

MIRA Vehicle Model 주위의 3차원 난류유동 예측

Prediction of Three-Dimensional Turbulent Flows around a MIRA Vehicle Model

명 현 국*, 진 은 주**
H. K. Myong, E. Jin

ABSTRACT

A numerical study has been carried out of three-dimensional turbulent flows around a MIRA reference vehicle model both with and without wheels in computation. Two convective difference schemes with two $k-\epsilon$ turbulence models are evaluated for the performance such as drag coefficient, velocity and pressure fields. Pressure coefficients along the surfaces of the model are compared with experimental data. The drag coefficient, the velocity and pressure fields are found to change considerably with the adopted finite difference schemes. Drag forces computed in the various regions of the model indicate that design change decisions should not rely just on the total drag and that local flow structures are important. The results also indicate that the RNG model with the QUICK scheme predicts fairly well the tendency of velocity and pressure fields and gives more reliable drag coefficient rather than the other cases.

주요기술용어 : MIRA Vehicle Model(MIRA 차량모델), Drag Coefficient(항력계수), Finite Difference Scheme(유한차도분식), $k-\epsilon$ Turbulence Model($k-\epsilon$ 난류모델)

1. 서 론

현재 자동차의 고성능화에 따른 연비저감 및 조정 안정성을 높이기 위해서 공기역학적 항력을 줄이거나 조절하려는 노력이 경주되고 있다. 특히,

자동차 주위의 유동은 박리, 재부착, 재순환 등을 포함하는 복잡한 3차원 난류 유동으로, 공기역학적 항력은 주로 이들 현상에 따른 압력항력이 대부분을 차지하고 있으므로 차량의 공기역학적 특성을 해석하기 위한 방법으로는 주행 실험, 풍동실험, 수치시뮬레이션이 있으나, 최근 차량 개발기간 동안의 시간 단축 및 경비의 최소화를 위해 수치시뮬레이션에 의한 방법이 늘어나고 있다. 따라서,

* 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부
** 국민대학교 자동차공학과

수치 시뮬레이션은 얼마나 빠른 시간내에 물리적 현상을 얼마나 정확하게 재현하느냐가 중요한 관건이다.

지금까지의 국내외의 연구 결과들¹⁻⁸⁾을 살펴보면 전체적인 유동장은 비교적 잘 예측하나 정량적인 예측에는 실패하고 특히, 항력계수 C_D 의 경우 풍동실험시의 값들과 2배정도의 차이를 보이고 있다. 이것은 상용 전산유체역학(CFD)코드에서 채택하고 있는 저차 유한차분도식은 자동차의 속도가 빠른 경우 대류항의 영향으로 인한 오류 확산이 커져 많은 오차를 발생하고, 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델은 후향계단 유동, 확대관 유동, 곡관내 유동과 같은 압력구배 영향이 큰 유동에 대해서는 정확하게 예측을 하지 못하기 때문이다. 또한, 격자수를 증가시키면 항력계수의 예측정도가 다소 개선되나 격자수를 늘리는 데 한계가 있어, 예측성능면에서 근본적인 해결책이 되지 못하고 있다.³⁻⁶⁾ 이와 함께 일반적으로 고차 유한차분도식과 수정 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하게 되면 예측성능이 사아당히 개선되는 것으로 보고되고 있어, RNG $k-\epsilon$ 난류모델⁹⁾을 사용하여 예측한 연구는 있으나^{7,8)}, 항력계수에 대한 실험값과 수치해석 결과 사이에 나타나는 오차가 어디서 발생하는지를 구체적으로 분석한 연구는 별로 없는 형편이다.

최근 명 등^{10,11)}은 자동차 주위 유동해석에 대한 유한차분도식 및 난류모델에 의한 영향을 구체적으로 알아보기 위해 비교적 자세한 기하학적 정보와 실험값을 잘 나타내고 있는 Ahmed body 주위유동에 대하여 대류항 미분법 및 난류모델에 따른 항력계수의 변화 및 유동장의 변화를 수치 시뮬레이션을 통하여 조사하고, 각 대류항 미분법 및 난류모델의 특성을 파악 하였다. 특히, 전체 항력계수에 대한 실험값¹²⁾과 수치해석 결과 사이에 나타나는 오차가 어디서 발생하는지를 구체적으로 알아보기 위해, 전체 항력계수를 전면부, 후부 경사면 및 후부 수직면에서의 항력계수와 표면마찰 항력으로 나누어 전체 항력계수에 미치는 각 부분의 공헌도를 평가하였다. 또한 Han et al.¹³⁾ 및 Ramnefors et al.¹⁴⁾도 최근 자동차 설계 변경을 하는데 있어서 전체 항력계수와 마찬가지로 국소 유동구조도 중요하다는 인식하에 명

등의 방법과 유사하게 난류모델에 따른 전체 항력계수에 미치는 다양한 영역에서의 공헌도를 평가하였다.

