

버스형상 무딘물체의 공력특성에 관한 수치해석적 고찰 - 난류모델과 이산화법의 영향 -

김민호* · 국종영 · 천인범

기아자동차

A Numerical Study on the Aerodynamic Characteristics of a Bus-Like Bluff Body - Effect of Turbulence Model and Discretisation Scheme -

Minho Kim* · Jongyoung Kuk · Inbum Chyun

Commercial Vehicle R&D Center, Kia Motors Corp., 700 Naebang-dong, Seo-gu, Gwangju 502-711, Korea
(Received 18 November 2002 / Accepted 16 April 2003)

Abstract : With the advent of high performance computers and more efficient numerical algorithms, computational fluid dynamics(CFD) has come out as a modern alternative for reducing the use of wind tunnels test in automotive engineering. However, in spite of the fact that many competent researchers have made all their talents in developing turbulence model over since the past dozen or more years, it has been an important impediment in using the CFD effectively to design machinery and to diagnose or to improve engineering problems in the industry since the turbulence model has been acting as the Achilles' tendon in aspect of the reliability even to this time. In this study, Reynolds-averaged Navier-Stokes equations were solved to simulate an incompressible turbulent flow around a bus-like bluff body near ground plane. In order to investigate the effect of the discretisation schemes and turbulence model on the aerodynamic forces several turbulence models with five convective difference schemes are adopted. From the results of this study, it is clear that choice of turbulence model and discretisation scheme profoundly affects the computational outcome. The results also show that the adoption of RNG k- ϵ turbulence model and nonlinear quadratic turbulence model with the second order accurate discretisation scheme predicts fairly well the aerodynamic coefficients.

Key words : Computational fluid dynamics(전산유체역학), Turbulence model(난류모델), Discretisation scheme(이산화 스킴), Aerodynamic coefficient(공력계수)

1. 서론

고속으로 주행하는 자동차의 공력특성은 연료소비율 및 조정 안정성 등에¹⁾ 지대한 영향을 미치므로 설계 초기 단계에서부터 신중히 고려해야 하는 주요 설계 항목이다.¹⁻³⁾

따라서 차량의 저항을 저감하려는 노력의 일환으로 풍동 및 전산유체역학(computational fluid dynamics) 기법을 이용한 많은 연구들이 수행되고 있으며, 승용차량의 경우 이러한 연구를 바탕으로 매끄러운 외형설계에 매진한 바 차량의 연비저감 및 고성능화에 필수 요소인 저 저항 차량이 개발되고 있다.⁴⁾ 최근에는 컴퓨터의 발달 및 해석 알고리즘의 비약적인 진보로 인해 전산유체역학 기법을 이용하

*To whom correspondence should be addressed.
amcae900@empal.com

여 차량 개발 기간을 단축하고 실험을 통해 얻기 힘든 많은 유용한 정보들을 얻고 있다. 한편 전산유체역학 해석에 있어서 격자 생성 기법 및 수치해석 알고리즘 그리고 난류계산 모델은 전산유체역학의 3대 요소라 할만큼 중요한 항목이며 더불어서 이에 대한 많은 연구들이 수행되었다.⁵⁻⁸⁾ 이중 격자 생성 기법과 해석 알고리즘은 정확하고 편리한 기법들이 이미 개발되어 있고 현재도 많은 연구들이 진행중이다. 그렇지만, 지난 십 수년 동안 전산유체역학 기법을 이용한 해석결과의 정확성을 향상시키기 위하여 난류 계산 모델 개발에 많은 연구를 진행해왔음에도 불구하고 아직까지도 난류계산 모델은 전산유체역학의 신뢰성에 아킬레스건으로 작용하고 있어서 신뢰할 만한 유용한 결과를 도출하는데 저해요인이 되고 있다.

전산유체역학 기법을 이용한 기존의 연구들⁹⁻¹¹⁾은 주로 표준 k-ε 난류모델과 일차 정확도 이산화기법(first-order accurate discretisation scheme)인 UD(Upwind Differencing) 스킴을 적용하여 해를 구하고 있으며 현재까지도 대부분의 주요한 공학적인 계산에 널리 활용되고 있다. 이는 표준 k-ε 난류모델을 적용한 연구 사례들이 다른 난류모델에 비해 풍부하여 기존 연구 결과들과 손쉽게 비교 분석이 가능하고 무엇보다도 해의 안정성과 수렴성이 뛰어나기 때문으로 판단된다. 그러나, Han¹⁰⁾과 명현국¹¹⁾ 그리고 허남건¹²⁾ 등에 의해 수행된 Ahmed Body 주위의 유동에 대한 연구결과 표준 k-ε 난류모델의 적용은 유동장의 경향은 비교적 실험결과와 유사하게 예측하지만 공력특성을 대변하는 항력계수는 실험값보다 최대 2배 정도 과도하게 예측하였다. 또한 대류항 이산화법으로는 UD(Upwind Differencing) 스킴과 같은 일차 정확도 상류 차분도식, CD(Central Differencing), LUD(Linear Upwind Differencing), MARS(Monotone Advection and Reconstruction Scheme) 등과 같은 이차 정확도 차분도식, QUICK(Quadratic Upstream Interpolation of Convective Kinematics)과 같은 삼차 정확도 차분도식 등이 개발되어 있으며 저차 차분도식인 UD를 적용한 경우에 비해 고차 차분도식인 QUICK을 적용시 항력계수 예측성능이 크게 개선되어 수치해의 정확도를

