

靜止된 圓管내 旋回流에 관한 數值解析

朴 鳳 奎*, 金 光 龍**, 趙 鏞 喆***

Computational Study on Swirling Turbulent Flow in a Stationary Pipe

Bong-Kyu Park,* Kwang-Yong Kim,** Yong-Chul Cho***

Abstract

A numerical computation of turbulent swirling flow in a stationary pipe is presented in this work.

Major concerns of this study are :

- 1) To approve similarity laws which were verified experimentally.
- 2) To investigate the effects of curvature modification for the $K-\epsilon$ model.

To account for effects of swirl, Rodi's curvature correction and Kim & Chung's are applied. The governing differential equations for elliptic flow are discretized by control volume formulation method, and the discretized equations are calculated ay line by line TDMA and SIMPLE algorithm.

The computational results also satisfy similarity laws which are based on swirl angle as in experiments. And the curvature modification of Rodi improves computational accuacy than the standard $K-\epsilon$ model. But such lower order closure models are not adequate for the prediction of this complex flow.

* 인하대학교 대학원

** 인하대학교 기계공학과 부교수

*** 인하대학교 기계공학과 교수

NOMENCLATURE

C_1, C_2	turbulence model constants in Reynolds stress model	U, V, W	mean velocities in axial, radial and tangential direction, respectively
d	diameter of pipe	u, v, w	fluctuation velocities in axial, radial and tangential direction, respectively
E	constant in wall function	W'	tangential velocity at $r/R=0.5$
K	turbulent kinetic energy	τ	Shear stress
L	length of pipe	δ	distance from wall
NI	the number of grid lin (x-direction)	δ_{ij}	Kronecker delta
NJ	the number of grid lin (r-direction)	κ	Von Kármán constant
P	production rate of turbulent kinetic energy	μ	absolute viscosity
p	mean static pressure	ν	kinematic viscosity
R	radius of pipe	θ	tangential coordinate
Ri	Gradient Richardson number	ϕ	Flow angle
Ri_r	Flux Richardson number	ϕ_s	swirl angle
r	radial coordinate	ϵ	dissipation rate of turbulent kinetic energy
S, S'	swirl number (Eq. (2-1), (2-2))	ρ	density

SUBSCRIPTS

a	average value	max	maximum value
eff	effective value	t	turbulent flow
in	inlet	N, E, S, W, P	nodal points in Fig. 2
l	laminar flow	n, e, s, w	points on control surfaces (Fig. 2)

1. 緒 論

流體流動에 旋回를 附與함으로써 熱 및 物質傳達의 效果를 增進시킬 수 있다는 것은 널리 알려진 事實로서 工學적으로 중요한 意味를 지니고 있다. 따라서 旋回流動은 가스터빈의 燃燒器, 高速遠心分離機, 熱交換機 및 工業用 加熱爐의 工業分野에 폭넓게 應用되고 있다.

圓管内 亂流旋回流에 관한 研究는 여러 觀點에서 많이 進行되어 왔다. 角運動量 減衰에 관한 研究는 Kreith & Sonju[1], Wolf et al. [2], 그리고 Murakami et al. [3] 등에 의해 遂行되었으며 Kreith & Sonju는 그들 實驗에 의하여 亂流旋回流強度의 10~20%가 減衰하며, 이 減衰率은 Reynolds 數가 작을수록 急激하다고 밝히고 있다.

또한 熱交換機 内部流動에 旋回를 附與함으로써 表面摩擦에 의한 過多한 에너지 損失없이 熱交換率을 增進시킬 수 있다는 可能性으로 많은 研究가 進行되기도 했다[4].

旋回를 強하게 附與하면 入口附近에서 軸方向으로 再循環領域이 形成된다. 이러한 流動에 관해 King et al. [5] 등은 實驗을 통해 이 領域은 管의 中心部分에서 볼 수 있으며 軸方向으로 壓力勾配가 陽으로 나타나는 고리모양의 領域이 存在한다고 밝혔다.

한편 Yajnik & Subbaiah[6]는 實驗을 통해 旋回가 軸方向速度에 미치는 影響을 考察했다. 또한 그들이 定義한 旋回角(Swirl angle)이 流動特性值로서 物理的 意味가 있음을 밝혔고 이를 基礎로 한 相似法則에 대해 研究하였다.

亂流流動을 數值解析하기 위해서는 運動量方程式에 있는 Reynolds Stress項들을 적절히 modeling해야 한다. 이러한 모델중 가장 經濟적이고 工學적으로 妥當성을 지닌 것으로 K-ε 모델이 널리 使用되고 있다[7-9]. 그러나 浮力이나 旋回 등에 의한 流線의 휨이 큰 流動에 대해서는 그 影響을 충분히 反映하지 못하므로 여러 모델 修正法들이 개발되어 왔다. [10-16].

本 研究에서는 旋回를 考慮한 修正法으로 Rodi가 개발한 曲率修正法[10]과 代數應力方程式 (Algebraic stress equation)으로부터 誘導한 Kim & Chung의 修正法[14]을 使用하였다.

