

<論 文>

단순화된 2차원 자동차형 물체 주위 유동에 관한 수치해석적 연구

강신형* · 이영림** · 유정열* · 이택식* · 김응서*

(1988년 10월 13일 접수)

A Numerical Study On Flows Over Two-Dimensional Simplified Vehicle-Like Body

S.H. Kang, Y.R. Lee, J.Y. Yoo, T.S. Lee, E.S. Kim

Key Words : Turbulent Flow(난류), Numerical Calculation(수치해석), Vehicle(자동차), Ground Effect(지면효과), Drag Coefficient(항력계수), Lift Coefficient(양력계수), $k-\epsilon$ model($k-\epsilon$ 난류모델)

Abstract

Turbulent flows around two-dimensional vehicle-like bodies in ground proximity are numerically simulated. The Reynolds averaged Navier-Stokes equations with a $k-\epsilon$ turbulence model are numerically solved, and a body-fitted coordinate system is used. It is shown that the simulation is acceptable in comparison with limited data measured in the wind-tunnel. According to numerical simulations, drag coefficients are under-estimated and lift coefficients are over-estimated during the model test in the wind-tunnel if the ground is fixed. Such ground effects are reduced as Reynolds number is increased. Reducing the gap between the vehicle and the ground make drag coefficients smaller and lift coefficients larger. The changes in static pressure distributions on the bottom and the rear surface play dominant roles in determination of the drag and the lift of the body in ground proximity. Drag component less than 10% of the total amount is contributed by skin-frictions. When the slant-angle of the body is reduced, the drag shows its minimum value and the lift shows its maximum value at about 22 degree.

기 호 설 명

BPD : 물체 후미의 정압에 의한 항력계수 성분	G : 난류에너지의 생성항
b'_j : 변환행렬의 성분	g_{ij}, g^{ij} : Metric tensors
C_D : 항력계수	H : 물체와 지면의 간격
C_i : 여러가지 난류모델 상수	J : Jacobian
C_L : 양력계수	k : 난류 운동에너지
FBPD : FPD+BPD	L : 물체의 길이
FPD : 물체의 앞면과 상하면의 압력에 의한 항력계수 성분	P, Q : 격자제어함수
	Re : Reynolds수 ($=\rho U_0 L / \mu$)
	S : 경사면의 위치
	SKF : 마찰에 의한 항력계수 성분
	S_ϕ : 수송방정식에서 소스항

* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과
 ** 서울대학교 대학원

- T : 물체 후미의 수직부분의 높이
- U, V : x, y 방향의 평균속도
- U_0 : 자동차 또는 지면의 속도
- x, y : Cartesian좌표
- δ^* : 지면경계층의 배제두께
- ε : 난류 소산율
- ρ : 밀도
- Γ_ϕ : ϕ 에 해당하는 확산계수
- μ, μ_t : 점성계수 및 난류점성계수
- ϕ : 종속변수
- σ_i : 난류모델 상수
- ξ, η : 변환된 계산영역에서의 좌표계

1. 서 론

자동차의 연료비의 절감, 안정성의 확보, 승차감의 향상 등의 관점에서 외형을 설계할 때 공기역학적인 관점에서 여러가지 문제점을 신중히 고려해야 한다. 실제로 공기역학은 자동차의 설계과정에서 주요한 역할을 하고 있다^(1,2). 이를 위하여 자동차 주위의 유동을 실험 또는 이론적으로 시뮬레이션하고, 현상을 이해 및 예측하여야 된다. 실제 자동차의 외형은 각이진 부분이 많은 3차원 형상일뿐만 아니라 여러가지 부착물이 설치되어 있다. 그래서 기본설계 단계에서는 이러한 부착물을 제외하고 형상을 단순화한 기본형상을 우선 개발 설계하게 된다. 이때 물체 주위의 유동을 수치해석적으로 시뮬레이션할 수 있다면 매우 편리하게 이용될 수 있다. 자동차 주위의 공기역학적 특성, 특히 저항특성은 후미의 유동특성에 주로 영향을 받는다. 후미의 유동은 차체주위의 3차원 경계층의 형성, 3차원 박리현상에 의한 차체 측면에서의 보텍스의 형성, 준축대칭 박리에 의한 역류의 형성 및 지면경계층의 형성에 의해 그 특성이 주어진다. 그러나 이러한 유동현상을 신빙성있게 해석하기는 아직 어렵기 때문에 풍동실험을 통해 주로 연구되고 있다.

이러한 자동차 주위의 복잡한 3차원 점성유동은 주로 $k-\varepsilon$ 난류모델을 채택한 Reynolds방정식을 사용하여 수치 시뮬레이션이 시도되고 있다^(3,4). 그러나 아직 설계에 이용될 만큼 정량적으로 정확한 예측이 이루어지지 못하고 있고 또한 상당한 컴퓨터의 기억용량과 계산시간이 소요된다. 따라서 아직도 2차원적인 유동특성을 연구하여 유동현상을 이해하고 설계에 활용하려는 노력이 많다⁽⁴⁾. 국내에

서도 이동호, 강신형⁽⁵⁾, 최도형, 최철진⁽⁶⁾, 최장섭 등⁽⁷⁾에 의해 비점성유동이론, 경계층이론, 실험적 방법 등을 통해 연구가 이루어졌다. 본 논문에서는 유정열 등⁽⁸⁾에서 수행된 단순화된 자동차형 2차원 물체 주위의 유동에 관한 실험적 연구와 병행하여 이루어진 수치해석적 연구⁽⁹⁾의 일부와 계속된 일련의 연구를 다루었다. 수치해석은 $k-\varepsilon$ 난류모델과 body-fitted 좌표계를 채택하여 수행하였으며, 우선 수치계산의 합리성 및 문제점을 파악하였다. 이어서 지면효과와 물체 후미의 경사각의 영향에 대하여 수치해석적으로 연구하였다.