높이기 위해서는 대류항 이산화에 고차 차분도식을 사용하는 것이 바람직하다고 보고¹³⁾ 한 바 있다. 본 연구에서는 이러한 배경 하에 Barlow 등¹⁴⁾ 이 실험적으로 고찰한 무딘 물체(bluff body)에 대해 난류모델과 이산화법에 따른 공력특성 변화를 고찰하였다.

2. 수치해석

본 연구는 유선화 된 버스 바디 주위의 난류 유동장 고찰을 위한 기초연구로써 버스 바디와 유사한 치수를 지닌 무딘 물체를 연구대상으로 선정하였고 난류모델과 이산화법의 변화가 항력 계수, 양력 계수, 모멘트계수 등에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 무딘 물체 하부와 지면과의 간격변화에 따른 공력 예측결과를 실험결과와 비교해 봄으로서 난류모델과 이산화법의 변화에 따른 정성적인 예측특성을 평가하였다.

2.1 난류모델의 수식화

본 연구에서는 난류모델과 대류항 이산화법 변화가 공력특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 표준 k-ε 난류모델과 복잡한 3차원 전단유동에서 일어나는 충돌분류, 박리, 재부착, 재순환 유동 등을 비교적 잘 예측한다고 보고된 RNG k-ε 난류모델 그리고 nonlinear quadratic k-ε 난류모델 등을 적용한 해석결과를 실험결과와 비교하였다. 그리고 대류항 이산화법으로는 앞서 기술한 저차 및 고차 스킴 등을 적용하여 각각의 대류항 이산화법에 따른 공력특성을 고찰하였다. 본 절에서는 각 난류모델의 지배방정식과 그 특성들을 정리하였다.

2.1.1 표준 k-ε 난류모델

표준 k-ε 난류모델(이하 STD 난류모델)의 지배방정식은 다음과 같다.

-난류 운동에너지

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_j k} - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}) = \mu_t (P + P_B) - \rho \epsilon - \frac{2}{3} (\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (1)$$

where $\mu_{eff} = \mu + \mu_t, P = 2 S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

- 난류 운동에너지 소산을

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) \\ &= C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \mu_t P + C_{\epsilon 3} \frac{\epsilon}{k} \mu_t P_B \\ & \quad - \frac{2}{3} C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \\ & \quad - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2)$$

2.1.2 RNG k-ε 난류모델

RNG k-ε 난류모델(이하 RNG 난류모델)은 STD 난류모델의 난류 운동에너지 지배방정식과 동일하며 STD 난류모델의 난류 운동에너지 소산을 지배방정식인 식 (2)의 오른쪽 항에 다음의 변형항이 추가된 모델이다.

$$\frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \frac{\rho \epsilon^2}{k}$$

where $\eta = S \frac{k}{\epsilon}, S = (2 S_{ij} S_{ij})^{1/2}$

S_{ij} 는 변형률 텐서 성분을 의미하며 S 는 변형률의 크기를 의미한다.

2.1.3 Nonlinear quadratic k-ε 난류모델

Nonlinear quadratic k-ε 난류모델⁵⁾(이하 QUAD 난류모델)의 레이놀즈 스트레스에 대한 구성방정식은 식 (3)과 같으며 Table 1과 Table 2에는 각 난류모델의 경험상수를 나타내었다.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} &= \frac{2}{3} \delta_{ij} - \frac{\mu_t}{k} S_{ij} + \\ & C_1 \frac{\mu_t}{\epsilon} [S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} S_{kl} S_{kl}] \\ & + C_2 \frac{\mu_t}{\epsilon} [\Omega_{ik} S_{kj} + \Omega_{jk} S_{ki}] \\ & + C_3 \frac{\mu_t}{\epsilon} [\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl}] \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 각각의 상수들은 다음과 같다.

