

〈논 문〉

Ahmed Body 주위의 3차원 난류유동 해석 — 난류모델의 평가 —

명현국* · 진은주** · 박희경***

(1996년 8월 13일 접수)

Simulation of Three-Dimensional Turbulent Flows around an Ahmed Body — Evaluation of Turbulence Models —

H. K. Myong, E. Jin and H. K. Park

Key Words : Turbulence Model(난류모델), Finite Differencing Scheme(유한차분도식), Ahmed Body(아메드 차체), Drag Coefficient(항력계수), Simulation(수치해석), General Curvilinear Coordinates System(일반좌표계)

Abstract

A numerical simulation has been carried out for three-dimensional turbulent flows around an Ahmed body. The Reynolds-averaged Navier-Stokes equation is solved with the SIMPLE method in general curvilinear coordinates system. Several $k-\epsilon$ turbulence models with two convective difference schemes are evaluated for the performance such as drag coefficient, velocity and pressure fields. The drag coefficient, the velocity and pressure fields are found to be changed considerably with the adopted $k-\epsilon$ turbulence models as well as the finite difference schemes. The results of simulation prove that the RNG $k-\epsilon$ model with the QUICK scheme predicts fairly well the tendency of velocity and pressure fields and gives more reliable drag coefficient. It is also demonstrated that the large difference between simulations and experiment in the drag coefficient is due to relatively high predicted values of pressure drag from vertical rear end base.

1. 서 론

자동차 연비저감 및 고성능화에 필수적인 공기역학적 항력계수 C_D 값을 저감시키는 문제는 일반적으로 자동차의 형상에 따라 항력이 크게 변하기 때문에 자동차의 설계단계에서부터 고려할 필요가 있다. 따라서, 국내외적으로 자동차 업계에서도 자동차 주위의 유동에 대한 기초연구로서, 간단한 형상

으로 되어 있으며 높은 레이놀즈수 조건하에서 실험되고 실험값이 비교적 상세히 알려져 있는 Ahmed body⁽¹⁾ 모형 주위의 유동에 대한 수치해석적 연구를 많이 시도하고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 예를 들어 Han⁽²⁾은 $97 \times 51 \times 31$ 의 격자계를 사용하고 2차 정확도의 유한차분도식과 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 수치해석을 수행한 결과, 정확한 항력계수를 구하는 데는 실패하였으나 유동장의 경향은 잘 예측하였다. 그러나, 상용 전산유체역학(CFD) 코드를 사용해서 경제성 및 수렴성을 고려하여 비교적 적은 수의 격자계와 대류항에 대한 유한차분도식으로서 1차 정확도의 상류차분도식(UDS)을 채택하

*회원, 국민대학교 기계자동차공학부

**회원, 국민대학교 자동차공학과

***쌍용자동차(주)

여 수행된 대부분의 연구결과^(3,4)는 유동장 경향은 비교적 잘 예측하고 있으나, 공학적으로 중요한 항력계수는 실험값보다 약 2배정도 크게 예측하며, 또한 속도장 및 압력장을 예측하는 데 있어서 정량적인 해석이 아닌 정성적인 해석에 그치고 있다.

최근 저자⁽⁵⁾는 이러한 원인으로 기존 연구에서 비교적 적은 수의 격자계를 사용한데도 문제가 있으나, 그것 보다는 기존 연구에서 사용된 대부분의 상용 CFD 코드에서 대류항 차분도식으로 채용하고 있는 1차 정확도의 상류차분도식과 난류모델로 채용하고 있는 표준 $k-\epsilon$ 난류모델에 더 큰 문제가 있다고 판단하고, 일단계로 유한차분도식에 따른 영향을 구체적으로 알아보기 위해 Ahmed body 주위의 유동에 대하여 대류항 미분법으로 잘 알려진 상류 차분도식(UDS ; Upwind Differencing Scheme), 2차 상류차분도식(SOU ; Second-order Upwind Differencing Scheme) 및 3차 상류차분도식(QUICK)에 따른 항력계수 및 유동장의 변화를 수치 시뮬레이션을 통하여 조사하고 각 대류항 미분법의 특성을 파악하였다. 연구결과, 항력계수, 속도 및 유동장 특성이 유한차분도식에 의해 상당히 변하는 것이 확인되었다. 일례로 전체 항력계수에 대한 예측결과가 UDS를 사용한 경우 실험값과 약 100% 정도의 큰 오차를 보이나, QUICK의 경우는 약 40% 정도의 오차로 크게 줄어들어 예측 성능이 크게 개선되었으며, 2차 정도의 유한차분도식을 사용한 Han⁽²⁾의 결과와 비슷하였다. 또한, 전체 항력계수에 미치는 물체표면 각 부분의 공현도를 평가한 결과 항력계수에 대한 수치해와 실험값과의 커다란 차이는 Ahmed body의 전면부와 후부 수직면 부분에서의 압력에 의한 항력계수의 과대예측으로 확인되었다. 이 과대 예측의 주된 원인은 압력구배 영향이 큰 전면부와 후부 수직벽 유동 영역에 대해서 잘 알려진 바와 같이 난류모델로 채택한 표준 $k-\epsilon$ 난류모델의 예측 성능이 크게 떨어지는 데 기인한다고 판단된다.