2. 지배방정식 및 경계조건

2.1 지배방정식 및 격자생성 방정식

본 연구에서는 주로 Fig. 1에 나타난 단순화된 2차원 자동차형 물체 주위의 유동을 다룬다. 유동은 비압축성 정상 난류유동으로 생각하고 잘 알려진 $k-\varepsilon$ 모델을 선택하였다⁽¹⁰⁾. 이때 Cartesian좌표계를 기본좌표계로 택하면 연속방정식 및 U, V, k, ε 에 대한 수송방정식은 다음의 형태로 나타낼 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V \phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}) + S_\phi \tag{1}$$

위 방정식은 유한차분법에 의해 수치해석되며, 임의 형태를 가진 물체 주위의 유동장을 해석하는 경우에는 경계조건의 원활한 처리를 위해 좌표면이 물체표면과 일치하는 body-fitted좌표계를 널리 사용한다.

이는 실제영역과 계산영역 사이에서 좌표변환 함수 $\xi = \xi(x, y)$ 및 $\eta = \eta(x, y)$ 를 도입하여 이루어지며 다음 좌표생성방정식을 수치해석하여 구한다⁽¹¹⁾.

$$g^{11}x_{\xi\xi} + g^{22}x_{\eta\eta} + 2g^{12}x_{\xi\eta} + Px_\xi + Qx_\eta = 0 \tag{2}$$

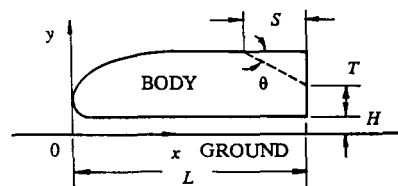


Fig. 1 Two-dimensional vehicle-like body and coordinate system

$$g^{11}y_{\xi\xi} + g^{22}y_{\eta\eta} + 2g^{12}y_{\xi\eta} + Py_{\xi} + Qy_{\eta} = 0 \quad (3)$$

여기서 metric tensor g^{ij} 및 g_{ij} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} gg^{11} &= g_{22} = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2, \\ gg^{12} &= -g^{12} = -(x_{\xi}x_{\eta} + y_{\xi}y_{\eta}), \\ gg^{22} &= g_{11} = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2, \\ g &= J^2 = (x_{\xi}x_{\eta} - y_{\xi}y_{\eta})^2 \end{aligned}$$

위 방정식은 계산영역과 경계에 해당하는 실제영역에서의 경계값을 경계조건으로 하여 계산된다.

$P(\xi, \eta)$, $Q(\xi, \eta)$ 는 격자 제어함수(grid control function)들로서 격자점의 배치를 조정한다.

본 연구에서는 물체의 후미형상이 수직이므로 $\xi = \xi(x)$ 로 하였다. 따라서 식 (2)는 필요없게 되고, 식 (3)은 다음과 같이 간단해진다.

$$g^{11}y_{\xi\xi} + g^{22}y_{\eta\eta} + 2g^{12}y_{\xi\eta} + Py_{\xi} + Qy_{\eta} = 0 \quad (4)$$

여기서 격자조정함수는 경계에서의 격자배치가 계산영역 내부로 선형적으로 영향을 주도록 다음과 같이 하였다⁽¹²⁾.

$$\begin{aligned} P(\xi, \eta) &= -g^{11} \frac{x_{\xi\xi}}{x_{\xi}} \\ Q(\xi, \eta) &= \frac{1}{y_{\eta}} + F^2(\xi, \eta) \\ F^2(\xi, \eta) &= \frac{[(\xi_2 - \xi)F_A(\eta) + (\xi - \xi_1)F_B(\eta)]}{(\xi_2 - \xi_1)} \end{aligned}$$

$$F_A(\eta) = -g^{22} \frac{y_{\eta\eta}}{y_{\eta}} \Big|_{\xi = \xi_1}$$

$$F_B(\eta) = -g^{22} \frac{y_{\eta\eta}}{y_{\eta}} \Big|_{\xi = \xi_2}$$

여기서 ξ_1 과 ξ_2 는 각각 상류와 하류에 해당하는 ξ 의 값을 나타낸다.

2.2 지배방정식의 좌표변환

좌표변환이 이루어지면 이에 따라서 지배방정식의 좌표변환을 수행해야 한다. 본 연구에서는 종속변수는 실제영역에서 정의한 그대로 두고, 독립변수만의 좌표변환을 하였다⁽¹²⁾. 이때 지배방정식 (1)은 다음의 형태로 된다.

$$\begin{aligned} &\frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (b_1^1 U \phi + b_2^1 V \phi) + \frac{\partial}{\partial \eta} (b_1^2 U \phi + b_2^2 V \phi) \right] = \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (J \Gamma_{\phi} g^{11} \frac{\partial \phi}{\partial \xi}) \right. \\ &+ \frac{\partial}{\partial \xi} (J \Gamma_{\phi} g^{12} \frac{\partial \phi}{\partial \eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J \Gamma_{\phi} g^{21} \frac{\partial \phi}{\partial \xi}) \\ &\left. + \frac{\partial}{\partial \eta} (J \Gamma_{\phi} g^{22} \frac{\partial \phi}{\partial \eta}) \right] + S_{\phi} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

$$b_i^j = \begin{bmatrix} b_1^1 & b_2^1 \\ b_1^2 & b_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{\eta} & -x_{\eta} \\ -y_{\xi} & x_{\xi} \end{bmatrix}, \quad J = \begin{vmatrix} x_{\xi} & x_{\eta} \\ y_{\xi} & y_{\eta} \end{vmatrix}$$