本 研究의 目的은 첫째, Yajnik & Subbaiah[6]가 實驗으로 立證한 相似法則을 數值分析을 통해 證明하고 둘째 K-ε 모델에 대한 曲率修正이 計算結果에 미치는 影響을 檢討하는데 있다. 아울러 計算의 正確性を 위하여 非旋回流에 대한 數值解析을 통해 壁法則(Wall function)適用上의 問題點을 檢討하였다.

II. 數值解析

2-1. 流動場

本 研究에서는 그림1과 같이 靜止된 圓管内에 流動場入口에서 旋回날개(Swirl vane)을 통해 부여된 亂流旋回流에 대해 數值解析하였다.

管의 直徑은 旋回流의 경우 Yajnik & Subbaiah의 實驗[6]과 동일한 120.5mm이고 非旋回流의 경우는 이와 함께 John Laufer의 實驗[17]과 같이 246.88mm를 使用하였다. 軸方向으로의 計算領域은 入口條件에 크게 影響을 받지않는 충분히 먼 거리인 173d까지 設定하였다.

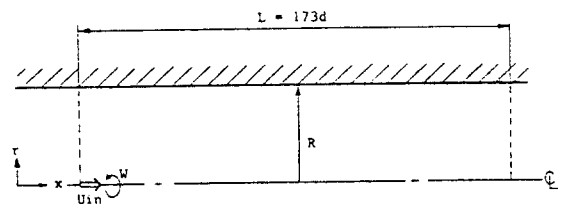


Fig. 1 The Flowfield being Investigated.

2-2. 旋回係數와 旋回角

旋回의 程度를 記述하는 因子인 旋回係數(Swirl number)는 線運動量束(Axial momentum flux)에 대한 角運動量束(Angular momentum flux)의 比로서 다음과 같은 式으로

$$S = \int_0^R UWr^2 dr / R \int_0^R U^2 r dr \quad (2-1)$$

혹은

$$S' = \int_0^R UWr dr / \int_0^R U^2 r dr \quad (2-2)$$

으로 定義되며, 이는 物理的으로 分명한 意味을 지니고 있어 많은 利用되었다[8, 10, 13].

반면에 Yajnik & Subbaiah는[6] 式(2-1)과 (2-2)가 積分을 包含하고 있어 실험치로부터 求하는 데 있어 正確性이 떨어지므로 旋回角(Swirl angle)을 特性值로 使用하여 解析하였다.

旋回角(Swirl angle)이란 壁으로부터 半徑의 5% 떨어진 지점에서의 流動角(Flow angle)을 말한다. 여기서 流動角은 流動場內 各 點에서 流動方向과 中心軸이 이루는 角度이다.

Yajnik & Subbaiah[6]는 實驗을 통해 旋回係數는 旋回角만의 函數로서 線形的인 관계가 있음을 밝혔으며 또 Reynolds數가 충분히 크고 入口部分에서 逆流가 發生하지 않는 경우에 入口條件의 영향을 크게 받지 않을 만큼 멀리 떨어진 部分에서 旋回角이 같은 斷面에서의 平均速度는 Reynolds數나 軸方向 거리에 관계없이 같은 分布를 나타낸다는 相似法則이 成立됨을 밝혔다.

2-3. 支配方程式

亂流流動의 支配方程式들은 각 方向의 速度 및 靜壓을 平均値와 亂流變動値의 合으로 表元하는 Reynolds 分解法을 連續方程式과 Navier-Stokes 方程式에 適用하여 求할 수 있다 [18]. 이렇게 얻어진 方程式들에 대해 定常狀態, 非壓縮性, 軸對稱 ($\partial/\partial\theta=0$)이라는 假定과 Reynolds stress들이 平均速度 勻配와 渦粘性係數(Eddy viscosity)에 比例한다는 Boussinesq의 假說[19]를 導入하면 本 研究에서 使用하는 運動量方程式과 連續方程式을 다음과 같이 얻을 수 있다.

連續方程式

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} = 0 \quad (2-3)$$

運動量方程式

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\nu_{eff} r \frac{\partial U}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial x} (\nu_{eff} \frac{\partial U}{\partial x}) + S_x \quad (2-4)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{W^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\nu_{eff} r \frac{\partial V}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial x} (\nu_{eff} \frac{\partial V}{\partial x}) + S_r \quad (2-5)$$

$$U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{VW}{r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\nu_{eff} r \frac{\partial W}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial x} (\nu_{eff} \frac{\partial W}{\partial x}) + S_\theta \quad (2-6)$$

여기서

$$S_x = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\nu_t r \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\nu_t \frac{\partial U}{\partial x})$$

$$S_r = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\nu_t r \frac{\partial V}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial x} (\nu_t \frac{\partial U}{\partial r}) - 2\nu_t \frac{V}{r^2}$$

$$S_\theta = -\frac{\partial}{\partial r} (\nu_t \frac{W}{r}) + \frac{\nu_t}{r} \frac{\partial W}{\partial r} - 2\nu_t \frac{W}{r^2}$$

2-4. 亂流모델

2-4-1. 標準 K-ε모델

Boussinesq의 假說에 基礎를 두고 있는 Lower order closure 모델들에서의 渦粘性係數는 層流粘性係數와는 달리 流體의 特性值가 아니며 流動의 각 地點마다 亂流構造에 따라 다른 값을 갖게 된다.

