

建物周圍의 二次元 亂流流動場에 대한 數值的 解析

A Numerical Study on Two-Dimensional Turbulent Flow Field
Around a Building

元 聖 弼* 李 東 煥**
Sung Pil Won Dong Hwan Lee

ABSTRACT

The heat loss of a building within a wind flow field results from convection and natural ventilation. Loss from natural ventilation is much more than one from convection, and the former depends mostly on the pressure distribution at the building surface.

Therefore, the objective of the present study is to calculate the pressure distribution and investigate flow phenomena, around the building with a rectangular shape in a two-dimensional turbulent flow field. The finite difference method, modelled upon the turbulence $k-\epsilon$ model, has been applied to the analysis. The results, followed by the changes of Reynolds numbers, inlet flow conditions, and building shapes, have been also obtained, respectively.

Various results of the present numerical analysis coincide qualitatively well with earlier reported empirical results.

Nomenclature

| | | | |
|----------|-------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------|
| A | : area | L^* | : length of building |
| C_{pc} | : pressure coefficient | ℓ | : turbulent mixing length |
| C_{pc} | : area-averaged pressure coefficient | ℓ^+ | : nondimensional turbulent length scale |
| H | : height of flow field | \tilde{P} | : pressure |
| H^* | : height of building | P | : time-averaged pressure |
| k | : turbulent kinetic energy | p | : fluctuation pressure |
| k^+ | : nondimensional turbulent kinetic energy | \hat{P} | : assumed pressure |
| L | : length of flow field | P' | : perturbation pressure |
| | | P_0 | : reference pressure |
| | | \tilde{u}_i | : velocity vector |
| | | U, V | : time-averaged velocities |

* 正會員, 蔚山大學校

** 蔚山大學校 機械工學科

- u, v : fluctuation velocities
- \hat{U}, \hat{V} : assumed velocities
- U', V' : perturbation velocities
- U_c : characteristic velocity
- U^* : friction velocity
- U^+ : nondimensional velocity
- x, y : cartesian coordinates
- y_g : gradient height

Greek Symbols

- ρ : density
- μ : viscosity
- μ_t : turbulent viscosity
- μ_e : effective viscosity
- ϵ : turbulent dissipation
- ϵ^+ : nondimensional dissipation
- w : wall shear stress
- ϕ : general variable
- Φ : dissipation function

Subscript

- ij : node point

Superscript

- : area-averaged quantity

I. 序 論

바람은 인간과 인간의 활동에 많은 影響을 끼쳐왔다. 바람에 의한 영향으로는 바람의 流體力에 기인한 건물의 不安定이나 建物周邊의 空氣混亂에 기인한 건물 내부의 流通시스템의 교란 및 바람 유동에 기인한 熱損失 등을 들 수 있다. 이러한 사항을 明確히 調查하는 일은 공학적인 興味 뿐만 아니라 自然風下에 存在하는 여러 구조물의 設計 施工에 있어서도 중요한 문제이다.

특히 건물 주위의 공기 유동에 기인한 熱損失은 建物表面과 空氣 사이의 對流에 의한 것과 自然通風(natural ventilation)에 의한 것이 있으며 후자의 것이 전자의 것에 비해 훨

씬 크며 건물 표면의 壓力分布에 依存한다. 따라서 건물 주위의 流動場을 해석하는 것이 熱損失을 계산하는 데에 있어서 가장 우선적인 단계라고 할 수 있다.

이러한 유동을 解析하는 방법으로는 風洞을 이용한 實驗的方法^(1,8,9,17)과 數值的方法이 있다. 해석의 主流를 이루는 實驗은 실제 바람의 大氣境界層을 잘 相似시킨 風洞이 사용되어야 하고 modelling이나 測定에 수반되는 여러 어려움과 經濟性 때문에 요즈음에 와서는 數值的方法이 보다 이점이 있다고 일반적으로 받아들여진다.

數值的方法으로는 Chorin에 의해 발전된 Random Vortex Method^(10,11,15,16)와 有限差分法^(10,11,12)으로 크게 나눌 수 있는데 일반적으로 輕微한 粘性流動으로 생각하여 層流支配方程式을 적용하며 계산한 것이 대부분이며 입구 유동조건이나 건물형상의 變化에 대한 數值的 結果도 찾기 힘들다.

그러므로 本 論文에서는 Fig.1과 같은 단일 건물 주위의 유동장에 대해 난류모델인 $k-\epsilon$ 모델을 적용하여 유한차분법으로 해석함으로써 건물표면의 壓力分布를 구하였다. 부수적으로 여러가지 유동현상을 규명하고 Re수나 입구 유동조건 變化 및 건물형상의 變化에 대한 結果도 제시하였으며 아울러 既存의 code나 수치적 결과와 本 연구결과를 비교하였다.