Table 1 ϕ , Γ_{ϕ} and S_{ϕ} for governing equations and turbulence model constants

Conservation of	ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
Mass	1	0	0
x-Momentum	U	μ_{eff}	$-\frac{1}{\rho J} (b_1^1 \frac{\partial P}{\partial \xi} + b_1^2 \frac{\partial p}{\partial \eta})$ $+\frac{1}{J^2} (b_1^1 \frac{\partial \mu_t}{\partial \xi} + b_1^2 \frac{\partial \mu_t}{\partial \eta}) (b_1^1 \frac{\partial U}{\partial \xi} + b_1^2 \frac{\partial U}{\partial \eta})$ $+\frac{1}{J^2} (b_2^1 \frac{\partial \mu_t}{\partial \xi} + b_2^2 \frac{\partial \mu_t}{\partial \eta}) (b_1^1 \frac{\partial V}{\partial \xi} + b_1^2 \frac{\partial V}{\partial \eta})$
y-Momentum	V	μ_{eff}	$-\frac{1}{\rho J} (b_2^1 \frac{\partial P}{\partial \xi} + b_2^2 \frac{\partial p}{\partial \eta})$ $+\frac{1}{J^2} (b_1^1 \frac{\partial \mu_t}{\partial \xi} + b_1^2 \frac{\partial \mu_t}{\partial \eta}) (b_2^1 \frac{\partial U}{\partial \xi} + b_2^2 \frac{\partial U}{\partial \eta})$ $+\frac{1}{J^2} (b_1^1 \frac{\partial \mu_t}{\partial \xi} + b_1^2 \frac{\partial \mu_t}{\partial \eta}) (b_2^1 \frac{\partial V}{\partial \xi} + b_2^2 \frac{\partial V}{\partial \eta})$
Turbulent kinetic energy	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G - C_D \rho \epsilon$
Dissipation rate of k	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\epsilon}}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$

Note : $G = \frac{\mu_t}{J^2} [2\{b_1^1 \frac{\partial U}{\partial \xi} + b_1^2 \frac{\partial U}{\partial \eta}\}^2 + (b_2^1 \frac{\partial V}{\partial \eta} + b_2^2 \frac{\partial V}{\partial \eta})^2] + (b_1^1 \frac{\partial V}{\partial \xi} + b_1^2 \frac{\partial V}{\partial \eta} + b_2^1 \frac{\partial U}{\partial \xi} + b_2^2 \frac{\partial U}{\partial \eta})^2$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \quad \mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$C_{\mu} = 0.09, \quad C_D = 1.0, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_{\epsilon} = 1.3$$

이고, 각 해당 방정식의 ϕ , Γ_ϕ , S_ϕ 와 난류모델 상수들을 Table 1에 요약하여 나타내었다.

2.3 경계 조건

이상의 지배방정식은 타원형 편미분방정식이며, 이를 해석할 경우에는 경계 조건이 필요하게 된다. 각 경계면에서의 경계조건은 다음과 같다.

(1) 상류 및 외부경계

상류는 물체에서 충분히 떨어진 위치로 여기서는 $x = -1.5L$ 로 하였다. 여기서 $U = U_0$, $V = 0$ 로 하였고 난류 운동에너지는 $k = 10^{-5}U_0^2$ 로 하였다. 한편 소산율은 $\epsilon = C_\mu k^{3/2}/0.001L$ 로 하였다. 따라서 바닥이 고정되는 경우에는 여기서부터 경계층이 형성된다. 또한 물체에서 떨어진 외부경계는 $y = 2.5L$ 로 하고 여기서 경계조건은 입구에서와 같다.

(2) 하류

물체에서 충분히 떨어진 하류에서 각 변수들은 Neuman 조건이 성립되도록 하였다. 여기에서는 $x = 5.3L$ 로 하였다.

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = \frac{\partial V}{\partial \xi} = \frac{\partial k}{\partial \xi} = \frac{\partial \epsilon}{\partial \xi} = 0$$

(4) 물체 표면과 벽면

벽면에서는 no slip 조건을 사용하였으며 벽에 평행한 속도 성분에 대해서는 벽법칙을 사용하였다. 벽에서는 속도분포와 난류량의 변화가 매우 심하므로 조밀한 격자의 분포가 요구된다. 이를 효과적으로 처리하기 위해 벽법칙을 흔히 사용하며⁽¹⁰⁾, 여기서는 비직교좌표계에 적합하도록 처리하였다⁽¹²⁾. 지면이 일정속도 U_0 로 움직일 때는 U 대신 $|U - U_0|$ 로 하여 벽법칙을 사용하였다.

3. 수치 해석

계산 영역으로 변환된 지배방정식을 검사체적에 대해 적분하여 차분화된 대수방정식을 구한다. Staggered grid를 사용하였으며 대류항에 대하여 hybrid scheme을 사용하였다. 가정된 압력분포에 의한 속도장이 연속방정식을 만족시키도록 압력을 보정하는 SIMPLE 알고리즘⁽¹⁰⁾에 의하여 압력을 구하였다. 차분화된 지배방정식은 TDMA 알고리즘에 의해 해를 구하고, 수렴된 해를 얻을 때까지 반복 계산하여 해를 구한다.

수치 해석 알고리즘을 요약하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- (1) 격자계를 생성한다.
- (2) 가정되거나 또는 전 계산단계에서 구한 압력에 의해 U , V 운동량 방정식을 푼다.
- (3) 구해진 속도장으로부터 연속 방정식이 만족되도록 압력을 보정하고 또한 속도를 보정한다.
- (4) k , ϵ 에 대한 차분 방정식을 풀고 그에 따른 점성 계수를 계산한다.
- (5) (2)~(4)의 단계를 수렴된 답을 얻을 때까지 반복 계산한다.