이러한 渦粘性係數(Eddy viscosity)는 速度次元 [V]과 길이次元[L]의 곱으로 表現되며, K-ε모델에서는 亂流運動에너지 (Turbulent kinetic energy, K)와 亂流運動에너지消滅率 (Dissipation rate of turbulent kinetic energy, ε)을 使用하여 次元解析을 통해 다음과 같이 表現된다[7].

i) 速度次元 [V] ≡ K^{1/2}

$$[K = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})] \quad (2-7)$$

ii) 길이次元 [L] ≡ K^{3/2} / ε (2-8)

$$[\epsilon = \nu_t (\frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i})^2]$$

따라서 渦粘特係數는

$$\nu_t = C_\mu K^2 / \epsilon \quad (2-9)$$

으로 表現되므로 亂流流動에서의 粘性係數는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\nu_{eff} = \nu_t + C_\mu K^2 / \epsilon \quad (2-10)$$

여기서 C_μ는 모델常數이다.

亂流運動에너지와 亂流運動에서 消滅率은 각각 다음과 같은 Transport equation에 의해 求해진다.

亂流運動에너지 方程式

$$U \frac{\partial K}{\partial x} + V \frac{\partial K}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial r}) + P - C_D \epsilon \quad (2-11)$$

亂流運動에너지消滅率 方程式

$$U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial r}) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} P - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{K} \quad (2-12)$$

여기서

$$P = \nu_t [2 \{ (\frac{\partial U}{\partial x})^2 + (\frac{\partial V}{\partial r})^2 + (\frac{V}{r})^2 \} + \{ \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \}^2 + \{ \frac{\partial W}{\partial x} \}^2 + \{ r \frac{\partial}{\partial r} (\frac{W}{r}) \}^2] \quad (2-13)$$

여기서 쓰이는 모델常數는 表1과 같은 값을 갖는다. [7, 20].

Table 1. The Values of Constants in the K-ε Model

C ₁₁	C ₁₂	C _μ	C ₃	σ _k	σ _ε
1.44	1.92	0.09	1.00	1.00	1.30

2-4-2. 曲率修正

K-ε標準모델은 旋回流와 같은 流線의 彎이 큰 流動解析에 있어 그 曲率效果를 충분히 나타내지 못하므로 다음과 같은 모델 修正이 必要하다.

i) Rodi의 修正法[10]

길이次元(Length scale)을 決定하는 方程式(ε-equation)에 遠心力의 影響을 考慮하기 위해 生成項(Production term, 式(2-13))의 實驗常數를 Flux Richardson數의 函數로 만들었다.

이 Flux Richardson數는 半徑方向 速度變動值의 附加의인 體積力(Body forces)生成에 基礎를 두고 있으며, 特히 回轉軸을 包含하는 流動에서 Gradient Richardson數 缺點을 改善하였다.

$$C_{\epsilon 1}' = C_{\epsilon 1} (1 + 0.9 R_{iF}) \quad (2-14)$$

$$R_{iF} = \frac{2W \frac{\partial}{\partial r} (\frac{W}{r})}{[\frac{\partial U}{\partial r}]^2 + [r \frac{\partial}{\partial r} (\frac{W}{r})]^2}$$

ii) Kim & Chung의 修正法[14]

代數應力方程式(Algebraic stress equation)은 式(2-16)과 같다 [21].

$$\frac{\overline{u_i u_j}}{K} = \phi_1 \frac{P_{ij}}{\epsilon} + \phi_2 \delta_{ij} \quad (2-16)$$

여기서

$$\phi_1 = \frac{1 - C_2}{(P/\epsilon) + C_1 - 1}$$

$$\phi_2 = \frac{2}{3} \frac{C_2 (P/\epsilon) + C_1 - 1}{(P/\epsilon) + C_1 - 1}$$

式(2-16)에 다음과 같이 逆流가 發生하지 않은 弱旋回流에 대한 假定을 導入하여

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V}{r} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{W}{r} \ll \frac{\partial W}{\partial r}$$

整理하면 渦粘性係數는 다음과 같이 表現된다.

$$\nu_t = \frac{\alpha}{1 + \beta R_i} \frac{K^2}{\epsilon} \quad (2-17)$$

여기서

$$R_i = \frac{K^2}{\epsilon^2} \frac{W}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \quad (2-18)$$

$$\alpha = 0.09, \quad \beta = 0.25$$

Kim & Chung은 이 修正法을 自由旋回噴流에 適用하여 좋은 結果를 얻었다(14, 22).

2-5. 境界條件

本 數值解析에서 使用한 境界條件은 表2와 같다.

Table 2. Boundary Conditions in each Equation

Variable Boundary	U	V	W	K	ϵ
Inlet	U_{in}	0	A	$0.03U_{in}^2$	$K^{3/2}/0.005R$
Outlet	$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$	0	$\frac{\partial W}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial K}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0$
Symmetry axis	$\frac{\partial U}{\partial r} = 0$	0	0	$\frac{\partial K}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \epsilon}{\partial r} = 0$
Top Wall	Wall function	0	Wall function	Wall function	Wall function

A : $U_{in} \times \text{TAN}(\text{Vane Angle})$

2-6. 壁法則(Wall function)

K- ϵ 모델에 관한 方程式들은 壁에서 떨어진 完全亂流領域에만 適用되도록 考案된 式들이므로 粘性의 影響이 큰 壁近處에서의 數值解를 經濟적으로 얻기 위해 實驗的인 壁法則(Wall function)을 適用한다 [23].