Table 1 Value assigned to turbulence model coefficients

구분	STD	RNG	QUAD
C_μ	0.09	0.085	0.09
C_ϵ	1.44	1.42	1.44
C_ϵ	1.92	1.68	1.92
C_ϵ	1.44	1.42	1.44
C_ϵ	-0.33	-0.387	-0.33
σ_k	1.0	0.719	1.0
σ_ϵ	1.219	0.719	1.219

Table 2 Additional coefficient of QUAD model

A_0	0.667	A_3	0.9	C_{NL3}	4.75
A_1	1.25	C_{NL1}	0.75	C_{NL6}	1000
A_2	1	C_{NL2}	3.75	C_{NL7}	1

$$C_\mu = \frac{A_0}{A_1 + A_2 S + A_3 \Omega}$$

$$C_1 = \frac{C_{NL1}}{(C_{NL6} + C_{NL7} S^3) C_\mu}$$

$$C_2 = \frac{C_{NL2}}{(C_{NL6} + C_{NL7} S^3) C_\mu}$$

$$C_3 = \frac{C_{NL3}}{(C_{NL6} + C_{NL7} S^3) C_\mu}$$

여기서

$A_0, A_1, A_2, A_3, C_{NL1}, C_{NL2}, C_{NL3}, C_{NL6}, C_{NL7}$ 등은 실험 상수이다. 대부분의 유동은 비등방성(anisotropy)을 갖는데 앞에서 기술한 난류 모델들은 이점을 고려하고 있지 않다. QUAD 난류모델은 비교적 최근에 개발된 모델이며 비선형 eddy viscosity 모델로서 레이놀즈 스트레스와 변형률의 관계에 비선형성을 부여한 모델이다.

2.2 Reference 모델 및 격자생성

본 연구에서는 난류모델과 대류항 이산화법에 따른 영향을 구체적으로 알아보기 위해 Barlow 등이 실험적으로 고찰한 바 있는 버스바디 모델과 유사한 스케일 모델 주위의 유동에 대하여 공기역학적 특성을 고찰하였다. 이 문헌에는 공기역학적 계수에 대한 상세한 실험결과와 실험모델에 대한 구체적인 치수 등이 기술되어 있으므로 해석결과와 정량적인 비교가 가능하다. 또한 바디 하부와 지면과의 간극변화에 따른 정성적인 경향성 고찰도 수행

할 수 있으므로 난류모델과 이산화법에 따른 공력 특성 해석기법을 정립하기 위한 기준모델로 채택하였다.

Fig. 1에는 기준모델의 치수를 도시하였다. 실험이 수행된 풍동의 높이는 2362mm이고 폭은 3363mm이며 난류 강도는 0.21%이다. 입구 유속은 62.6m/s(140m.p.h)이며 전두부 단면적의 제곱근을 기준으로 한 Reynolds 수는 1.75×10^6 이다. 실험조건을 재현하기 위하여 해석모델 격자계의 치수를 풍동의 실제 치수로 모델링하였고 입구유속 및 난류 레벨을 동일하게 적용하였다. 본 연구 목적이 해석의 신뢰성 고찰이므로 해석의 목적에 맞게 246여 만개의 큰 모델을 생성하였다.

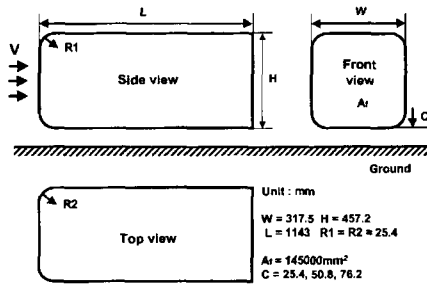


Fig. 1 Dimensions of reference model

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 항력 예측 특성

Table 3부터 Table 5에는 난류모델과 대류항 이산화법 변화에 따른 공력계수 해석결과를 나타내었다. Table 3에는 항력계수 예측결과와 오차를 나타내었고 항력계수 실험값은 0.2742이다. 전반적으로 난류모델과 이산화법의 변화에 따라 실험결과에 비해 최소 6%에서 170%정도의 오차를 나타내고 있으며 해석결과가 전체적으로 실험결과에 비해 과대하게 예측되었다.

Fig. 2에 도시한 바와 같이 STD 난류모델을 적용한 경우 바디 후미 상단과 하단부에 인접한 영역에서 재순환 유동이 형성되고 있으며 하류의 흐름은 지면방향으로 향하는 속도성분이 지배적이다. 또한 바디 하부와 지면사이를 통과한 흐름이 하류로 충분히 발달하지 못하고 역 흐름이 발생하였다. 후미 하단부에는 난류 운동 에너지가 상대적으로 큰 값을 갖는 와류가 형성되고 있으며 전두부 곡률 부위의 난류 운동 에너지도 과도하게 예측하기 때문에 STD 난류 모델을 사용한 경우에는 대류항 이산화법을 위해 어떠한 이산화 스킴을 사용하더라도 90% 이상의 오차를 나타내어 정확한 항력계수 예측에는 실패함을 알 수 있었다. 반면 RNG와 QUAD 난류 모델을 적용한 경우 바디 하부와 지면사이를 통과하는 유동이 하류쪽으로 보다 발달되어 있으며 하부