4. 수치계산 결과와 검토

4.1 계산의 신뢰성

이상에서 기술한 계산방법을 Fig. 1에 나타낸 단 순화한 2차원 자동차형 물체 주위의 유동에 적용하여 여러가지 특성을 검토하고자 한다. 이때 물체의 앞부분에서는 매우 얇은 층류경계층이 형성되고, 천이과정을 거쳐 난류 경계층으로 변한다. 이러한 얇은 점성층을 본 연구에서 채택하고 있는 타원형 방정식에 의해 수치해석하기 위해서는 많은 수의 그리드를 경계층 내에 분포시켜야 한다. 더구나 채택한 $k-\epsilon$ 난류모델은 층류에서 난류로의 천이과정을 시뮬레이션할 수 없다. 그러나 본 연구에서 다루고 있는 몽푁한 물체의 유동특성은 주로 전체적인 유동형태와 물체 주위의 압력분포에 따라 결정되므로 앞부분의 경계층의 영향은 그리 크지는 않다고 생각된다. 그래서 본 연구의 예비 연구⁽⁹⁾에서는 유한크기의 평판과 4:1 타원실린더 주위의 점성유동을 다루어 봄으로써 앞부분 경계층의 처리가 전체적인 유동과 특히 물체 표면의 마찰계수 및 압력분포의 예측에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 고찰하였다. 이를 위해서 2차원 포텐셜 유동해석 및 2차원 경계층 해석결과를 활용하여 비교하였다. 이러한 연구결과는 여기서 지면상 상세히 다루기는 어려우나 개략 본 연구의 모형에는 60×60 개의 격자를 배치하면 합리적인 결과를 기대할 수 있었다.

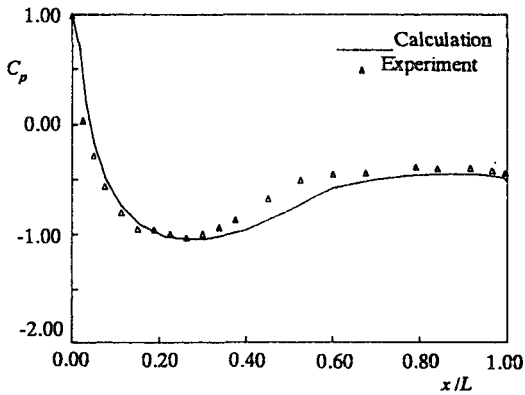
한편 실제 모형에 대한 계산의 신뢰도를 검증하기 위하여 병행된 연구⁽⁸⁾의 실험자료를 활용하였다. Fig. 2에는 Reynolds수가 7.96×10^5 이고 H/L 이 0.0704이며, 경사각이 없이 후미가 모두 수직인 경우, 실험결과와 계산결과를 비교하였다. 전반적인 유동의 형태와 물체 상 하면에서 정압의 분포는 정성적으로 잘 일치하고 있다. 물체의 윗면에서는 중간에서 압력이 약간 적게, 아랫면에서는 앞부분

에서 압력이 높게 예측되었다. 한편 후미의 후류영역에서의 압력은 실험치보다 약간 적게 예측되었다. 이러한 시뮬레이션의 차이는 항력계수와 양력계수에 약간의 오차를 유발한다. 그러나 모형실험에서 예상되는 여러가지 오차의 가능성을 생각할 때 이러한 결과의 차이는 앞으로 실험과 수치계산공히 세심한 검토가 요망된다. 본 연구에서는 일단 계산결과가 합리적이라고 생각하고 이를 토대로 다

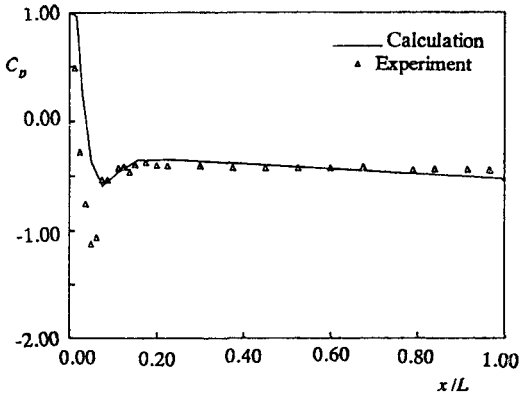
음의 수치해석적인 연구를 수행하였다.

4.2 지면효과

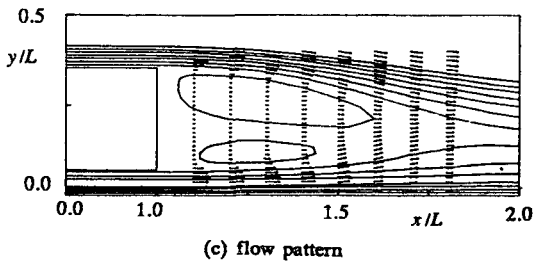
자동차의 모형을 풍동에서 시험할 경우 실제로 움직이는 지면을 시뮬레이션하기가 매우 어렵다. 그래서 보통 고정된 평판을 사용한다. 그러나 이때 평판 위에 경계층이 형성되기 때문에 이를 가급적 피해야 하며, 실험결과를 적절히 보정해야 한다. 이에 관한 연구는 과거에 수행된 바 있으나⁽¹³⁾ 본 연구에서는 수치해석적으로 다루어보았다. 여기서는 모형과 지면의 간격을 $H/L=0.0704, 0.037, 0.020$ 세 가지로 변화시키고, 고정된 지면과 자동차와 동일 속도로 움직이는 지면에서 전체적인 유동과 항력 및 양력의 변화를 살펴보았다. Reynolds수는 가상적인 풍동시험에 해당하는 2.65×10^5 및 가상적인 실제의 경우인 4.0×10^6 의 두 가지를 택하였다.