본 연구에서는 보다 실제 자동차 형상에 가까운 MIRA 차량모델³⁾(Fig.1참조) 주위의 난류유동을 수치 시뮬레이션하고 유한차분도식과 난류모델의 영향을 구체적으로 살펴본다. 특히 바퀴의 유무에 따라 유동장 특성이 크게 변한다는 인식하에 이전 연구³⁻⁵⁾와는 달리 바퀴를 모델에 포함시킨 경우와 포함시키지 않은 경우에 대해 항력계수의 변화, 자동차 주위의 압력분포, 유동장의 변화를 조사하여 실험값³⁾과의 비교를 통해 바퀴의 유무에 따른 유동장 특성을 파악한다. 명 등^{10,11)}의 연구 결과를 고려하여 대류항 미분법으로는 잘 알려진 상류차분도식(Upwind Differencing Scheme, 이하 UDS)과 고차 상류차분도식(Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics, 이하 QUICK 도식)을 사용하고, 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델⁹⁾을 사용하여 수치 시뮬레이션을 수행함으로써 각 대류항 미분법 및 난류모델의 특성을 파악한다. 또한, 전체 항력계수를 전면부 경사면, 후부 경사면 및 후부 수직면에서의 항력계수와 표면 마찰항력으로 나누어 전체 항력계수에 미치는 각 부분의 공헌도를 평가한다.

2. 수학적 모델

난류유동을 표현하기 위해 Reynolds 시간평균

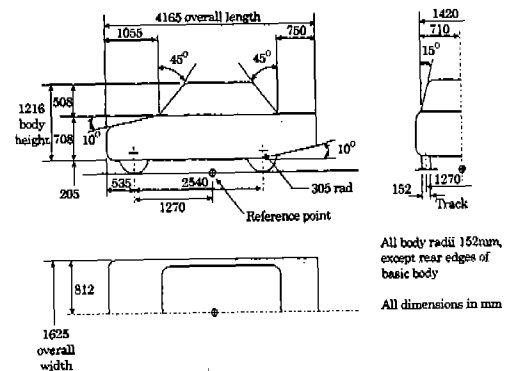


Fig.1 Simplified car(MIRA) model³⁾

개념을 도입하면 연속 방정식과 운동량 방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

연속 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j] = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j u_j - \tau_{ij}] = \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } \tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \quad (3)$$

이때 운동량 방정식에 식 (3)과 같은 형태의 Reynolds 응력 $\overline{u_i' u_j'}$ 이 발생하는데, 6개의 부가적인 미지수가 추가되어 방정식계는 수학적으로 닫혀지지 않으므로 모델화에 의해 닫혀진 계를 얻는다. 이 Reynolds 응력은 난류현상 중에서 큰 영향을 보여, 무시할 수 없는 사실이 경험적으로 알려져 있으므로 난류점성개념을 도입하여 다음과 같이 수학적으로 유사성을 가정한다.

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = 2\mu_i S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\text{여기서 } S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

난류에너지 k 와 난류에너지 소산율 ϵ 은 난류 에너지 방정식과 난류에너지 소산율 방정식을 이용하여 구할 수 있으며, 일반적인 고레이놀즈수형 $k-\epsilon$ 난류모델의 형태는 다음과 같다.

난류에너지 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = G - \rho \epsilon \quad (7)$$

난류에너지 소산율 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \end{aligned} \quad (8)$$

본 연구에서 난류모델의 영향을 평가하기 위해 채택한 두 모델의 모델상수 값들과 생성항 G 및 부가항 R 을 정리해서 나타내면 Table 1과 같다. 참고로 표준 $k-\epsilon$ 난류모델(이하 표준모델)은 단순하면서 수렴성이 좋아 2방정식 난류모델 중 가장 많이 쓰이고 있으나, 박리, 재순환을 포함하는 복잡한 3차원 유동에서는 난류에너지를 크게 예측함으로써 난류점성이 증가하여 오차를 발생시키는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 오차를 줄이기 위해 제시된 RNG $k-\epsilon$ 모델(이하 RNG 모델)은 RNG이론(Renormalization Group Theory)으로부터 R 을 난류에너지 소산율 방정식에 추가하여 모델화하고 난류에너지 소산율 ϵ 에서의 평균 유동 불균형의 영향을 재현함으로써 재순환 유동 및 박리유동의 예측 성능이 뛰어난 것으로 보고되고 있다.

3. 수치해석적 방법

계산은 정상상태, 비압축성 유체의 질량, 운동

Table 1 Coefficients of two $k-\epsilon$ models

	Std.model	RNG model
G	$\mu_t 2 S_{ij} S_{ij}$	$\mu_t 2 S_{ij} S_{ij}$
C_μ	0.09	0.085
$C_{\epsilon 1}$	1.44	1.42
$C_{\epsilon 2}$	1.92	1.68
σ_k	1.0	0.719
σ_ϵ	1.3	0.719
R	0	$\frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k}$

$$\eta = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \frac{k}{\epsilon}, \quad \beta = 0.012, \quad \eta_0 = 4.38$$

