. burst에 의한 變動成分은 流動方向이 바뀔 때 粘性消散 때문에 變動成分이 없어져서 再層

流化가 이루어졌다.

振動流動의 레이놀즈수가 약 3020과 6050일 때 加速領域에서는 亂流成分이 나타나지 않고 減速位相에서만 亂流成分이 나타난다. 즉 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. 천이유동의 壁面부근에서 bursting phenomena 라고 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할수록 亂流成分이 增加하고 있다. 이상의 實驗 結果로부터 無次元 角振動數가 8.94일 때 振動流動의 레이놀즈수가 2100 과 6050사이에서는 亂流와 層流가 共存하는 遷移流動領域의 速度과형으로부터 알 수 있다.

波動速度成分은 振動流動의 레이놀즈수와 밀접한 관계가 있으며 振動流動 레이놀즈수가 增加함에 따라 증가한다. 이 實驗 結果는 先行 연구 結果와 比較하여 확인한 結果本 實驗의 結果가 遷移流動 領域에 있음을 알 수 있고(박, 1987; Ohmi 와 Iguchi, 1982b), 그림 7의 삼각형표시 ( $\nabla$ )는 遷移振動流動에 대한 本 研究의 實驗範圍를 표시하고 있다.

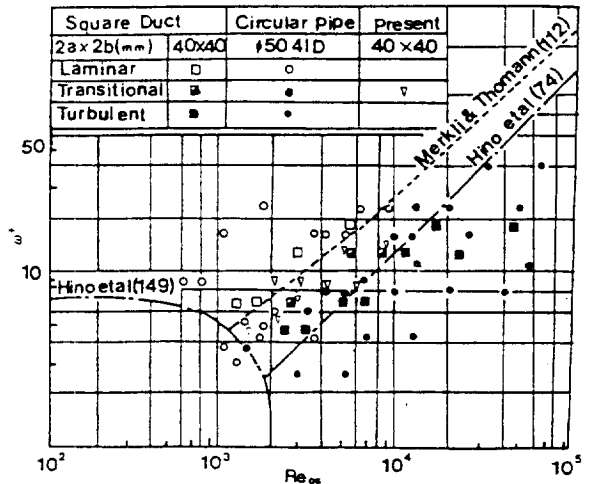


Fig. 7 Diagram for region of Laminar, transitional and turbulent oscillatory flow(Ohmi and Iguchi, 1982b).

#### 나. 速度分布

遷移振動流動의 入口길이를 결정하기 위하여 遷移振動流動의 레이놀즈수 중 2100, 3020 과 6050일 때의 發達하고 있는 速度分布의 實驗結果를 軸方向에서 速度分布식(식 12)으로 부터 計算하여 그림 8, 9, 10에 나타내었다. 이들 그림들은 12개의 위상각에 따른 速度振幅과 振動流動의 局所速度의 비( $u_{os}/|u_{m,os}|$ )로 나타내었다. 그림에서 위상각( $\omega t/(\pi/6)$ )이 0, 1, 2, 6, 7, 8은 加速位相에서의 실험값이고, 위상각이 3, 4, 5, 9, 10, 11은 減速位相에서의 실험값을 나타내고 있으며, 그림의 윗부분은 流入流動이고, 하반부는 流出流動을 나타내고 있다. 遷移振動流動에서 振動流動의 레이놀즈수가 增加할 수록, 또는 덕트의 無次元 軸方向의 位置가 下流 方向으로 進行할 수록, 流入流動 領域을 나타내는 速度分布값이 점점 增加하고 있음을 알 수 있다. 完全히 發達된 流動領域에서는 流入流動과 流出流動의 속도분포형이 거의 對稱인 형태를 띠고 있다. 이러한 형태는 遷移振動流動에서 속도파형의 實驗結果를 나타내는 그림 5, 6에서도 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 덕트 入口 流動領域에서는 境界層이 발달함으로 인하여 비점성 유동지역인 포텐셜流動이 存在하다가 振動流動의 레이놀즈수가 증가하고, 덕트의 無次元 軸方向의 길이가 增加하면 壁面이 점성의 영향을 받아 境界層 領域이 成長되어간다. 完全히 發達된 流動領域에서는 軸방향의 速度分布의 變化가 거의 없어지고 壁面쪽의 速度값이 入口에서의 速度값보다 增加하였다. 完全히 發達된 유동영역의 中心領域에서 軸方向의 速度分布는 振動流動의 레이놀즈수가 2100일 경우에는 그림 8에서 보는 바와 같이 층류 速度分布 特性인 拋物線形 速度分布의 형태를 하고 있다.  $u_{os}/|u_{m,os}|$ 의 값은 진동유동의 레이놀즈수에 관계없이 유체가 下流 方向으로 進行하여도 完全히 發達된 流動領域에서는 거의 일정하게 된다. 그림 8의 모든 그림에서 遷移 振動流動의 橫方向의 速度分布는 加速領域보다 減速領域의 速度分布값이 약간 크게 나타나고 있다. 무차원 軸방향의 位置가 5와 10