(a) upper surface

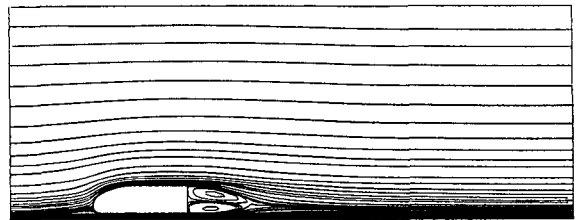


(b) lower surface

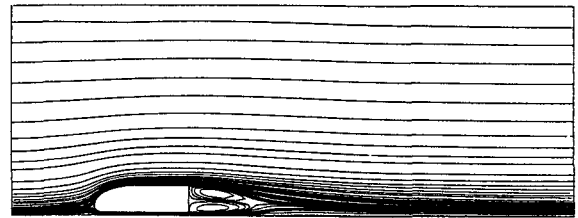


(c) flow pattern

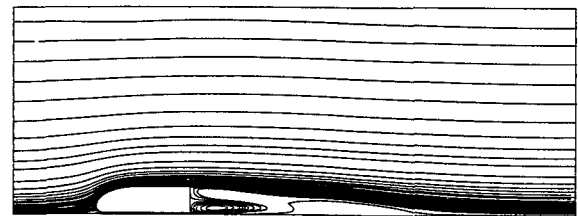
Fig. 2 Simulated and measured pressure distributions over the model and flow pattern($Re=7.96 \times 10^5$)



(a) $H/L=0.0704$



(b) $H/L=0.037$



(c) $H/L=0.020$

Fig. 3 Changes in simulated flow patterns over the body with gaps($Re=2.65 \times 10^5$; fixed grounds)

Fig. 3에는 Reynolds수가 2.65×10^5 이고, 고정된 지면의 경우 물체주위의 유동형태를 나타내었다. 유동은 물체의 상반부와 하반부로 갈려서 흐르며, 물체의 후미에는 쌍으로 된 재순환 영역이 나타난다. 여러가지 변수에서 전반적인 유동형태는 이와 동일하나, Fig. 3에서와 같이 지면과의 간격이 줄어들수록 재순환 영역의 길이가 길어지면서 지면쪽으로 약간 치우친다. 그러나 Re 와 지면경계조건은 유동형태에는 큰 영향을 미치지 않는다. 계산된 항력계수 및 양력계수를 Table 2에 수록하였다. 지면경계조건에 영향을 표에서 비교할 수 있으며 각 3번째 열에는 지면이 움직일 때 고정된 지면에 비하여 계수들의 증감되는 양의 퍼센트를 나타내었다. 예를들어 $Re=2.65 \times 10^5$ 이고 H/L 이 0.0704인 경우, 이는 앞서 언급한 대로 모형시험이 이루어지는 상황에 가장 가까운 경우인데, 이 경우 저항계수는 0.632이고 양력계수는 0.735이다. 이는 실제 3차원 물체의 경우보다는 높은 값을 나타낸다. 이러한 계수들은 주로 압력분포에 의해서 결정되며, 마찰저항에 의한 항력계수 성분은 0.072에, 즉 12% 미만임을 알 수 있다. 지면이 움직인다면

저항계수는 2.9% 증가하고 양력계수는 20% 감소함을 나타내었다. 이러한 계수의 증감은 주로 압력분포의 변동에 의하여 이루어지고, 특히 물체의 후미, 즉 후류역류구역에서 정압의 변동에 의해 결정된다고 하겠다. 이러한 경향은 H/L 를 0.037 및 0.020으로 감소시켜도 마찬가지이며, 저항계수의 증가율은 더욱 증가하고, 양력계수의 감소율은 떨어진다. 전체 유동형태는 비슷하다 하더라도, 물체의 표면과 지면에서 정압분포를 살펴보면 상당히 차이가 나며, 이에따라 항력과 양력이 변한다. 이러한 압력분포의 변화는 주로 지면쪽의 물체바닥에서 상당히 크나 물체의 윗면에서는 많은 변화가 없다. Fig. 4에는 $Re=2.65 \times 10^5$ 일 때 $x/L=1.0$ 즉 지면과 물체 사이의 출구위치에서 속도분포를 비교하였다. 지면이 고정되면 지면에서 속도가 영에서부터 증가하는 경계층을 형성한다. 지면이 움직이는 경우에는 속도는 $x/L=0.0$ 근처에서는 1.0에서부터 감소하는, 그러나 전 영역에서 Fig. 4에서와 같이 1.0에서 증가하는 속도분포를 보인다. 한편 물체의 아랫면에서는 거의 변화가 없으므로 지면이 움직일 때보다 고정되는 경우에 흐르는 유량이 같

Table 2 Ground effects on drag and lift coefficients

Re	H/L	BC	C_D	C_L	FPD	BPD	SKF
2.65×10^5	0.0704	M	0.632	0.735	0.022	0.538	0.072
		F	0.614	0.883	0.027	0.515	0.072
		%	2.9	-20.0	-0.8	3.6	0.1
2.65×10^5	0.037	M	0.634	1.241	0.047	0.519	0.068
		F	0.595	1.470	0.053	0.476	0.066
		%	6.0	-18.4	-0.9	6.7	0.2
2.65×10^5	0.020	M	0.560	1.987	0.082	0.414	0.065
		F	0.506	2.316	0.092	0.355	0.059
		%	9.7	-16.5	-1.8	10.5	1.0
4.0×10^6	0.0704	M	0.606	0.601	0.031	0.534	0.041
		F	0.593	0.681	0.032	0.520	0.041
		%	2.1	-13.4	-0.2	2.3	0.0
4.0×10^6	0.037	M	0.610	1.015	0.050	0.520	0.041
		F	0.602	1.089	0.057	0.507	0.038
		%	1.4	-7.2	-1.1	2.1	0.4
4.0×10^6	0.020	M	0.563	1.574	0.090	0.435	0.039
		F	0.491	1.751	0.093	0.362	0.037
		%	14.6	-10.3	-0.5	14.8	0.3

Note : Values in () denote percentage of increased amount of coefficients when the ground moves.