한편 Hur 등^(6,7)은 표준 모델 및 새로운 RNG (ReNormalization Group) 이론을 도입하여 유도된 RNG $k-\epsilon$ 모델⁽⁸⁾을 사용하여, 난류모델에 따른 항력계수의 변화, 유동장의 변화를 수치 시뮬레이션을 통하여 조사한 결과, RNG $k-\epsilon$ 모델이 표준 $k-\epsilon$ 모델에 비해 개선된 예측 성능을 보이며, 또한 계산 격자수를 늘리면 예측 성능이 더욱 개선된다고 보고하였다. 그러나, 이들의 연구결과는 정성적으

로는 실험결과를 비교적 잘 예측하고 있으나, 정량적으로는 대류항 미분법으로 상류차분도식을 사용하였기 때문에 계산 격자수의 증가 및 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였음에도 불구하고 실험결과보다 상당히 큰 오차(약 80~100% 정도)를 나타내고 있으며, 또한 이러한 원인에 대해서도 구체적으로 분석하지 않고 있다.

본 연구에서는 이러한 배경하에 자동차 주위 유동해석에 대한 난류모델에 따른 영향을 구체적으로 알아보기 위해 표준 $k-\epsilon$ 모델과 복잡한 3차원 전단유동에서 일어나는 충돌분류, 박리, 재부착, 재순환 유동 등을 비교적 잘 예측한다고 보고된 두개의 수정 $k-\epsilon$ 모델, 즉 정체점 부근에서 난류 운동 에너지의 생성을 고려한 Kato-Lauder의 수정 $k-\epsilon$ 모델⁽⁹⁾ 및 기존 연구에서 사용된 RNG $k-\epsilon$ 모델⁽⁸⁾을 Ahmed body에 적용하여, 각 난류모델에 따른 항력계수의 변화, 유동장의 변화를 수치 시뮬레이션을 통하여 조사하고, 각 모델들의 특성을 파악하고자 한다. 특히, 본 연구에서는 대류항 유한차분도식에 따라 예측 성능이 크게 변한다는 저자들의 이전 연구결과로부터 각 난류모델에 대해 유한차분도식으로 상류차분도식 및 3차 상류차분도식을 적용하여 대류항 미분법의 특성을 난류모델과 함께 파악하고, 또한 전체 항력계수에 미치는 물체표면 각 부분의 공현도를 평가하여 항력계수에 대한 수치해와 실험값과의 차이에 대한 원인을 규명하고자 한다.

2. $k-\epsilon$ 난류모델

난류유동을 해석하기 위하여 시간평균개념을 도입하면 레이놀즈 응력항 $\overline{u_i u_j}$ 이 발생하며, 이 레이놀즈 응력항은 난류점성개념을 도입하여 난류 운동 에너지 $k(\equiv \overline{u_i u_i}/2)$ 와 평균 변형률로 다음과 같이 근사 시킬 수 있다.

$$\overline{\rho u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

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

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

Table 1 Coefficients of three k-ε models

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

$$S_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad \Omega \equiv \sqrt{2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}},$$

$$\Omega_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad \eta \equiv S \frac{k}{\epsilon}, \quad \beta = 0.012, \quad \eta_0 = 4.38$$

k-방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho U_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = P - \rho \epsilon \quad (3)$$

ε-방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho U_j \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \quad (4)$$

본 연구에서 난류모델의 영향을 평가하기 위해 채택한 세 모델의 모델상수 값들과 생성항 P 및 부가항 R 을 정리해서 나타내면 Table 1과 같다. 표준 k - ϵ 난류모델(이하 Std. 모델)은 2방정식 난류모델 중 가장 널리 알려진 모델로 단순하면서 수렴성이 좋은 특성을 가지고 있으나, 박리유동 및 재순환유동 등 압력구배의 영향이 큰 복잡한 3차원 전단유동에 적용하면 많은 오차를 발생시키는 것으로 알려져 있다. 이것은 표준 k - ϵ 난류모델의 난류생성항 P 에 평균 변형률에 의한 항만이 고려되어 있기 때문으로, 본 연구에서 다루는 Ahmed body 전면부와 같은 정체점 근방에서 난류에너지를 실제보다 크게 발생시켜 난류점성을 증가시키므로 결과적으로 상당히 큰 오차가 발생하게 된다. Kato-Launder 모델⁽⁹⁾(이하 K-L 모델)은 이러한 인식하에, 이와 같은 오차를 방지하기 위하여 변형률텐서(strain rate tensor) S_{ij} 와 회전텐서(rotation tensor) Ω_{ij} 의 조합으로 이루어진 새로운 난류생성항 P 를 Table 1에 나타낸 것 같이 제시하였다. 참고로 K-L 모델은 단순 전단유동인 경우에는

