

亂流 Offset 噴流에 관한 數值解析

李 愚 正*, 金 光 龍**, 趙 鏞 喆***

Calculation of Turbulent Offset Jet

Woo-Jung Lee,* Kwang-Yong Kim,** Yong-Chul Cho***

ABSTRACT

The paper discusses the problem of the flow over the backward facing step and the offset jet, which are calculated numerically. Standard $k-\epsilon$ model and its LPS modification are used as turbulence models. Hybrid central/upwind scheme and skew-upwind scheme are used as numerical schemes.

The numerical scheme has a strong influence on the offset jet rather than the flow over backward facing step. The skew-upwind scheme gives good results in both cases. However, the $k-\epsilon$ model with LPS modification yields no remarkable improvements in the predictions of both flows. The skew-upwind scheme improves the prediction of reattachment length in the offset jet.

기호설명

A : 檢査表面의 面積 혹은 差分式의 係數

a : 檢査表面의 面積

C_1, C_2, C_c : 亂流모델의 常數들

C_b, C_u

G : 亂流運動에너지 生成項

H : Step의 높이 (Fig. 1) 혹은 Offset

噴流中心線의 높이 (Fig. 2)

h : Offset噴流아랫면의 높이 (Fig. 2)

J : Total Flux (식 (7))

k : 亂流運動에너지

L : 再附着點까지의 거리

ℓ : Length Scale

P : 壓力

R : 流線의 曲率半徑

* 인하대학교 대학원

** 인하대학교 기계공학과 부교수

*** 인하대학교 기계공학과 교수

R_{ii} : Richardson 數

S_s : Source 項

t : Offset 噴流의 노즐 幅

U, V : 각각 x, y 方向의 亂流平均速度

V : 速度벡터의 크기

x, y : 直交좌표계의 좌표들

Γ : 交換係數

ε : 亂流運動에너지의 消滅率

ϕ : 從屬變數

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, \lambda$: 亂流모델常數들

μ : 粘性係數

ρ : 密度

I. 緒 論

본 研究에서는 亂流 Offset 噴流를 數值的으로 解析하였다. Offset 噴流는 熱交換器, 燃燒器, 流體 噴出器 등에서 볼 수 있으며, 再循環領域과 衝突領域 그리고 壁噴流領域이 同時에 存在하는 流動場으로 流線의 曲率效果가 큰 複雜한 流動現象을 나타낸다.¹⁾²⁾

Offset 噴流의 實驗的研究는 Sawyer³⁾⁴⁾와 Pelfrey, Liburdy¹⁾²⁾에 의해 遂行되었다. Sawyer는 주로 Offset 높이에 따른 再附着點의 位置와 바닥면에서의 壓力分布에 대해 研究의 重點을 두었고³⁾, Pelfrey와 Liburdy는 LDV (Laser Doppler Velocimeter)를 使用해서 噴流의 形成過程을 觀察하고 亂流流動 特性值들을 測定¹⁾²⁾ 하였다. Offset 噴流를 解析하기에 앞서 豫備計算을 통해 數值的인 正確性を 檢討하기 위하여 比較的 簡單한 Backward Facing step 을 지나는 流動場을 解析하였다. Backward Facing step을 지나는 流動에 대한 實驗的研究는 대단히 많았으며⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾ 數值解析으로는 Amano와 Goel⁹⁾이 $k-\varepsilon$ 모델과 代數應力모델 (Algebraic stress model)을 使用해서 좋은 結果를 얻었다.

2次元 剝離流動에 관한 解析에서는 여러 亂流 모델들이 提示되었다.¹⁰⁾¹¹⁾ 특히, $k-\varepsilon$ 모델은 流線의 힘이 큰 再循環領域內에서는 妥當하지 않다고 알려져 있으며¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾ 이에 따라 Durst와 Rastogi¹⁰⁾는 旋回流에 대한 $k-\varepsilon$ 모델의 修正式인 LPS方法을 2次

元 Fence의 剝離流動에 適用하였다. Leschiziner와 Rodi¹¹⁾는 代數應力모델 (Algebraic stress model)로부터 流線의 힘의 效果를 考慮한 $k-\varepsilon$ 모델의 修正式을 誘導하였으며, 이를 Twin parallel jet에 適用해 向上된 結果를 얻었고, 數值 scheme의 適用에 있어서 Hybrid scheme보다 流動이 格子線과 큰 角度로 交叉하는 경우를 考慮해준 Skew-upwind scheme이 더 向上되는 結果를 얻었다.