소한다. 이러한 관계로 지면이 고정될 때 물체의 아랫면에서의 압력분포가 증가하고 따라서 후류에서의 압력도 증가한다. 이러한 압력분포의 변화는 전체적으로 저항을 증가시키고 양력을 감소시키는 역할을 한다. 실제로 3차원 자동차 형상에서는 이 보다 변화량이 적다고 생각되나 풍동시험시 적절한 방법에 의해서 이러한 지면의 효과를 고려해야 하겠다.

Fig. 5에는 Table 2의 결과를 그림으로 나타내어 이러한 지면효과를 전체적으로 나타내었다. 먼저 물체와 지면이 가까워지면 저항은 감소하고 양력은 상당히 증가한다. 이러한 경향은 참고문헌(13)의 실험적 연구결과와 정성적으로 일치한다. 그러나 참고문헌(13)의 연구에서는 지면이 고정된 경우만 다루었기 때문에 이러한 계수의 변화를 지면경계층의 효과, 즉 δ^*/H 의 변화로 설명하고 있다. Fig. 5에서는 지면이 움직여서 지면경계층의 영향이 없는 경우 지면효과가 지면이 고정되어 지면경계층의 효과가 포함된 경우와 일치한다. 한편 Reynolds수를 4.0×10^6 으로 증가시켜도 이러한 변

화는 동일하며, 단지 양적으로 적음을 확인할 수 있다.

4.3 경사각의 영향

한편 물체의 뒷면 경사각의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1에서와 같이 물체 뒷쪽의 $S/L=0.229$ 위치에서 후미를 변화시켜 뒷면 경사각 θ 만을 변화시켰다. 뒷면 경사각의 영향은 실제 Reynolds수에서 움직이는 지면의 효과를 고려한 난류유동 해석으로 각도의 변화에 따른 항력 및 양력의 변화를 살펴보았다.

Fig. 6에는 경사각에 따라서 후류 역류 형태를 비교하였다. 각도가 작을 때는 뒷면에서 유동박리가 이루어지지 않고 뒷 수직 후미에서만 두 개의 재순환 역류구역이 이루어진다. 그러나 각도가 25도일 때는 $x/L=0.9$ 에서 유동이 박리된다. 이후 각도가 증가하면 급히 박리 지점이 앞으로 움직이고 전체적인 유동형상은 심하게 변하여 경사진 뒷면에 재순환 영역이 형성된다.

이러한 유동의 변화에 따라서 물체 주위의 압력 분포는 상당히 변한다. 각도에 따른 항력계수와 양력계수의 변화 및 저항계수의 성분들을 Fig. 7과

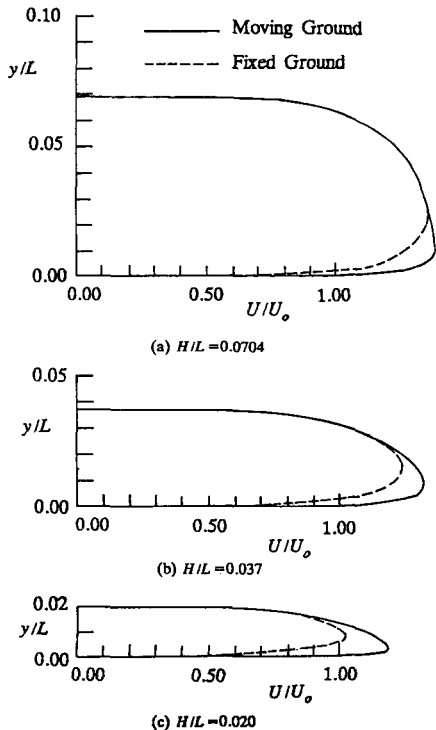


Fig. 4 Changes in velocity distribution with gaps and boundary condition ($Re=2.65 \times 10^5$)

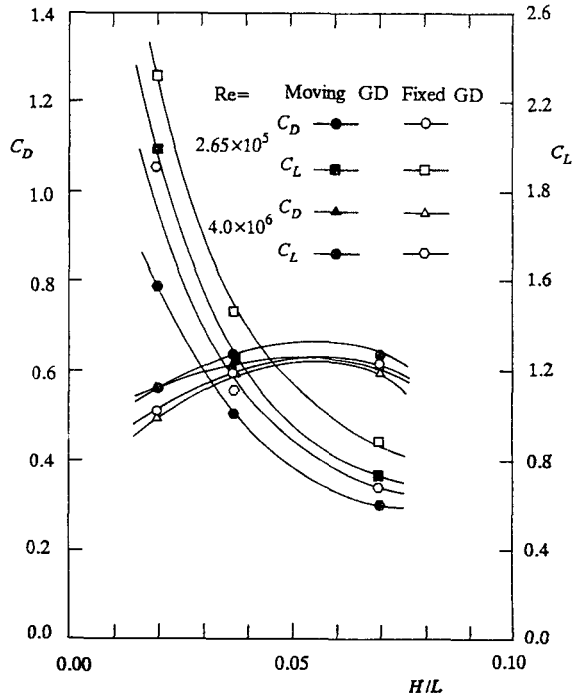


Fig. 5 Grounds effects on drag and lift coefficients of the body

Table 3에 나타내었다. 경사각이 증가하면 주로 물체 하면의 정압이 상당히 변하고, 후미의 정압이 증가한다. 이에 따라 물체의 상하면에 의한 압력저항은 증가하며, 이러한 증가량은 주로 뒷쪽 경사면의 압력변화에 따라 이루어진다. 그러나 물체 후미의 압력에 의한 저항은 급히 감소한다. 이는 실제