량 및 스칼라량의 보존식을 비교적 일반 좌표계에서 이미신티도가 입증된 3차원 유동해석 프로그램 MOSA-3D^{10,11)}를 사용하여 계산하였다. 이 프로그램은 유한체적법에 기초하여 벡터와 스칼라량을 모두 제어체적의 중심에 위치시키는 집중격자계를 사용하고 있으며, 미소 체적 중심에서의 직교좌표 성분의 속도, 압력 및 스칼라 성분을 주요 종속변수로 채택하고 있다. 대류항 미분으로는 상용 CFD 코드에서 많이 채용되고 있는 상류차분도식 외에 HDS(Hybrid Difference Scheme), PDS(Power-law Difference Scheme), 2차 상류차분도식(SOU) 및 3차 상류차분도식(QUICK)을 모두 사용할 수 있으며, 운동량 방정식에서의 압력항 처리는 SIMPLE 알고리즘을 사용하고 있다. 또한, 이산화 방정식을 풀기 위해 속도와 스칼라장에서는 SIP(Strongly Implicit Procedure)법을, 압력 보정방정식에서는 이전의 CGM보다 수렴속도가 빠른 것으로 최근 알려진 MCGS법을 선택적으로 사용하고 있다. 또한, 난류모델로는 상용 CFD코드에서 많이 채용되고 있는 표준 $k-\epsilon$ 모델, RNG $k-\epsilon$ 모델 및 최근 국내의 연구논문에서 사용되고 있는 수정 $k-\epsilon$ 모델이 내장되어 있다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 MIRA 모델의 제원은 Fig.1과 같으며, 계산 영역은 Fig.2와 같이 풍동의 아래 벽면에 고정된 MPRA 모델을 실험한 풍동 테스트 장치³⁾로 취하였다. 계산을 위해 사용한 격자는 비균일 격자로 관심 영역인 MIRA 차량모델 앞 뒤 영역에 집중시킨 104×50×40개(약 208,000개)의 격자를 사용하였다. 그 중 MIRA

모델은 11,600 정도의 격자로 바퀴를 포함하거나, 포함하지 않은 두 가지 경우로 모델링하였다.

경계 조건은 MPRA의 풍동 실험³⁾에 기초하여 풍동 입구에서 속도는 32.62m/s이고, 포텐셜 유동으로 가정하였으며, 난류에너지 및 난류에너지 소산율은 국소 평형 조건을 고려하여 다음과 같이 구하였다. 여기서, 난류 강도 I 는 0.1%로 하고, L 은 실험으로부터의 기준점에서의 경계층 두께 0.155m를 사용하였다.

$$u_{in} = 32.62 \text{ m/s}, \quad k_{in} = \frac{3}{2} (I u_{in})^2,$$

$$\epsilon_{in} = \frac{C_{\mu}^{3/4} k_{in}^{3/2}}{0.1L} \quad (9)$$

출구경계에서는 유동이 국부적으로 포물선형 형태를 가진다고 가정하고 출구 경계면에서의 계수값을 0으로 수정하였다. 또한 대칭 경계조건을 이용하여 계산영역을 전체 유동장의 반만을 잡고 계산하였다. 벽면과 모델 표면에 대해서는 점착조건을 부여하였고, 벽면에 인접한 제어체적에 대하여는 벽법칙을 사용하여 계산에 필요한 속도 및 난류에 관계된 스칼라량들을 계산하였다.

계산에서의 수렴 판정조건은 수렴이 불안정하여 내부 격자에서의 질량 잉여량, 운동량 잉여량이 입구에서의 질량 유입, 운동량 유입의 0.03% 이하가 되면 수렴한 것으로 간주하였다.

4. 결과 및 고찰

MIRA 모델에 작용하는 전체 항력은 물체 표면에서의 압력에 의한 압력항력(pressure drag)과 물체 표면마찰에 의한 항력(skin friction pressure)으로 구성된다. 본 연구에서는 다음 식으로 전체 항력을 계산하고, 전면 투영 면적 A 는 바퀴가 있는 경우 185m²이고, 바퀴가 없는 경우 184m²를 사용하였다.

$$C_D = \frac{-\int_{SA} P \cdot n_1 dA + \int_{SA} (\mu + \mu_t) \left. \frac{dV_t}{dn} \right|_{wall} \cdot n_1 \cdot dA}{0.5 \rho u_{\infty}^2 A}$$

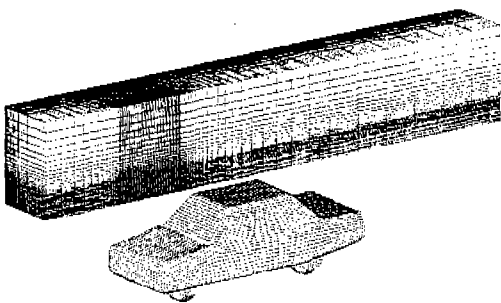


Fig.2 Computational model around a MIRA model

$$= \frac{-\sum_{SS} P \cdot n_1 \Delta A_{SS} + \sum_{SS} \tau \cdot n_1 \Delta A_{SS}}{0.5 \rho u_{\infty}^2 A}$$

$$= \frac{(p - p_{\infty})}{0.5 \rho u_{\infty}^2 A} \quad (10)$$

여기서,

- u_{∞} : 특성 속도 (= 입구 속도)
- n_1 : 표면과 수직한 법선 벡터의 직교 좌표계에서의 x 성분
- SA : 모델의 표면적
- SS : 모델의 표면적
- τ : 표면에서의 유체에 의한 전단응력

Table 2와 Table 3에 유한차분도식 및 난류 모델에 따른 항력계수 C_D 의 예측 결과를 각각 나타내었다. MIRA의 풍동실험³⁾에서의 전체 항력계수는 0.316으로, 시뮬레이션 결과와 비교하면 예측 성능에 있어서 유한차분도식에 따른 영향이 난류 모델에 따른 영향보다 상당히 큰 것을 알 수 있다. 즉, 난류 모델로 RNG 모델을 사용한 경우가 Std. 모델보다 2~4%로 오차가 다소 개선되는데 비해, QUICK 도식을 사용한 경우는 UDS보다 31~37% 정도로 오차가 크게 개선된다. 따라서, 수치해의 정확도를 높이기 위해서는 기존 연구 결과^{10,11)}와 마찬가지로 고차 유한차분도식을 사용할 필요가 있다. 또한 QUICK 도식과 RNG 모델을 함께 사용하였을 때 전체 항력계수에 대한

본 예측결과는 바퀴가 없는 경우 0.3158로 실험값과 0.0002내로 거의 일치하고 있다. 이와 함께 본 예측결과는 상용코드로 계산한 기존의 예측결과³⁾와도 거의 일치하고 있어, 본 연구에서 사용한 MOSA-3D 코드의 신뢰성이 다시 한 번 입증되었다.