부근인 入口에서 中心部分의 均일한 속도분포는 流入流動 때 壁面에서 얇은 경계층과 중심부 유동의 포텐셜 유동이 共存하기 때문이다. 入口에서 橫方向의 速度分布는 入口의 中心에서 均일한 速度分布로부터 無次元 軸方向의 거리가 약간씩 增加함에 따라 중심부분의 속도가 曲線形態로 發達해가면서 完全히 發達된 流動形態로 되었다. 完全히 發達된 流動領域에서 速度分布는 下流方向으로 進行함에 따라 더 이상 변하지 않게 되며 無次元 角振動數를 8.94로 고정하였기 때문에 遷移振動流動 레이놀즈수가 2100일 경우 完全히 發達된 流動領域은 無次元 軸方向의 位置 약 20 附近에서 軸方向 速度分布값이 일정해지며, 振動流動의 레이놀즈수가 6050으로 增加하면서 軸方向의 速度分布의 變化가 거의 없는 부분이 약간씩 뒤에서 나타나는 현상을 觀察하였다. 無次元 角振動數가 增加하면 덕트의 入口에서 流體粒子가 밖으로 나갔다가 다시 들어오는 流體粒子量은 적어지고 덕트의 中央部에 남아 있는 부분은 많아진다. 따라서 振動流動의 入口 길이는 無次元 角振動數에 반비례하며, 無次元 角振動數가 일정할 경우에는 振動流動의 레이놀즈수에 比例함을 알았다. 完全히 發達된 流動領域附近에서는  $u_{os}/|u_{m,os}|$ 가 亂流流動의 速度分布特性인 1/7승법칙(the one-seventh power law)과 층류유동의 速度分布 特性인 拋物線形 分布의 中間 形態를 띠고 있음을 알 수 있다.

#### 다. 入口길이

振動流動에서는 流體粒子가 流入과 流出을 反復하기 때문에 入口를 통하여 덕트내로 들어오는 流體粒子의 移動距離는 入口區間에서 最大 移動距離가 존재한다. 따라서 流體의 속도분포의 變化가 일어나는 길이를 入口길이라 정의한다.

入口길이로부터 軸方向으로 流體粒子가 안쪽에 있어 入口의 影響을 받지 않는 流動領域에 있는 流體粒子는 왕복운동으로 덕트의 外部로 나가지 않는다. 그러므로 無次元 角振動數가 작은 경우에는 入口의 影響을 받아 境界層이 發達