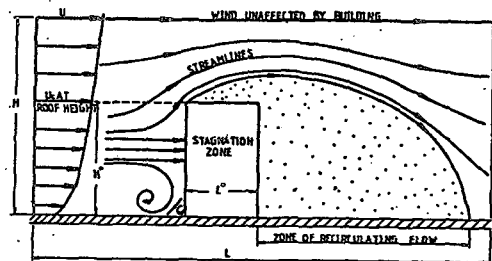


Fig.1 Flow Patterns around a Building

II. 數值解析

Fig.1에서 보이고 있는 流動場의 理論的인

해석은 다음의 가정을 따라 행한다.

- ① 유동장은 大氣境界層의 surface layer 이다.
- ② 유체는 非壓縮性이다.
- ③ 二次元 난류유동이다.

1. 支配方程式

亂流流動을 모든 時間과 位置에서 서술한다는 것은 不可能한 일이다. 그러므로 平均速度와 같은 어떤 平均값을 지배하는 방정식을 만들어 사용하게 된다.

속도 \tilde{u}_i 와 壓力 \tilde{P} 를 時間에 대해 平均된 값(U_i, P)과 난류변동값(u_i, p)으로 구분하여

$$\tilde{u}_i = U_i + u_i, \quad \tilde{P} = P + p$$

로 나타내면 非壓縮性 유체에 대한 연속방정식과 Reynolds 운동량방정식은 각각

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{\rho u_i u_j} \right) \dots\dots\dots (2)$$

가 된다. $-\overline{\rho u_i u_j}$ 는 Reynolds 剪斷應力이며 이에 대한 closure model로서 난류점성계수 概念을 이용하면

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \dots\dots\dots (3)$$

이 된다. 여기서 μ_t 는 난류점성계수로서 Prandtl-Kolmogorov 假說에 의해 modelling 하면

$$\mu_t \propto \rho k^{1/2} l \dots\dots\dots (4)$$

가 된다. k 는 난류운동에너지($=\frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$)이고 l 은 turbulent mixing length이다. turbulent dissipation인 $\epsilon (=k^{3/2}/l)$ 을 사용하면 식(4)는

$$\mu_t = c_D \rho k^2 / \epsilon \dots\dots\dots (5)$$

가 되며 c_D 는 결정해야 할 비례상수이다. 따라서 k 와 ϵ 에 대한 부수적인 지배방정식

을 각각 유도해야 하는데 ($k-\epsilon$ model 혹은 two-equation model이라 함), 그 유도과정은 진부하므로 省略한다.^{4,5,6)}

결국 적당한 closure model(eddy diffusivity 概念, local isotropy 概念 등)을 사용하면 난류유동의 지배방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\rho \frac{\partial(U\phi)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(V\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(c_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(c_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \dots\dots\dots (7)$$

여기서 ϕ 는 일반화된 변수로서 ϕ 에 따른 c_ϕ 와 S_ϕ 의 값은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Values of c_ϕ and S_ϕ

| ϕ | c_ϕ | S_ϕ |
|------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| U | $\frac{\mu_e}{(=\mu+\mu_t)}$ | $-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V}{\partial x} \right)$ |
| V | μ_e | $-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V}{\partial y} \right)$ |
| k | $\frac{\mu_e}{\sigma_k}$ | $\mu_t \Phi - c_\mu \rho \epsilon$ here, dissipation function, $\Phi = 2 \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2$ |
| ϵ | $\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$ | $c_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \Phi - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$ |

Table 1의 c 와 σ 의 값은 empirical function이나 난류 Reynolds수인 Re_t 가 클 경우 상수값이 되므로 Re_t 수가 클 경우의 전형적인 값을 Table 2에서 보여주고 있다.

Table 2. Standard values of c and σ

| c_D | c_μ | c_1 | c_2 | σ_k | σ_ϵ |
|-------|---------|-------|-------|------------|-------------------|
| 0.09 | 1.0 | 1.45 | 1.89 | 1.0 | 1.0 |

그러나 벽면에 가까운 곳에서는 여러 가지 성질들이 급격하게 변하고 국소 Re_t 수가 매우 작으므로 식 (7)을 직접 사용할 수 없다. 따라서 벽면 가까이에서는 一次元 Couette 유동에 대한 해석(constant shear stress, equi-

librium layer)을 적용한다.

벽면 가까이에서는

$$U^+ = \frac{1}{K} \ln(Ey^+) \dots\dots\dots (8a)$$

$$k^+ = c_D^{-1/2} \dots\dots\dots (8b)$$

$$\epsilon^+ = \frac{1}{Ky^+} \dots\dots\dots (8c)$$

가 成立하며, 여기서

$$U^+ = U/U^*, U^* = \sqrt{\tau_w/\rho}, y^+ = \rho U^* y/\mu$$

$$k^+ = k/(\tau_w/\rho), \epsilon^+ = \epsilon/(\tau_w^2/(\rho\mu))$$

$$\tau_w = \rho c_D^{1/2} k^{1/2} KU/\ln(Ey^+)$$

이며 K 는 von karman 상수로서 매끈한 면일 경우 0.4 정도의 값을 가지고, E 는 벽면의 粗度와 剪斷應力에 따라 변하나 매끈한 면이고 $K=0.4$ 일 경우 대략 9.0의 값을 갖는다.

