

정4각덕트의 입구영역에서 난류정상유동의 실험해와 수치해의 비교에 관한 연구

고영하* · 박길문** · 봉태근***

A Study on the Comparison Between Experimental and Numerical Analysis
for Developing Turbulent Steady Flows in the Entrance Region of a Square Duct

Y. H. Koh · G. M. Park · T. G. Bong

Key words : Turbulent Steady Flow(난류정상유동), Velocity Profile(속도분포), Turbulence Intensity(난류강도), Entrance Length(입구길이)

Abstract

The flow characteristics of developing turbulent steady flow are investigated numerically and experimentally in the entrance region of a square duct (40 mm × 40 mm and 4,000 mm). The numerical analysis are incorporated by finite - volume discretization with staggered grid system and SIMPLE algorithm.

The numerical solution are compared with experimental results of mean velocity profiles, turbulence intensity and entrance length.

For turbulent steady flow, the turbulent components in the velocity waveforms increase as the dimensionless transverse position approaches the wall. Turbulence intensity increases as the dimensionless transverse position increases from the center to the wall of the duct for the developing turbulent steady flows. The entrance length of the turbulent steady flow is about 40 times as large as the hydraulic diameter under the present experimental condition.

NOMENCLATURE

A_p : Piston stroke of oscillator (mm)	a : Duct half - width (mm) b : Duct half - width (mm) C_{t1}, C_{t2} : Turbulent model constant
--	---

* 조선대 병설공업전문대학(원고접수일 : 96년 10월)

** 조선대학교

*** 목포해양대학교

- D_h : Hydraulic diameter ($= 4ab/2(a+b)$)
(mm)
- f_μ : Turbulent model constant
- f : Frequency of oscillation (Hz)
- L_e : Entrance length (mm)
- P : Pressure
- Re : Reynolds number
- U, V, W : Velocity component along $x - , y - ,$
and $z -$ axis respectively (m/s)
- x, y, z : Cartesian coordinates of test section
- x' : Dimensionless $x -$ axis ($= vx/abu_m$)
- y' : Dimensionless $y -$ axis ($= y/a$)
- z' : Dimensionless $z -$ axis ($= z/b$)

SUBSCRIPTS AND OTHERS

- ν : Molecular kinematic viscosity (m^2/s)
- ρ : Density (Kg/m^3)
- τ : Shear stress (Kg/m^2)
- ω : Angular frequency of oscillation
(rad/s)
- ω' : Dimensionless angular frequency
[$(D_h/2) \sqrt{(\omega/\nu)}$]
- σ_r, σ_k : Turbulent model constant
- fd : Fully developed component
- rms : Root mean square value
- : Mean value

1. 서 론

현대사회에서는 현대인의 요구에 부합되는 상품이나 도구를 만들기 위한 가장 밀접한 분야가 기계공업인데, 이러한 기계공업이 계속적으로 발달되어 기계장치가 고성능화 및 정밀화됨에 따라 유체기계의 유동해석에 절실하게 필요한 관로계의 최적설계는 장치효율, 안정성 및 경제성에 커다란 영향을 미치게 된다. 그러므로, 유체기계에 연결된 덕트 입구영역에서 유동해석은 유체기계를 설계하는데 기초적 자료를 제공할 수 있을 뿐 아니라, 공조덕트 설비, 열 교환기, 압축기, 제트엔진 및 로켓의 맥동연소동에 대한 유동해석과 설계등에

응용할 수 있다.

난류 정상유동에 대한 연구 자료를 살펴보면, Gessner, F. B.와 Emery, A. F.¹⁾는 4각 Channel 유동에서 완전 발달된 난류유동의 여러가지 양상을 연구하였고, Talor, A. M. P. 등²⁾은 원관에서 2차운동(Secondary Motion)을 갖는 곡관을 통하여 발달하는 층류유동과 난류유동에 대한 속도측정을 비교연구하였으며, Moin, P.와 Kim, J.³⁾는 완전 발달된 영역에서 난류 Channel 유동의 수치적 연구를 하였다. 이들 연구외에도 기존 연구들^{4) 6)}은 거의 원관의 유동에 치중되어 있을뿐 아니라 층류유동이나 천이유동 및 실험적 연구 혹은 완전 발달된 유동에 대한 연구로 국한되어 있다. 그래서, 본 연구는 정4각덕트의 입구영역에서 난류 정상유동에 대한 실험해와 수치해를 비교 검토하여 정확한 유동해석의 규명에 중요한 자료를 제공하고자 한다.

