

自動車들레의 流動의 數值 Simulation

— $k-\varepsilon$ 亂流 model 에 의한 數值解의 比較例 — *

Numerical Prediction of the Flow Around a Road Vehicle
— Comparisons between Numerical Solutions based on the
 $k-\varepsilon$ Turbulence Model —

李 澤 植 ** 譯
Taik - Sik Lee

自動車 들레의 亂流의 數值 simulation의 試圖가 점차 進行되고 있다. 그러나 解法上의 選擇이 대단히 많고 어떠한 選擇이 最高인가를 아는 것은 容易하지 않다. 現狀으로는 同一 計算對象에 대하여 여러가지 要因의 影響을 系統的으로 明白히 한 data가 적은 것이 이 問題를 一層 알 수 없게 하고 있다. 本稿에서는 現在 實用 level에서는 가장 汎用性이 있는 $k-\varepsilon$ 亂流 model에 基礎한 解法에 注目하여 數值解法 其他의 諸條件이 自動車 들레의 亂流의 simulation結果에 미치는 影響을 例示한다.

1. 緒 言

$k-\varepsilon$ 亂流 model에 의하여 代表되는 2 方程式 model을 사용한 Reynolds 方程式에 기초한 解法을 自動車들레의 亂流의 數值 simulation에 適用한 論文이 比較的 큰 國際會議에 처음으로 出現한 것은 아마 1982年 6月 London에서 開催된 車輛設計協會에 의한「車輛設計에 미치는 空氣力學의 影響」에 관한 國際會議, 또는 同年 12月 西獨 Wolfsburg에서 開催된 Volkswagen社에 의한「車輛空氣力學」에 관한 國際會議였다고 생각된다. 이들 國際會議에서 發表된 自動車들레의 流動의 simulation은 高度로 洗練된 風洞實驗의 觀點에서 보아 不滿足한 點이 認定됨에도 不拘하고 從來 風洞實驗이 主體였던 車輛空氣力學의 分野에 큰 衝擊을 주었다. 特히 이들의 數值 sim-

ulation技術이 自動車의 高性能化에 同伴하는 風洞實驗의 增大, 車輛의 開發期間의 短縮化 傾向에 대한 近代의 武器로서 風洞實驗의 代案으로 될 수 있는가에 대하여 강한 關心이 모여졌다. 그後 歐美를 中心으로 精力的 檢討가 進行되어¹⁾⁻⁶⁾ 여러가지 報告가 公表되고 있으나 現在 初期段階에서 指摘된 自動車들레의 流動의 數值 simulation의 問題點이 그다지 解消되지 못한 것이 現狀이다.

表 1에 主要文獻의 一覽을 表示한다. 表에는 數值解法, 亂流 model, 座標系, 次元, 計算對象, mesh數등을 나타내었다. 表부터 數值解法에 관하여는 差分法, 有限體積法의 適用이, 또 亂流 model에 관하여는 $k-\varepsilon$ model의 採用이 比較的 많은 것을 알 수 있다. 또한 年代的으로 보면 初期의 論文이 集中한 1982-

* 東京大學 生産研究 38卷2號(1986.12)에 게재된 논문임.

** 서울大學校 工科大學

表1 主要文獻

著者	數值解法 ^{*1)}	亂流 model	座標系	次元 ^{*2)}	計算對象	mesh數 ^{*3)}	備考
Markatos ⁷⁾ (1983)	FDM	$k-\epsilon$ model	直交直線	3D 3D	fast back型 notch back型	20×12×8 25×9×15	
Demuren ⁸⁾ (1982)	FDM	$k-\epsilon$ model	直交直線	2D 3D	fast back型 notch back型	75×39 45×26×17	
Rastogi ⁹⁾ (1982)	FDM	$k-\epsilon$ model	直交直線	2D	fast back型	30×35	SIMPLE法
Hasse ¹⁰⁾ (1983)	FDM	0方程式 model	—	2D	fast back型	n. d.	
Malin ¹¹⁾ (1985)	FDM	$k-\epsilon$ model	—	3D 3D	fast back型 square back型	38×26×14 38×26×14	SIMPLE法
Willoughby ¹²⁾ (1985)	FDM	$k-\epsilon$ model	直交直線		冷却系를 包含 車輛前頭部	75×75	SIMPLE法
小林 ^{13)~17)} (1985~86)	FDM	$k-\epsilon$ model	直交直線	2D	fast back型	141×69	SMAC法
Rawnsley ¹⁸⁾ (1986)	FVM	$k-\epsilon$ model	—	3D 3D	fast back型 square back型 notch back型	47×26×14 47×26×14 47×26×14	SIMPLE法
谷口 ¹⁹⁾ (1986)	FVM	$k-\epsilon$ model	—	2D 3D	fast back型 fast back型	60×30 60×30×20	SIMPLE法
Ecer ²⁰⁾ (1982)	FEM	0方程式 model	—	2D	fast back型	n. d.	