$S = \Omega$ 로 되어, 표준 k - ϵ 난류모델의 난류생성항과 같으나, 거의 수직응력만이 존재하는 정체점 근방에서는 $\Omega = 0$ 로 되어 난류생성항이 0으로 되므로 난류에너지의 과대발생을 방지할 수 있다. 한편, 새로운 RNG 이론을 도입하여 얻어진 RNG k - ϵ 모델⁽⁸⁾(이하 RNG 모델)은 재순환 유동 및 박리 유동의 예측능력이 뛰어난 것으로 보고되고 있다. 이 RNG 모델에서 ϵ 방정식에 부가되어 있는 R 은 약한 전단유동(η 가 작음)에서는 약간 증가되므로 ϵ 를 감소시켜 난류점성 μ_t 을 증가시키고, 빠른 변형률이 존재하는 유동(η 가 큼, $\eta > \eta_0$)에서는 R 의 부호가 바뀌므로 ϵ 를 증가시켜 난류점성 μ_t 을 크게 감소시키는 특성을 가지고 있다. 따라서, 이 두 모델은 항력계수에 대한 수치해와 실험값과의 커다란 차이가 Ahmed body의 전면부와 후부 수직면 부분에서의 압력에 의한 항력계수의 과대예측으로 명 등⁽⁵⁾에 의해 최근 확인된 표준 k - ϵ 난류모델의 결함을 개선할 가능성이 높다고 예상되므로 본 연구에서 채택하였다.

3. 수치해석방법

계산에 사용된 지배방정식은 정상상태의 비압축성 유체의 연속방정식, 운동량방정식 및 스칼라량에 대한 보존식으로, 스칼라량에 대한 보존식은 앞에서 기술한 k - ϵ 모델 방정식의 계산에 사용된다. 이들 지배방정식을 풀기 위해 본 연구에서는 Peric⁽¹⁰⁾

이 개발한 3차원 유동해석이 가능한 유한체적 프로그램을 기본으로 하여, 국내에서 개발된 3차원 유동해석 프로그램인 MOSA-3D⁽⁵⁾를 사용하였다. 이 프로그램은 일반좌표계를 사용하고, 유한체적법에 기초하여 벡터와 스칼라 값을 모두 제어체적의 중심점에 위치시키는 집중격자계를 사용하고 있으며, 미소 체적 중심에서의 직교좌표 성분의 속도, 압력 및 스칼라 성분을 주요 종속변수로 채택하고 있다. 대류항 미분으로는 상용 프로그램에서 많이 채용되고 있는 상류차분도식 외에 HDS(Hybrid Differencing Scheme), PDS(Power-law Differencing Scheme), 2차 상류차분도식(SOU) 및 3차 상류차분도식(QUICK)을 모두 사용할 수 있으며, 운동량 방정식의 압력항 처리를 위하여 연속방정식의 속도와 연관시킨 SIMPLE 알고리즘을 사용하고 있다. 특히, 본 프로그램은 이산화된 선형 대수방정식을 풀기 위해 연속방정식으로부터 유도된 압력보정방정식의 해법으로는 이전의 CGM보다 수렴속도가 빠른 것으로 최근에 알려진 MCGS⁽¹¹⁾를 선택적으로 사용할 수 있으며, 속도장과 스칼라장에는 SIP(Strongly Implicit Procedure)을 사용하고 있다. 또한, 난류모델로는 상용 코드에 많이 채택되어 있는 표준 $k-\epsilon$ 모델, RNG $k-\epsilon$ 모델, Chen's $k-\epsilon$ 모델, Kato-Launderk- ϵ 모델 및 최근 국내외 연구논문에서 사용되고 있는 수정 $k-\epsilon$ 모델 등이 내장되어 있다. 이 프로그램의 신뢰성은 기존연구⁽⁵⁾에서 확인되었다.

본 해석에 사용된 Ahmed body는 후미 경사각(slant angle)이 항력계수가 가장 작은 12.5도 로 이에 대한 자세한 사양은 참고문헌⁽¹⁾에 상세히 기술되어 있다. 본 연구에서는 이 모형을 계산하기 위해 Fig. 1에 보인 바와 같이 비균일 격자계 $93 \times 46 \times 35$ (약 150,000개의 cell)를 사용하였으며, 이