Table 3 Variation of drag coefficient

Scheme	Turbulence model	CFD (CD)	ΔCD	Error (%)
UD	STD	0.6486	0.3744	136.5
	RNG	0.4479	0.1737	63.3
	QUAD	0.5153	0.2411	87.9
CD	STD	0.7490	0.4748	173.2
	RNG	0.3740	0.0998	36.4
	QUAD	0.4065	0.1323	48.3
MARS	STD	0.7401	0.4659	169.9
	RNG	0.2971	0.0229	8.4
	QUAD	0.2902	0.0160	5.8
LUD	STD	0.7469	0.4727	172.4
	RNG	0.3022	0.0280	10.2
	QUAD	0.2926	0.0184	6.7
QUICK	STD	0.5270	0.2528	92.2
	RNG	0.3017	0.0275	10.0
	QUAD	0.3403	0.0661	24.1

주1) $\Delta CD = CFD(CD) - EXP(CD)$, $EXP(CD) = 0.2742$

주2) $Error(\%) = \frac{CFD(CD) - EXP(CD)}{EXP(CD)} \times 100$

Table 4 Variation of lift coefficient

Scheme	Turbulence model	CFD (CL)	ΔCL	Error (%)
UD	STD	-0.1875	0.0282	-13.1
	RNG	-0.1999	0.0158	-7.3
	QUAD	-0.2024	0.0133	-6.2
CD	STD	-0.1708	0.0499	-20.8
	RNG	-0.2005	0.0152	-7.0
	QUAD	-0.1936	0.0221	-10.2
MARS	STD	-0.1840	0.0317	-14.7
	RNG	-0.2038	0.0119	-5.5
	QUAD	-0.1855	0.0302	-14.0
LUD	STD	-0.1772	0.0385	-17.8
	RNG	-0.2031	0.0126	-5.8
	QUAD	-0.1854	0.0303	-14.0
QUICK	STD	-0.2051	0.0106	-4.9
	RNG	-0.2223	-0.007	3.1
	QUAD	-0.1954	0.0203	-9.4

주1) $\Delta CL = CFD(CL) - EXP(CL)$, $EXP(CL) = -0.2157$

주2) $Error(\%) = \frac{CFD(CL) - EXP(CL)}{EXP(CL)} \times 100$

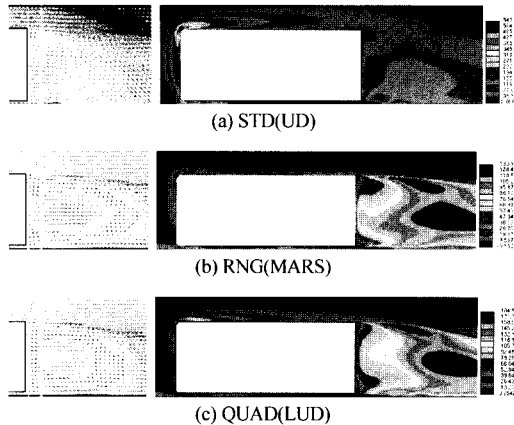


Fig. 2 Velocity vectors and distribution of turbulent kinetic energy at rear wake region

에서 상승하는 흐름과 상부에서 하강하는 흐름이 만나 상류와 하류쪽으로 각각 분지되는 영역이 발생하였다. 상단부와 하단부에서 발생하는 와류의 세기 또한 상대적으로 크게 감소되어 있으며 전반적인 난류 운동 에너지 분포도 유사하였다.

이차 정확도 이산화법인 MARS, LUD스킴과 삼차 정확도 이산화법인 QUICK 스킴을 채택할 경우 STD 난류모델을 제외한 나머지 난류모델의 적용시 UD스킴을 사용한 결과보다 실험결과에 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 CD 스킴을 제외한 이차 정확도 및 삼차 정확도 이산화법을 적용한 경우 RNG난류모델과 QUAD 난류모델은 약 10%이내의 오차를 보여 항력계수 예측시 우수한 예측성능을 나타내었다. Shih¹⁵⁾등이 제안한 QUAD난류모델의 경우 이차 정확도 이산화법을 채택할 때 7%이내의 오차를 보이거나 삼차 정확도 이산화법을 사용할 경우 오히려 오차가 크게 발생하였다. 따라서 고차 정확도 이산화법을 사용하는 것이 항상 보다 정확한 예측결과를 도출하는 것은 아니며 채택된 난류모델 또한 공력 예측 결과에 민감하게 영향을 미침을 알 수 있었다.