* 1 FDM: 差分法, FVM: 有限體積法, FEM: 有限要素法

* 2 2D: 2次元, 3D: 3次元, * 3: (前後軸方向)×(上下軸方向)×(左右軸方向)

3年代에 비하여 그後の 論文發表는 그다지 많지 않다는 것을 알 수 있다. 이것은 自動車가 가지는 複雜한 形狀의 取扱, 또 航空機와는 달리 車體의 背後에 存在하는 큰 後流의 取扱의 困難性등 때문에 simulation技術이 큰 壁에 直面하고 있는 點, 또는 數值simulation技術이 가지는 戰略的地位 때문에 數值解法其他의 細部가 公表되기 어려운 點을 示唆하고 있다고 생각된다. $k-\epsilon$ 亂流 model에 기초한 解法에 의한 問題點의 存在를 明確하게 위하여 그림 1에 一例로서 fast back型 2次元車體에 있어서 上表面壓力分布를 여러가지 解法에 의하여 計算한 結果의 比較를 表示한다. 그림에서는 本稿에서 注目하는 差分法 및 有限體

積法외에 有限要素法, panel法에 의한 解法實驗値와 對比되어 있다. 小林·諸岡¹³⁾, 谷口¹⁹⁾以外的 data는 Volkswagen社의 提供 data²¹⁾이다. 그림으로부터 壓力分布의 定性的 傾向은 概略의으로 一致하고 있으나 細部에 있어서는 數值解法사이에 相當한 差異가 있다는 것을 알 수 있다. 이들의 結果는 計算結果의 差異가 數值解法自身의 差異에 의한 것은 勿論 同一數值解法, 同一亂流 model을 使用한 경우 일지라도 計算 scheme, mesh分割, 境界條件의 設定의 差異에 의하여 얻어지는 計算結果가 大幅으로 달라진다는 것을 意味하고 있다.

따라서 이들의 parameter를 最適하게 設定하는 것이 計算上 큰 課題가 된다. 現在 이들

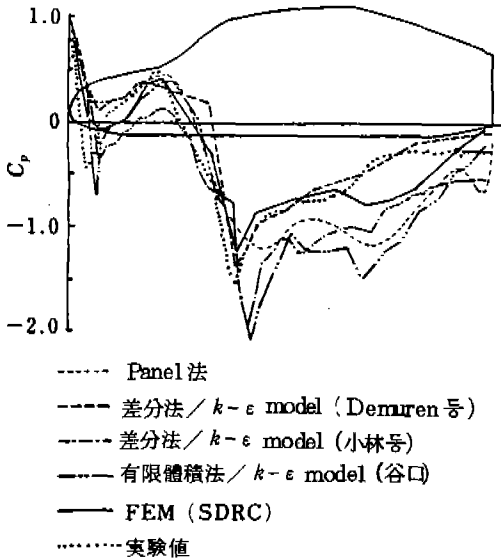


그림 1 여러가지解法에 의한 計算結果의 比較

의 問題點의 解明은 아직 充分하지 않고 比較 檢討를 위한 計算例의 蓄積이 一層 要望되고 있다.²²⁾⁻²³⁾

本稿에서는 亂流 model로서 $k-\epsilon$ 亂流 model을 사용한 Reynolds方程式에 기초한 解法에 注目하고 差分法 및 有限體積法의 差異가 2次元車體 둘레의 流動의 狀態, 特히 車體表面 壓力分布 및 後流構造에 미치는 影響을 例示한다. 더욱 mesh分割, Re 數의 影響에 대하여도 基礎的 資料를 提供한다.

2. 數值解法

2.1 數值解法 I (差分法)

差分法은 流動의 計算分野에서는 일찍부터 가장 잘 사용되어 왔고 偏微分方程式을 差分方程式으로 近似化시켜 解를 구하는 것이다.

이 差分方程式은 一意的으로 決定되는 것이 아니고 解의 精度가 각각 相異한 差分形式이 數많은 提案되어 있다. 많은 경우 直交直線座標系에 適用되는 이 手法은 近年 曲線非直交座標系에도 適用되어 그 有效성과 應用範圍를 擴大해가고 있다. 本稿에서는 直交直線座標系를 사용해서 差分計算을 행하고 空間에 대하여

여는 中心差分을, 또 時間에 對하여는 Adams · Bashforth差分을 適用한다 (또 k, ϵ 의 輸送方程式의 對流項에 대하여는 計算의 安定때문에 upwind差分을 適用). 또 計算 algorithm로서는 SMAC法²⁴⁾를 使用한다.

SMAC法은 A Simple Version of Marker and Cell Method의 略記이고 別名 HSMAC法으로도 불리는 時間進行型의 陽解法이다.

SMAC法의 特徵은 SMAC法의 原型인 MAC法이 壓力에 관한 Poisson方程式을 풀므로서 連續의 關係를 評價하고 있는데 對하여 Poisson方程式을 푸는 代身에 壓力과 速度를 同時에 修正하여 連續의 關係를 滿足시키는 點에 있다.