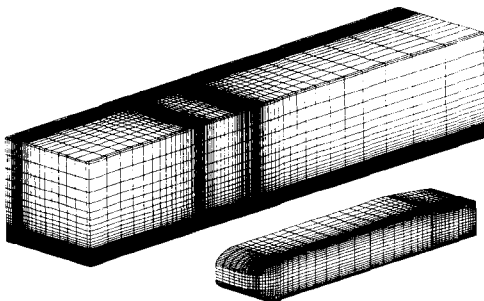


Fig. 1 Computational model around an Ahmed body

중 12,900개의 cell($43 \times 20 \times 15$)은 Ahmed body를 모델링하는데 사용하였다. 특히, 계산의 정확성을 향상시키기 위해 관심영역인 Ahmed body 앞뒤 영역에 격자계를 집중하여 배치하였다. 또한 유동장 내의 모형은 블럭으로 처리하고, 계산시간과 기억용량을 줄이기 위하여 중간단면의 대칭조건을 이용하여 유동장의 반만을 계산영역으로 잡아 계산하였다.

경계조건으로는 Ahmed의 풍동실험⁽¹⁾에 따라 입구에서는 균일 속도 60m/s로 공기가 유입되고 난류강도는 $I=0.05$ 로 하였다. 입구에서의 유동은 포텐셜유동으로 가정하여 입구에서의 경계층은 존재하지 않는 것으로 하였다. 출구경계에서는 유동이 국부적으로 포물선형 형태를 가진다고 가정하고 출구 경계면에서의 계수 값을 0으로 수정하였다. 모형의 대칭면을 지나는 $z=0$ 인 면은 대칭경계조건을, 나머지 벽면과 Ahmed body 표면에 대해서는 점착조건을 부여하였으며, 벽면에 인접한 제어체적에 대하여는 벽법칙을 이용하여 속도 및 난류에 관계된 값들을 계산하였다. 입구에서의 난류에너지 및 난류에너지 소산율은 국소평형의 식으로부터 다음과 같이 구하였다.

$$U_{in} = \bar{U}, \quad k_{in} = \frac{3}{2}(I\bar{U})^2, \quad \epsilon_{in} = \frac{C_{\mu}^{3/4} k_{in}^{3/2}}{0.1L}$$

L : 입구직경 (5)

계산은 IRIS Workstation R1000을 사용하였으며, 수렴판정 조건은 전체 내부격자에서의 질량잉여량 및 운동량잉여량이 각각 입구에서의 질량유입량 및 운동량유입량의 0.1% 이하가 되면 수렴한 것으로 하였다. 또한, 본 연구에서는 고차 유한차분도식인 QUICK을 안정되게 수렴시키기 위해서 운동량방정식에 대해서는 고차 유한차분도식을, 난류모델 방정식에 대해서는 UDS를 각각 사용하였다. 또한 고차 유한차분도식을 이용하는 경우, 초기상태에서의 발산을 방지하기 위하여 UDS를 사용해서 얻어진 결과를 초기 값으로 사용하였으며 완화계수를 작게 하였다. 이와 같이 함으로써 QUICK을 사용한 경우 UDS인 경우에 비해 약 50~70%의 계산 시간이 추가로 걸렸다. 보다 상세한 수치해석방법은 참고문헌⁽⁵⁾에 기술되어 있다.

4. 결과 및 고찰

난류모델 및 유한차분도식에 따른 전항력계수

Table 2 Drag breakdown with two finite difference schemes and three $k-\epsilon$ models

	Std. Model (UDS)	K-L Model (UDS)	RNG Model (UDS)	Std. Model (QUICK)	K-L Model (QUICK)	RNG Model (QUICK)	Exp.
C_k	0.1615	0.1348	0.1371	0.0561	0.0290	0.0319	0.016
C_s	0.0483	0.0498	0.0484	0.0426	0.0438	0.0428	0.037
C_B	0.2110	0.2303	0.2040	0.1684	0.1846	0.1537	0.122
C_f	0.0453	0.0435	0.0438	0.0505	0.0508	0.0501	0.055
C_D	0.4661	0.4584	0.4333	0.3177	0.3082	0.2785	0.230

C_D 결과를 Table 2에 나타냈다. 참고로 Ahmed body에 작용하는 전항력계수는 명 등⁽⁵⁾에서와 같이 물체표면에서의 압력에 의한 항력(pressure drag)과 유동에 의한 물체표면에서의 마찰력(skin drag)을 합한 전항력을 물체의 투영면적, 유체의 밀도 및 특성속도(입구속도)를 이용하여 구하였다. 전항력계수에 대한 결과를 보면 전체적으로는 예측 성능에 있어서 유한차분도식에 따른 영향이 난류모델에 따른 영향보다 상당히 큰 것을 알 수 있다. 즉, 난류 모델에 따라 다소 차이는 있으나, 전반적으로 저차 유한차분도식인 UDS를 사용하였을 경우의 오차는 실험값과 약 2배정도의 차이를 보이고 있는 데 비해, 고차 유한차분도식인 QUICK를 사용하면 실험값과의 차이가 약 40% 이하로 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 사실은 계산 격자수를 증가시켜 예측성능을 다소 개선시키는 방법^(6,7)보다는 고차의 유한차분도식을 사용하는 것이 계산 시간 단축 및 예측성능 향상면에서 볼 때 보다 적절한 방법임을 제시해주고 있다.