로 정압 자체도 증가하고 후미의 수직벽의 두께도 얇아지기 때문이다. 결과적으로 압력에 의한 물체의 저항력은 경사각이 22도 전후에서 최소가 된다. 여기에서 마찰에 의한 저항은 앞서와 마찬가지로 약 10% 미만이 되며 각도에 따라 거의 일정하다. 한편 양력계수는 저항계수와는 반대로 각도에 따라

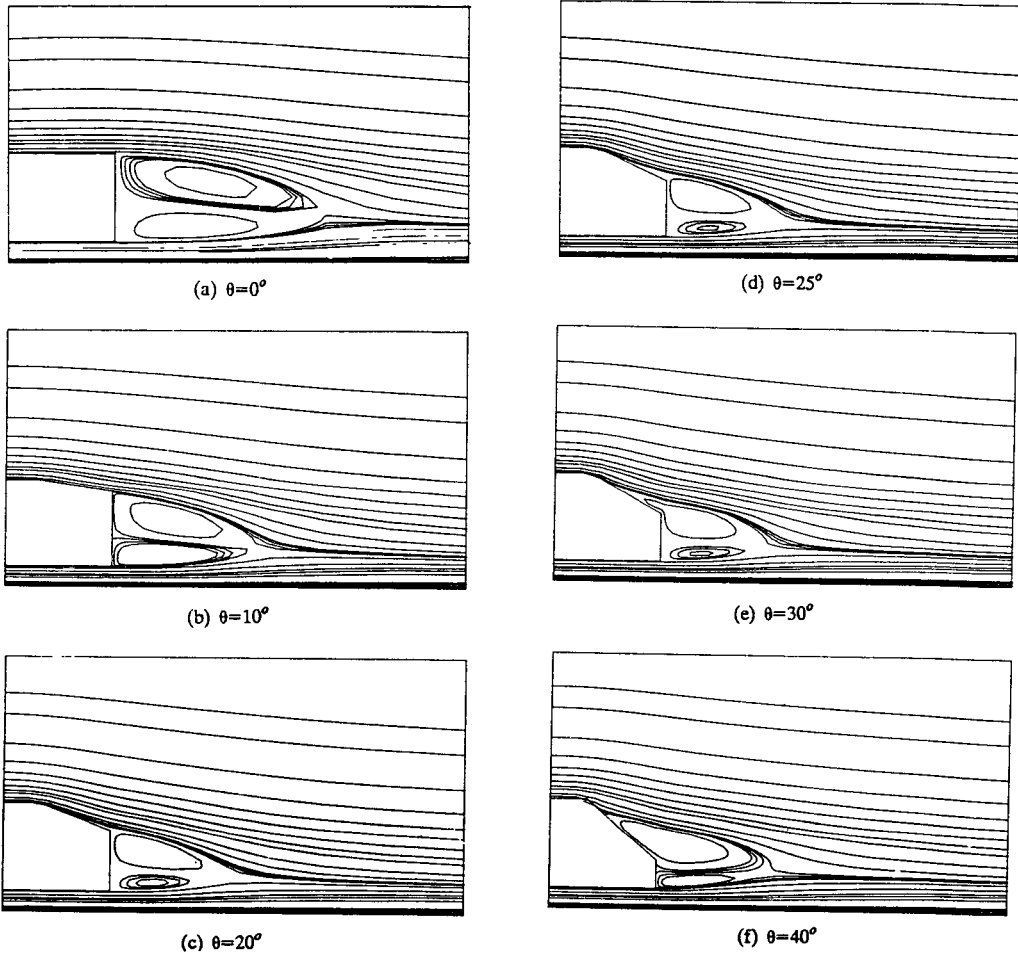


Fig. 6 Changes in simulated flow patterns over the body with various slant-angles

Table 3 Effects of slant angles on drag and lift coefficients

θ	FPD	BPD	SKF	FBPD	C_D	C_L
0	0.031	0.534	0.041	0.565	0.606	0.601
5	0.054	0.425	0.041	0.479	0.520	1.154
10	0.091	0.323	0.041	0.414	0.455	1.713
20	0.189	0.162	0.039	0.351	0.391	2.529
25	0.231	0.138	0.039	0.368	0.407	2.525
40	0.439	0.108	0.036	0.547	0.583	1.740

서 증가하여 22도 근처에서 최대가 되었다가 이후 감소하는 경향을 보인다. 이는 주로 아랫면의 압력 변동에 의해 지배되었다. 이와같이 항력과 양력은 주로 물체의 경사면과 후미 수직부분의 정압력 분포와 물체 아랫면의 압력의 변화에 따라 정해진다. 이러한 제반 현상은 경사각도에 따른 유동박리점의 변화, 이에 따른 정압분포의 변화에 기인한다고 생각된다.

한편 경사각을 25도로 고정하고 경사면의 높이 T/L 를 0.153, 0.180, 0.207로 변화시켜 보았다. 높이의 증가에 따라서 Table 4에 나타낸 대로 저항은 증가하고 양력은 감소하였다. 높이가 증가하면 후류의 정압과 밑면의 정압이 감소한다. 높이에 따른 항력계수와 양력계수의 변화는 주로 아랫면과

수직 후미에서 압력변화에 의해 이루어짐이 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 단순화된 2차원 자동차형 물체를 대상으로 수치해석적 연구를 수행하였다. 이상의 연구를 다음과 같이 요약하여 결론을 내린다.

(1) $k-\epsilon$ 난류모델과 body-fitted 좌표계를 사용한 계산방법은 전반적으로 합리적인 결과를 보인다. 그러나 보다 정밀한 실험자료의 확보와 이를 통한 결과의 비교 검토가 요망된다.