2. 境界條件

건물이 없을 때의 大氣중의 바람은

$$U(y) = U(y_g)(y/y_g)^\alpha \dots\dots\dots (9)$$

와 같은 速度分布를 가진다는 것이 일반적으로 알려져 있다. 여기서 勾配높이 y_g 와 乘數 α 는 地面의 형상에 따라 변한다. 本 論文에서는 지면의 平均粗度를 약 1 m (grass and shrub approximation)라고 두었을 때의 값인 $y_g=430$ m, $\alpha=0.3$ 을 취했으며^(9,17), 건물높이 H^* 에서의 바람을 特性速度라 생각하고 U_c 라 표시하면 식 (9)는

$$U(y) = U_c(y/H^*)^{0.3} \dots\dots\dots (10)$$

이 된다. 한편 大氣境界層에서의 난류점성계수는 Lettau⁽⁹⁾에 의하면

$$\mu_t = \rho l^2(y) \left[\left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (11)$$

이 되며 여기서

$$\frac{l(y)}{L_M} = \frac{0.4 y/L_M}{1 + 4(y/L_M)^{5/4}}$$

$$L_M = 0.0736 U^*/f, f = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/sec}$$

이다. 따라서 유동장 入口에서의 境界조건은

$$U(o, y) = U_c(y/H^*)^{0.3} \dots\dots\dots (12a)$$

$$V(o, y) = 0 \dots\dots\dots (12b)$$

$$k(o, y) = \left(l \frac{\partial U}{\partial y} / c_D \right)^2 \dots\dots\dots (12c)$$

$$\epsilon(o, y) = k(o, y)^{3/2} / l \dots\dots\dots (12d)$$

가 된다.

유동장 높이 H 에서 유동은 건물에 의해 영향을 받지 않으므로 入口에서의 값을 그대로 유지한다고 볼 수 있다. 따라서 free stream에서의 境界조건은

$$U(x, H) = U(o, H) \dots\dots\dots (13a)$$

$$V(x, H) = 0 \dots\dots\dots (13b)$$

$$k(x, H) = k(o, H) \dots\dots\dots (13c)$$

$$\epsilon(x, H) = \epsilon(o, H) \dots\dots\dots (13d)$$

가 된다.

한편 유동장 出口에서는 出口面을 건물이 놓인 위치에서 충분히 떨어진 곳에 설정한다면 $\partial U/\partial x=0$ 과 같은 境界조건을 적용한다. 그러나 실제적으로 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 계산할 領域이 不必要하게 커진다고 볼 수 있다. 따라서 計算領域을 줄이면서 물리적 조건을 近似的으로 만족시키기 위해 선형외삽법 (linear extrapolation)을 사용한다. 그러므로 유동장 出口에서의 境界조건은

$$U(L, y), V(L, y), k(L, y) \text{ \& } \epsilon(L, y) = \text{선형외삽값} \dots\dots\dots (14)$$

가 된다.

마지막으로 地面과 건물표면에서는

$$U = V = k = \epsilon = 0 \dots\dots\dots (15)$$

가 된다.

3. 有限差分法에 의한 差分方程式

Fig. 2에서 보이는 격자구조에 대한 식(6)과 (7)의 차분방정식은 hybrid scheme을 적용하여 검사체적 유도방법으로 유도한다. 한편 速度分布의 경향이 진동하거나 실제의 경우에 어긋나는 것을 방지하기 위해 식(7)의 차분화는