2. 이론해석

2. 1 지배 방정식

정4각덕트의 입구영역에서 난류 정상유동에 대한 이론해석을 하기 위하여 Fig. 1과 같이 직교 좌표계를 선정하여 x, y, z 축 방향의 속도성분을 u, v, w 라고 하였다. 본 연구에서 작동유체는 공기이므로, 지배 방정식(연속 방정식과 운동량 방정식)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = & \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \{2\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{u'^2}\} & \\ + \frac{\partial}{\partial y} \{\nu(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}) - \overline{u'v'}\} & \\ + \frac{\partial}{\partial z} \{\nu(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}) - \overline{u'w'}\} & \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = & \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \{\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\} & \\ - \overline{u'v'} + \frac{\partial}{\partial y} \{2\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \overline{v'^2}\} & \end{aligned}$$

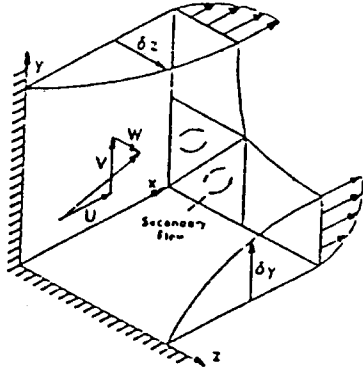


Fig. 1 3-Dimensional grid system for velocity component

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \{ \overline{u' \frac{\partial \overline{w}}{\partial y}} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial z} \} - \overline{u' w'}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{w}}{\partial t} + \overline{u} \frac{\partial \overline{w}}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial \overline{w}}{\partial y} + \overline{w} \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \{ \overline{u' \frac{\partial \overline{u}}{\partial z}} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial y} \} \\ - \overline{u' w'} + \frac{\partial}{\partial y} \{ \overline{u' \frac{\partial \overline{v}}{\partial z}} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial y} \} \\ - \overline{b' w'} + \frac{\partial}{\partial z} \{ 2 \overline{v} \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} - \overline{w'^2} \} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $-\overline{u'_i u'_j}$ 성분이 나오는데, 이들은 Reynolds 응력을 의미한다.

Reynolds 응력을 텐서를 도입하여 행렬 형태로 정리하면

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = -\rho \begin{vmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u' v'} & \overline{u' w'} \\ \overline{u' v'} & \overline{v'^2} & \overline{v' w'} \\ \overline{u' w'} & \overline{v' w'} & \overline{w'^2} \end{vmatrix} \quad (5)$$

2.2 난류모델

현재 수치해석에 가장 많이 사용되고 있는 난류 모델은 $\kappa-\epsilon$ 모델과 ASM (Algebraic Stress Model) 인데 $\kappa-\epsilon$ 모델은 3차원 유동에서는 부정확하여 ASM을 이용하려 하였으나, ASM을 덕트 유동에 응용하려면 덕트 벽면에서는 ASM 모델을, 덕트 중앙 부근에서는 $\kappa-\epsilon$ 모델을 이용해야 하는 복잡성 때문에 요즈음 Kim⁷⁾에 의하여 개발된 저 Reynolds

수 난류 모델을 이용하고자 한다. 저 Reynolds 수 ASM을 이용하기 위하여 식 (2)와 (3) 및 (4)의 다음과 같은 부가적인 방정식이 있다.