3.2 양력 예측 특성

Table 4에는 난류모델과 이산화법 변화에 따른 양력계수의 해석결과를 나타내었다. 실험결과에 의하면 양력계수는 -0.2157로서 다운포스(down force)가 작용하고 있으며 해석결과에서도 음의 값을 가

져 다운포스가 발생함을 볼 수 있다. 항력계수의 예측과는 반대로 실험결과에 비해 전반적으로 작게 예측되었고 오직 QUICK 스킴에 RNG 난류모델을 적용한 경우만 실험 값보다 다소 크게 예측되었다.

앞에서 기술한 항력계수 예측에 가장 큰 오차를 나타낸 STD 난류모델의 적용시 삼차 정확도 이산화법인 QUICK 스킴을 제외한 나머지 스킴을 채택할 경우 양력계수의 예측에서도 여전히 13% 이상의 오차를 보이고 있다. RNG 난류모델의 경우 이산화법에 관계없이 모두 8%이내의 오차를 보여 항력계수 및 양력계수 모두 우수한 예측성능을 나타내었다.

3.3 모멘트 예측 특성

Table 5에는 피칭 모멘트 계수(pitching moment coefficient)를 나타내었다. 피칭 모멘트 계수의 물리적인 의미는 차량 무게중심점을 기준으로 회전하려는 특성을 대변하는 것으로 후미 스포일러나 베인과 같은 부착물(add-on device)을 장착한 경우 공기역학적으로 조정 안정성을 예측해 볼 수 있는 항목이다. Table 3과 Table 4에 도시한 항력 및 양력계수와는 달리 모멘트 계수는 상당히 큰 오차를 보임을 볼 수 있다. 오차율 10% 이내의 값을 만족하는 경우

Table 5 Variation of moment coefficient

Scheme	Turbulence model	CFD (C _M)	ΔC _M	Error (%)
UD	STD	0.2036	0.1193	141.5
	RNG	0.1570	0.0727	86.2
	QUAD	0.1807	0.0964	114.4
CD	STD	0.2144	0.1301	154.3
	RNG	0.1394	0.0551	65.4
	QUAD	0.1487	0.0644	76.4
MARS	STD	0.2194	0.1351	160.3
	RNG	0.1224	0.0381	45.2
	QUAD	0.1151	0.0308	36.5
LUD	STD	0.2160	0.1317	156.2
	RNG	0.1228	0.0385	45.7
	QUAD	0.1158	0.0315	37.4
QUICK	STD	0.1810	0.0967	114.7
	RNG	0.1349	0.0506	60.0
	QUAD	0.1312	0.0469	55.6

주1) ΔC_M=CFD(C_M)-EXP(C_M), EXP(C_M)= 0.0843

주2) Error(%)=CFD(C_M)-EXP(C_M)/EXP(C_M)×100

는 없었으며 전반적으로 MARS와 LUD 이산화 스킴에 QUAD 난류모델을 적용할 때 상대적으로 적은 오차를 보였다.

3.4 난류량에 저차 이산화법을 적용한 경우의 공력특성

Table 6에는 대류항 이산화시 난류항을 UD로 고정하고 속도항에 이차 정확도 및 삼차 정확도 스킴을 적용한 모델의 공력특성을 도시하였다. 역시 STD 난류모델은 전반적으로 상당히 큰 오차를 보이고 있고 RNG 난류모델을 사용한 경우 항력과 양력계수 예측에 있어서 대부분 10% 이내의 오차로 상대적으로 우수한 결과를 보였다. 또한 이차 정확도 이산화법을 적용시 QUAD 난류모델의 사용은 항력계수의 경우 RNG 난류모델 보다 적은 오차를 가지나 양력계수는 보다 큰 오차를 보였다.

QUAD 난류모델 사용과 속도항을 MARS 스킴으로 적용한 기존 연구⁴⁾의 항력계수 예측결과는 약 1%에서부터 4%정도의 오차가 발생하였는데 본 연구에서도 상당히 유사한 결과를 나타내고 있다. 또한 A. P. Gaylard¹⁵⁾ 등은 LUD 스킴을 사용할 때 보다 정확한 항력계수의 예측이 가능하다고 보고한 바

Table 6 Aerodynamic coefficients in case of the model with UD scheme for the turbulent quantity

Turbulence model	Scheme	Aerodynamic coefficient [Error(%)]		
		For velocity	C _D	C _L
STD	MARS	0.5163 [88.3]	0.2209 [2.4]	0.1897 [125]
	LUD	0.5152 [87.9]	0.2204 [2.2]	0.1890 [124.3]
	QUICK	0.5270 [92.2]	0.2051 [-4.9]	0.1810 [114.7]
RNG	MARS	0.2513 [-8.4]	0.1808 [16.2]	0.0973 [15.4]
	LUD	0.2520 [-8.1]	0.1961 [9.1]	0.1074 [27.4]
	QUICK	0.3017 [10.0]	0.2223 [3.1]	0.1349 [60.0]
QUAD	MARS	0.2741 [0]	0.1839 [-14.7]	0.1096 [30]
	LUD	0.2723 [-0.7]	0.1841 [-14.6]	0.1095 [29.9]
	QUICK	0.3403 [24.1]	0.1954 [-9.4]	0.1312 [55.6]

있으며 본 연구에서도 LUD 스킴을 적용한 경우 다른 스킴의 적용에 비해 비교적 적은 오차를 보였다.