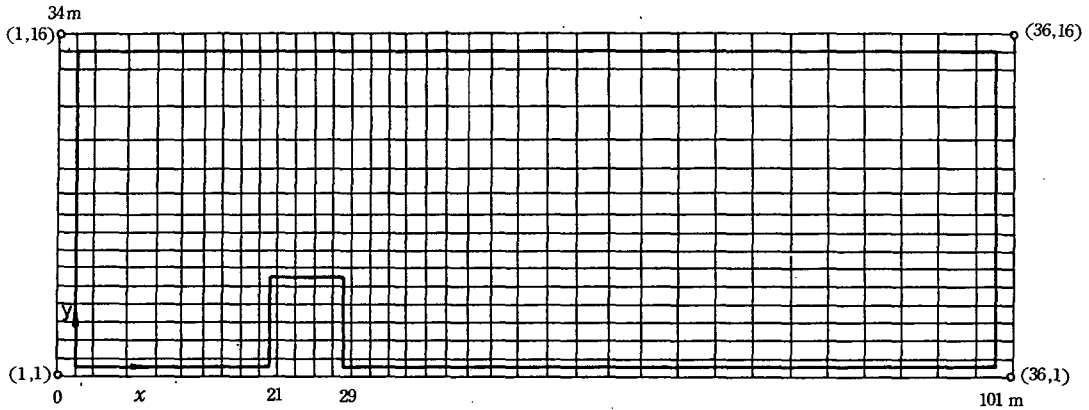


Fig.2 Node System in Calculated Flow Domain

ϕ 에 따라서 微小檢査體積을 다르게 취한다. 따라서 Fig.3에서 보는 바와 같이 ϕ 가 U 인 경우 A 形態를 適用하며 V 인 경우 B 形態를 適用하고, ϕ 가 k 나 ε 인 경우와 연속방정식에는 C 形態를 적용한다.

格子間隔을 편의상 $\Delta x, \Delta y$ 라 하여 内部格子點(i, j)에 해당하는 차분방정식을 구해보면

$$(U_{i+1,j} - U_{i,j}) \Delta y + (V_{i,j+1} - V_{i,j}) \Delta x = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$(A_{p,\phi} - B_\phi) \phi_{i,j} = A_{N,\phi} \phi_{i,j+1} + A_{S,\phi} \phi_{i,j-1} + A_{E,\phi} \phi_{i+1,j} + A_{W,\phi} \phi_{i-1,j} + C_\phi \quad \dots\dots\dots (17)$$

이 된다. 여기서 係數 A, B 및 C 는 ϕ 에 따라 변하며 대표적으로 $\phi = U$ 인 경우

$$A_{N,U} = \left[\frac{F_n}{2}, D_n \right] - \frac{F_n}{2}, \quad A_{S,U} = \left[\frac{F_s}{2}, D_s \right] + \frac{F_s}{2}$$

$$A_{E,U} = \left[\frac{F_e}{2}, D_e \right] - \frac{F_e}{2}, \quad A_{W,U} = \left[\frac{F_w}{2}, D_w \right] + \frac{F_w}{2}$$

$$A_{P,U} = A_{N,U} + A_{S,U} + A_{E,U} + A_{W,U}$$

$$B_U = [F_s - F_n - F_w - F_e, 0]$$

$$C_U = \Delta y (P_{i-1,j} - P_{i,j}) + [F_n - F_s + F_e - F_w, 0] \cdot U_{i,j} + (\mu_{e,i,j} \cdot DUE - \mu_{e,i-1,j} \cdot DUW) \Delta y + (D_N \cdot DVE - D_s \cdot DVW) \Delta y$$

$$F_n = \frac{\rho \Delta x}{2} (V_{i-1,j+1} + V_{i,j+1}), \quad F_s = \frac{\rho \Delta x}{2} (V_{i-1,j} + V_{i,j})$$

$$F_e = \frac{\rho \Delta y}{2} (U_{i,j} + U_{i+1,j}), \quad F_w = \frac{\rho \Delta y}{2} (U_{i-1,j} + U_{i,j})$$

$$D_n = \frac{\Delta x}{4 \Delta y} (\mu_{e,i,j} + \mu_{e,i,j+1} + \mu_{e,i-1,j} + \mu_{e,i-1,j+1})$$

$$D_s = \frac{\Delta x}{4 \Delta y} (\mu_{e,i,j} + \mu_{e,i,j-1} + \mu_{e,i-1,j} + \mu_{e,i-1,j-1})$$

$$D_e = \frac{\Delta y \cdot \mu_{e,i,j}}{\Delta x}, \quad D_w = \frac{\Delta y \cdot \mu_{e,i-1,j}}{\Delta x}$$

$$DUE = \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x}, \quad DUW = \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{\Delta x}$$

$$DVE = \frac{V_{i,j+1} - V_{i-1,j+1}}{\Delta x}, \quad DVW = \frac{V_{i,j} - V_{i-1,j}}{\Delta x}$$

가 되며 []는 괄호속의 값 중에 큰 값을 나타내는 기호이다.

한편 벽면 가까이에서는 Couette 유동에 대한 해석을 적용하므로 식 (17)의 係數값은 약간 수정된다.