$$\begin{aligned} \overline{u} \frac{\partial \chi}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial \chi}{\partial y} + \overline{w} \frac{\partial \chi}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} (v + C_{k1} \frac{\chi}{\epsilon} \overline{u'^2}) \frac{\partial \chi}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial y} (v + C_{k1} \frac{\chi}{\epsilon} \overline{v'^2}) \frac{\partial \chi}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} (C_{k1} \frac{\chi}{\epsilon} \overline{u' v'}) \frac{\partial \chi}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial y} (C_{k1} \overline{u' v'}) \frac{\partial \chi}{\partial x} - \epsilon \\ \{ \overline{u'^2} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \overline{v'^2} \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} \\ + \overline{w'^2} \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} + \overline{u' v'} (\frac{\partial \overline{u}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial x}) \\ + \overline{u' w'} (\frac{\partial \overline{u}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial x}) \\ + \overline{u' w'} (\frac{\partial \overline{v}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial y}) \} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \overline{u} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \overline{w} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} (v + C_\epsilon \frac{\chi}{\epsilon} \overline{u'^2}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial y} (v + C_\epsilon \frac{\chi}{\epsilon} \overline{v'^2}) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} (C_\epsilon \frac{\chi}{\epsilon} \overline{u' v'}) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial y} (C_\epsilon \frac{\chi}{\epsilon} \overline{u' v'}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \\ - C_{\epsilon 1} f_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{\chi} \{ \overline{u'^2} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \overline{v'^2} \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} \\ + \overline{w'^2} \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} + \overline{u' v'} (\frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial x}) \\ + \overline{u' w'} (\frac{\partial \overline{u}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial x}) + \overline{v' w'} \\ (\frac{\partial \overline{v}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial y}) \} - C_{\epsilon 2} f_{\epsilon 2} \frac{\epsilon}{\chi} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $C_{k1}=0.22$, $C_\epsilon=0.36(C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 1})$, $C_{\epsilon 1}=1.54$, $C_{\epsilon 2}=1.92$ 이다.

Reynolds 응력에 대한 대수응력 방정식은 참고 문헌 [6]을 이용하였다.

2.3 경계조건

정4각덕트 유동은 대칭성이 있으므로 덕트 횡단

면의 4분의 1만을 고려하였고, 경계조건은 다음과 같이 4부류로 나누었다.

(1) 덕트벽면의 경계조건

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = \chi = 0 \\ \varepsilon = 2\nu \left(\frac{\partial \chi}{\partial n} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

여기서 n은 벽에 수직한 단위벡터를 나타낸다.

(2) 덕트 중심의 경계조건

$$\left. \begin{aligned} \bar{w} = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, (\phi = \bar{v}, \bar{w}, \chi, \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(3) 덕트의 입구조건

$$\left. \begin{aligned} \bar{v} = \bar{w} = 0 \\ \bar{u} : \text{측정값} \\ c : 0.001\bar{w} \\ \varepsilon = \frac{\chi^{3/2}}{L_D} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

덕트 입구의 Reynolds 응력은 u, v, w, κ, ε의 입구 값과 κ값이 κ-ε모델에 의하여 풀어진 후에 Boussinesq의 모델로부터 계산되었다.

(4) 덕트의 출구조건

$$\left\{ \frac{\partial P}{\partial z} \right\}_{\text{exit}} = \text{constant} \quad (11)$$

3. 수치해석

3.1 Parabolic 계산과 scheme

본 논문에서는 재순환이나 박리가 주유동 방향에 존재하지 않기 때문에 이 Parabolic 계산을 덕트유동에 이용하였다. 또한 이계산의 장점은 Elliptic 형태와 비교하여 컴퓨터 용량이 적게 사용되고 정확성은 비슷하기 때문이다. 이 계산으로 3차원 유동을 풀기 위하여 입구부터 출구까지 정규적인 간격으로 계산하도록 하여 이들 계산을 반복하도록 하였다.

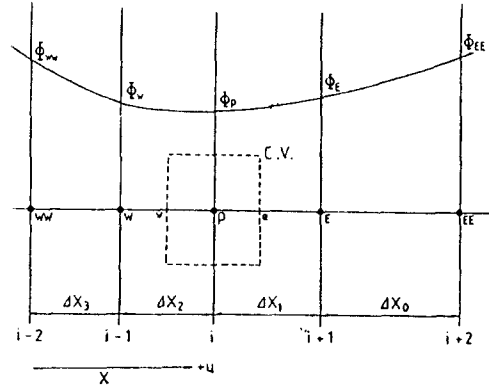


Fig. 2 QUICK scheme in nonuniform grid

Scheme의 선택은 수치해석에서 아주 중요한데, 본 논문에서는 False Diffusion을 방지하기 위하여 QUICK(Quadratic Upstream - Weighted Interpolation for Convective Kinematics) Scheme을 이용하였다. 물론, κ나 ε의 대류항이나 주유동 방향의 대류항에는 Hybrid Scheme을 이용하였고, 그의 2가지 운동방정식의 대류항에만 QUICK Scheme을 적용하였다. Fig. 2는 비균일 격자에서 QUICK Scheme을 나타내고 있다.