Algorithm의 主要部는 다음과 같다.

- (1) 運動方程式부터 速度 u, v, w 를 구한다.
- (2) 이들 速度는 반드시 連續式을 滿足하고 있는 것은 아니므로 u, v, w 및 壓力 P 를 同時에 修正하여 連續式을 許容誤差內에서 滿足할때까지 反復해서 計算을 행한다.
- (3) 새로히 求해진 速度 u, v, w 를 사용해서 k, ϵ 의 輸送方程式을 푼다.
- (4) 時間 step를 進行한다. (1)에 돌아간다.

2.2 數值解法 II (有限體積法)

有限體積法은 計算領域을 數개의 小領域으로 分割하여 각각에 대하여 積分을 행하고 離散化을 하는 것이다. 또 分割 mesh를 座標軸方向에 沿하여 주어 離散式을 階差의 型으로 導出하고 있기 때문에 有限要素的인 性質과 差分法의 性質을 兼備하고 있다. 本稿에서는 計算 algorithm로서 SIMPLE法²⁵⁾을 使用한다. 또 離散化에 關하여 若干 詳細하게 說明을 加한다.¹¹⁾

計算領域을 座標軸에 沿하여 有限體積을 가지는 小領域(cell)으로 分割하고 각 cell內에 代表點을 定한다 (그림 2에서는 點 P).

이 cell은 6個의 面 e, w, n, s, t, b 로 隣接 cell E, W, N, S, T, B 와 接하고 있다.

즉 ξ 의 陽方向의 隣接 cell을 E , ξ 의 陰方向의 그것을 W 로 하고 η, ξ 方向에 대하여는

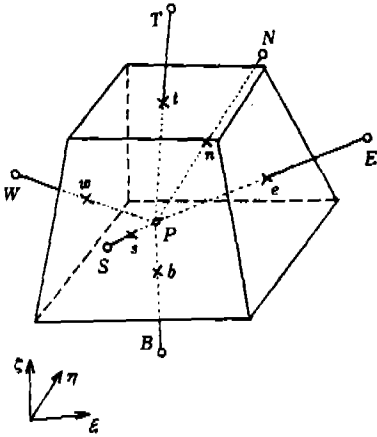


그림 2 有限體積法에 있어서의 cell의 定義

각각 N, S 및 T, B로 한다. Patarkar·Spalding에 의한 方法에서는 速度벡터 \vec{v} 를 射影成分 (u, v, w)으로 나누어 u 를 面 e상에 點 P-E方向成分으로서, 또 面 w상에 點 W-P方向成分으로서 定義한다. v, w 에 대해서도 마찬가지로 定義한다. 즉 速度는 cell面上에서, 그밖의 scalar量은 cell內的 代表點에서 定義한다. scalar量 ϕ 는 一般的으로

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \text{div}(\vec{v}\phi - \Gamma \text{grad}\phi) = S \dots\dots\dots(1)$$

로 表示된다. 여기서 Γ, S : 場所, 時間의 函數가 되는 scalar量이다.

式(1)을 cell P에 대하여 體積積分하면

$$\int_{vol} \frac{d\phi}{dt} dv + \int_A \vec{J}_A \cdot \vec{dn} - \int_{vol} S dv = 0 \quad (2)$$

가 얻어진다. 여기서 vol : cell體積, A : 境界面積, \vec{n} : 境界面の 法線벡터, $\vec{J}_A = (\vec{v}\phi - \Gamma \text{grad}\phi)_A$, 境界面에서의 總流束, 式(2)의 第1項, 第3項은 cell內에서 $d\phi/dt, S$ 가 각각 一定值를 가진다고 假定하여 積分한다. 또 第2項은 \vec{J}, \vec{n} 을 各面에서 一定이라고 假定하여 面 e, w, n, s, t, b 각각에 대하여 積分한다. \vec{J} 는 近接 cell에 있어서의 諸量에 의하여 補間된다. 여기서는 對流流束 $\vec{v}\phi$ 를 up-wind補間으로 또 擴散流束 $\Gamma \text{grad}\phi$ 를 中心補間으로 近似한다. 이들의 積分에 의하여 式(2)는

$$a_p \phi_p = \sum a_{NB} \phi_{NB} + b \dots\dots\dots(3)$$

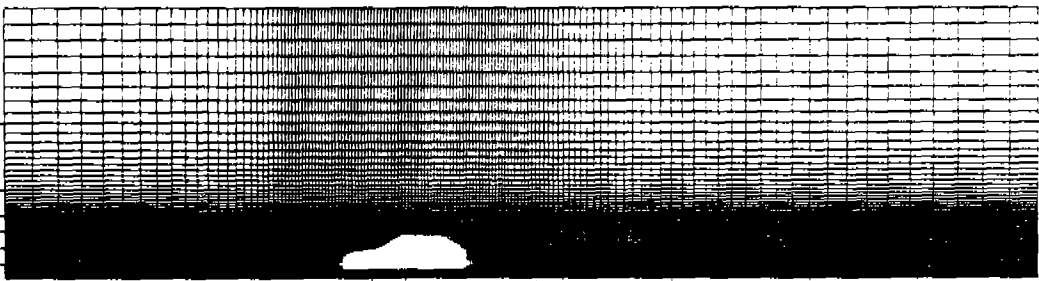


그림 3 mesh 分割 (差分法)