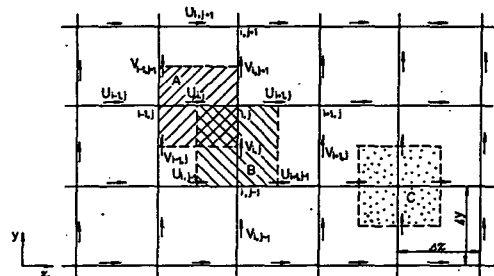


Fig.3 Node Point Arrangement

4. 計算方法 및 收斂條件

차분화된 식 (16), (17)을 계산하는 데 있어서의 어려움은 정확한 壓力分布를 결정하는 것이다. 이것은 壓力分布를 계산하기 위한 조건식이 없기 때문에 볼 수 있다. 따라서 收斂率을 증가시키고 정확한 결과를 얻기 위하여 Patankar⁽²⁾가 제안한 Simple Algorithm을 적용하면 壓力分布에 관한 부수적인 식을 유도할 수 있다. 壓力과 速度에 대한 정확한 값을 推定값과 補正값(perturbation value)으로 나누어 표시하여

$$P = \hat{P} + P', \quad U = \hat{U} + U', \quad V = \hat{V} + V'$$

이라 하고 이 식들을 몇 가지의 조작과정을 거쳐 연속방정식에 대입하면 壓力補正式(pressure correction equation)이라 부르는 壓力補正값에 대한 관계식이 얻어지며 다음과 같이 표시된다.

$$G_P P'_{i,j} = G_N P'_{i,j+1} + G_S P'_{i,j-1} + G_E P'_{i+1,j} + G_W P'_{i-1,j} + M_S \dots\dots\dots (18)$$

여기서

$$G_N = \frac{\rho(\Delta x)^2}{A_{P,U} v_{i,j+1}}, \quad G_S = \frac{\rho(\Delta x)^2}{A_{P,U} v_{i,j-1}},$$

$$G_E = \frac{\rho(\Delta y)^2}{A_{P,U} v_{i+1,j}}$$

$$G_W = \frac{\rho(\Delta y)^2}{A_{P,U} v_{i-1,j}}, \quad G_P = G_N + G_S + G_E + G_W$$

$$M_S = \rho(\hat{U}_{i,j} - \hat{U}_{i+1,j}) \Delta y + \rho(\hat{V}_{i,j} - \hat{V}_{i,j+1}) \Delta x$$

이다. 여기서 $A_{P,U,i+1,j}$ 는 格子點 $(i+1, j)$ 에서의 $A_{P,U}$ 값이며 나머지도 마찬가지로 정의된다. 한편 M_S 는 하나의 미소검사체적에서의 質量率이며 0에 수렴해 갈수록 연속방정식을 만족하는 정확한 速度分布가 얻어짐을 알 수 있다. 따라서 M_S 는 收斂解의 判斷基準이 되며 수렴조건은 모든 格子點에서의 M_S 값의 합이 流動場 總質量流動의 0.5% 미만인

$$\sum_i \sum_j |M_S| < 0.005 \int_0^H \rho U(o, y) dy \dots\dots (19)$$

로 한다.

이와 같은 Algorithm을 적용하여 각각의 차분방정식을 line by line method로 계산한다.

5. 壓力係數의 計算

壓力係數 C_{PC} 는 다음과 같이 정의한다.

$$C_{PC} = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_c^2} \dots\dots\dots (20)$$

여기서 P_0 는 基準壓力으로 일반적으로 大氣壓으로 정하나 수치계산에서는 유동장 내의 어떤 고정된 위치에 있는 壓力으로 정할 수 밖에 없으며 따라서 P_0 는 free stream에서의 壓力으로 생각한다. 그리고 어떤 면에 대한 平均壓力係數 \bar{C}_{PC} 는,

$$\bar{C}_{PC} = \frac{1}{A} \int_A C_{PC} dA \dots\dots\dots (21)$$

이 된다.

Ⅲ. 結果 및 考察

수치해석 결과는 우선 $H^* = 10m$, $L^* = 8m$ 인 건물에 대해서 $U_c = 10m/s$ 이고 입구유동조건이 식 (10)인 경우의 결과를 대표적으로 자세히 考察하고, Re 수 $(= \frac{U_c H}{\mu})$ 의 변화, 입구유동조건 변화 및 건물형상의 변화에 따르는 결과에 대해서도 간단히 言及하고자 한다. 수치해는 250번 정도의 반복계산 후에 수렴조건을 만족하였으며, CPU time은 Prime-750 computer를 사용시 10~15분 정도 걸렸다.

1. 一般的인 結果

入口에서 下流쪽으로 21m 떨어진 곳에 위치한 건물($H^* = 10m$, $L^* = 8m$)에 대해서 $U_c = 10m/s$ ($Re = 2.139 \times 10^7$)이고 입구유동조건이 식 (10)인 勾配流動인 경우의 결과를 살펴보면 우선 Fig. 4는 流動樣相을 보여주고 있는데 건물 뒤에 커다란 再循環地域이 存在함을 뚜렷하게 볼 수 있으며 재순환지역의 길이는 건물 높이의 6~7배로서 實驗⁽⁸⁾에 의한 결

과인 6~8배와 일치한다.