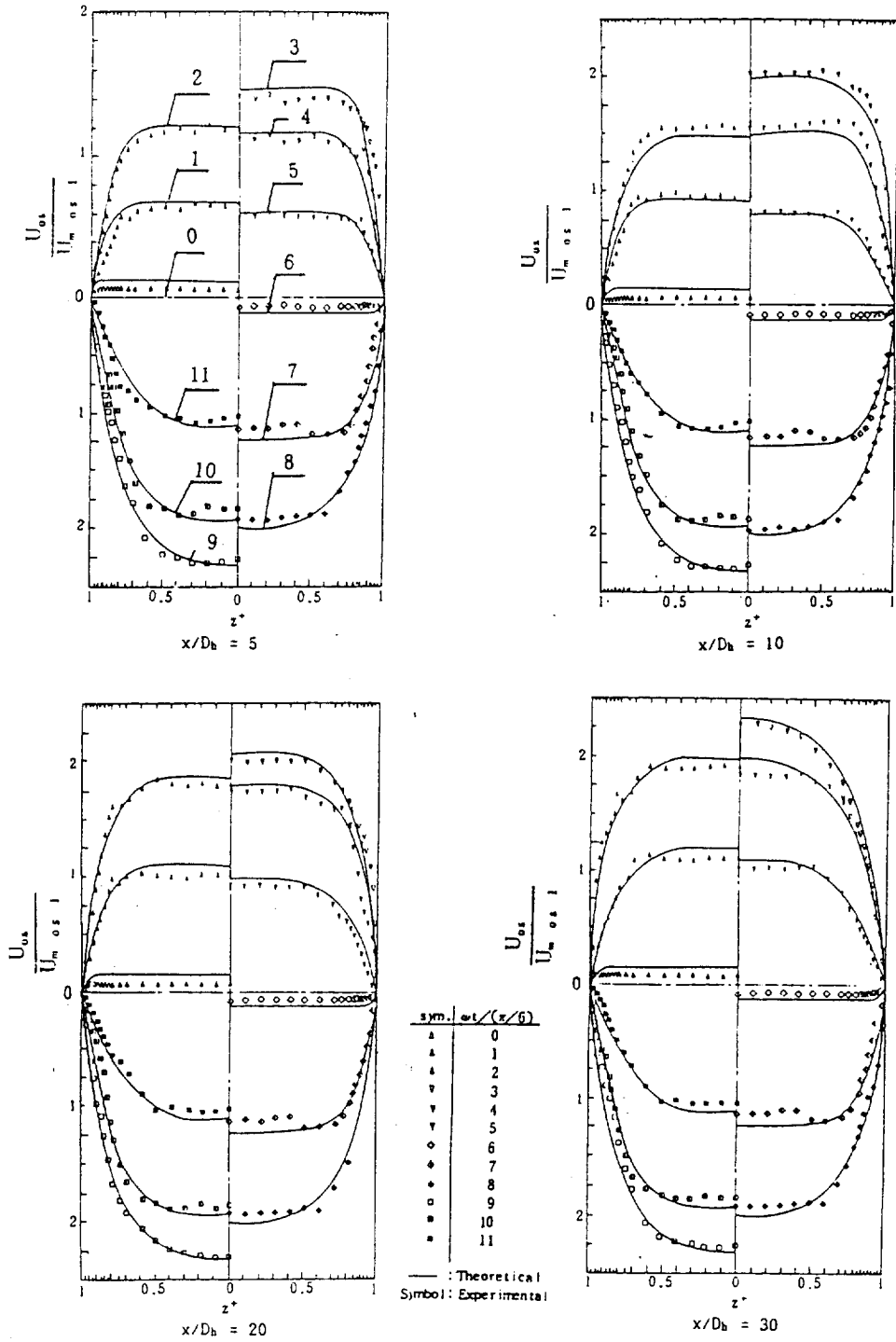


Fig. 8 Velocity profiles of developing transitional oscillatory flow at  $Re_{os}=2100$ .