3.2 Reynolds 응력의 계산과 격자의 구성

프로그램의 발산을 막기 위하여 Reynolds 응력을 계산할 때는 Pseudo-viscosity 텐서와 Residual Stress 텐서로 나눈 후에 계산하도록 하였다.

$$\overline{u_i' u_j'} = -\nu_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i' u_j' \quad (12)$$

여기서 ν_{ij} 는 Pseudo-viscosity tensor이고, $u_i' u_j'$ 은 잉여응력이다. 식 (12)를 운동량 방정식에 대입하면, 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \overline{u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k}} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \{ (\nu + \nu_{ij}) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \} - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i' u_j') \end{aligned} \quad (13)$$

Pseudo-viscosity 텐서의 각 성분은 다음과 같다 (식 (14)).

$$\begin{vmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\chi}{\epsilon} (2\phi_1 + \phi_1) \overline{u^2} & \frac{\chi}{\epsilon} f_{12} \overline{v^2} & \frac{\chi}{\epsilon} \phi \overline{w^2} \\ \frac{\chi}{\epsilon} \phi_2 \overline{v^2} & \frac{\chi}{\epsilon} (2\phi_2 + \phi_2) \overline{v^2} & \frac{\chi}{\epsilon} \phi_2 \overline{w^2} \\ \frac{\chi}{\epsilon} \phi \overline{u^2} & \frac{\chi}{\epsilon} \phi_2 \overline{v^2} & \frac{\chi}{\epsilon} [2(1 - C_2) + \phi_3] \overline{w^2} \end{vmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{11} & A_{12} & A_{13} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \overline{u^2} \\ \overline{v^2} \\ \overline{w^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{11} & B_{12} & B_{13} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \overline{u'v'} \\ \overline{u'w'} \\ \overline{v'w'} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{vmatrix} \quad (15)$$

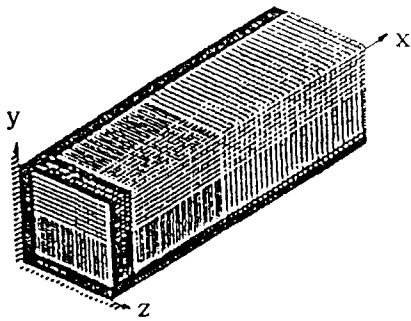


Fig. 3 Computational grid system

이들 Reynolds 응력을 계산하려면 6×6 행렬이 필요한데, 많은 시간이 소요되므로 2개의 3×3 행렬로 다음과 같이 바꾸어 계산하도록 하였다((식 15)).

Fig. 3에서처럼 격자는 미세(Fine) 격자와 거친(Coarse) 격자로 나누어지는데, 덕트 중심 부근에서는 거친 격자를 이용하고, 덕트 벽면 부근에서는 미세 격자를 사용하였다.

그리고, Reynolds 응력의 계산은 해의 안정성과 정확성을 주기 위하여 Fig. 4처럼 정육면체의 면 중심에서 계산하도록 하였다.

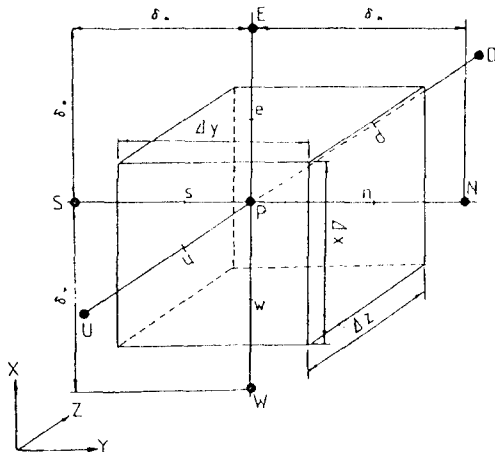


Fig. 4 Nomenclature and dimensions of grid cell for general variable ϕ

4. 실험

Fig. 5는 본 실험에서 이용된 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 정4각 시험덕트, Scotch-yoke 형 가진기, x, y 및 z 축으로 자동 이송시킬 수 있는 3차원 이송장치, 유량을 측정하기 위한 오리피스, 송풍기 등으로 구성하였다. 본 실험에서 사용된 정4각덕트는 종횡비가 1이며 아크릴로 제작하였고,