壁法則에 따르면 $y^+ = 11.63$ 을 基準으로 하여 壁으로부터 첫번째 格子線에서의 y^+ 가 이 값보다 큰 경우에는 Log-law region의 法則이 適用되고 이 값보다 작은 경우에는 Laminar sublayer의 法則이 適用된다 [24].

2-7. 計算過程

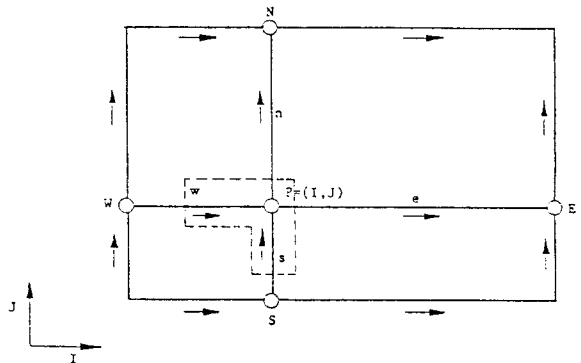
支配方程式들은 數值的으로 計算하기 위해서는 差分式을 만들어야 하며 그 過程에서 對流項과 擴散項의 關係를 나타내는 Scheme이 必要하게 된다. 本 研究에서는 逆流가 存在하지 않기 때문에 格子線과 流動方向이 거의 一致하므로 Hybrid central/upwind difference scheme을 使用하였다 [25].

格子系로는 非旋回流의 計算結果에 따라 가장 經濟的이고 妥當한 計算值를 얻은 것을 旋回流 計算에 使用하였으며 이는 23×23 (NI \times NJ)의 節點을 갖는 格子系이었다. 그리고 數值的擴散(Numerical diffusion)을 없애기 위해 그림 2와 같은 Staggered grid system을 使用하였다 [25].

각 節點들의 값은 TDMA (Tri-diagonal matrix algorithm)로 計算하였다 [25, 26].

運動量方程式에 있는 壓力句配를 얻기 위해서는 壓力補正方程式을 聯立해서 計算하는 SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation) 方法을 採擇하였다 [25, 26].

Computer code는 TEACH code[23]를 修正하여 使用하였으며 收斂條件으로 乘餘誤差 (Residual source)가 0.04이하로 줄어들 때까지 反復計算하였다.



Three Grids For P, W etc. - at Position Marked (○)
for U Velocity - at Position Marked (→)
for V Velocity - at Position Marked (↑)
Fig. 2 Staggered Grid and Notation for the Rectangular Computation Mesh.

III. 結果

本 研究에서는 靜止된 圓管内를 흐르는 亂流流動에 대해 標準 K-ε 曲率修正한 모델을 使用하여 數值解析했으며, 그 結果를 非旋回流의 경우 John Laufer의 實驗值(17)와 Yajnik & Subbaiah의 實驗值(6)와 比較하였으며, 旋回流의 경우 Yajnik & Subbaiah의 相似法則에 대한 實驗結果와 比較 檢討하였다.

3-1. 非旋回流

圓管壁에 壁法則(Wall function) 適用의 問題點을 檢討하기 위해 非旋回流에 대해 計算하였다.

그림 3, 4와 5에서 나타난 바와 같이 軸方向 速度

Table 3. 벽으로부터 첫번째 격자선에 대한 검토

run	δ_p/d	y^+	Wall function	$N_I \times N_J$
1	1.05×10^{-3}	12.4 × 127	Log law region	23 × 23
2	6×10^{-1}	8.7 × 8.8	Laminar sublayer	23 × 30

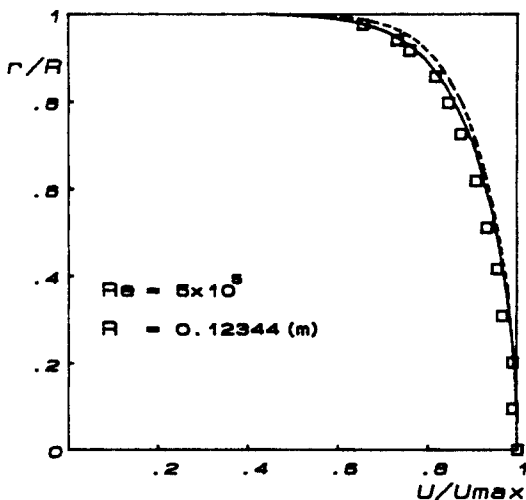


Fig. 3 Axial Velocity Profile (without Swirl) : □ Experiment by John Laufer, ----; run 1, —; run 2.

分布는 壁法則이 適用되는 壁으로부터 첫번째 格子線이 Laminar sublayer에 들 경우가 Log-law region에 들 경우보다 實驗值에 接近하며 두 計算值의 差異는 Reynolds數가 클수록 작아짐을 볼 수 있다. 이는 Log-law region의 壁法則이 Reynolds數가 충분히 큰 亂流流動에 대해 成立하기 때문인 것으로 思料된다.