(2) 실제 자동차의 속도로 움직인다고 생각해야 하는 지면이 고정됨으로 인하여 항력계수는 약 3% 감소하고, 양력계수는 약 20% 증가한다. 이러한 지면효과는 Reynolds수가 증가하면 다소 감소한다. 또한 지면과 물체의 간격이 가까워지면 항력은 감소하고 양력은 증가한다. 이러한 지면효과는 주로 물체의 바닥과 후미의 정압분포의 변화에 의해 이루어진다. 그러나 전체적인 유동형태는 많이 변하지 않는다.

(3) 물체 후미의 경사각을 증가시키면 약 22도 근처에서 저항계수는 최소치를, 양력계수는 최대값을 나타낸다. 이는 앞서의 결론에서와 같이 물체 바닥과 후미에서 정압분포의 변화에 따른다. 특히 저항은 경사면과 후미 수직면에서, 양력은 아랫면의 정압분포에 지배된다. 마찰저항은 10% 미만이며 형상의 변화에 따라 그 변화가 적다. 경사각을 일정하게 두고 경사면의 높이를 높이면 저항은 증가, 양력은 감소한다. 이와 같은 원리로 압력변화에 의해 결정된다.

후 기

본 연구는 1987년도 학술진흥재단의 학술연구조성비로 지원된 자유공모과제 "자동차의 항력감소 및 외형설계에 관한 기초연구"(연구책임자: 유정

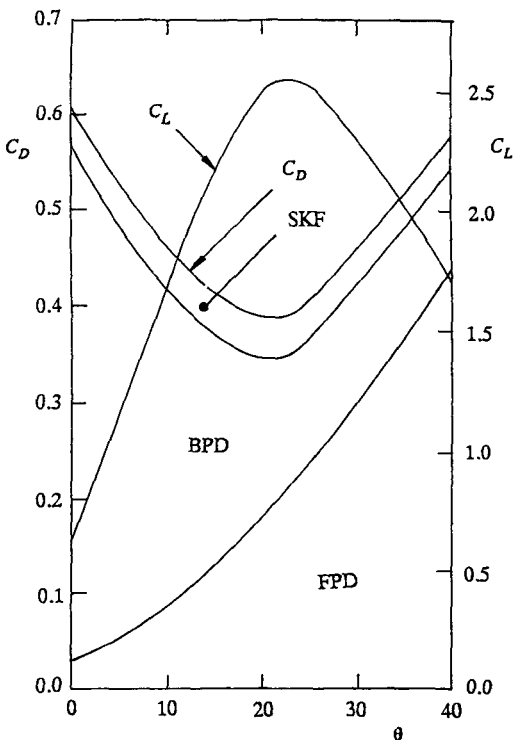


Fig. 7 Variation of drag and lift coefficients with slant-angles

Table 4 Effects of tail height on drag and lift coefficients

T	FPD	BPD	SKF	FBPD	C_d	C_L
0.153	0.247	0.092	0.037	0.339	0.376	2.729
0.179	0.231	0.138	0.039	0.368	0.407	2.525
0.207	0.185	0.192	0.039	0.377	0.416	2.333

열)를 통해 이루어졌음을 밝히며, 이에 관계자 여러분에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Ed., G. Sovran, T. Morel and W.T. Mason, 1978, "Aerodynamic Drag Mechanism of Bluff Bodies and Road Vehicles", Plenum Press, New York.
- (2) 강신형, 정석호, 김성훈, 1987, "자동차의 공기역학", 한국자동차공학회지, 제 9 권, 제 3 호, pp. 46~54.
- (3) 한태영, 1988, "A Navier-Stokes Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flows around a Bluff Body in Ground Proximity", 88국내외 한국과학기술자 학술회의 교재, 한국과학기술 단체총연합회.
- (4) T. Kobayashi, K. Kotoh and N. Taniguchi, 1986, "Numerical Prediction of the Flow around a Road Vehicle-Comparisons between Numerical Solutions based on the $k-\epsilon$ Model", 동경대학 생산연구, 제38 권, 제 2 호.
- (5) 이동호, 강신형, 1984, "패널법을 이용한 자동차의 외형설계", 한국자동차공학회지, 제21권, 제 2 호, pp. 9~17.
- (6) 최도형, 최철진, 1986, "점성-비점성 유동 반복계산 방법을 이용한 2차원 자동차 모형의 공력 특성 예측", 한국자동차공학회지, 제 8 권, 제 1 호, pp. 52~61.
- (7) 최장섭, 최도형, 박승오, 1988, "자동차 중앙대칭 단면 부근의 3차원경계층 계산", 한국자동차공학회지, 제10권, 제 2 호, pp. 61~69.
- (8) 유정열, 김사량, 강신형, 이택식, 김응서, 백세진, 1989, "단순화한 2차원 자동차형 물체 주위 유동에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 제13권 제 1 호, pp. 178~189.
- (9) 이영림, 1988, "지면효과를 고려한 2차원 물체 주위의 난류유동에 대한 수치해석", 서울대 대학원 석사학위 청구논문.
- (10) S.V. Patankar, 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill.
- (11) J.F. Thompson, 1985, "Grid Generation Techniques in Computational Fluid Dynamics, AIAA Jour. 22(11).
- (12) H.C. Chen and V.C. Patel, 1985, "Calculation of Trailing-Edge, Stern and Wake Flows by a Time-Marching Solution of the Partially-Parabolic Equations", IIHR Rept. 285, The Univ. of Iowa.
- (13) W.T. Mason, 1973, "Ground-Effects on the Aerodynamic Characteristics of Automobile Models An Examination of Wind-Tunnel Test Technique", GMR-1378, General Motors Corp.