本 研究에서는 이와같이 流動場을 計算하기 위해 亂流運動에너지와 燒滅率에 관한 方程式을 풀어 亂流粘性係數를 決定하는 $k-\varepsilon$ 모델을 使用했으며, $k-\varepsilon$ 모델의 曲率修正 方法으로 LPS (Lauder, Priddin, Sharma)¹²⁾의 方法을 使用했다.

數值 scheme으로는 Hybrid central/upwind Scheme과 skew-upwind scheme이 使用되었으며, 이 兩者에 의한 結果值가 比較 檢討되었다. Skew-upwind scheme은 G. D. Raithby¹³⁾가 提案한 것으로 速度벡터의 크기와 方向性を 考慮하여 流動이 格子線과 큰 角度로 交叉하는 流動에서 數值的 擴散을 減消시키는 것으로 알려져 있다.

本 研究의 計算結果는 有限差分法에 따른 節點系의 選擇이 數值解에 미치는 影響, 數值 scheme이 數值解에 미치는 影響, 그리고 $k-\varepsilon$ 모델의 曲率修正에 따른 效果등이 해당되는 實驗值와 比較 檢討되었다. Backward facing step을 지나는 流動은 Tani, Iuchi, Komoda⁵⁾의 實驗에 대해, 그리고 Offset 噴流는 Pelfrey, Liburdy¹⁾의 實驗에 대해 解析을 遂行하였다.

II. 數值解析

2-1 計算領域

2-1-1 Backward Facing Step을 지나는 流動

Tani, Iuchi 및 Komoda⁵⁾에 의해 實驗된 Fig. 1과 같은 Step을 흘러가는 定常狀態, 亂流流動에 대해 數值解析을 遂行하였다. 上流로 부터 흘러오는 흐름은 step이 시작되는 部分에서 剝離가 일어나서 再附着이 되는 곳까지 再循環領域을 形成하게 된다. H는 0, 02m이고 흐름의 速度는 28m/s이다. 作動流體는 空氣($\rho=1, 211 \text{ kg/m}^3$)이다. 計算領域은

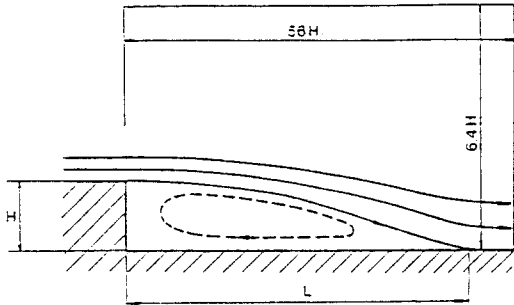


Fig. 1 The Flowfield of Backward Facing Step

바닥면으로 부터 6. 4H 떨어진 지점을 Entrainment boundary로 하였고, 各 速度成分의 勾配가 더 이상 변하지 않는, 卽 X-方向으로 56H되는 지점을 出口로 設定하였다.

2-1-2 Offset 噴流

Pelfrey와 Liburdy¹⁾에 의해 實驗된 Fig. 2와 같은 壁 사이의 노즐에서 噴出되는 定常狀態, 亂流流動에 대해 數值解析을 遂行하였다.

노즐入口에서 噴出되는 동시에 剝離가 일어나서 再附着이 되는 곳까지 再循環領域이 形成되고, 衝突領域과 壁噴流領域이 생기게 된다.

H=0, 0875 (m), h=0, 0812 (m) 그리고 노즐의 幅은 t=0, 0125 (m)가 된다. 흐름의 速度는 18m/s 이고 噴出되는 流體는 공기($\rho=1, 211 \text{ kg/m}^3$)이다. 計算領域은 바닥면으로 부터 13t 떨어진, 流動主流

의 影響을 거의 받지 않는 지점을 Entrainment boundary로 하였고, 各 速度成分의 勾配가 더 이상 변하지 않는, 卽 X-方向으로 51t되는 지점을 出口로 設定하였다.

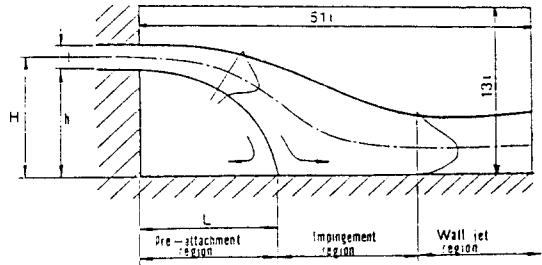


Fig. 2 The Flowfield of Offset Jet

2-2 支配方程式

亂流의 各 方向의 速度 및 靜壓을 平均値와 亂流 變動値의 合으로 表示하는 Reynolds 分解法 (Reynolds decomposition)을 連續方程式과 Navier-Stokes方程式에 代入함으로써 支配方程式을 얻을 수 있다.