그러므로 本 研究에서는 旋回流計算에서 첫번째 格子線이 Laminar sublayer에 충분히 들 수 있도록 壁附近에서 조밀한 格子間隙을 갖게 했다.

3-2. 旋回流

3-2-1. 相似法則(Similarity laws)에 관한 檢討

i) 旋回角의 相似法則에 대한 特性值로서의 價値

Table 4. 벽으로부터 첫번째 격자선에 대한 검토

run	δ_p/d	y^+	Wall function	$N_I \times N_J$
1	2.9×10^{-1}	18~18.4	Log low region	23 × 23
2	1.05×10^{-1}	8.4~8.5	Laminar sublayer	23 × 23

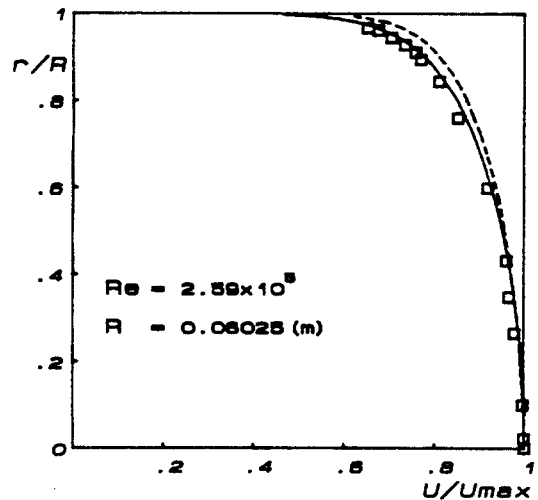


Fig. 4 Axial Velocity Profile (without Swirl) : □ Experiment by Yajnik and Subbaiah, ----; run 1, —; run 2.

Table 5. 벽으로부터 첫번째 격자선에 대한 검토

run	δ_s/d	y_s^+	Wall function	N1XNJ
1	11.35×10^{-3}	15.4~16.1	Log low region	23X21
2	2.9×10^{-3}	6.3~6.5	Laminar sublayer	23X23

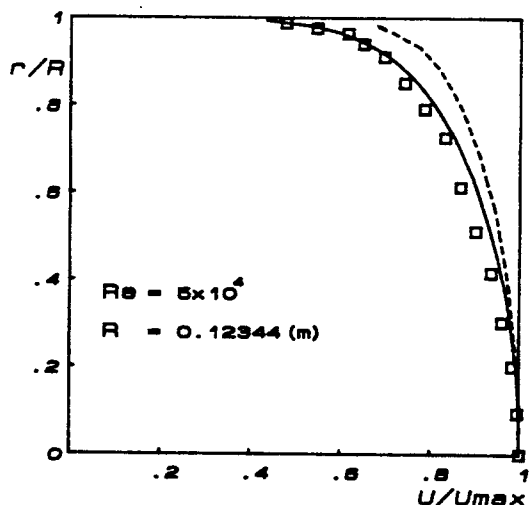


Fig. 5 Axial Velocity Profile (without Swirl) : □ Experiment by John Laufer, ---- : run 1, — : run 2.

를 檢討하기 위해 物理的 意味가 分명한 두가지 旋回係數와 의 關係가 있는 것으로 나타났으며, 그 直線式들은 다음과 같이 表現된다.

$$S = 0.0079\phi, \quad (3-1)$$

$$S' = 0.012\phi, \quad (3-2)$$

式(3-1)은 Yajnik & Subbaiah의 實驗에 의한 結果와 같으며 式(3-2) 역시 實驗結果와 거의 一致한다. 그리고 이는 Reynolds數나 曲率修正의 영향이 없는 것으로 나타났다. 그러므로 旋回角은 亂流管流動에 있어 旋回에 대한 特性值로 충분한 物理的 意味가 있음이 數值接近으로도 立證됨을 알 수 있다.

ii) 半徑方向에 따른 流動角의 分布를 그림7과 8에 나타냈다.

그림7은 旋回角이 5°인 斷面에서의 分布이고, 그

Table 6. Calculation case(with swirl)

run	Re. (10)	Model	Vane ang.	Swirl ang.	Station
1	1.36	K-ε std.	15	5°	75d
2	1.36	Rodi	15	5°	75d
3	1.36	Kim & Chung	15	5°	75d
4	1.42	K-ε std.	15	5°	50d
5	1.42	Rodi	15	5°	50d
6	1.42	Kim & Chung	15	5°	50d
7	2.48	K-ε std.	20	9.2°	50d
8	2.48	Rodi	20	9.2°	50d
9	2.48	Kim & Chung	20	9.2°	50d
10	0.67	K-ε std.	30	9.2°	50d
11	0.67	Rodi	30	9.2°	50d
12	0.67	Kim & Chung	30	9.2°	50d