한편, 난류에너지 생성항에 회전을 고려한 K-L 모델은 예상한 바와 같이 Std. 모델에 비해 Ahmed body 전면부에서는 상당히 개선된 예측결과를 나타내나, 후부 수직면에서는 오히려 더 나쁜 예측결과를 보여주고 있어, 전체적으로 Std. 모델에 비해 다소 개선된 예측성능을 나타내고 있다. 반면, RNG 모델을 사용한 경우에는 두 유한차분도식 모두에 대해서 표준 $k-\epsilon$ 모델의 예측결과에 비해 절대값으로는 각각 약 0.033 및 0.04 정도의 개선된 예측성능을 나타내고 있으며, QUICK를 사용한 경우 표준 $k-\epsilon$ 모델이 약 40% 정도 과대 예측한 데 비해 RNG 모델은 약 20% 정도로 상당히 개선된 예측성능을 나타내고 있다. 따라서, 난류모델도 예측성능에 상당히 큰 영향을 미치고 있다는

기존의 연구결과^(6,7)가 확인되었다.

이러한 수치해의 오차가 어디서 발생하는지를 평가하기 위해서 Fig. 2와 같이 전항력계수를 전면부에서의 항력계수 C_k , 후부 경사면에서의 항력계수 C_s , 후부 수직면에서의 항력계수 C_B 및 표면마찰 항력 C_f 로 나누어 전항력계수에 미치는 각 부분의 공헌도를 평가하여 Table 2에 C_D 와 함께 나타냈다. 결과를 보면 난류모델의 형태에 관계없이 항력계수에 대한 수치해의 가장 큰 오차는 후부 수직면에서의 압력에 의한 항력계수의 예측결과로, 가장 좋은 예측결과를 보이는 QUICK를 사용한 RNG 모델에서도 약 26%의 오차를 나타내고 있으며, 이것이 전체적으로 전항력에서 과대 예측의 주된 원인으로 판명되었다. 따라서, 향후의 난류모델은 물체 후부의 박리 및 재부착을 동반하는 재순환 영역을 정확히 예측할 수 있도록 개량되어야 될 것으로 사료된다. 항력계수에 대한 수치해의 두 번째로 큰 오차는 전면부에서의 압력에 의한 항력계수의 예측결과로, 비록 절대값으로는 작지만 UDS를 사용할 경우 약 9~14배의 차이를 나타내고 있으며, QUICK를 사용한 경우에도 2~4배의 오차를 보인다. 특히, 전술한 바와 같이 Ahmed body 전면부와 같은 정체점 근방에서 난류에너지를 실제보다 크게 발생시켜 난류점성을 증가시키므로 상당히 큰 오차를 발생시킨다는 인식하여, 난류 생성항에 회전효과를 고려한 K-L 모델은 예상한 바와 같이 전



Fig. 2 Configurations of an Ahmed body for calculating drag breakdown.

면부의 항력계수 예측을 크게 개선시키고 있으나, 후부 수직면에서의 압력에 의한 항력계수를 표준 $k-\epsilon$ 모델보다도 과대 예측하고 있는 것으로 나타났다. 이상의 결과를 종합하면, 전체적으로는 RNG 모델이 각 부분의 부분항력계수를 포함해 전 항력계수에 대한 예측성능이 다른 $k-\epsilon$ 난류모델에 비해 상당히 우수하다고 판단할 수 있다.

또한 Table 2의 결과는 저차 유한차분도식을 사용할 경우 전면부 정체점 근방에서의 압력에 의한 항력계수의 과대 예측이 난류모델의 선택이나 계산 격자수를 증가시켜도 크게 개선되지 않는 것을 입증하여 주고 있다. 따라서, 서론에서 기술한 Hur 등^(6,7)이 제시하는 계산 격자수를 크게 증가시켜 예측성능을 다소 개선시키는 방법보다는 고차의 유한차분도식을 사용하는 것이 계산 시간 단축 및 예측 성능 향상면에서 볼 때 보다 타당한 방법이라고 판단할 수 있다.

Fig. 3은 QUICK를 사용하였을 때의 각 모델에 따른 대칭경계면에서 Ahmed body 상부면 상의 압력계수 $C_p(\equiv (p-p_\infty)/(0.5\rho U_\infty^2))$ 를 나타내고 있다. 세 모델이 전체적으로 양호한 예측성능을 나타내고 있으나, RNG모델이 다른 모델에 비하여 후

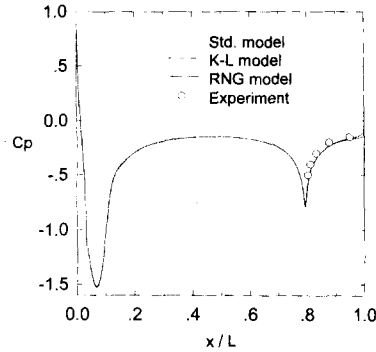


Fig. 3 Cp distribution in the top surface symmetric plane for a 12.5-deg slant angle.