2次元, 定常狀態의 速度 및 여러 스칼라量에 대해서 保存方程式들을 整理하면, 一般의 하나의 偏微分方程式의 形態로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial x} (\rho U \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho V \phi) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \\
 &\quad \text{(對流項)} \qquad \qquad \qquad \text{(擴散項)} \\
 \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi &\qquad \qquad \qquad (1)
 \end{aligned}$$

方程式에서 ϕ 는 一般의 從屬變數이며 時間平均 값이고, Γ_ϕ 는 交換係數이며, S_ϕ 는 Source로서 ϕ 의 生成과 消滅을 나타내는 項이다. 各 方程式의 從屬變數와 交換係數 및 Source項 S_ϕ 는 Table 1과 같다.

Table 1. The values of the Dependent Variable in Equation (1)

Equation	ϕ	$\Gamma\phi$	$S\phi$
Continuity	1	0	0
x-Momentum	U	μ	$-\partial P/\partial x$
Y-Momentum	V	μ	$-\partial P/\partial y$
Turbulent kinetic Energy	k	μ/σ_k	$G-C_D\rho\varepsilon$
Turbulent dissipation rate	ε	μ/σ_ε	$(C_1\varepsilon G-C_2\rho\varepsilon^2)/k$

$$G = \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \right]$$

2-3 k-ε모델과 亂流모델의 修正

2-3-1 k-ε모델

亂流流動에서는 粘性係數가 層流에서와 달리 一定하지 않으므로 層流의 粘性係數 μ_i 과 流動의 狀況에 따라 變하는 過流粘性係數 μ_t (Eddy viscosity)의 疊으로 이루어 진다.

$$\mu = \mu_i + \mu_t \quad (2)$$

k-ε모델에서 過流粘性係數 μ_t 는 길이 次元과 速度次元의 곱이며 다음과 같이 表示된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

k와 ε는 k와 ε에 관한 偏微分方程式을 풀어서 구할 수 있다.

2-3-2 亂流모델의 修正

本 研究에서는 k-ε모델의 對해 曲率效果를 考慮해 주는 曲率修正法中 LPS方法을 利用하였다. LPS方法은 Launder, Priddin, Sharma¹²⁾가 旋回流에 對해서 k-ε모델을 修正한 것으로 Leschizner, Rodi¹¹⁾는 2次元 剝離流動에 LPS方法을 適用하였다. LPS方法에 따라 Turbulent dissipation eq.의 source項에 包含되어 있는 係數 C_2 를 曲率效果에

의한 附加的인 亂流에너지의 生成을 考慮하여 다음과 같이 修正하였다.

$$C_2 = 1.92 (1 - C_c R_{it}) \quad (4)$$

여기서

$$R_{it} = \frac{k^2}{\varepsilon^2} \frac{\bar{V}}{R} \frac{\partial}{\partial R} (RV) \quad (5)$$

R_{it} 는 Richardson 數이고, R은 流線의 曲率半徑. 모델에 사용된 堂數들은 Table 2.와 같다.

$$\bar{V} = (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{[UV \frac{\partial V}{\partial y} - V^2 \frac{\partial U}{\partial y} + U^2 \frac{\partial V}{\partial x} - UV \frac{\partial U}{\partial x}]}{(U^2 + V^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

Table 2. The Values of Constants in the k-ε model

C_1	C_2	C_μ	C_D	C_c	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.00	0.2	1.0	1.3

2-4 境界條件

2-4-1 Backward Facing Step을 지나는 流動

本 研究에서 考慮된 Fig. 1과 같은 流動場을 數值的으로 解析하기위해 Table 3.과 같은 境界條件을 選擇하였다.

Table 3. Boundary Conditions (Backward Facing Step)

Variable \ Boundary	U	V	k	ε
Inlet	U (i, j)	0	k (i, j)	A
Outlet	$\partial U/\partial x = 0$	B	$\partial k/\partial x = 0$	$\partial \varepsilon/\partial x = 0$
Entrainment	$\partial U/\partial y = 0$	$\partial V/\partial y = 0$	$\partial k/\partial y = 0$	$\partial \varepsilon/\partial y = 0$
Side wall	0	wall function	wall function	wall function
Bottom wall	wall function	0	wall function	wall function

* A : $C_\mu k^{\frac{3}{2}} (\lambda \ell)$ * B : Continuity Eq.의 만족

2-4-2 Offset 噴流

本 研究에서 考慮된 Fig. 2와 같은 流動場을 數值的으로 解析하기 위해 Table 4. 와 같은 境界條件을 선택하였다.