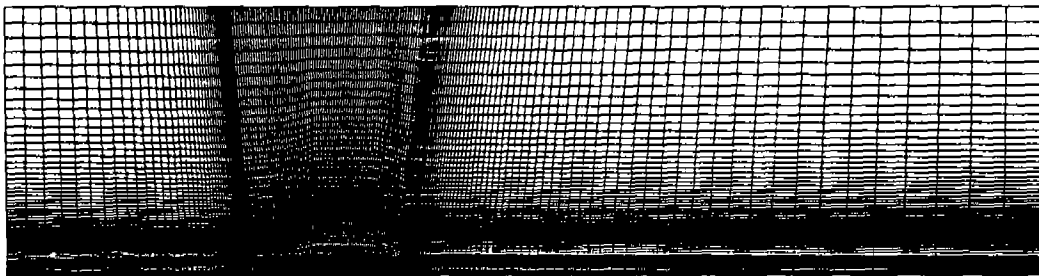


그림 4 mesh 分割 (有限體積法)

의 階差式으로 交換된다. 여기에 $NB: E, W, N, S, T, B$ 의 어느 하나를 選擇한다.

a_p, a_{NB}, b : 係數, 式(3)은 正規等間隔cell 下에서는 差分法에 의한 階差式과 等價이다.

또한 vector 量에 관한 方程式에 대하여도 上記와 類似한 手法에 의하여 離散化된다.

SIMPLE 法은 Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation의 略記이고 壓力結合方程式에 의한 半陰解法이다. AI-algorithm의 主要部는 다음과 같다.

(1) 運動方程式으로 부터 速度 u, v, w 를 구한다.

(2) 連續式으로부터 導出되는 壓力補正式을 사용해서 壓力補正量 δp 를 구한다.

(3) 壓力補正量 δp 를 사용해서 速度補正式으로부터 새로운 速度 u, v, w 를 구한다.

(4) u, v, w 를 사용해서 k, ϵ 의 輸送方程式을 푼다.

(5) 連續式을 許容誤差內로 滿足할때 까지 Step(1)~(4)를 反復한다.

3. 計算條件

流動場으로서 風洞內의 2次元車體둘레의 亂류를 想定한다. 表 2에 數值解法으로 使用하

表 2 計算條件

數值解法	差分法	有限體積法
車體形狀	2次元 fast back 型	
輪廓近似	階段狀 近似	車體形狀에 適合한 直線近似
計算領域, mesh 分割	그림 3 $l_1^{*1} \doteq 2.6l, l_2 \doteq 4.4l$ $h_1 \doteq 6.3h, h_2 \doteq 0.23h$	그림 4 $l_1 \doteq 1.5l, l_2 \doteq 4.0l$ $h_1 \doteq 5.0l, h_2 \doteq 0.22h$
標準 mesh 數	141 × 69 (車體: 40 × 22) 車體가가이의 mesh는 縱橫比 1對2의 等間隔 mesh, 車體부터 떨어진곳에서는 mesh幅이 等比級數의으로 增加하는 不等間隔 mesh	180 × 90 (車體: 84 × 22) 車體形狀에 適合한 mesh
境界條件	入口部	$U=1.0, V=0, k=3.2 \times 10^{-8}, \epsilon=7.1 \times 10^{-4}$ (文獻 26 参照)
	出口部	均一流出
	上面部	free slip 條件, $V=0$
	車體境界, 地面盤	壁面에 平行方向速度: 1/7乘則, 同垂直方向速度: 零, k : free slip 條件, $\epsilon = c_\mu^{3/4} k^{3/2} / (\kappa y), \kappa$: Karman 定數 y : 壁부터의 距離
		均一流出, $p=0$
		入口部와 同一
		壁面에 平行方向速度: 壁法則에 의한다. $\tau_w/\rho = (c_\mu^{1/2} k)^{1/2} u/u^+, u^+ = (1/\kappa) \ln(Ey^+), y^+ = (c_\mu^{1/2} k)^{1/4} \times y/\nu, E$: 定數, k : free slip 條件 (k 의 輸送方程式의 生成項 $G = (\tau_w/\rho)(u/y), \epsilon = k^2(\rho/\tau_w)(u/y)$), ϵ : 差分法과 同一
數值定數	$c_\mu = 0.09, c_1 = 1.44, c_2 = 0.1728, \sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3$ (文獻 27 参照)	$c_\mu = 0.09, c_1 = 1.44, c_2 = 0.1728, \sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.22$
Re 數 *2	2.2×10^6	$1.0 \times 10^5, 1.0 \times 10^6, 2.1 \times 10^6$

(*1 l_1 : 計算領域入口部, 車體前端사이의 距離, l_2 : 同出口部, 車體後端사이의 距離, h_1 : 同上面部, 車體屋上사이의 距離, h_2 : 地上 높이, l : 車長, h : 車 높이, *2 代表길이: 車 높이, 代表速度: 入口速度)

는 差分法 및 有限體積法 각각의 경우에 대한 車體形狀의 輪廓近似, 計算領域, mesh 分割, 標準 mesh 數, 境界條件, 數值定數 및 計算 Re 數를 나타낸다.