3.5 해석의 경제성

지금까지 기술한 내용에서 알 수 있듯이 이산화 스킴과 난류 모델의 적용방법이 해석 결과에 심오하게 영향을 미치고 있다. 여기서 한가지 간과해서는 안될 것은 해석의 경제성 측면이다. 고차의 이산화법을 사용하여 정확한 해석결과를 얻는 것도 중요하지만 해석시간이 너무 많이 소요될 경우 자동차 초기 설계 단계에서 신속한 대응이 불가능하기 때문이다. Table 7에는 기존에 주로 사용하였던 STD 난류모델과 UD 스킴을 적용한 모델을 기준으로 상대적인 해석시간을 지수화 하였다. 일차 및 이차 정확도 이산화법을 채택한 경우 해석시간 지수는 대부분 2 이하이지만 삼차 정확도 이산화법인 QUICK을 채택한 경우는 4이상으로 고차 이산화법을 사용하면 수렴조건을 만족하기 위해 4배에서 5배 정도의 해석시간이 더 소요됨을 알 수 있었다.

Table 7 Relative CPU time

Scheme	CPU time(Hr.) [relative CPU index]		
	STD	RNG	QUAD
UD	20.4[1]	20.8[1.02]	9.9[0.49]
CD	26.1[1.3]	19.7[0.97]	23.6[1.2]
MARS	23.7[1.16]	27[1.3]	40.4[1.98]
LUD	21.2[1.04]	33.4[1.64]	30.5[1.5]
QUICK	111.8[5.48]	110.4[5.41]	84.8[4.16]

3.6 하부 간격변화에 따른 공력특성

본 절에서는 상대적으로 우수한 예측성능을 보인 난류모델과 이산화법에 대해 Fig. 1에 도시한 바와 같이 지면과 바다 하부 사이의 간격변화에 따른 공력특성을 고찰하였다. 난류모델은 RNG 난류모델과 QUAD 난류모델, 이산화법은 이차 정확도 스킴 중 LUD와 MARS를 고려하였다. Fig. 3에는 바다 하부와 지면과의 간격변화에 따른 항력변화를 도시하였다. 실험결과 지면과 바다의 간격이 증가함에 따라 항력계수는 점차 증가하고 양력계수(이하 절대값을 기준으로 함)는 감소하는 경향을 보였다. RNG 난류모델을 적용한 항력계수 예측 결과 대류항의

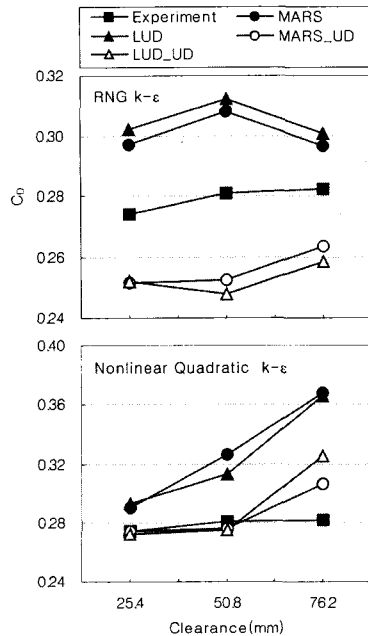
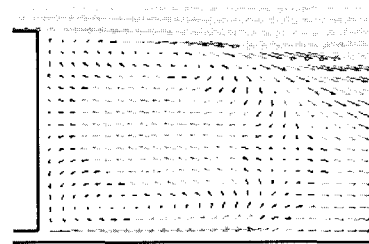


Fig. 3 Qualitative characteristics of drag prediction

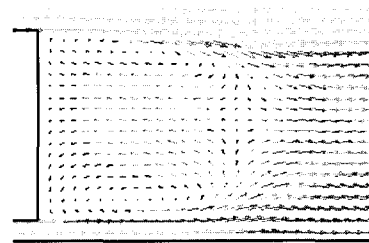
이산화에 동일한 이산화법(계열에서 MARS, LUD)을 적용할 때 실험결과보다 모두 크게 예측했고 난류량 이산화에 저차 이산화법을 적용한 경우(계열에서 MARS_UD, LUD_UD)는 모두 작게 예측하였다.