그러나, 실제로 MIRA의 풍동실험 결과값은 바퀴가 있는 경우로, 이 경우에는 Table 3에서 보는 바와 같이 예측결과는 바퀴가 없는 경우보다 전체적으로 21~28% 정도 C_D 값을 더 높게 예측하며, QUICK 도식과 RNG 모델을 함께 사용했을 경우에도 실험값과 약 27%의 오차를 나타내고 있다. 본 예측결과와 직접적으로 비교할 수 있는 수치 예측 결과는 아직까지 보고되어 있지 않지만, 바퀴가 있는 경우 절대값으로는 0.068~0.087 정도 C_D 값을 더 높게 예측하는 본 예측 결과는 바퀴가 있는 경우 약 0.08 정도 C_D 값이 증가한다는 여러 가지 형상의 차량에 대한 이전의 실험보고¹⁵⁾와도 잘 일치하고 있다. 따라서, 차량의 공기

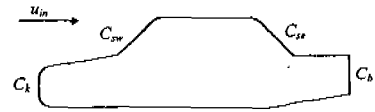


Fig.3 Configurations of a MIRA model for calculating drag breakdown

Table 2 Drag breakdown with two finite difference schemes and two $k-\epsilon$ models [wheels not modeled in computations]

	UDS		QUICK Scheme	
	Std. model	RNG model	Std. model	RNG model
C_k	0.2079	0.2080	0.1458	0.1426
C_{sw}	0.0134	0.0137	-0.0202	-0.0213
C_{se}	0.1039	0.1017	0.0942	0.0938
C_b	0.0726	0.0650	0.0622	0.0562
C_f	0.0463	0.0460	0.0449	0.0445
C_D	0.441	0.4344	0.3269	0.3158
Error	40.5%	37.5%	3.45%	-0.06%

Table 3 Drag breakdown with two finite difference schemes and two $k-\epsilon$ models [wheels modeled in computations]

	UDS		QUICK Scheme	
	Std. model	RNG model	Std. model	RNG model
C_k	0.2222	0.2221	0.1695	0.1669
C_{sw}	0.0138	0.0139	-0.0222	-0.0238
C_{se}	0.1162	0.1119	0.1056	0.1047
C_b	0.0694	0.0622	0.0628	0.0600
C_f	0.0900	0.0909	0.0940	0.0952
C_D	0.5116	0.5010	0.4097	0.4030
Error	61.9%	58.5%	29.7%	27.5%

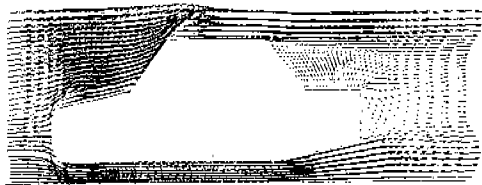
역학적 특성을 정확히 평가하기 위해서는 필수적으로 바퀴를 고려하여야만 한다.

MIRA 모델 각 부분의 전체 항력계수에 미치는 공헌도를 구체적으로 평가하기 위해, Fig.3과 같이 전면부에서의 항력 계수 C_k , 전면부 경사면에서의 항력 계수 C_{sw} , 후부 경사면에서의 항력 계수 C_{se} , 후부 수직면에서의 항력 계수 C_b , 표면마찰 항력 및 나머지 항력을 C_f 로 나누어 Table 2와 Table 3에 C_D 와 함께 나타내었다. 부분 항력계수를 살펴보면, 첫째로 예상한 바와 같이 전반적으로 표면마찰항력은 전체항력의 10~14% 정도로 압력항력이 전체항력의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 둘째로, 전면부와 후부 경사면에서의 항력이 상대적으로 크게 작용하고, 후부 수직면에서의 항력 C_b 의 영향이 상대적으로 작게 작용함을 알 수 있다. 이는 차량 뒷유리창의 각이 점점 커짐에 따라 C_b 의 값은 감소하고 C_{se} 의 값이 증가하게 되는 실험적 사실¹²⁾과도 일치한다. 그러나, 일반적으로 알려진 사실과는 달리 MIRA 모델의 경우 전면부에서의 항력이 후부면에서의 항력과 같은 정도로 큰 값을 나타내는 본 예측결과는 난류모델이 정체점을 포함하는 전면부에 대한 예측성능에 문제가 있다는 기존의 연구결과^{10,11)}를 고려하더라도, 실제 차량설계에서 전면부에 대한 설계가 후부면에 대한 설계에 못지 않게 중요하다는 사실을 수치해석적으로 입증하고 있다고 사료된다. 셋째로, Table 2 및 Table 3으로부터 전면부 정체점 근방에서의 압력에 의한 항력계수는 난류모델의 선택에는 별로 영향을 받지 않고 사용한 유한차분도식에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이 정체점 근방 유동은 일반적으로 계산 격자수를 크게 증가시켜도 예측 정확도가 크게 개선되지 않으므로, 수치해의 정확도를 높이기 위해서는 계산 격자수를 크게 증가시키는 방법보다 진술한 바와 같이 고차의 유한차분도식을 사용하는 것이 계산 시간의 단축도 동시에 얻어지므로 보다 적절하다고 사료된다. 넷째로 바퀴를 고려한 경우 MIRA 모델 전 영역에 걸쳐 바퀴를 고려하지 않은 경우보다 항력이 증가하며, 전면부에서 후부면보다 더 크게 증가하고 있다. 또한, 표면마찰 항력 및 나머지 항력 C_f 도 후부면보다 상대적으로 크게 증가하고 있는데, 이것은 표면마찰 항력의 증가로 보