4. 結果 및 考察

4.1 數值解法의 差異의 影響

그림 5에 車體表面의 壓力分布에 미치는 本稿에 있어서의 數值解法의 差異의 影響을 나타낸다. 그림에서 差分法(FDM)의 경우는 $Re = 2.2 \times 10^6$ 에 대한 結果를, 또 有限體積法(FVM)의 경우는 $Re = 1.0 \times 10^6$ 에 대한 結果를 나타내고 있다. 壓力係數 C_p 는 $C_p = 2(p - p_\infty)$ 로 定義한다.

여기서 p_∞ : 均一流動中에서 無次元 壓力이다. 또 여기서는 이들 Re 數의 差異가 큰 影響을 주지 않는다고 생각하여(4.2節 參照)兩者를 比較한다. 그림으로부터 兩 數值解法에 의한 C_p 分布의 定性的 傾向은 거의 一致하나 定量的으로 보면 다음과 같은 差異가 認定된다.

(i) 車體 roof의 前後端등 모서리部에서의 壓力의 peak 值에 대하여는 有限體積法의 경우가 尖銳한 peak 值를 준다.

(ii) 車體下面의 壓力分布에 대하여는 差分法 쪽이 낮은 C_p 值를 준다.

上記 (i)의 結果는 有限體積法에서는 모서리部에 있어서 車體表面에 의하여 沿하여 흐르고, 剝離가 發生하기 어렵게 되어 있다는 것을 意味한다. 現在 本 車體形狀에 관한 實驗 結果가 없으므로 嚴密한 考察은 困難하나 本 車體形狀과 類似한 形狀을 가지는 그림1에 表示된 上表面 壓力分布로 보아도 有限體積法은 過大하게 尖銳한 peak 值를 再現하는 것 같이 생각된다. 한편 差分法에서는 이와는 逆으로 車體形狀의 모서리部에 있어서 有限體積法에 比하여 그다지 強한 peak 值가 나타나 있지 않다. 本稿에 있어서의 兩數值解法에 의한 計算例에서는 mesh 分割이 相異하고 特히 有限體積法에서는 境界適合座標系를 使用하고 있다.

또 計算條件, 差分型式등도 同一하지 않다. 特히 有限體積法에서는 運動方程式, k, ϵ 의 輸送方程式 모두 對流項에는 upwind 補間을 適

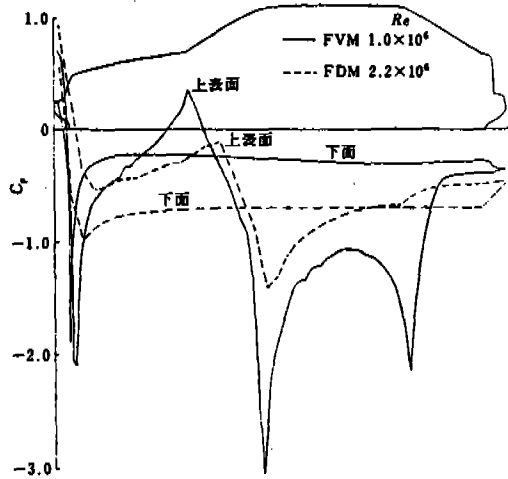
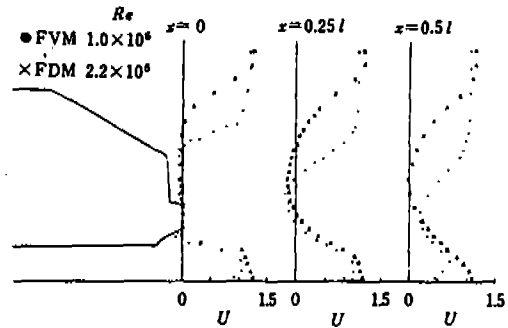
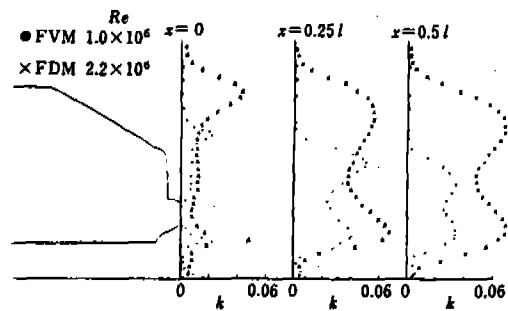


그림 5 壓力分布에 미치는 數值解法의 差異의 影響



(a) 主流方向速度分布



(b) 亂流 에너지分布

그림 6 車體背後的 後流에 미치는 數值解法의 差異의 影響

用하고 또 k , ε 의 輸送方程式의 生成項 G 를 近似시켜 計算을 행하고 있다. 이러한 까닭에 그림 5에 表示된 C_p 分布의 通常의 差分法과 有限體積法과의 差異에 의한 것이라고 簡單하게 斷定할 수는 없다. 다음에 上記의 結果에 대하여는 差分法의 경우는 有限體積法의 경우에 比하여 床下流動의 平均流速이 보다 크게 되어 있는 것을 나타낸 것으로 생각된다.