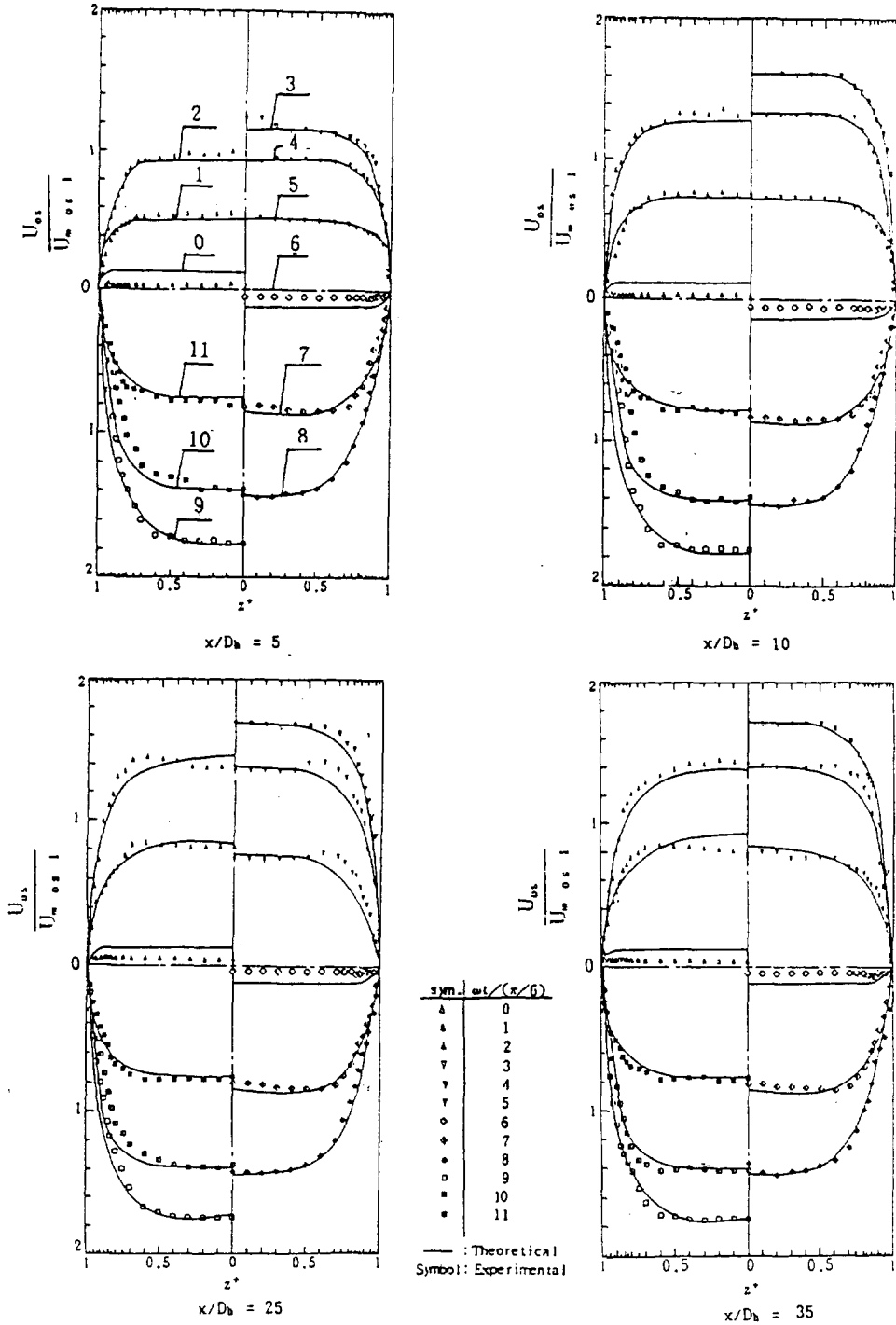


Fig. 9 Velocity profiles of developing transitional oscillatory flow at  $Re_{os} = 3020$ .