Table 4. Boundary Conditions (Offset Jet)

Variable Boundary	U	V	k	ε
Inlet	U (i, j)	0	k (i, j)	A
Outlet	$\partial U / \partial x = 0$	B	$\partial k / \partial x = 0$	$\partial \epsilon / \partial x = 0$
Entrainment	0	$\partial V / \partial y = 0$	0	0
Side wall	0	wall function	wall function	wall function
Bottom Wall	wall function	0	wall function	wall function

* A : $C_k^{3/2} / (\lambda \ell)$ * B : Continuity Eq. 의 만족

2-5 計算方法

2-5-1 差分式

式(1)은 다음과 같이 表現될 수 있다.

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = S_\phi \quad (7)$$

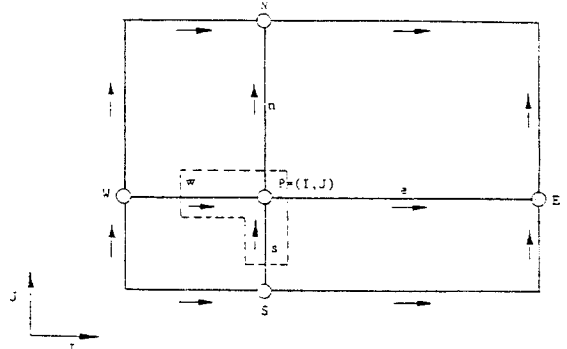
$$J_x = \rho U \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$J_y = \rho V \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

Fig. 3에서 P點을 中心으로 體積에 대해 式(7)을 積分하면 다음과 같다.

$$\int_e J_x dA_x - \int_w J_x dA_x + \int_n J_y dA_y - \int_s J_y dA_y = \int_v S_\phi dA \quad (8)$$

式(8)에서 擴散項은 Central difference scheme을 適用하고 對流項은 여러 scheme들을 適用함으로써 다음과 같은 差分式을 얻을 수 있다.



Three Grids for P,W etc.-at Position Marked(○) for U Velocity-at Position Marked(→) for V Velocity-at Position Marked(↑)

Fig. 3 Staggered Grid and Notation for the Rectangular Computation Mesh.

$$A_p \phi_p = A_w \phi_w + A_e \phi_e + A_s \phi_s + A_n \phi_n + b$$

2-5-2 數值 scheme

式(8)의 왼쪽項들을 積分하기 위해서는 式(7)의 對流項과 擴散項에 數值 scheme을 使用해야 하는데, 擴散項은 一般的으로 central difference scheme을 適用하고 對流項에는 여러 scheme들을 適用¹⁴⁾ 할 수 있다.

本 研究에서는 對流項에 Hybrid central/upwind scheme과 Raithby의 Skew-upwind scheme을 適用하였다. Fig. 3에서 P點을 中心으로 體積에 대해서 支配方程式을 積分하면 다음과 같은 有限差分式을 求할 수 있다.

$$C_w \phi_w - C_e \phi_e + C_s \phi_s - C_n \phi_n + D_e (\phi_e - \phi_p) - D_w (\phi_p - \phi_w) + D_n (\phi_n - \phi_p) - D_s (\phi_p - \phi_s) - S_\phi \Delta x \Delta y = 0 \quad (10)$$

$$C_w = \rho U_w a_w, C_e = \rho U_e a_e, C_s = \rho V_s a_s,$$

$$C_n = \rho V_n a_n$$

$$D_w = (\Gamma_\phi)_w a_w / \delta x_i, D_e = (\Gamma_\phi)_e a_e / \delta x_{i+1}$$

$$D_s = (\Gamma_\phi)_s a_s / \delta y_j, D_n = (\Gamma_\phi)_n a_n / \delta y_{j+1}$$

1) Hybrid central/upwind scheme

w面에서 對流項 flux는 다음과 같이 表現된다.

$$C_w \phi_w = \begin{cases} C_w a_w (\phi_w + \phi_P) / 2 | (Pe)_w | < 2 \\ C_w a_w \phi_w & U_w > 0, | (Pe)_w | \geq 2 \\ C_w a_w \phi_P & U_w < 0, | (Pe)_w | \geq 2 \end{cases} \quad (11)$$

2) Skew-upwind scheme

流線이 格子線과 큰 角度로 交叉할때 數值的 擴散으로 큰 誤差를 발생시킬 수 있다. Raithby는 Fig. 4와 같이 速度벡터의 크기와 方向性을 考慮해 주는 Skew-upwind scheme을 提示하였다.