그림 6에 車體背後의 後流에 미치는 數值解法의 差異의 影響을 表示한다. 計算條件은 그림 5와 同一이다. 그림 6 (a) 및 (b)는 각각 車體後端, 後端부터 $0.22l$, $0.5l$ (l : 車長) 下流에 있어서의 主流方向速度 U 의 分布와 亂流 energy k 의 分布를 나타낸 것이다. 그림으로부터 速度分布에 대하여 兩 數值解法에 의한 計算結果사이에는 다음과 같은 差異가 認定된다.

(i) 地面盤附近에서는 差分法이 더 큰 速度를 준다.

(ii) 車體後部の 傾斜面의 背後에서는 差分法 쪽이 더 큰 速度缺損領域이 생기게 한다.

上記 (i)의 結果는 그림 5의 下面이 C_p 分布의 結果와 對應하는 것이고, (ii)의 結果는 有限體積法에서는 後流가 작아지는 것을 나타내고, 또 有限體積法의 경우의 모서리部에서의 C_p 分布의 傾向을 立證하는 것이다.

다음에 k 의 分布에 대하여 兩 數值解法에 의한 計算結果사이에는 定性的傾向이 大略一致하고 있다. 즉 後流의 速度勾配의 極大值에 對應해서 k 의 分布에도 2個의 peak 値가 나타난다. 定量的으로 보면 差分法은 全般的으로 k 를 더욱 크게 評價하는 傾向이 있는 것이 特徵이다.

4.2 mesh 分割 및 Re 數의 影響

그림 7에 車體床下面과 地面盤사이에서의 mesh 數의 影響을 表示한다. 그림에 差分法의 경우에 대하여 mesh 數가 標準의 5 mesh (表 2 參照)부터 10 mesh로 變化시킨 경우에 車體上面의 壓力分布에 나타나는 變化를 例示하였다.

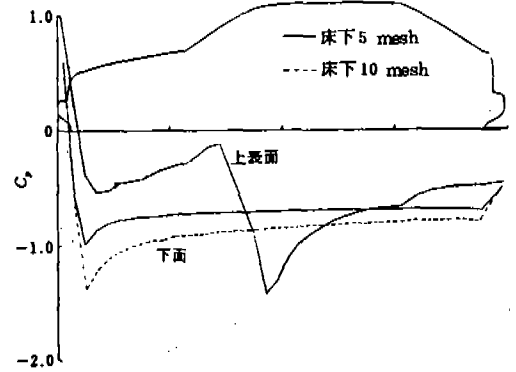


그림 7 壓力分布에 미치는 mesh 分割의 影響 (差分法)

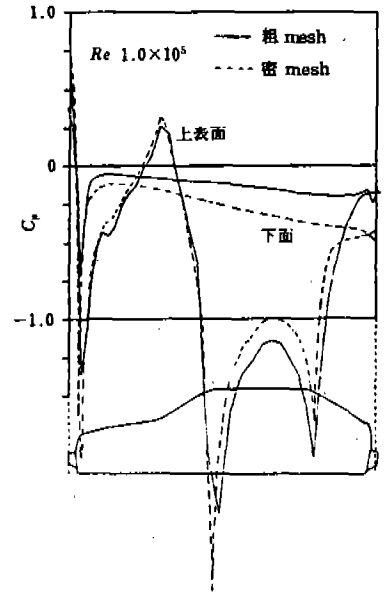


그림 8 壓力分布에 미치는 mesh 分割의 影響 (有限體積比)

그림으로부터 이 mesh 數의 變化가 上面의 壓力分布에 미치는 影響은 거의 없다는 것과 한편 下面의 壓力分布에 대하여는 稠密한 mesh 일수록 C_p 値를 작게하는 傾向이 있다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 計算領域全域에 걸쳐서 mesh 數를 變化시킨 경우 車體表面의 壓力分布에 미치는 影響을 表示한 것이다. 그림에서는 有限體積法의 경우에 대하여 標準 mesh (表 2 參照)를 稠密 mesh를 假定하고 이에 대하여 거친(粗)

mesh(100×50(車體: 42×15))를 設定하였다. 그림으로부터 上表面의 壓力分布에 대하여는 場所에 따라서 狀況이 다르나 稠密한 mesh일수록 尖銳한 peak 値를 가지기 쉬운 C_p 分布가 된다는 것, 또 下面의 壓力分布에 대하여는 그림 7에서의 表示된 傾向과 마찬가지로 稠密한 mesh일수록 C_p 値가 작아지는 傾向이 있다는 것을 알 수 있다.