속도항과 난류항의 이산화에 각각 MARS와 UD 스킴을 사용한 경우 정성적으로 점차 증가하는 경향을 보이나 대류항 이산화법을 달리한 나머지 경우 모두 정성적으로 실험결과와 동일하지 않은 결과를 나타내었다. 정성적인 경향성은 실험과 일치하지 않는 반면 실험결과 대비 최대 12%이내의 오차를 보여 정량적으로는 잘 일치하는 결과를 보였다. QUAD 난류모델을 적용한 항력계수 예측 결과 모두 실험결과와 유사하게 바디하부와 지면과의 간격이 증가할수록 항력계수 또한 증가하여 정성적으로는 일치하는 결과를 얻었지만 지면과 바디 하부 사이의 간격이 증가할수록 예측 성능이 떨어짐을 알 수 있었다. 즉 지면과 바디 하부를 통과하는 유속의 변화가 예측 성능에 민감하게 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. RNG 난류모델을 적용한 경우와 마찬가지로 대류항 이산화에 동일한 스킴을 사용할 때 실험결과보다 크게 예측하였고 속도항에 MARS를, 난류항에 UD 스킴을 적용한 경우 실험결과에

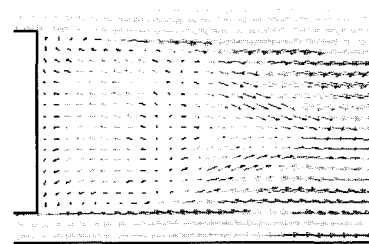
비해 모두 8% 정도의 오차를 보여 가장 우수한 예측 결과를 나타내었다. Fig. 4에는 QUAD 난류 모델을 적용한 모델의 수직단면 후류 유동특성을 도시하였다. 지면과의 간격이 25.4mm와 50.8mm인 경우 후류 흐름 패턴은 거의 유사하나 76.2mm인 경우 상당히 다른 특성을 보이고 있다. 바디 상부와 하부를 통과하는 흐름이 만나 분지되는 영역은 지면과 바디



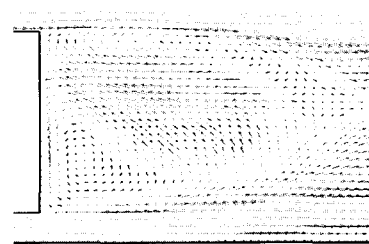
(a) QUAD model with 25.4mm clearance



(b) QUAD model with 50.8mm clearance



(c) QUAD model with 76.2mm clearance



(d) RNG model with 76.2 clearance

Fig. 4 Rear wake flow characteristics according to the variation of turbulence model and underbody clearance

사이의 간격이 증가할수록 보다 바다 후면에 근접한 위치에서 발생하며 바다상단과 하단에서 형성되는 와류 영역도 축소되어 있다. 특히 지면과 바다 하부의 간격이 76.2mm인 모델의 경우 분지되는 흐름 영역이 바다 높이방향으로 넓게 분포되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 4(d)에 도시한 RNG 난류 모델을 적용한 경우는 바다 하부를 통과하는 올려흐름의 영향이 보다 확연하며 재차 바다 후면을 향하는 유속이 크게 평가되었다. Fig. 5에는 양력 특성을 도시하였다. 항력계수 해석 결과와 마찬가지로 QUAD 난류모델을 적용한 경우는 이산화법에 상관없이 모두 감소하는 결과를 보여 실험결과와 정성적으로 동일한 경향을 보이거나 RNG 난류모델을 적용한 경우 난류량에 저차 이산화 스킴을 사용시 일정한 경향성을 도출하지 못하고 있음을 볼 수 있다.

또한 각각의 해석결과 들만을 비교해 보면 RNG 난류모델과 QUAD 난류모델의 적용에 따라 항력계수 예측시 각각 25%와 20%의 차이를 보였고 양력계수 예측시 각각 39%와 19%의 차이가 발생하였다. 따라서 이산화법에 따른 공력예측시 QUAD 난류모

델을 적용할 때 예측결과와 편차가 보다 적음을 알 수 있었다.

4. 결론

버스 형상과 유사한 무딘 물체에 대하여 난류모델과 이산화법이 공력 예측결과에 미치는 영향을 고찰하였다. 일차 정확도 이산화법과 STD 난류모델을 적용한 경우 공력 예측 결과는 상당히 큰 오차를 가지므로 정량적으로 평가해야 하는 경우에는 배제하는 것이 바람직하다. 또한 전반적으로 항력계수 예측에는 이차 정확도 이산화법인 MARS와 LUD스킴을 적용할 때 10%이내의 오차를 보여 가장 우수한 예측 성능을 보였다. RNG 난류 모델의 경우 이차 및 삼차 정확도 이산화법을 적용할 때 항력 및 양력 예측 결과 모두 10% 이내의 오차를 나타내지만 지면과 바다 하부의 간격변화에 따른 예측 결과 정성적인 경향성 예측에는 실패하였다. 반면, QUAD 난류모델은 약 14% 정도의 오차를 나타내었지만 실험 결과의 정성적인 경향성과 동일한 예측이 가능하였고 해석 결과들의 자체적인 비교에서도 결과의 편차가 RNG 난류모델에 비해 적게 나타나 보다 일관성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 보다 정확한 예측결과를 얻기 위해서는 무딘 물체 후부의 박리 및 재순환 유동 등을 정확히 예측할 수 있는 난류모델의 개량 및 개발이 필수적이며 보다 복잡한 형상에 대해 실험결과와의 추가적인 검증이 수반되어야 할 것이다. 본 연구의 결과들은 버스형상과 같은 무딘 물체에 대한 공력특성 해석 기법을 정립하기 위한 기초 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