W面에서 對流項 flux는 다음과 같이 表現된다.

$$C_w \phi_w = \begin{cases} i) U_w > 0 \\ 2(L_w - K_w) \phi_w + 2K_w \phi_{ws} \quad (V_w > 0) \\ 2(L_w - K_w) \phi_w + 2K_w \phi_{wN} \quad (V_w \leq 0) \\ ii) U_w \leq 0 \\ 2(L_w - K_w) \phi_P + 2K_w \phi_s \quad (V_w > 0) \\ 2(L_w - K_w) \phi_P + 2K_w \phi_N \quad (V_w \leq 0) \end{cases}$$

여기서 $L_w = \frac{1}{2} C_w a_w$

$$K_w = S_{uw} \text{ Min } [|L_w|, \rho(a_w / \delta y_{kw}) |V_w| \delta x_i / 4]$$

$$k_w = j + \frac{1}{2} (1 - S_{vw})$$

이고 S_{uw} 와 S_{vw} 는 크기가 1이고 부호는 U_w , V_w 와 일치한다.

2-5-3 計算過程

式(9)의 差分式은 line by line TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)의 의해 遂行¹⁴⁾되었다. 運動量方程式과 速度 壓力 補正式을 聯立해서 計算하는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for pressure Link Equation) 方法을 使用¹⁴⁾했고, program은 TEACH Code¹⁵⁾를 修正해서 利用하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 各各 Backward Facing Step

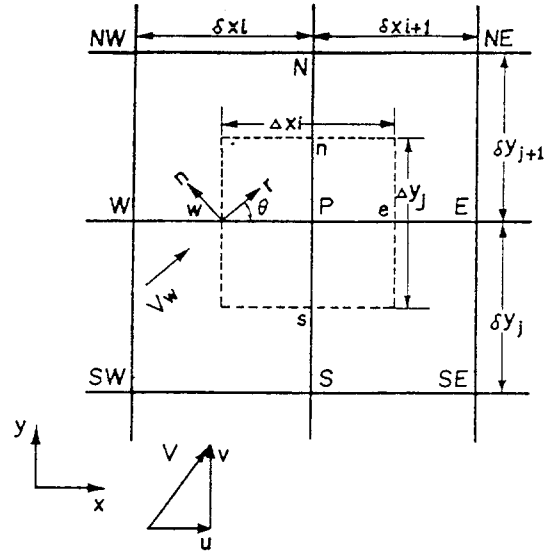


Fig. 4 Control Volume

의 지나는 流動과 Offset噴流의 格子를 나타내고 있다. 流動의 變化가 심한 곳에서는 正確한 解를 求하기 위해 格子를 稠密하게 나누었다.

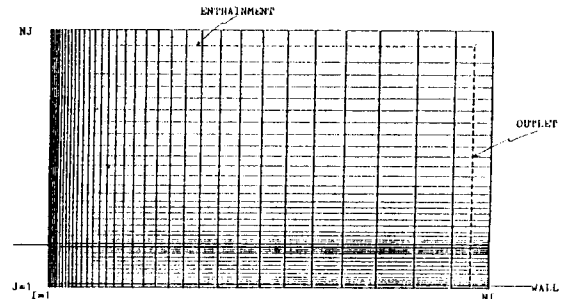


Fig. 5 The Grid of Backward Facing step

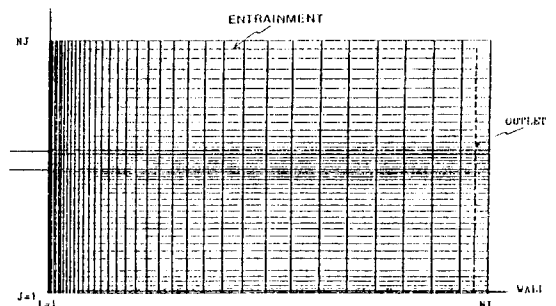


Fig. 6 The Grid of Offset jet

III. 結 果

3-1 節點系의 選擇에 따른 影響

Fig. 1의 Backward Facing Step의 流動場 解析함에 있어서, 計算領域內 流動에 垂直하는 方向의 格子의 갯수가 數値解에 미치는 影響에 대해 檢討해 보았다. 格子의 갯수를 27, 30, 34, 38個로 變化시켰을 경우 34個 以後로는 數値解의 變化가 없음을 알 수 있었다.