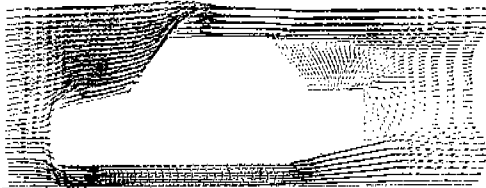
기보다는 바퀴로 인해 MIRA 모델 하부면의 유동 특성이 변하여 결과적으로 이 영역에서의 압력항력이 증가되었기 때문으로 사료된다.

일반적으로 자동차 주위 유동에 대한 전체 항력계수의 예측면에서 난류모델로 RNG 모델을 사용한 경우가 Std. 모델을 사용한 경우보다 상당히 개선된 결과를 준다고 알려져 있으며, 실제로 Ahmed body인 경우에 오차가 14~18%로 상당히 개선되는 연구 결과¹¹⁾가 보고되어 있다. 그러나, 본 연구에서 다루고 있는 MIRA 모델인 경우 앞에서 기술한 바와 같이 전체 항력계수의 예측면에서 난류모델로 RNG 모델을 사용한 경우가 Std. 모델을 사용한 경우보다 오차가 2~4% 개선되는데 그치고 있다. 이러한 원인은 MIRA 모델인 경우 Ahmed body인 경우와는 달리 Table 2 및 Table 3에서 보는 바와 같이 전면부와 후부 경사면에서의 항력이 상대적으로 크게 작용하고, 후부 수직면에서의 항력 C_b 의 영향이 상대적으로 작게 작용하며, 전면부 정체점 근방에서의 압력에 의한 항력계수가 난류모델의 선택에 별로 영향을 받지 않는데 있다고 사료된다. 즉, MIRA 모델인 경우 표준 $k-\epsilon$ 모델에 비해 재순환 유동 및 박리 유동의 예측 성능이 뛰어난 것으로 보고되고 있는 RNG $k-\epsilon$ 모델도 후부면에서의 항력과 같은 정도로 큰 값을 나타내고 정체점을 포함하는 전면부에 대한 항력을 표준모델과 마찬가지로 정확히 예측하지 못하기 때문이다. 따라서, MIRA 모델의 예측성능을 높이기 위해서 향후의 난류 모델은 전면부와 같은 정체점 근방에서의 유동을 정확히 예측할 수 있도록 개량되어야 할 것으로 사료된다.

Fig.4와 Fig.5는 바퀴가 없는 경우와 바퀴가 있는 경우에 대해 각 난류모델에 의해 예측된 대칭 경계면에서의 MIRA 모델 주위의 유동 상태를 각각 나타낸 것이다. 그림에는 지면 관계상 QUICK 도식의 결과만을 나타냈다. 예측 결과를 보면 바퀴의 유무에 따라 전면에서의 정체점 및 박리, 후부 경사각에 의한 상대적으로 미약한 재순환 유동과 후류 내의 재순환 유동 등 두 경우에 대한 유동 해석결과가 전체적으로는 비슷한 형태를 나타내나, 전면부 및 MIRA 모델 하부면에서는 다소 다른 유동특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 고려하고 있는 MIRA 모델인

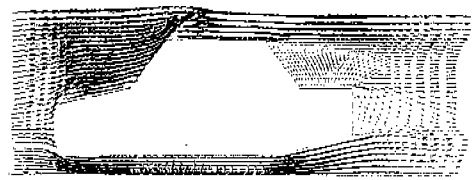


(a) Std. $k-\epsilon$ model

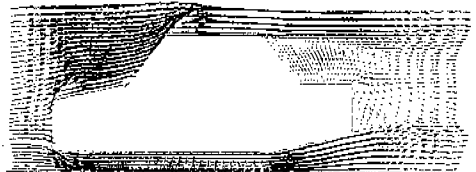


(b) RNG $k-\epsilon$ model

Fig.4 Velocity vectors in the plane of symmetry, using QUICK scheme [wheels not modeled in computations]



(a) Std. $k-\epsilon$ model



(b) RNG $k-\epsilon$ model

Fig.5 Velocity vectors in the plane of symmetry, using QUICK scheme [wheels modeled in computations]