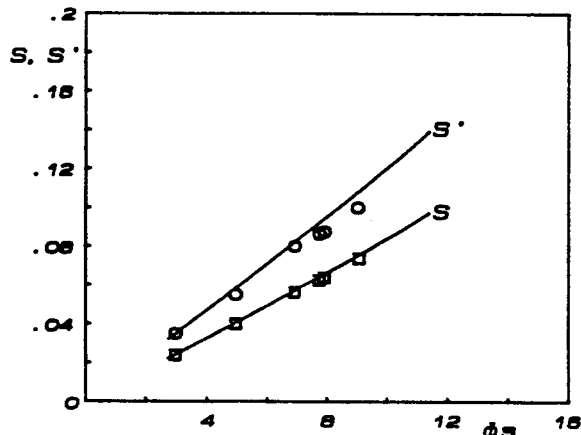


Fig. 6 Variation of Swirl Angle with Swirl Number. ○ □ ; Experiment, — ; Calculation

림8은 9.2°斷面에서의 分布이다. 이들 그림에서 旋回角이 5°인 경우는 Reynolds數나 거리에 상관없이 分布曲線이 一致하였으며, 實驗值와는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 9.2°인 경우는 Reynolds數에 따라 약간의 차이를 보이고 있으나, 實驗值에서도 이와 같은 차이는 나타나고 있다.

iii) 그림9와 11은 平均速度分布를 相似法則에 대해 考察한 것이다. 그림9는 旋回角이 5°인 斷面에서

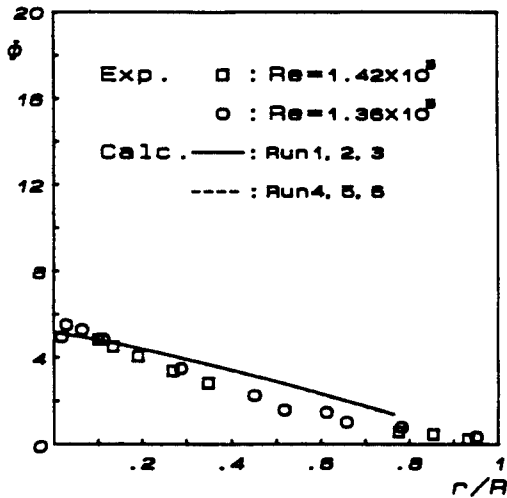


Fig. 7 Incline of Velocity ($\phi_s = 5^\circ$).

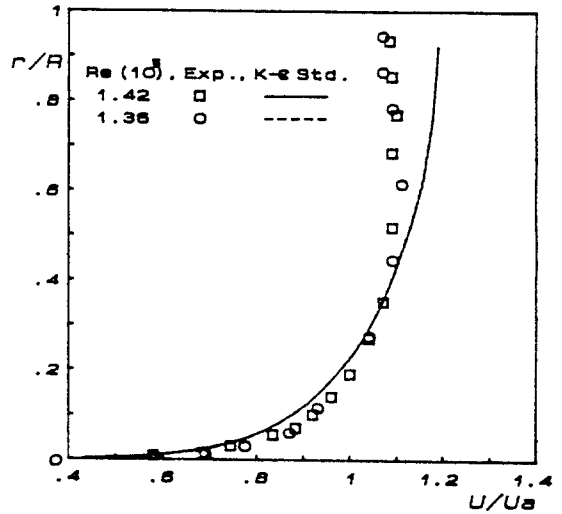


Fig. 9 Incline of Velocity ($\phi_s = 5^\circ$).

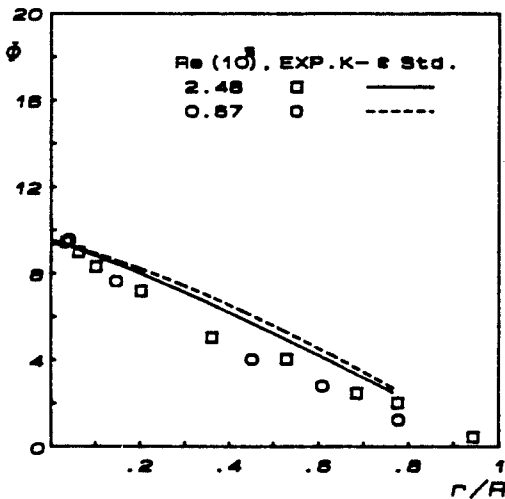


Fig. 8 Incline of Velocity ($\phi_s = 9.2^\circ$).

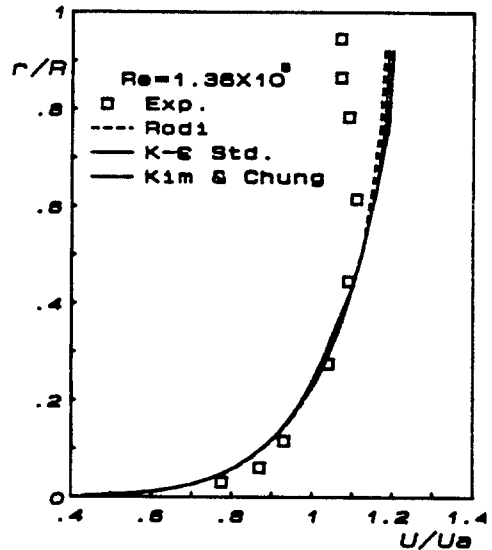


Fig. 10 Axial Velocity Profile ($\phi_s = 5^\circ$)

入口로부터 거리에 상관없이 軸方向의 平均速度分布가 一致함을 볼 수 있다. 그림 11은 接線速度分布를 그린 것으로 이 역시 一致하는 結果를 보인다. 이로부터 平均速度分布에 대한 相似法則이 數値解析으로도 이루어짐을 알 수 있다.