3-2 Backward Facing Step을 지나는 流動

Fig. 7은 流動方向 亂流平均速度的 分布를 보여 주고 있으며 k-ε 모델을 適用했을 경우 Skew-upwind scheme이 Hybrid scheme보다 약간 더 實驗值에 接近하는 것을 보여주고 있으나, 그 變化는 크지않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 k-ε 모델에 대한 LPS 曲率修正의 效果를 보여주고 있다. x/H=3.0까지는 曲率修正의 效果가 거의 나타나고 있지 않으며, x/H=4.5 이후에도 LPS方式의 曲率修正의 效果는 무시할 만큼 작게 나타났다. 모든 計算值들은 共히 實驗值에 비해 再循環領域을 짧게 計算하고 있음을 알 수 있다.

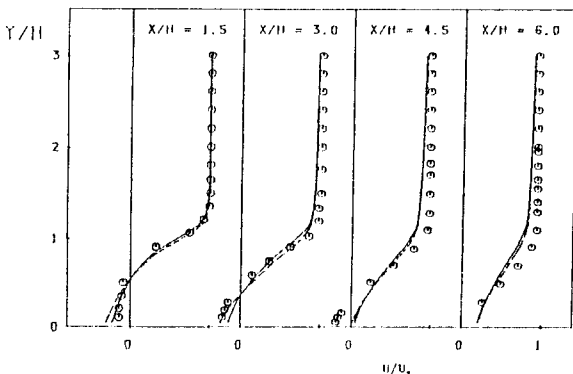


Fig. 7 Mean velocity profiles for B.F.S. (k-ε model)
 ○ experimental data; — Hybrid; - - - Skew-upwind

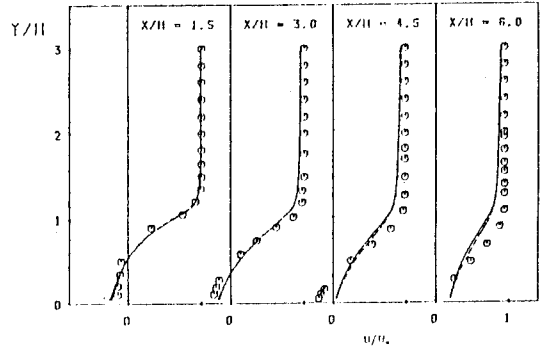


Fig. 8 Mean velocity profiles for B.F.S. (Skew-upwind scheme)
 ○ experimental data; — k-ε ; - - - L.P.S

3-3 Offset 噴流

流動方向의 速度分布를 나타내는 Fig. 9는 k-ε 모델을 適用했을 경우 Hybrid scheme보다는 skew-upwind scheme이 훨씬 더 實驗值에 接近함을 보여 준다. 이러한 傾向은 backward facing step을 地나는 流動에 비해 顯著하게 나타난다.

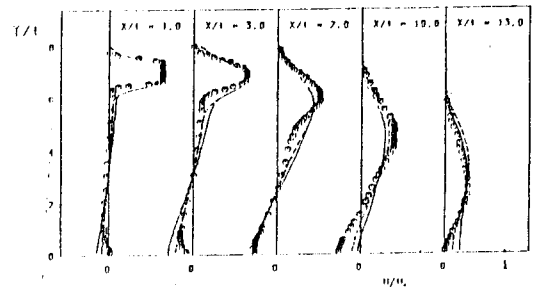


Fig. 9 Mean velocity profiles for Offset Jet (k-ε model)
 ○ experimental data; — Hybrid; - - - skew-upwind

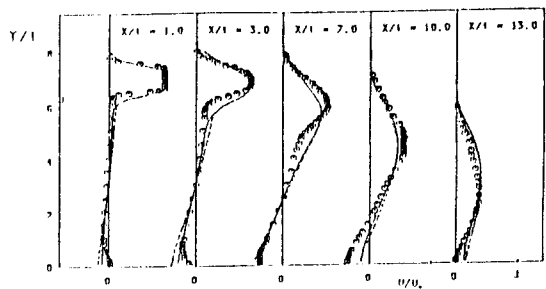


Fig. 10 Mean velocity profiles for Offset Jet (Skew-upwind scheme)
 ○ experimental data; — k-ε ; - - - L.P.S

Fig. 10는 k-ε모델에 대한 LPS 曲率修正의 효과가 全 流動場에 걸쳐서 별로 나타나지 않고 있음을 보여주는데, 이는 LPS 曲率修正方式이 주어진 流動場의 計算에서 k-ε모델에 曲線의 轉이 效果를 제대로 反映시키지 못함을 알 수 있다. 따라서, 주어진 流動場에 대해 LR (Leschiziner와 Rodi) 方式으로 修正된 k-ε모델이나 代數應力모델 (Algebraic stress model)의 適用이 앞으로의 研究에서 檢討되어야 할 것으로 思料된다.