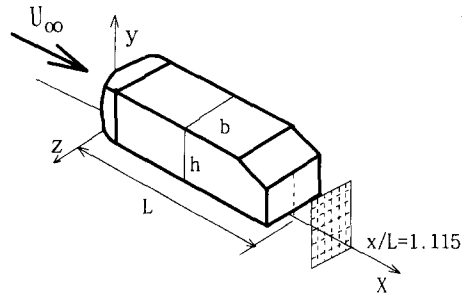


Fig. 4 Position for scanning velocities and total pressure coefficient C_p .

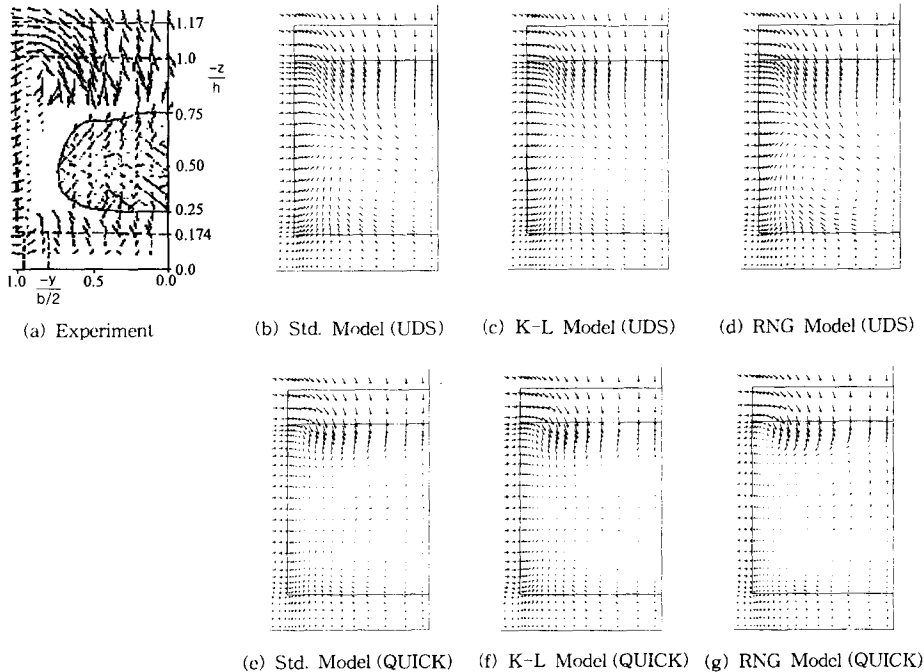


Fig. 5 Cross flow velocity distribution at $x/L=1.115$

부에서의 실험값에 보다 근접하고 있다. 또한, 결과제시는 생략하였으나, UDS를 사용한 경우 QUICK인 경우에 비해 상대적으로 전면부에서는 높게, 후부에서는 낮게 모든 난류모델이 예측하고 있어, 복잡한 유동해석 시 수치해의 정확도를 높이기 위해서는 QUICK와 같은 고차 유한차분도식을 사용할 필요가 있음이 확인되었다.

Fig. 4는 후부 재순환영역내 $x/L=1.115$ 에서 속도 V, W 와 전압(total pressure)을 비교하기 위한 평면을 나타내고 있으며, Fig. 5는 이 단면에서의 속도 V, W 를 나타낸 것으로 비교를 위해 실험결과⁽¹⁾도 함께 실었다. 보다 상세한 실험결과⁽¹⁾에 따르면 Ahmed body 후부 경사면 양쪽 모서리에서 후와동(trailing vortex)이 발생되고, 후면의 상하에서는 방향이 서로 반대인 재순환 유동영역이 존재하며, 후부 수직면 좌우 모서리로부터 발생하는 한 쌍의 재순환 유동영역이 존재하는 것으로 알려져 있다. 해석결과를 보면 UDS를 사용한 경우에는 저차 유한차분도식의 특징인 오류확산으로 인하여 실험적 사실과 다른 양상을 보이고 있으나, QUICK를 사용한 경우에는 세 난류모델이 실험적 사실을 대체적으로 잘 보여주고 있다. 난류모델에 따른 변화는

RNG모델이 전체적으로 경사각 위의 후류 및 밀면에서 말려들어가는 와류를 정성적으로 잘 예측하고 있다. 정량적으로는 모든 난류모델이 대류항에 대한 차분도식으로 QUICK를 사용한 경우가 UDS를 사용한 경우에 비해 작게 예측하고 있다. 그러나, 이 영역에서의 속도 크기가 매우 작아 실험결과의 정확도에도 문제가 있으므로 정확한 비교는 현 시점에서 어렵다고 판단된다.