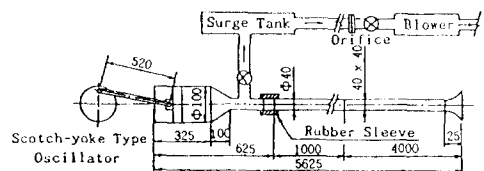


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1. Experimental conditions of developing turbulent steady flows

x/D_h	Re_{st}	x/D_h	Re_{st}
5	16600	40	16600
	33200		33200
	66400		66400
10	16600	50	16600
	33200		33200
	66400		66400
20	16600	60	16600
	33200		33200
	66400		66400
30	16600	90	16600
	33200		33200
	66400		66400

단면($2a \times 2b$)은 40×40 mm, 길이(L)는 4,000 mm로 하였다. 덕트의 윗면(28 - $\phi 5.4$ Drill, Tap 1/4")과 양면(64 - $\phi 1.0$ Drill)에는 열선 유속계로 속도를 측정할 수 있도록 구멍을 만들었다.

본 실험에서 난류 정상유동에 대한 속도분포와 난류강도 분포에 대한 데이터는 횡단면 위치(z')를 0.0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.95로 변화시키고, 축방향 위치(x/D_h)를 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90으로 변

화 시키면서 측정하였다. 특히 축방향 위치에서 난류 정상유동에 대한 측정은 속도파형이 거의 변화되지 않는 위치까지 측정 하였다. Table 1은 이들 난류 정상유동에 대한 실험조건을 나타내고 있다. 이들 데이터는 열선 유속계의 시그널 콘디셔너와 선형기 및 코릴레이타에 A/D변환기를 연결하여 컴퓨터에서 분석하도록 하였다.

5. 결과 및 고찰

난류 정상유동의 속도파형을 열선 유속계의 열선신호로부터 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에서 프린터로 기록하도록 하였다. 그들의 속도파형은 무차원 횡단면 위치와 축방향 위치를 변화시키면서 얻어졌던 것 중에서 대표적인 경우를 Fig. 6에 나타내었다. 이들로부터 난류성분은 덕트중심보다는 덕트 벽면에서 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 다시 말해서 Reynolds 수가 증가할수록 측정위치가 덕트 중심보다는 벽쪽으로 갈수록 이들의 유동은 불안정하고 불규칙한 유동이 됨을 알 수 있었다.