Fig.5는 건물 표면에서의 壓力係數값을 보여주고 있는데 지붕과 건물 후면에 陰의 壓力이 작용하므로 건물의 安定性에 영향이 미침을 알 수 있다. 그리고 지붕면의 流動剝離點 가까이에서 가장 큰 陰의 壓力이 나타나고 건물 후면은 거의 일정한 陰의 壓力이 된다는 것도 既存의 實驗結果^(8,17)와 일치한다. 한편 Fig.6은 유동장 내의 等壓力係數값을 보여주고 있는데 건물에 의해 壓力場은 전체적으로 큰 영향을 받고 下流쪽으로 갈수록 陰의 壓力場은 약화된다. 그리고 Table 3은 건물 표면의 平均壓力係數에 대한 既存의 實驗結果와의 비교가 나타나 있는데 定性的으로 잘 일치하고 있다.

實驗結果와의 차이는, 實驗에서는 基準壓力이 보통 유동의 영향이 없는 곳의 大氣壓이고 三次元的으로 實驗이 遂行되며 實驗에서의 입구유동양상이 약간 다르기 때문에 기인한다 할 수 있다.

Fig.7은 난류운동에너지의 대략 크기를 나타내고 있는데 건물 下流쪽에 order 1 이상의 領域이 形成되며 rms 속도로 환산한다면 1.4 m/s 정도로서 基準速度 10 m/s에 대해서 14% 이상의 큰 強度를 나타낸다. 또한 이 사실은 재순환지역에 集中된 큰 渦動이 형성됨을 의미한다.

Table 3. \bar{C}_{PC} at building surface in the case of gradient inlet flow, compared with reported empirical results:
 $U_c = 10 \text{ m/s}$, $H^* = 10 \text{ m}$, and $L^* = 8 \text{ m}$

| Location | present study \bar{C}_{PC} | empirical ⁽⁸⁾ \bar{C}_{PC} | empirical ⁽¹⁾ \bar{C}_{PC} |
|-------------|------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| upwind wall | 0.827 | 0.8 | 1.1 |
| roof | -0.628 | -0.5 | -0.7 |
| rear wall | -0.281 | -0.4 | -0.5 |

Fig.8은 무차원화된 turbulent length scale을 간단히 보여주고 있는데 재순환지역의

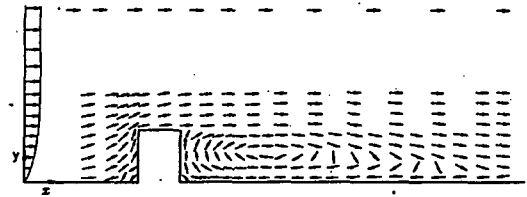


Fig.4 Flow Patterns in the case of Gradient Inlet Flow: $U_c = 10 \text{ m/s}$ ($Re = 2.139 \times 10^7$), $H^* = 10 \text{ m}$, and $L^* = 8 \text{ m}$

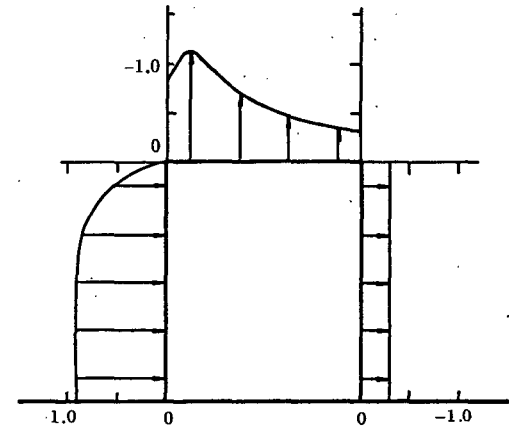


Fig.5 \bar{C}_{PC} at Building Surface in the case of Gradient Inlet Flow: $U_c = 10 \text{ m/s}$, $H^* = 10 \text{ m}$, and $L^* = 8 \text{ m}$

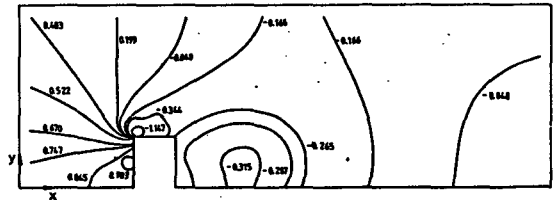


Fig.6 Pressure Field in the case of Gradient Inlet Flow (C_{PC} values): $U_c = 10 \text{ m/s}$, $H^* = 10 \text{ m}$, and $L^* = 8 \text{ m}$

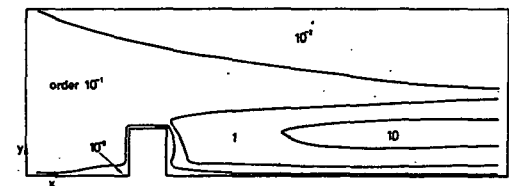


Fig.7 Turbulent kinetic Energy of Unit J/kg in the case of Gradient Inlet Flow: $U_c = 10 \text{ m/s}$, $H^* = 10 \text{ m}$, and $L^* = 8 \text{ m}$