Fig. 6은 후부 재순환 영역내 $x/L=1.115$ 인 측정 평면에서의 아래와 같이 정의되는 전압력계수 C_g 에 대한 등압선을 나타내고 있다.

$$C_g = \frac{p_r - p_\infty}{0.5\rho U_\infty^2} \quad (6)$$

위 식에서 p_r 는 국소전압을 의미한다. 실험결과와 비교하면 UDS를 사용한 경우는 Fig. 5의 결과로부터 예상한 바와 같이 Ahmed body 후부 경사면 양쪽 모서리에서의 후와동(trailing vortex)을 발생시키는 압력장에 대한 예측이 고차 유한차분도식인 QUICK를 사용한 경우에 비하여 크게 떨어지고 있음을 알 수 있다. 또한, 난류모델에 따른 변화도 비교적 커서 RNG 모델의 예측성능이 가장 좋으며, Std. 모델보다도 Ahmed body 뒷부분에서

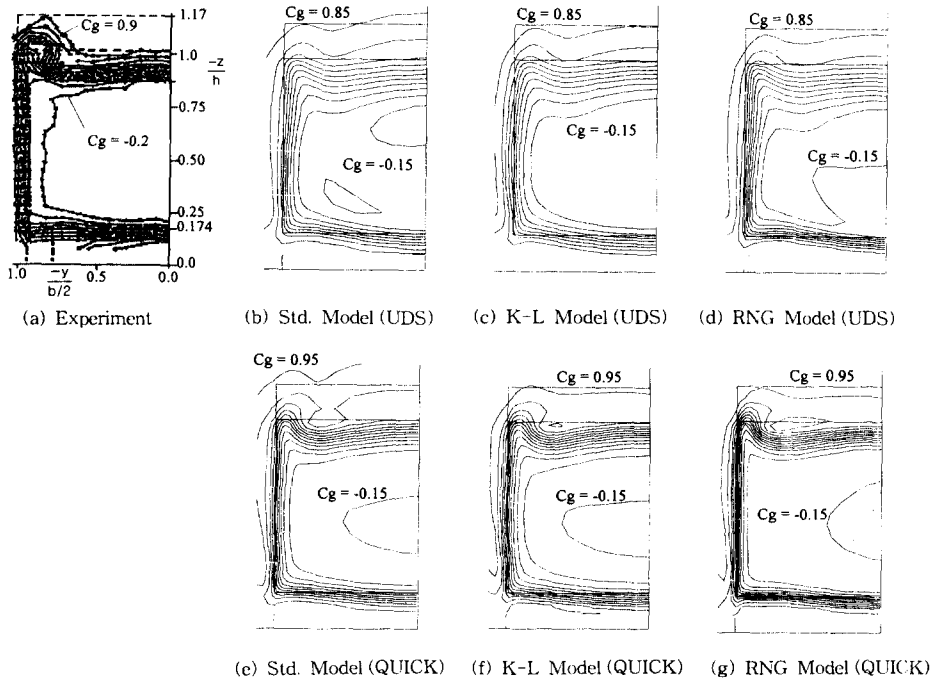


Fig. 6 Isobars in wake at $x/L=1.115$

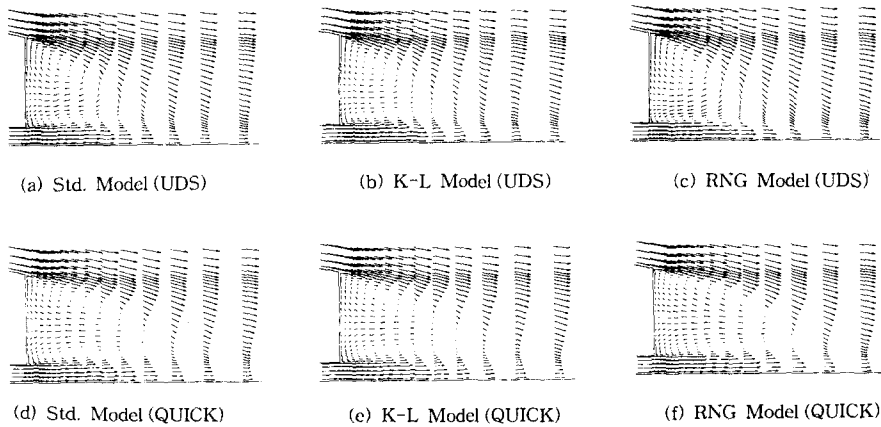


Fig. 7 Velocity profile at symmetric plan

다소 예측성능이 떨어진 K-L 모델이 보다 실험값에 근접하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 대칭경계면에서의 Ahmed body의 후류 부분을 나타낸 것이다. 결과를 보면 모든 난류모델과 유한차분법이 대칭경계면에서 후류내에 방향이 서로 반대인 상하로 위치되어진 재순환 유동영역이 존재한다는 실험적 사실⁽¹⁾을 잘 재현시켜 주고 있다. 그러나, 오류확산이 큰 UDS를 사용한 경우에 비해 QUICK를 사용한 경우가 상대적으로 큰 재순환영역을 갖고 있으며, 또한 표준 $k-\epsilon$ 난류모델에 비해 RNG 모델이 재순환 영역을 상대적으로 크게, 즉 실험결과에 더욱 근접하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