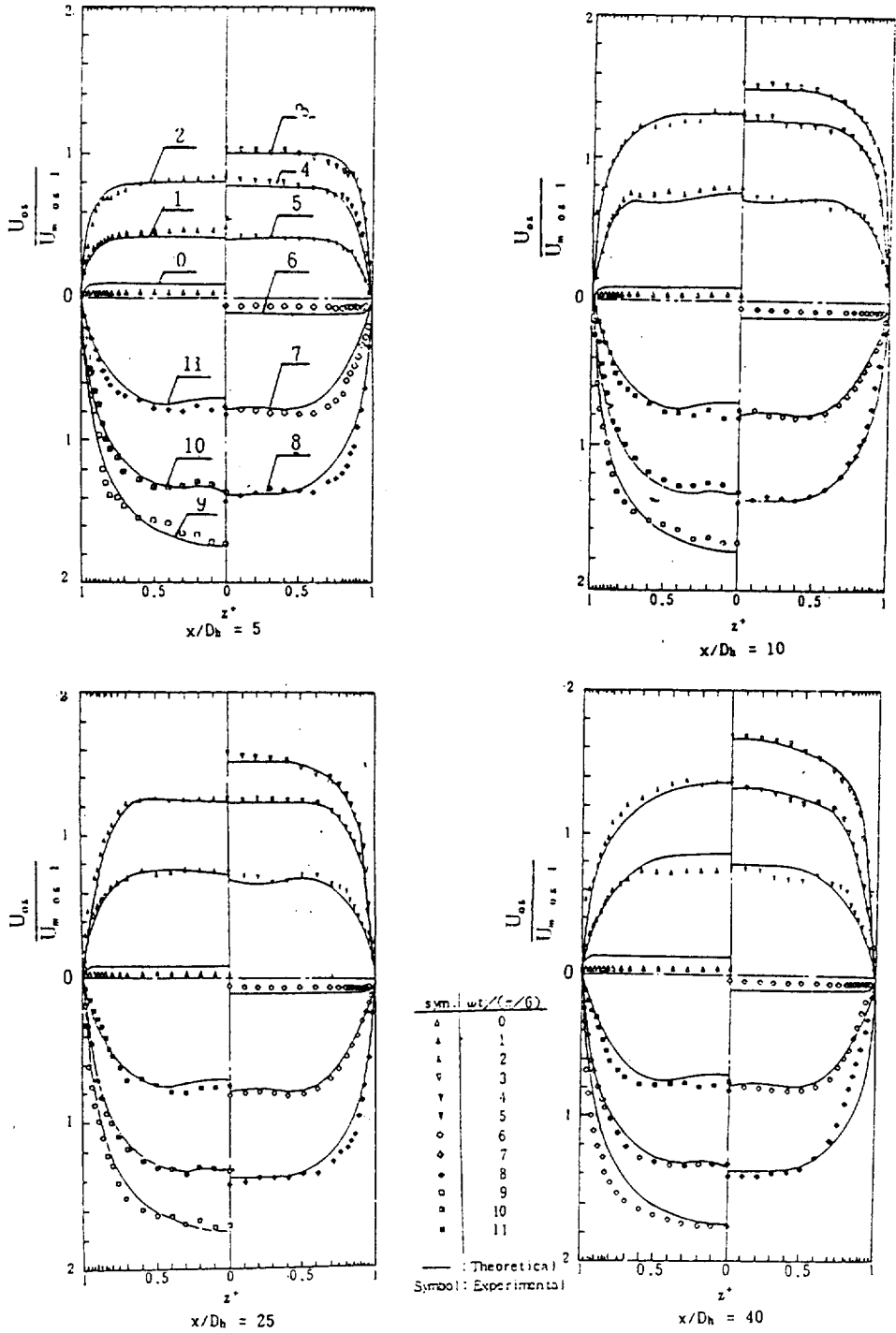


Fig. 10 Velocity profiles of developing transitional oscillatory flow at  $Re_{cs}=6050$ .

하고 있는領域이 길어지고, 無次元 角振動數가 크면 클수록 入口의 影響을 받는 지역이 짧아지는 현상이 觀察되었는데, 본 연구에서는 속도분포와 속도과형을 실험할 때는 無次元 角振動數를 8.94로 固定하였으나 入口길이를 결정하는 실험에서는 표 2 및 그림 7과 같이 무차원 角振動數와 진동유동의 레이놀즈수를 변화시키면서 실험하였다. 遷移振動流動의 入口길이는 진동유동의 레이놀즈수와 무차원 각진동수와 관계가 있으며 속도분포와 속도과형으로 판단한 遷移振動流動의 入口길이 결정식은  $L_e/D_h = K \cdot Re_{\omega} / 2 (\omega^+)^2$  이며, 여기서 K는 實驗常數이다. 이 식은 Ohmi 등(1984)이 直4角덕트에서 실험하여 발표하고, 박(1987)이 正4角덕트에서 層流振動流動의 실험결과를 사용하여 정확성을 규명한 식과 일치하였다. 그러나 實驗常數는 무차원 각진동수와 진동유동의 레이놀즈수가 遷移振動流動 영역의 범위내에 있어야 한다.

본 실험에서 진동유동의 최대속도진폭으로 구한 실험결과는 그림 12와 같이 무차원 각진동수  $\omega^+$ 가 약 3에서 12의 범위에 있을 때 Gauss-Jordan의 最小自乘法에 의해 구한 결과 實驗常數 K는 1.2에서 2.0 사이에 있음을 알 수 있었다.

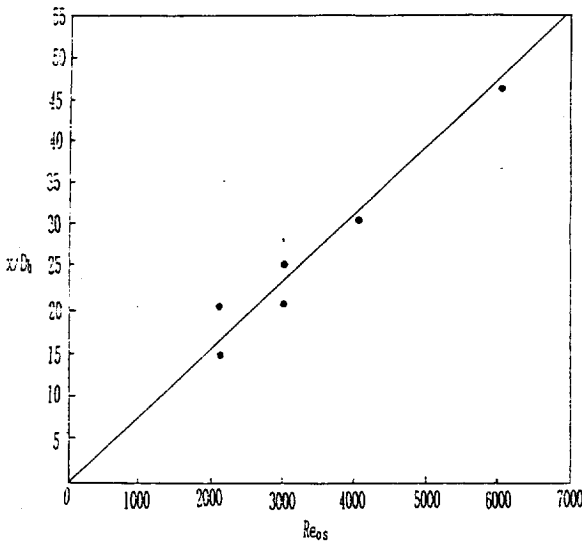


Fig. 11 Curve fitting of entrance length for developing transitional oscillatory duct flows.