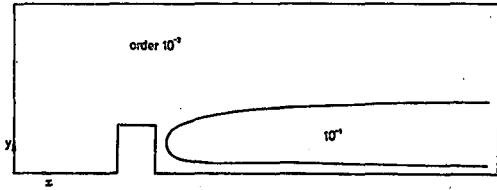


Fig.8 Turbulent Length Scale, $l^+ (=l/H^*)$, in the case of Gradient Inlet Flow: $U_c = 10 \text{ m/s}$, $H^* = 10 \text{ m}$, and $L^* = 8 \text{ m}$

scale이 보다 크며 큰渦動이 형성됨을 역시 알 수 있다. 後流 領域에 있어서 y 방향을 따라서의 l^+ 값은 증가-감소의 形態를 가지는데 증가에서 감소로 변하는 지점의 높이가 x 방향을 따라서 변화되므로 이곳에서의 length scale을 정확히 가정한다는 것은 不可能하다. 따라서 mixing length 모델이나 one-equation 모델을 적용한다는 것은 사실상 어렵다는 것을 間接的으로 示唆한다고 볼 수 있다.

이상의 결과로부터 건물주위의 유동장에 대해 $k-\epsilon$ 모델을 적용한 本 數值計算은 既存의 實驗結果와 잘 일치되는 바람직한 結果를 얻게 됨을 알 수 있다.

2. Re 수 變化에 대한 結果

結果1에서 이미 言及한 동일한 建物, 條件에 대해서 U_c 값을 변화시켜 본 結果, 유동양상이나 壓力場, 再循環地域의 길이 및 平均壓力係數 등은 거의 變함이 없었다. 물론 난류 운동에너지의 크기나 mixing length의 크기는 달라지나 그 양상은 大同小異하다.

결국 Re 수 변화에 대한 相對的인 영향은 없다고 볼 수 있다.

3. 入口流動條件의 變化에 대한 結果

동일한 건물에 대해서 入口유동이 $U = 10 \text{ m/s}$ 로 일정한 경우, Fig.9는 그 流動樣相을 보여주고 있다. 入口勾配流動의 경우에 비해서 流線이 보다 매끄러우며 剝離點 부근에서의 速度벡터의 각도가 다소 크므로 Fig.10에서 보는 바와 같이 재순환지역이 커진다.

Table 4는 \bar{C}_{PC} 값을 나타내고 있는데 入口

구배유동의 結果인 Table 3과 비교해보면 入口一定流動의 경우 \bar{C}_{PC} 의 절대값이 다소 크다. 이것은 건물주위유동이 보다 매끄러운 양상을 띄는 사실과 附合한다.

Table 4. \bar{C}_{PC} at building surface in the case of uniform inlet flow: $U = 10 \text{ m/s}$, $H^* = 10 \text{ m}$, and $L^* = 8 \text{ m}$

| Location | \bar{C}_{PC} |
|-------------|----------------|
| upwind wall | 1.11 |
| roof | -0.813 |
| rear wall | -0.312 |

결국 入口유동조건 的 變化는 재순환지역의 크기나 건물면의 \bar{C}_{PC} 값에 영향을 끼친다.

4. 建物形狀의 變化에 대한 結果

Fig. 11은 $Re = 2.139 \times 10^7$ 인 入口구배유동

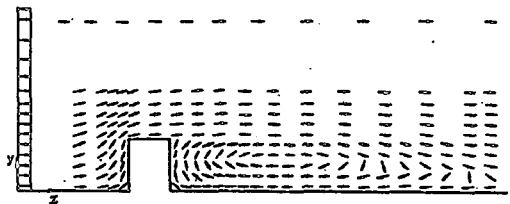


Fig.9 Flow Patterns in the case of Uniform Inlet Flow: $U = 10 \text{ m/s}$, $H^* = 10 \text{ m}$, and $L^* = 8 \text{ m}$

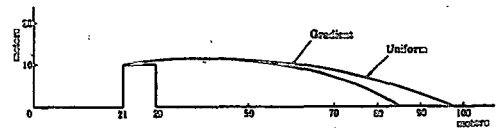


Fig.10 Comparison of Recirculating Zones, to the Change of Inlet Flow Conditions

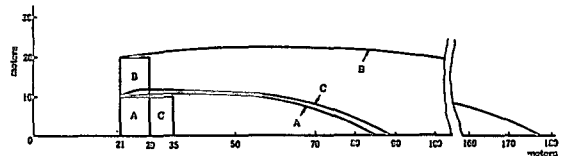


Fig.11 Comparison of Recirculating Zones, in the case of Gradient Inlet Flow: $Re = 2.139 \times 10^7$, A: $10 \times 8 \text{ m}$, B: $20 \times 8 \text{ m}$, C: $10 \times 14 \text{ m}$

의 경우, 건물형상의 변화에 대한 재순환지역의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 건물의 높이에 따라 재순환지역의 길이는 比例해서 커지나, 건물의 길이에 따르는 영향은 별로 없음을 보여준다. 물론 아주 긴 건물의 경우($H^* \ll L^*$)에는 재순환지역의 길이 가 당연히 작아질 것으로 기대된다.