3-2-2. 曲率修正에 대한 檢討

그림 6과 7에서 보듯이 旋回角이나 流動角과 같은 旋回特性值에 대한 曲率修正의 영향은 거의 없으며,

計算値는 實驗値와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

그림 10은 旋回角이 5° 인 斷面에서 軸方向速度에 대한 曲率修正의 영향을 檢討한 것으로 Rodi의 修正法에 의한 結果가 實驗値에 좀더 接近했으나, 標準 K- ϵ 모델과 曲率修正한 모델에 의한 計算値의 차이는 아주 작은 것으로 나타났다.

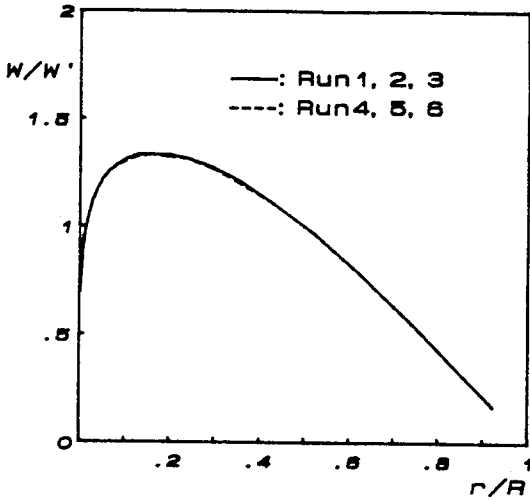


Fig. 11 Tangential Velocity Profile ($\phi_s = 5^\circ$).

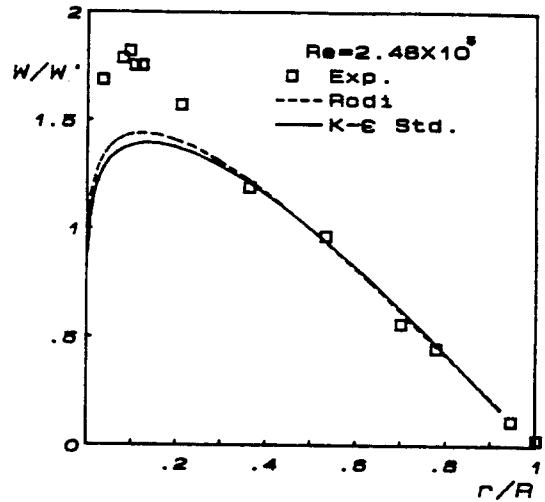


Fig. 13 Tangential Velocity Profile ($\phi_s = 9.2^\circ$).

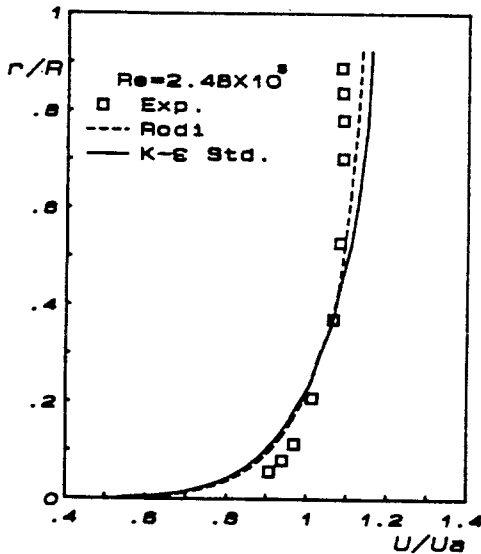


Fig. 12 Axial Velocity Profile ($\phi_s = 9.2^\circ$).

그림 12는 旋回角이 9.2° 인 斷面에서 軸方向速度分布를 그린 것으로 Rodi의 修正法이 適用된 結果가 實驗値에 많이 接近함을 보인다. 그림 13은 旋回角이 9.2° 인 斷面에서 特定方向速度分布를 그린 것으로 Rodi의 曲率修正法에 의한 結果가 標準 K- ϵ 모델에 의한 結果보다 實驗値와 比較했을 때 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 이는 Lower order closure

모델이 갖는 共通的인 缺點으로 알려진 바와 같다 [27].

IV. 結 論

亂流 旋回管流動에 대한 數值解析으로 얻은 結果로부터 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

i) 計算値에서 旋回係數(Swirl number)는 入口條件이나 Reynolds 數에 관계없이 旋回角(Swirl angle)만의 函數로 線形的 關係를 보였다.

ii) 計算値는 流動角(Flow angle)分布와 平均速度分布가 旋回角에 따른 相似를 만족시킴을 보인다.

iii) 亂流 모델로는 標準 K- ϵ 모델을 사용한 경우 實驗値에 좀 더 近似한 計算値를 얻을 수 있었으나 이러한 Lower order closure 모델들을 사용한 計算結果들은 實驗値와 根本的인 差異를 보이고 있다.

i) 과 ii) 의 結論은 Yajnik & Subbaiah(6)가 實驗을 통해 밝힌 事實과 一致한다.