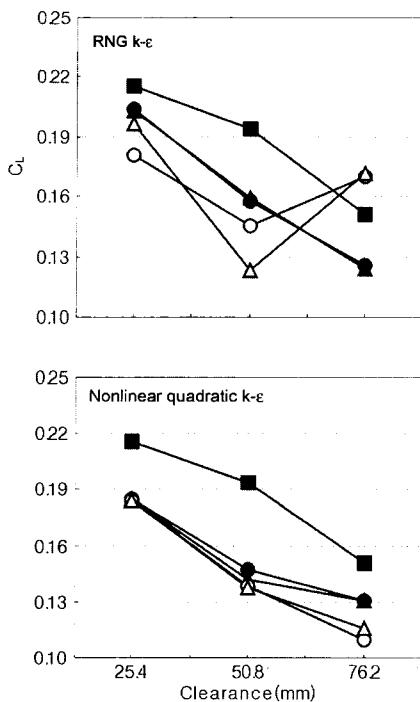


Fig. 5 Qualitative characteristics of lift prediction

References

- 1) S. H. Kang, S. H. Chung, S. H. Kim, "Aero-dynamics of Road Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.9, No.3. pp.46-54, 1987.
- 2) K. Fujihashi, K. Okumira, "Analysis of Vehicle Stability in Crosswind," FISITA World Automotive Congress, F2000G355, 2000.
- 3) G. Spvran, T. Morel, W. T. Mason, Aerodynamic Drag Mechanism of Bluff Bodies and Road Vehicles, Plenum Press, New York, 1987.

- 4) D. Aronson, S.-B. Brahin, S. Perzon, "On the Underbody Flow of a Simplified Estate," SAE 2000-01-0495, 2000.
- 5) T. H. Shih, J. Zhu, J. L. Lumley, "A Realizable Reynolds Stress Algebraic Equation Model," NASA Tech. Memo.105993, 1993.
- 6) V. Yakhot, S. A. Orszag, T. B. Thangham., T. E. Gatski, C. G. Speziale, "Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique," *Physics of Fluids A*, Vol.4, No.7, pp.1510-1520, 1992.
- 7) C. Electcher, *Computational Techniques for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- 8) P. A. Durbin, "Separated Flow Computation with the $k-\varepsilon$ -V2 Model," *AIAA J.* Vol.33, pp.659-664, 1995.
- 9) K. Yamane, N. Hase, S. Fujita, R. Isomura, I. Takeda, "Concurrent CFD Analysis for Development of Rear-Spoiler for Hatchback Vehicles," SAE 970410, 1997.
- 10) T. Han, "Computational Analysis of Three Dimensional Turbulent Flow Around Bluff Body in Ground Proximity," *AIAA J.* Vol.27, No.9, pp.1213-1219, 1989.
- 11) H. K. Myung, E. Jin, H. K. Park, "Simulation of Three-Dimensional Turbulent Flow around an Ahmed Body-Evaluation of Turbulence Model," *KSME(B)*, Vol.21, No.7, pp.873-881, 1997.
- 12) N. Hur, S. Y. Toon, W. K. Cho, K. H. Kim, "A Numerical Study on 3-Dimensional Flow Field around a Vehicle," *Proceedings of Fall Annual conference(II)*, KSME, pp.172-176, 1992.
- 13) H. K. Myung, H. K. Park, E. Jin, "Simulation of Three-Dimensional Turbulent Flow around an Ahmed Body-Evaluation of Differencing Scheme," *KSME(B)*, Vol.20, No.11, pp.3589-3597, 1996.
- 14) J. Barlow, R. Gutenes, R. Ranzebach, "Parametric Study of Wake Structures and Forces of Rectangular Bodies with Radiused Edges Near a Plane Surface," SAE 2000-01-0490, 2000.
- 15) A.-P. Gaylard, A.-J. Baxendale, J. P. Howel, "The Use of CFD to Predict the Aerodynamic Characteristics of Simple Automotive Shapes," SAE 980036, 1998.