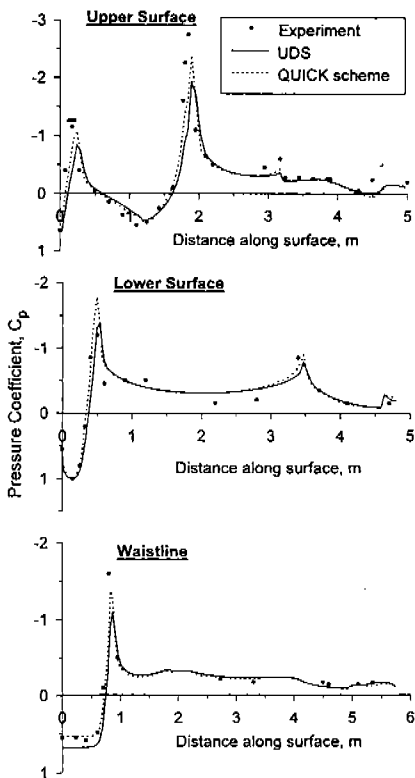


Fig.6 Static pressure distribution in the symmetric plane, using RNG $k-\epsilon$ model [wheels not modeled in computations]

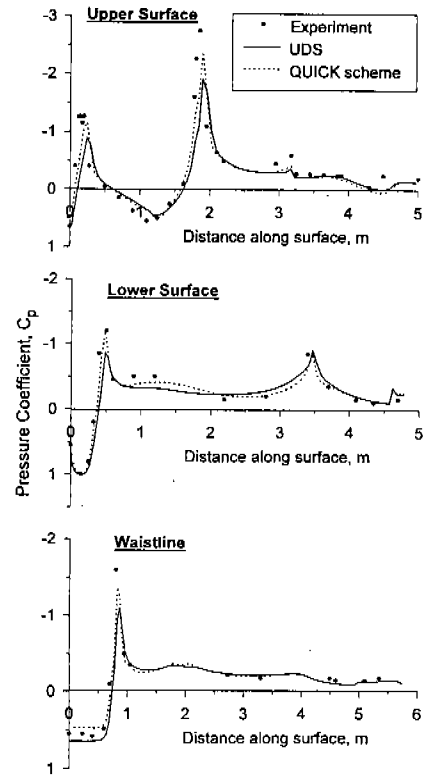


Fig.7 Static pressure distribution in the symmetric plane, using RNG $k-\epsilon$ model [wheels modeled in computations]

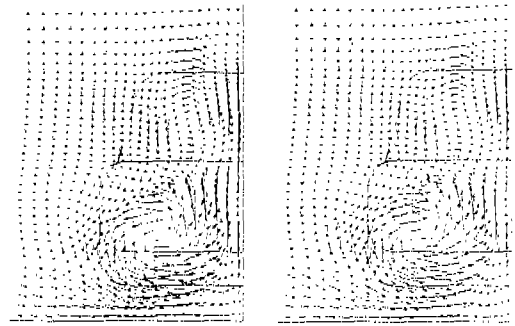
바퀴의 유무 두 경우에 대해 전체적으로 난류모델에 따른 차이는 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있으며, 이것은 앞에서 기술한 난류모델에 따른 항력 값 차이가 2~4%로 작게 나타나는 것과도 관계된다고 사료된다. 이와 함께 MIRA 모델에서는 Abmed body에서와 같이 이전 연구^{2,10-12)}에서 보고된 후부 수직면의 상하에서 방향이 서로 반대인 두 개의 재순환 영역이 존재하지 않고, 한 개의 재순환 영역만이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이것은 MIRA 모델 하부면 후미 부분이 위쪽으로 경사지어져 있어 아래쪽에 재순환 영역이 생기지 않고 위쪽 재순환 영역만 생겼기 때문이다.

Fig.6과 Fig.7은 RNG 모델을 사용하였을 때의 유한차분도식, 즉 UDS와 QUICK 도식에 따른 압력계수 C_p 의 값을 바퀴가 없는 경우와 바퀴가 있는 경우에 대해 MIRA 모델의 대칭 평면 상부면, 대칭 평면 하부면, 차량 측면으로 나누어 실험값³⁾과 함께 각각 나타낸 것으로, 이 때의 C_p 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{(p - p_\infty)}{0.5\rho u_\infty^2} \quad (11)$$

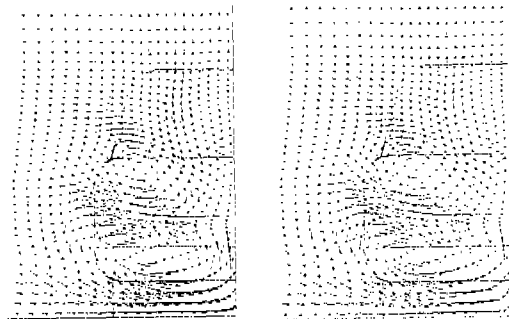
참고로 표준 모델의 경우도 유사한 거동을 나타내나 RNG 모델의 경우가 보다 좋은 예측 성능을 보이기 때문에, 본 논문에는 RNG 모델을 사용하였을 때의 결과만을 나타내었다. 두 그림에서 보는 바와 같이 UDS를 사용하였을 경우 바퀴의 유무에 관계없이 전면부, 앞 유리창과 지붕의 경계부근, 전면과 측면의 경계 부근 등에서 모두 실험값보다 높게 예측하는데 비해, QUICK 도식을 사용했을 경우에는 실험값과 상당히 잘 일치하고 있다. 또한 바퀴가 있는 경우와 바퀴가 없는 경우를 비교해 보면 대칭 평면 상부면 및 차량 측면에서는 차이를 거의 보이지 않으나, MIRA 모델 하부면, 특히 앞 뒤 바퀴 부근에서는 바퀴가 있는 경우가 예측 성능이 더욱 우수한 것을 알 수 있다.