REFERENCES

1. Frank Kreith and O.K. Sonju, "The decay of a turbulent swirl in a pipe,

- "Journal of Fluid Mechanics, Vol. 22, Part 2, pp. 257-271, 1965.
2. L. Wolf Jr., Z. Lavan and A. A. Fejer, "Measurements of the decay of swirl in turbulent flow, "AIAA Journal, Vol. 7, No. 5, pp. 971-973, 1969.
 3. M. Murakami, O. Kito, Y. Katayama and Y. Iida, "An experimental study of swirling flow in pipes, "Bulletin of the JSME, Vol. 19, No. 128, pp. 118-126, 1976.
 4. R. G. Backshall and Fred Landis, "The boundary layer velocity distribution in turbulent swirling pipe flow, "Journal of Basic Engineering, pp. 728-733, December 1969.
 5. M. K. King, R. R. Rothfus and R. I. Kermode, "Static pressure and velocity profiles in swirling incompressible tube flow, " AIChE Journal, Vol. 15, No. 6, pp. 837-842, 1969.
 6. K. S. Yajnik and M. V. Subbaiah, "Experiments on swirling flows, " Journal of Fluid Mechanics, Vol. 60, Part 4, pp. 665-687, 1973.
 7. B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows, " Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269-289, 1974.
 8. I. Kubo and F. C. Gouldin, "Numerical calculations of turbulent swirling flow, " Journal of Fluids Engineering, pp. 310-315, September 1975.
 9. J. J. Gorski, T. R. Govindan, and B. Lakshminarayana, "Computation of three-dimensional turbulent shear flows in corners, " AIAA Journal, Vol. 23, No. 5, pp. 685-692, 1985.
 10. W. Rodi, "Influence of buoyancy and rotation on equations for the turbulent length scale, " Proceedings of the 2nd Symposium on Turbulent Shear Flows, Imperial College, London, pp. 10, 37-10, 42, 1979.
 11. W. Rodi and G. Scheuerer, "Calculation of curved shear layers with two-equation turbulence models, " Physics of Fluids, Vol. 26, No. 6, pp. 1422-1436, 1983.
 12. M. A. Leschziner and W. Rodi, "Calculation of annular and twin parallel jets using various discretization schemes and turbulence-model variations, " Journal of Fluids Engineering, Vol. 1, pp. 352-360, 1981.
 13. M. A. Leschziner and W. Rodi, "Computation of strongly swirling axisymmetric free jets, " AIAA Journal, Vol. 2, No. 12, pp. 1742-1747, 1984.
 14. K. Y. Kim and M. K. Chung, "New eddy viscosity model for computation of swirling turbulent flows, " AIAA Journal, Vol. 25, No. 7, pp. 1020-1022, 1987.
 15. B. E. Launder and C. H. Priddin and B. I. Sharma, "The calculation of turbulent boundary layers on spinning and curved surfaces, " Journal of Fluid Engineering, pp. 231-239, March 1977.
 16. F. Pourahmadi and J. A. C. Humphrey, "Prediction of curved channel flow with an extended $K-\epsilon$ model of turbulence, " AIAA Journal, Vol. 21, No. 10, pp. 1365-1373, 1983.
 17. J. Laufer, "The structure of turbulence in fully developed pipe flow, " NACA Report No. 1174, 1953.

18. H. Tennekes and J. L. Lumley, "A first course in turbulence," The MIT Press, pp. 28-31, 1973.
19. J. O. Hinze, "Turbulence," McGraw-Hill Book Company, pp. 377-384, 1959.
20. W. Rodi, "Turbulence models and their application in hydraulics," IAHR AIRH, , pp. 20-29, 1984.
21. W. Rodi, "A new algebraic relation for calculation the Reynolds stress," Z. Angrew. Math. Mech, 56, pp. 219-221, 1976.
22. K. Y. Kim, "Computational study on the swirling turbulent flow with recirculation," Ph. D. Thesis, Dept. of Mech. Eng., KAIST, 1987.
23. P. Bradshaw, "Turbulence," Topics in Applied Physics, Vol. 12, Springer-Verlag, 1978.
24. D. G. Lilley and D. L. Rhode, "Computer code for swirling turbulent axisymmetric recirculating flows in practical iso-thermal combustor," NASA CR-3442, Feb. , 1982.
25. S. W. Patankar, "Numerical heat transfer and fluid flow," McGraw-Hill, pp. 113-137, 1980.
26. S. W. Patankar, "A calculation procedure for two-dimensional elliptic situations," Numerical Heat Transfer, Vol. 4, pp. 409-425, 1981.
27. B. Lakshminarayana, "Turbulence modeling for complex shear flows," AIAA Journal, Vol. 24, No. 12, pp. 1900-1917, 1986.

용어해설

CIM & AI을 위한

● ASNI

American National Standards Institute 미국국가규격협회. 미국에 있어서의 표준규격을 편집/출판하는 조직명. ANSI규격은 여기서 정한 것이다. 근래 오프티컬다바이스/시스템에서 많은 ANSI규격을 본다.