Table. 5는 再附着點 거리를 나타낸 것으로 Offset噴流의 경우 標準k-ε모델과 skew-upwind scheme을 적용하였을 때가 가장 實驗値에 接近하고 있다. 그러나, 여전히 計算値와 實驗値의 差異는 크게 나타나고 있으며, 그 원인은 skew-upwind scheme의 사용으로 수치 scheme에 의한 요인은 어느 정도 제거되었다고 볼 수 있으므로 수치 scheme에 기인하기 보다는 본 연구에서 사용된 표준 k-ε모델이나 LPS方式으로 修正된k-ε모델이 共히 流線의 曲率效果를 제대로 반영하지 못하고 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 11은 바닥면에서의 壓力分布를 나타낸 것으로 剝離領域內에서 急激한 變化를 보이다가 再附着點에서 最大가 되고, 衝突領域에서 急激히 減少하여 壁噴流領域에서는 거의 一定해 지는 것을 보여준다.

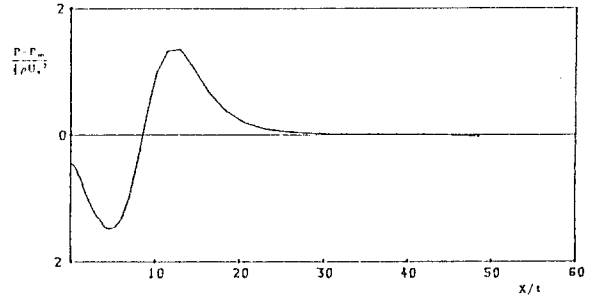


Fig. 11 Dimensionless pressure distribution for Offset Jet (skew-upwind scheme)

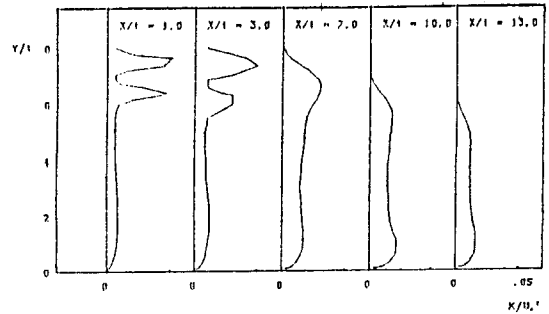


Fig. 12. Dimensionless turbulent kinetic energy for Offset Jet (skew-upwind scheme)

Fig. 12는 流動方向의 亂流運動에너지分布를 보여주고 있다.

x/t = 1.0, x/t = 3.0 附近에서 亂流運動에너지는 노즐壁의 影響을 받아서 2개의 peak點이 存在하다가 x/t = 7.0 以後는 peak點들이 서로 만나면서 서서

Table 5. Reattachment Length

Description	Model	Geometry	Reattachment Length (L)	
			Hybrid scheme	Skew-upwind Scheme
Numerical Analysis	Standard K-ε model	B. F. S	4.319	4.202
		O. J	10.346	11.509
	K-ε model with L. P. S	B. F. S	4.813	4.479
		O. J	10.33	11.287
Experimental Result		B. F. S ⁵¹	6.11	
		O. J ¹¹	13	

* B. F. S : Backward-Facing Step

O. J : Offset Jet

L : B. F. S (x/H), O. J (x/t)

히 減少하는 傾向을 보여주고 있고, 바닥면附近에서는 亂流運動에너지가 서서히 커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13은 全 流動場에 걸쳐 燒滅率의 分布를 나타낸 것으로 亂流運動에너지 傾向과 비슷한 樣相을 보이고 있다.