또한 완전 발달된 영역에서는 난류의 파동성분

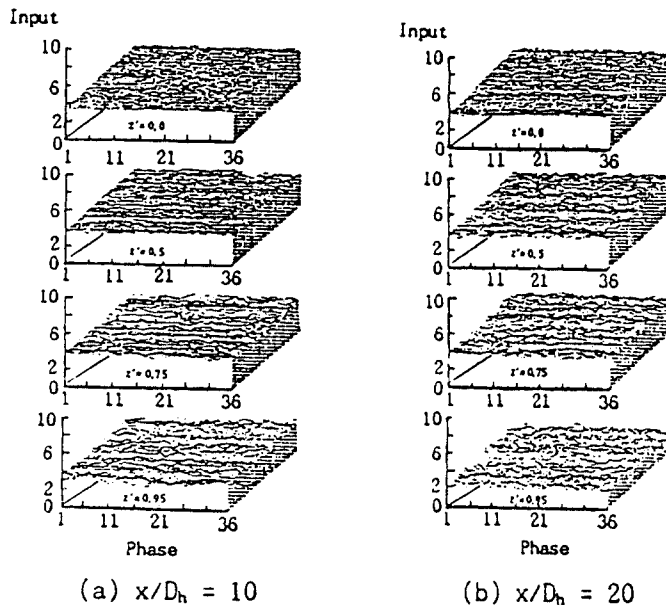


Fig. 6 Velocity waveforms of developing turbulent steady flow at $Re = 66400$

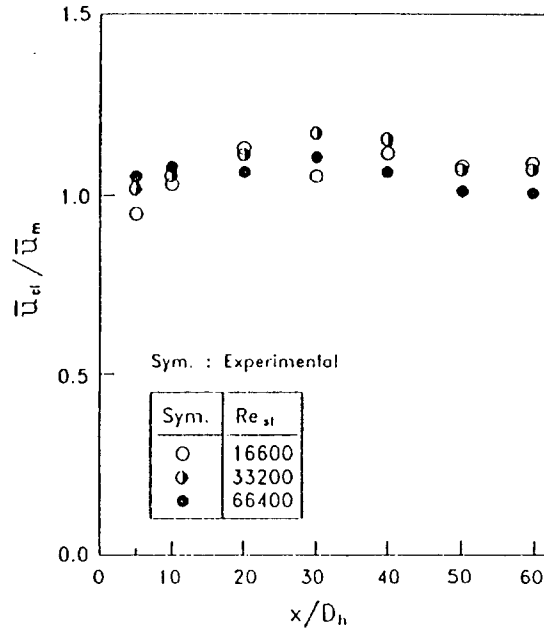


Fig. 6 Continued

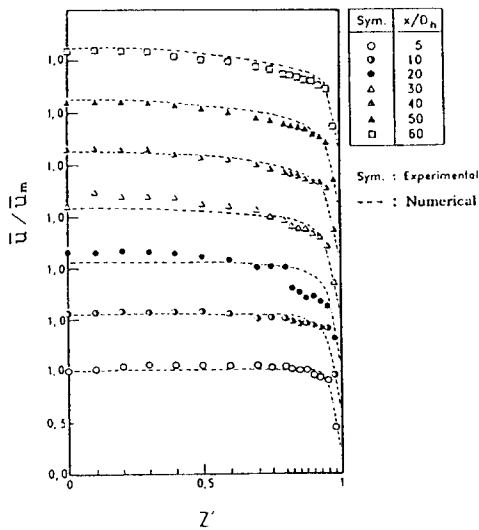


Fig. 7 Velocity profiles along the change in the axial direction and Reynolds number for turbulent steady flow in the entrance region

이 더이상 변화되지 않고 있음을 관찰할 수 있었다. 입구영역에서 난류 정상유동의 속도분포를 덕트의 무차원 축방향 위치에 따라 Fig. 7에 나타낸

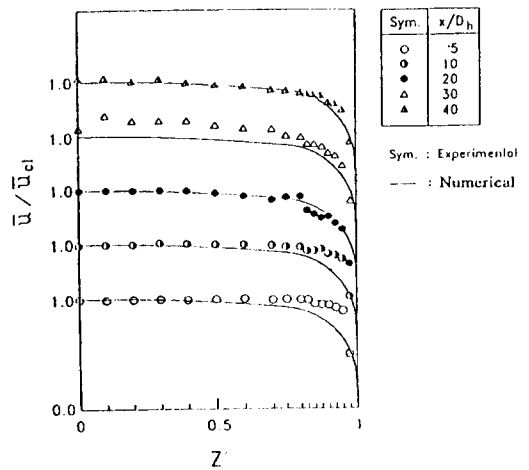


Fig. 8 Cross-sectional velocity profiles of steady flow at Re_{z1}=66400

것인데, Overshoot 현상이 x/D_h=30 지점에서 나타나고 있음을 관찰할 수 있었다.

이 지점은 Reynolds 수에 크게 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있었다. Reynolds 수가 66400인