그림 9에 有限體積法의 경우에 대하여 車體表面의 壓力分布에 미치는 Re 數의 影響을 나타낸다. 그림에서 $Re=1.0 \times 10^5$, 1.0×10^6 및 2.1×10^6 의 경우를 例示한다. 그림으로부터 上下表面의 壓力分布 모두 本計算 Re 數사이에서는 定量的인 差異는 認定되나 定性的으로는 거의 同一한 傾向에 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 實驗에서는 Re 數가 10^5 의 order의 경우와 10^6 의 order의 경우에는 物體表面에 있어서의 剝離의 樣相이 相異하고 C_p 分布에 定性的인 差異가 나타난다. 그림 10에 2次元車體(그림 1에 表示하는 車體形狀과 同一의 車體形狀)에 대하여 車體上表面의 壓力分布에 미치는 Re 數의 影響¹⁴⁾을 例示한다. 그림의 $Re = 2.2 \times 10^6$ 의 경우에 實驗結果는 實車大의 模型을, 또 $Re = 1.2 \times 10^5$ 의 경우는 縮尺 1/17.5의 模型을 사용해서 얻은 것이다.

그림 11에 2次元翼에 대하여 翼面의 壓力分布에 미치는 Re 의 影響²¹⁾을 例示한다.

그림 10 및 11로부터 2次元車體의 경우 roof 中央附近부터 後部に 있어서, 또 2次元翼의 경우 翼背面의 後半部에 있어서 Re 數에 의하여 定性的으로 相異한 C_p 分布가 認定된다. 따라서 現段階에서의 計算에 있어서는 實驗에서 나타나는 Re 數의 差異에 의한 上記의 傾向變化를 再現하고 있지 않는 것으로 생각된다.

車體境界 및 地面盤附近에서 壁法則을 適用하는 경우 壁近傍의 最適 mesh 分割은 Re 數의 크기와 密接한 關係가 있다.

즉 計算에 의하여 구하여지는 壁座標 y^+ (壁近傍 第 1 mesh, 表 2 參照)가 Re 數에 存在하고 Re 數에 따라서는 y^+ 가 壁法則으로 定義되

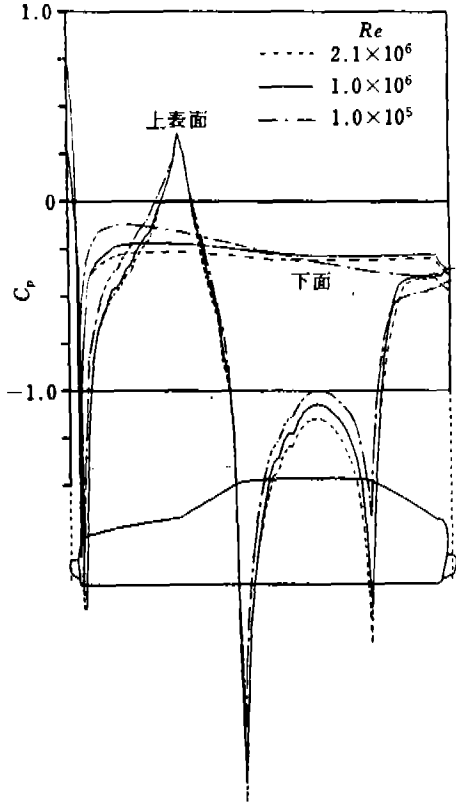


그림 9 壓力分布에 미치는 Re 數의 影響 (有限體積法)

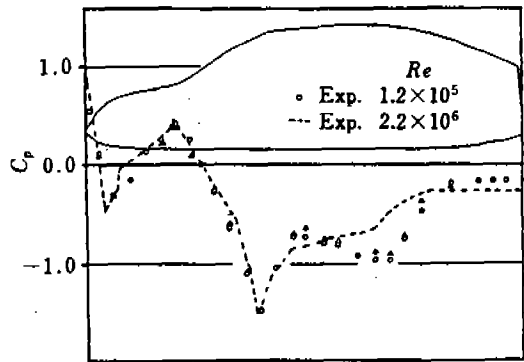


그림 10 壓力分布에 미치는 Re 數의 影響 (2次元車體)

는 y^+ 의 範圍에 存在하지 않게 되는 경우가 있다. 그림 9의 計算例에서는 3가지의 Re 數에 대하여 同一한 mesh 分割을 使用하였다. $Re = 1.0 \times 10^6$ 의 경우에는 y^+ 가 $30 \leq y^+ \leq$