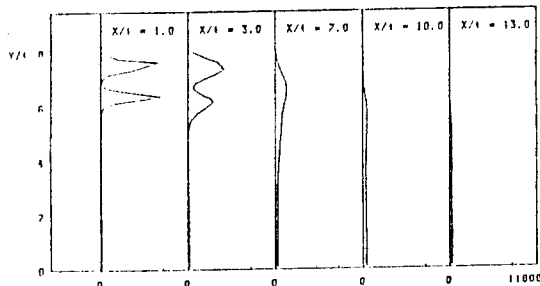


Fig. 13 Turbulent energy dissipation rate for Offset Jet (skew-upwind scheme) moel)
 ○ experimental data; — Hybrid; - - - Skew-upwind

IV. 結 論

본 연구에서는 Backward Facing Step을 지나는 流動과 Offset噴流에 대한 計算値를 各 實驗値에 比較함으로써 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) Backward Facing step을 지나는 유동에 비해 Offset噴流의 경우에 數值 scheme의 影響이 크고, skew-upwind scheme이 두 경우 共に 計算値를 向上시킨다.

2) k-ε모델에 대한 LPS 방식의 曲率修正은 Backward Facing Step과 Offset噴流에서 共に 實驗値와 比較한 計算値의 向上을 두드러지게 보여 주지 못한다.

3) Offset噴流에 대한 再附着點距離를 豫測함에 있어서 Hybrid scheme보다 Skew-upwind scheme의 計算値가 實驗値에 더 接近한다.

REFERENCES

1. Pelfrey, J. R. R. and Liburdy, J. A., "Mean Flow Characteristics of a Turbulent Offset Jet," Transactions of the ASME, Vol. 108, 1986, pp. 82-88.
2. Pelfrey, J. R. R. and Liburdy, J. A., "Effect of Curvature on the Turbulence of a Two-Dimensional Jet," Experiments in Fluids 4, 1986, pp. 143-149.
3. Sawyer, R. A., "The Flow Due to a Two-Dimensional Jet Issuing Parallel to a Flow Plate," J. of Fluid Mech., Vol. 9, 1960, pp. 543-560.
4. Sawyer, R. A., "Two-Dimensional Reattachment Jet Flows Including the Effects of Curvature on Entrainment," J. of Fluid Mech., Vol. 17, 1963, pp. 481-498.
5. Tani, Iuchi and Komoda, "Experimental Investigation of Flow Separation Associated with a Step or a Groove," Aeronautical Research Institute, University of Tokyo No. 364, 1961, pp. 119-136.
6. Kim, J., Kline, S. J., and Johnston, J. P., "Investigation of a Reattachment Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward-Facing Step," Transactions of the ASME, Vol. 102, 1980, pp. 302-308.
7. Armaly, B. F., Pereira, J. C. F. and Schong, B., "Experimental and Theoretical Investigation of backward-Facing step Flow," J. of Fluid mech., Vol. 127, 1983, pp. 473-496.
8. Durst, F. and Rastogi, A. K., "Theoretical and Experimental Investigations of Turbulent Flow with

- Separation," Turbulent Shear Flows 1, Springer Verlag, Berlin, 1980, pp. 208-219.
9. Amano, R.S. and Goel, p., "Computations of Turbulent Flow Beyond Backward-Facing Step Using Reynolds-Stress Closure," AIAA Journal, Vol. 23, 1985, pp. 1356-1361.
 10. Durst, F. and Rastogi, A. K., "Turbulent Flow over Two-Dimensional Fences," Turbulent Shear Flows 2, Springer verlag, Berlin, 1980, pp. 218-232.
 11. Leschziner, M.A. and Rodi, W., "Calculation of Annular and Twin Parallel Jets Using Various Discretization Schemes and Turbulence Model Variations," Transactions of the ASME, Vol. 103, 1981, pp. 352-360.
 12. Launder, B.E., Priddin, C.H. and Sharma, B.I., "The Calculation of Turbulent Boundary Layers on Spinning and Curved Surfaces," J. of Fluids Eng., 1977, pp. 213-239.
 13. Raithby, G.D., "Skew Upwind Differencing Schemes for problems Involving Fluid Flow," Comp. Methods in Applied Mechanics and Engineering Vol. 9, 1976, 153-164.
 14. Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," McGraw Hill, 1980.
 15. Lilly, D.G. and Rhode, D.L., "Computer Code for Swirling Turbulent Axisymmetric Recirculation Flows in Practical Isothermal Combustor Geometries," NASA CR-3442, 1982.

용어해설

CIM & AI을 위한

● ASCII

American National Standards Code for Information Interchange, X3.4-1968 7 자리의 부호화 문자의 부호화 문자세트를 사용한 표준부호(펄리트체크를 포함하면 8 자리). 이것은 데이터처리시스템, 통신시스템 및 관련장치간의 정보교환에 사용된다. ASCII 세트는 제어문자 및 그래픽문자에 의해 구성되어 있다. USASCII (United States of American National Standards Code for Information Inter change)어와 유사어.