Fig.8과 Fig.9는 QUICK 도식을 사용했을 때 바퀴가 없는 경우와 바퀴가 있는 경우에 대해 표준 모델과 RNG 모델에 따른 MIRA 모델 후부 재순환 영역내 $x/L=1.0$ 인 단면에서 예측된 속도 분포를 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와



(a) Std. $k-\epsilon$ model (b) RNG $k-\epsilon$ model

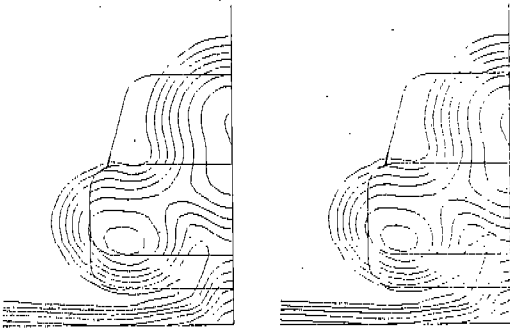
Fig.8 Comparison of cross-flow velocity distributions in the transverse plane at $x/L=1.0$, using QUICK scheme [wheels not modeled in computations]



(a) Std. $k-\epsilon$ model (b) RNG $k-\epsilon$ model

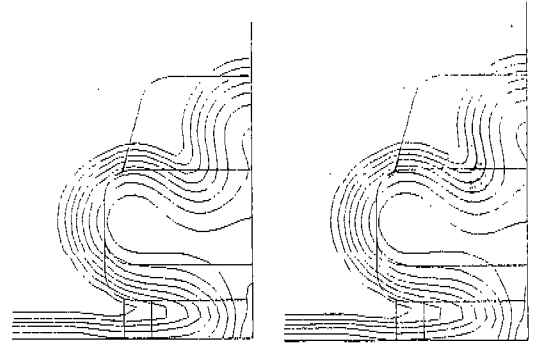
Fig.9 Comparison of cross-flow velocity distributions in the transverse plane at $x/L=1.0$, using QUICK scheme [wheels modeled in computations]

같이 난류모델에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 예측 결과를 보면 먼저 바퀴의 유무에 관계없이, 이전 연구^{2,10-12)}에서 보고된 후부 수직면 좌우 모서리로부터 발생하는 한 쌍의 재순환 유동 영역이 존재하며, 이와는 별도로 크기는 상대적으로 작으나 후부 경사면 중심면으로부터 발생하는 한 쌍의 재순환 유동 영역이 존재하는 것을 보여주고 있다. 이것은 Fig.4 및 Fig.4에서 본 바와 같이 대칭 경계면 상에 후부 경사각에 의해 생기는 재순환 영역이 후부 경사각 부분에만 상대적으로 미약하게 존재하고 하류로 감에 따라 상승기류가 생기는데 있는데, 이것과 후부 경사면 양



(a) Std. $k-\epsilon$ model (b) RNG $k-\epsilon$ model

Fig.10 Isobars in wake at $x/L=1.0$, using QUICK scheme [wheels not modeled in computations]



(a) Std. $k-\epsilon$ model (b) RNG $k-\epsilon$ model

Fig.11 Isobars in wake at $x/L=1.0$, using QUICK scheme [wheels modeled in computations]

모서리에서 발생하려는 후와동(trailing vortex)이 서로 영향을 미쳐서 생기는 것으로 사료된다. 바퀴가 없는 경우 아래에 생기는 재순환 유동의 크기가 매우 크고, 또한 이것이 위쪽의 재순환 유동에까지 영향을 주어 Fig.8에서 보는 바와 같이 후부 경사면 양 모서리에서 발생하려는 후와동을 억제하고 있다. 반면, 바퀴가 있는 경우는 바퀴의 영향으로 아래에 생기는 재순환 유동의 크기가 상대적으로 작아지고, 따라서 이것이 위쪽의 재순환 유동에도 영향을 거의 주지 못하여 Fig.9에서 보는 바와 같이 후부 경사면 양 모서리 부근에서 명확하게 후와동이 발생하고, 상하로 생기는 2개의 재순환 유동 영역 속으로 깊게 침투함으로써 마치 3개의 재순환 유동이 존재하는 것 같은 유동 특성을 나타내고 있다.

Fig.10과 Fig.11은 QUICK 도식을 사용했을 때 바퀴가 없는 경우와 바퀴가 있는 경우에 대한 표준 모델과 RNG 모델에 따른 MIRA 모델 후부 재순환 영역내 $x/L=1.0$ 인 단면에서 예측된 전압 계수 C_g 의 등압 분포를 각각 나타낸 것이다. 여기서, P_T 는 국소 전압력을 나타낸다.

$$C_g = \frac{(p_T - p_\infty)}{0.5\rho u_\infty^2} \quad (11)$$

예측 결과를 보면 전체적으로 난류모델에 따른

차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 예측 결과는 Fig.8과 Fig.9의 결과로부터 예상한 바와 같이 바퀴의 유무에 따라 후부면 전체에 걸쳐 압력 분포가 상당히 변화하는 것을 명확히 보여주고 있다. 따라서, 이들 결과로부터 차량의 공기역학적 특성을 정확히 평가하기 위해서는 수치 시뮬레이션을 수행할 때 필수적으로 바퀴를 포함시키는 것이 중요함을 알 수 있다.