경우에 난류 정상유동의 무차원 횡단면 위치에 따른 속도분포를 Fig. 8에 나타낸 것인데, 입구영역에서 속도분포는, 덕트 중심 부근에서는 점진적인 증가를 보였으나 벽면에서는 빠르게 감소하고 있음을 알 수 있었다. 측정 위치가 입구로부터 하류로 진행됨에 따라 덕트의 횡단면을 두 영역으로 나눌 수 있는데, 한 영역은 점성력의 영향을 받는 영역과 그렇지 않는 영역으로 나눌 수 있었다. 덕트의 중심속도는 증가하는 반면 벽면 근방의 속도는 하류로 갈수록 경계층의 발달로 감소되고 있는 것이다. 이 현상은 유동의 질량 유량율이 어디서나 항상 같은 이유로 해석된다. 또한 이들의 변화는 무차원 횡단면 위치가 40인 지점 이후에서는 거의 변화가 없었고, 수치해와 근사하게 접근하고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 입구영역에서 난류의 무차원 횡단면 위치에서 중심속도에 대한 각 지점의 순간속도를 나타내었다. 이들로부터 입구영역의 덕트 중심부근에서는 균일 유동을 보이다가 덕트 벽면의 분포에서는 빠른 변화를 보이고 있음을 알 수 있는데, 이것은 덕트의 벽면에서 점성력의 영향때문이다. 그러나, Fig. 8과 마찬가지로 이들의 분포도 무차원 축방향 위치가 40인 지점부터는 더 이상 변화가 나타나지 않았다. 이것은 경계층 두께가 덕트 중심부분에 도달되어 완전 발달된 영

역이 되었음을 의미한다. 또한 이들의 분포는 7분의 1승 법칙에도 잘 일치하였고, 수치해에도 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 Laufer⁵⁾와 Pennel⁹⁾의 난류강도 실험 결과와 본 실험에서 얻어진 완전 발달된 영역에서의 난류강도 분포를 비교하였는데 덕트 중심으로부터 벽면까지 거의 점진적인 증가를 보이는 동일한 양상을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 11은 완전 발달된 영역에서 덕트 중심속도에 대한 국부속도와 $u'_{rms}/u'_{rms,cl}$ 의 분포를 나타낸 것인데 덕트 중심속도에 대한 국부속도가 7분의 1승 법칙에 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었고 $u'_{rms}/u'_{rms,cl}$ 분포에서도 덕트 중심부근 보다는 벽면 부근에서 난류강도가 크게 나타남을 알 수 있는데 이러한 현상은 덕트 벽면부근이 중심부근보다 훨씬 점성의 영향에 크게 작용되기 때문으로 사료된다.

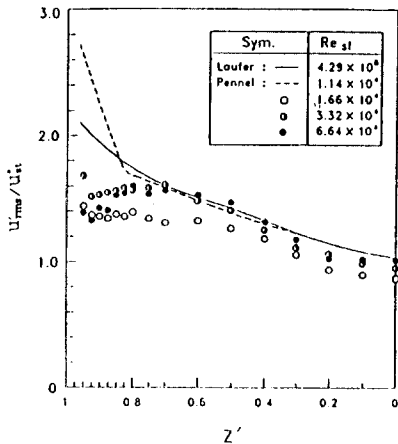


Fig. 9 Velocity profiles of local velocity divided by central velocity at several dimensionless cross sectional positions for developing turbulent steady flow in the entrance region at $Re_{st} = 66400$

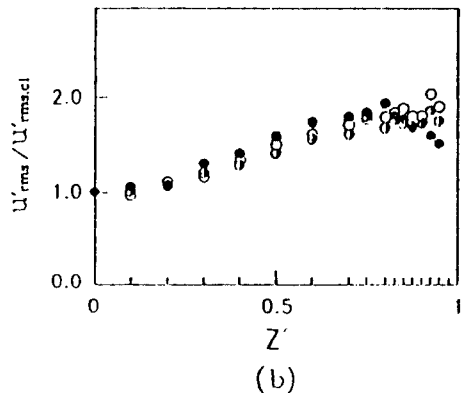
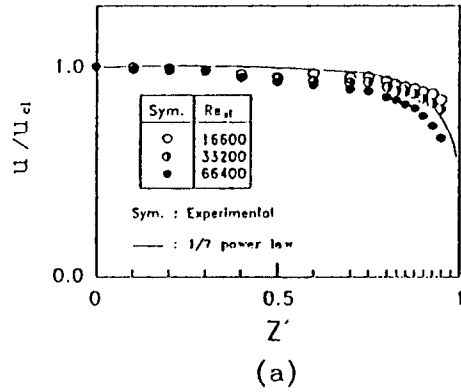