Table 5. Comparison of \bar{C}_{PC} to change of building shape, in the case of gradient inlet flow: $Re = 2.139 \times 10^7$
 $H^* \times L^* \sim A; 10 \times 8mB; 20 \times 8m$
 $C; 10 \times 14m$

| Location | A \bar{C}_{PC} | B \bar{C}_{PC} | C \bar{C}_{PC} |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| upwind wall | 0.827 | 0.829 | 0.813 |
| roof | -0.628 | -0.654 | -0.515 |
| rear wall | -0.281 | -0.282 | -0.235 |

Table 5는 건물면의 \bar{C}_{PC} 값의 비교를 나타내고 있다. 건물전면에 대해서는 변화가 없고 지붕이나 건물 후면에서는 다소 변화가 있는데 $H^* < L^*$ 인 C의 경우가 A나 B의 경우보다 \bar{C}_{PC} 값이 작으며 이것은 재순환유동의 強度가 보다 작기 때문이다.

결국 동일한 유동조건인 경우 건물형상의 변화는 유동양상이나 平均壓力係數값에 영향을 미침을 알 수 있다.

IV. 結 論

建物周圍의 二次元 流動場에 대해 亂流모델인 $k-\epsilon$ 모델을 적용하여 數值的方法으로 解析한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

첫째, 건물주위의 유동장에 대한 $k-\epsilon$ 모델의 적용은 既存의 實驗結果와 附合하는 결과를 얻게 되므로 타당성이 인정된다.

둘째, Re수 변화는 平均壓力係數, 재순환지역의 길이 등에 영향을 주지 않는다.

세째, 入口流動條件의 변화나 建物形狀의 변화는 平均壓力係數나 재순환지역의 길이 등의 결과에 영향을 미친다.

앞으로 높은 건물(tall building, $H^*/L^* > 8$)이나 공장과 같은 긴 건물(long low building, $H^* \ll L^*$)이 있거나 建物群이 있는 경우의 유동장에 대해서도 보다 細密한 研究가 必要하며 더 나아가 건물 주위의 유동장에 의 해 먼지나 기타 公害物의 擴散에도 研究가 必要할 것으로 생각된다.

현재 建物群이 있는 경우의 수치적 연구가 진행중에 있으며, 實驗을 통한 相互補完을 꾀할 예정이다.

〈後 記〉

本 研究는 1986年度 문교부의 研究活動費 支援에 의해 이루어졌으며 이에 대하여 감사한다.

REFERENCES

1. P. Sachs, Wind Forces in Engineering, Pergamon Press, 1st ed., 1972.
2. S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, 1st ed., 1980.
3. D.A. Anderson, J.C. Tannehill, and R.H. Pletcher, Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, McGraw-Hill, 1st ed., 1984.
4. A.D. Gosman, Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows, Academic Press, 1st ed., 1969.
5. B.E. Launder and D.B. Spalding, Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, 1st ed., 1972.
6. Editor: P. Bradshaw, Turbulence, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2nd ed., 1978.
7. T. Cebeci and A.M.O. Smith, Analysis of Turbulent Boundary Layers, Academic Press, 1st ed., 1974.
8. Air Flow around Buildings, ASHRAE Handbook, Chap. 14, 1981.

9. J.E. Cermak, "Applications of Fluid Mechanics to Wind Engineering", *J. of Fluids Eng.*, September, 1975.
10. T. Hanson, D.M. Summers, and C.B. Wilson, "Numerical Modelling of Wind Flow over Buildings in Two Dimensions", *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 4, pp. 25-41, 1984.
11. T. Hanson, F. Smith, D.M. Summers, and C.B. Wilson, "Computer Simulation of Wind Flow around Buildings", *Computer Aided Design*, Vol. 14, No. 1, 1982.
12. L.S. Caretto, R.M. Curr, and D.B. Spalding, "Two Numerical Methods for Three-Dimensional Boundary Layers, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 1, pp. 39-57, 1972.
13. A.S. Monin, "Atmospheric Boundary Layer", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 2, pp. 225-250, 1970.
14. Hans A. Panofsky, "The Atmospheric Boundary layer below 150 meters", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 6., pp. 147-178, 1974.
15. A.J. Chorin, "Numerical Study of Slightly Viscous Flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 57, pp. 785-796, 1973.
16. A.J. Chorin, "Vortex Sheet Approximation of Boundary Layers", *J. Comput. Phys.*, Vol. 27, pp. 428-442, 1978.
17. J.E. Cermak, "Aerodynamics of Buildings", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 8, pp. 75-103, 1976.