5. 결 과

실제 자동차 형상에 가까운 MIRA 차량모델 주위의 3차원 난류유동을 수치 시뮬레이션하고 유한차분도식과 난류모델의 영향을 구체적으로 살펴 보았다. 특히 바퀴의 유무에 따라 유동장 특성이 크게 변한다는 인식하에 바퀴를 모델에 포함시킨 경우와 포함시키지 않은 경우에 대해 항력계수의 변화, 자동차 주위의 압력 분포, 유동장의 변화를 조사하여 실험값과의 비교를 통해 바퀴의 유무에 따른 유동장 특성을 파악하였다. 또한 전체 항력 계수를 전면부, 전면부 경사면, 후부 경사면 및 후부 수직면에서의 항력계수와 표면 마찰항력으로 나누어 전체 항력계수에 미치는 각 부분의 공헌도를 평가하였다. 연구 결과,

- 1) 유한차분도식의 영향이 난류모델의 영향보다 훨씬 크게 나타났다. 즉, 유한차분도식으

로 상류차분도식 대신에 QUICK 도식을 사용한 경우 항력계수가 31~37% 정도로 예측 성능이 크게 향상되었으나, 난류모델로 표준 $k-\epsilon$ 모델 대신에 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용한 경우 항력계수가 2~4% 정도 개선되는데 그쳤다.

- 2) 바퀴를 포함시킨 경우가 바퀴를 포함시키지 않은 경우에 비해 항력계수를 21~28% 더 높게 예측하였으며, QUICK 도식과 RNG 모델을 사용하였을 경우에도 실험값과 약 27%의 오차를 나타냈다.
- 3) MIRA 모델의 경우 전면부에서의 항력이 후부면에서의 항력과 비슷한 정도로 크게 나타나, 실제 차량설계에서 전면부에 대한 설계가 후부면에 대한 설계에 못지 않게 중요한 것으로 나타났다.
- 4) 바퀴의 유무에 따라 항력계수, 속도장 및 압력장 등 유동 특성이 크게 바뀌는 것으로 나타나, 차량의 공기 역학적 특성을 정확히 평가하기 위해서는 수치 시뮬레이션을 수행할 때 필수적으로 바퀴를 포함시키는 것이 중요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Kobayashi, K., "A Review of CFD Methods and Their Application to Aerodynamics", SAE paper: 920338, 1992.
2. Han, T., "Computational Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flows Around Bluff Body in Ground Proximity", AIAA Journal, Vol. 27, No. 9, pp. 1213~1219, 1989.
3. Anonymous, "Validation of CFD Codes for Predicting Aerodynamic Performance", Automotive Engineer, Oct./Nov., pp. 46~49, 1992.
4. Hur, N., Ahn, I. K., Kim, S. R., Lee, K. H., and Lee, S. C., "A Study on Vehicle Aerodynamics by using CFD : Simulation of 3-D Flow Fields around MIRA

Reference Vehicle Model", AFERC Report AF9411-24, 1995.

5. Hur, N., Ahn, I. K., Kim, S. R., Lee, K. H., and Lee, S. C., "A Study on Vehicle Aerodynamics by using CFD", AFERC Report AFR-95-B04, 1996.
6. Williams, J., Quinlan, W. J., Hackett, J. E., Thompson, S. A., Marinaccio, T., and Robertson, A., "A Calibration Study of CFD for Automotive Shapes and CD", SAE paper : 940323, 1994.
7. 류종우, 조성권, 양준모, 최해천, 유정열, 이준식, "자동차 하단부 형상이 항력과 양력에 미치는 영향", 한국자동차공학회논문집, 제4권, 1호, pp. 134~146, 1996.
8. Hur, N., and Cho, W. K., "Simulation of 3-D Flow Fields around Bodies of a Vehicle Shape by Using the RNG $k-\epsilon$ Model for Turbulence", Proc. Of 3rd JSME-KSME Fluids Engineering Conf., July 25-27, Sendai, Japan, pp. 96~101, 1994.
9. Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., and Speziale, C. G., "Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique", Phys. Fluids, A4., pp. 1510~1520, 1992.
10. 명현국, 박희경, 진은주, "Ahmed body 주위의 3차원 난류 유동 해석-유한차분도식의 평가-", 대한기계학회논문집, 제20권, 11호, pp. 3580~3597, 1996.
11. 명현국, 진은주, 박희경, "Ahmed body 주위의 3차원 난류 유동 해석-난류모델의 평가-", 대한기계학회논문집, 제21권, 8호, pp. 1046~1055, 1997.
12. Ahmed, S. R., Ramm, G., and Faltin, G., "Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake", SAE paper : 840300, 1984.
13. Han, T., Sumantran, V., Harris, C., Kuzmanov, T., Huebler, M., and Zak, T.,

“Flow-Field Simulations of Three Simplified Vehicle Shapes and Comparisons with Experimental Measurements”, SAE paper : 960678, 1996.

14. Rammefors, M., Bensryd, R., Holmberg, E., and Perzon, S., “Accuracy of Drag

Prediction of Cars using CFD- Effect of Grid Refinement and Turbulence Models”, SAE paper : 960681, 1996.

15. Barnard, R. H., Road Vehicle Aerodynamic Design, Addison Wesley Longman Ltd., 1996.