그리고 그림 11에서와 같이 무차원 각진동수를 8.94로 고정하였을 때 實驗常數 K는 1.23 이었다.

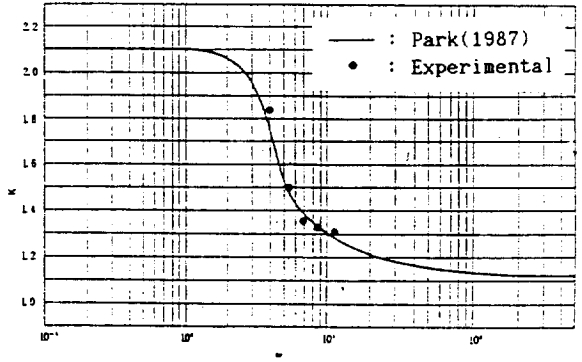


Fig. 12 Experimental constant of K vs. dimensionless frequency of  $\omega^+$  square duct.

### 5. 結論

正4角덕트의 入口영역에서, 發達하고 있는 遷移振動流動에 대한 理論과 실험결과로부터 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 振動流動의 軸方向 速度는 加速位相 보다 減速位相에서 더 크다.
- 2) 振動流動에서는 流動의 方向이 바뀔 때 粘性消散의 影響으로 加速領域에서 再層流化가 이루어졌다.
- 3) 遷移振動流動의 경우 入口길이는 振動流動 레이놀즈수, 無次元角振動數와 關係가 있으며, 遷移振動流動의 正4角덕트 入口길이 결정식은 直4角덕트 入口길이 결정식( $L_e/D_h = K \cdot Re_{\omega} / 2 (\omega^+)^2$ )과 동일하였다.

### 參考文獻

1. 박길문. 1987. 정4각 덕트 入口領域에서 遷移非定常流動에 關한 研究, 고려대학교 박사 학위 논문.
2. 박길문, 박선종, 최주호, 유영태. 1989. 정4각 덕트의 遷移非定常流動에 關한 研究, 공기조

- 화·냉동공학회논문집 1(3) : 252-262.
3. 박길문, 유영태, 고영하. 1990. 4각 덕트 入口領域에서 遷移 定常流動의 入口길이에 關한 研究, 공기조화·냉동공학회논문집 2(1) : 1-10.
  4. 박길문, 유영태, 문영순. 1991. R2엔진의 排氣管에서 流量과 壓力損失에 關한 研究, 亞細亞기보 10 : 31-45.
  5. 유영태. 1989. 정4각 덕트 入口領域에서 遷移定常流動, 振動流動과 脈動流動의 流動特性에 關한 研究, 조선대학교 박사학위논문.
  6. 최주호. 1988. 정4각 덕트에서 遷移非定常流動 特性에 關한 研究, 조선대학교 박사학위논문.
  7. Christiansen, E.B. and H.E. Lemon. 1965. Entrance region flow, Pre. Symp. Penn. Vol. 11, No. 6.
  8. Ohmi, M. and M. Iguchi. 1982a. Transition to turbulence and velocity distribution in an oscillatory pipe flow, Bull. of the JSME 25, No. 201.
  9. Ohmi, M. and M. Iguchi. 1982b. Critical Reynolds' number in an oscillation pipe flow, Bull. of the JSME 25, No. 200.
  10. Ohmi, M. and M. Iguchi. 1982c. Flow patterns and frictional losses in an oscillatory pipe flow, Bull. of the JSME 25, No. 222.
  11. Ohmi, M., M. Iguchi and F. Akao. 1984. Laminar-turbulent transition and velocity profiles of oscillatory rectangular duct flows, Bull. of JSME 27, No. 229.



### 學位取得

성명 : 金昌洙

생년월일 : 1945년 3월 15일

근무처 : 상주산업대학교 산업기계공학과

취득학위 : 공학박사

학위수여대학 : 경상대학교 대학원

학위취득년월일 : 1993년 2월 26일

학위논문 : 移秧機의 遠隔制御시스템에 關한 基礎研究