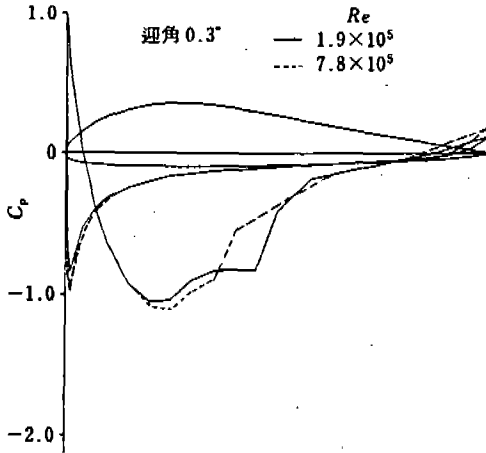


그림 11 壓力分布에 미치는 Re數의影響
(2次元翼)

100의範圍에存在하나, $Re=2.1 \times 10^6$ 의 경우에는 y^+ 가 약간 크고 $y^+ \approx 100 \sim 200$ 의範圍에, $Re=1.0 \times 10^5$ 의 경우에는 y^+ 가 작고 $y^+ \approx 12 \sim 30$ 의範圍에存在하고 있다. 이들의結果는當然한 일이지만 y^+ 가 mesh分割에依存한다는 것을意味하고 따라서境界條件으로서壁法則을使用하는限 mesh分割의粗密의影響을 y^+ 와獨立으로論議하는 것이困難하다는 것을示唆하고 있다.

5. 結 言

亂流 model로서 $k-\epsilon$ 亂流 model을使用한 Reynolds方程式에 기초한解法에注目하여差分法 및 有限體積法에 의한數值 simulation結果의對比를試圖하였다. 더욱 mesh分割, Re數가 2次元車體둘레의流動狀態에 미치는影響을例示하였다. 本稿에서使用한差分法 및 有限體積法은 모두現在比較的 know-how가蓄積되어 있는數值解法이다. 勿論本稿에 있어서는計算結果는 각각의數值解法에 있어서 여러가지計算條件을最適으로하여 얻어진 것은 아니다. 그럼에도不拘하고, 兩者에 의한計算結果에는 큰差異가 있는 것은明白하다. 今後數值解法, 計算 scheme, 亂流 model의選擇, mesh分割, 境界條件의設定 등의諸問題를包含하여自動車둘레의流動의數

值 simulation技術의改善을向하여一層의 꾸준한努力이必要하다는 것을痛感한다.

끝으로本稿에서의比較計算은本所內에設值된「車輛等の空氣力學에 관한研究委員會」의 working group作業의一環으로行해졌다. 또本所 NST研究 group의各位로부터有意義한討論에 대하여謝意를表한다.

참 고 문 헌

1. W. Schmidt and R. Buchheim, Proc. of VW Internat, Symposium on Vehicle Aerodynamics. (1982)
2. R. Buchheim and H. Roehe, VDI Berichte, 537 (1984), 261
3. B. Wagner, VDI Berichte, 537 (1984), 661
4. D. Hammond, Jr., SAE Paper 850473 (1985)
5. G.H. Bibbins and W.W. McVinnie, SAE Paper 850475 (1985)
6. W. Schmidt, Dornier Post, 2/83 (1983)
7. N.G. Markatos, Int. J. of Vehicle Design, SP 3 (1983), 387
8. A.O. Demuren and W. Rodi, Proc. of VW Internat, Symposium on Vehicle Aerodynamics. (1982)
9. A.K. Rastagi, Proc. of VW Internat. Symposium on Vehicle Aerodynamics, (1982)
10. W. Hasse and W. Seibert, Aerodynamics of Transportation II, ASME. FED 7 (1983), 21
11. M.R. Malin *et al.*, Proc. of 2nd Internat. Symposium on Ship Resistance, (1985), 16:1
12. D.A. Willoughby *et al.*, SAE paper 850282 (1985)
13. 小林・諸岡, 日本機械學會論文集, B51-466 (1985). 1962
14. 小林・諸岡, 生産研究, 38-1(1986), 50
15. T. Kobayashi *et al.*, Computational Mechanics

- '86, (1986), VII-77
16. 鬼頭・小林, 生産研究, 38-8(1986), 406
 17. 鬼頭・小林, 自動車研究, 8-11(1986), 443
 18. S.M. Rawnsley and D.G. Tatchell, SAE Paper 860217 (1986)
 19. 谷口, 東大機械工學研究報告, 21(1986), 89
 20. A. Ecer, Proc. of VW Internat. Symposium on Vehicle Aerodynamics, (1982)
 21. U. Seiffert and R. Buchheim, 私信에 의함 (1986)
 22. 小林・村上, 生産研究, 36-12(1984), 502
 23. 小林・鬼頭, 自動車技術, 40-4(1986), 435
 24. C.V. Hirt and J.L. Cook, J. Compu. Phys., 10 (1972), 324
 25. S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, (1980), Hemisphere Pub. Corp
 26. J. Laufer, NACA Rep. 1174 (1954)
 27. B.E. Launder and D.B. Spalding, Computer Methods in Appl. Mech. and Eng., 3 (1974), 269
 28. 筒井, 私信에 의함 (1986)