Fig. 10 Turbulence intensity of turbulent steady flows at $x/D_h = 90$

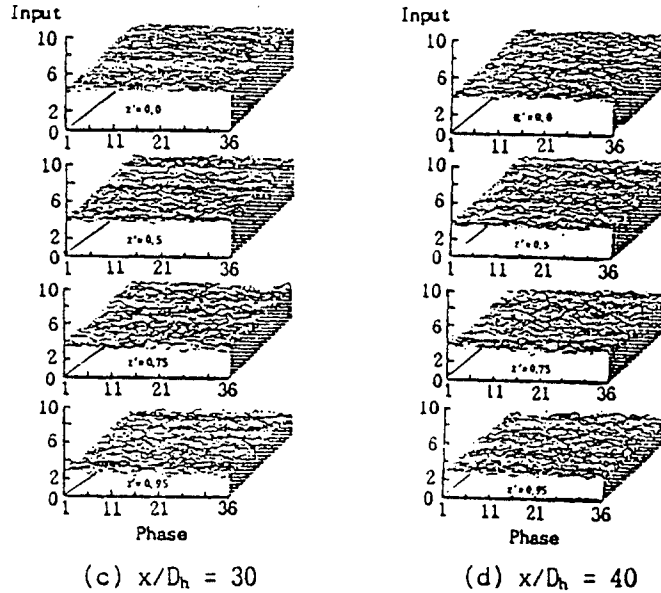


Fig. 11 The distributions of \bar{u}'/u'_{cl} and $u'_{rms}/u'_{rms,cl}$ for fully developed turbulent steady flow at $x/D_h = 90$

6. 결 론

정4각덕트의 입구영역에서 난류 정상유동의 실험해와 수치해의 비교 결과는 다음과 같다.

(1) 난류 정상유동의 속도분포에서 Overshoot 현상은 덕트의 무차원 축방향 위치가 30부근에서 발생한다.

(2) 난류 정상유동의 완전 발달된 영역에서 덕트의 중심속도에 대한 국부속도는 7분의 1승 법칙에 잘 일치하였고, 또한 입구로부터 하류까지 수치해에 잘 일치함을 확인하였다.

(3) 난류 정상유동의 입구길이는 덕트 입구로부터 수력직경의 약 40배 부근이었다.

후 기

이 논문은 1996년도 조선대학교 공업전문대학 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1) Gessner, F. B. and Emery, A. F., "The Numerical Prediction of Developing Turbulent Flow in Rect-

angular Duct", *J. of Fluids Eng.*, Vol. 103, pp. 441 - 455, 1981.

- 2) Talor, A. M. P., Whitelaw, J. H., and Yianneskis, M., "Curved Ducts with Strong Secondary Motion ; Velocity Measurements of Developing Laminar and Turbulent Flow", *J. of Fluids Eng.*, Vol. 104, pp. 350 - 359, 1982.
- 3) Moin, P. and Kim, J., "Numerical Investigation of Turbulent Channel Flow", *J. of Fluids Eng.*, Vol. 118, pp. 341 - 377, 1982.
- 4) Park, G. M., "Flow Characteristics of Developing Laminar Unsteady Flow in a Square Duct", Ph. D. Thesis, Korea Univ., 1987.
- 5) Yoo, Y. T., "A Study on Flow Characteristics of Developing Transitional Steady, Oscillatory and Pulsating Flows in the Entrance Region of a Square Duct", Ph. D. Thesis, Chosun Univ., 1990.
- 6) Koh, Y. H., "A Study on Turbulent Characteristics of Developing Turbulent Steady and Unsteady Flows in the Entrance Region of a Square Duct", Ph. D. Thesis, Chosun Univ., 1992.
- 7) Kim, M. H., "A Study on the Development of Low Reynolds Number Turbulence Model", Ph. D. Thesis, Korea Univ., 1990.

- 8) Laufer, J., "The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow", National Advisory Committee for Aeronautics, Report 1174, pp. 1 - 18, 1955.
- 9) Pennel, W. T., Sparrow, E. M., and Eckert, E. R. G., "Turbulence Intensity and Time - mean Velocity Distributions in Low Reynolds Number Turbulent Pipe Flow, Int. J. Heat Transfer, Vol. 15, pp. 1067 - 1074, 1972.