자동차 주위 유동해석에 있어서 유한차분도식과 함께 난류모델에 의한 영향을 구체적으로 알아보기 위하여 비직교 일반좌표계를 사용해서 Ahmed body 주위의 유동에 대하여 세가지 형태의 $k-\epsilon$ 난류모델 및 두 가지 유한차분도식에 따른 항력계수 및 유동장의 변화를 수치해석을 통하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 예측성능에 있어서 유한차분도식에 따른 영향이 난류모델에 따른 영향보다 상당히 큰 것으로 확인되었다. 따라서, Ahmed body 주위 유동과 같은 복잡한 유동해석 시 수치해의 정확도를 높이기 위해서는 QUICK와 같은 고차차분도식을 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

(2) 검토한 세 난류모델 중 RNG 모델이 각 부분의 부분항력계수를 포함해 전항력계수에 대한 예측성능이 가장 우수하다. 즉, QUICK를 사용한 경우 표준 $k-\epsilon$ 모델이 전항력계수를 실험결과보다 약 40% 정도 과대예측한 데 비해, RNG 모델은 약 21% 정도로 크게 개선된 예측성능을 나타내고 있다.

(3) Ahmed body 전면부와 같은 정체점 근방에서의 표준 $k-\epsilon$ 모델의 문제점을 개선하기 위해 제안된 K-L 모델은 전면부의 항력계수에 대해서는 크게 개선된 예측성능을 나타내나, Ahmed body 후부에서의 항력계수를 표준 $k-\epsilon$ 모델보다도 다소 과대 예측하고 있어, 결과적으로 표준 $k-\epsilon$ 모델보다 크게 개선된 예측성능을 보여주고 있지 못하는 것으로 나타났다.

(4) 난류모델의 형태에 관계없이 항력계수에 대한 수치해의 가장 큰 오차는 후부 수직면에서의 압력에 의한 항력계수의 예측결과로 가장 좋은 예측결과를 보이는 QUICK를 사용한 RNG 모델에서도 약 26%의 오차를 나타내고 있으며, 이것이 전체적으로 전항력에서 과대 예측의 주된 원인으로 판명되었다.

(5) 항력계수에 대한 수치해의 두 번째로 큰 오차는 전면부에서의 압력에 의한 항력계수의 예측결과로, 비록 절대값으로는 작지만 UDS를 사용할 경우 약 9~14배의 차이를 나타내고 있으며, QUICK를 사용한 경우에도 2~4배의 오차를 나타냈다.

따라서, 향후의 난류모델은 물체 후부의 박리 및

재부착을 동반하는 재순환 영역과 Ahmed body 전면부와 같은 정체점 근방에서 유동을 정확히 예측할 수 있도록 개량되어야 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(자유공모 No : 01 E 0601)에 의한 결과임을 밝히며, 본 연구를 수행하는 데 있어 격자제를 제공해 준 서강대학교 허남건교수에게 감사드린다.

참고문헌

- (1) Ahmed, S. R., Ramm, G. and Faltin, G., 1984, "Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake," *SAE Paper* 840300.
- (2) Han, T., 1989, "Computational Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flows Around Bluff Body in Ground Proximity," *AIAA J.*, Vol. 27, No. 9, pp. 1213~1219.
- (3) 허남건, 조원국, 윤성영, 김광호, 1992, "3차원 자동차주위의 유동장에 관한 수치적 연구," 대한기계학회 '92 추계학술대회논문집(Ⅱ), pp. 172~176.
- (4) 조원국, 허남건, 1993, "Ahmed Body 주위의 유동장 해석에 관한 연구," 대한기계학회 '93년도 추계학술대회논문집(Ⅱ), pp. 47~50.
- (5) 명현국, 박희경, 진은주, 1996, "Ahmed Body 주위의 3차원 난류유동해석 (유한차분도식의 평가)," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제11호, pp. 3589~3597.
- (6) Hur, N. and Cho, W. K., 1994, "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.
- (7) Hur, N., Ahn, I. K., Kim, S. R., Lee, K. H. and Lee, S. C., 1996, "A Study on Vehicle Aerodynamics by Using CFD," *AFERC Report* AFR-95-B04.
- (8) Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B. and Speziale, C. G., 1992, "Development of Turbulence Models for Shear Flows by Double Expansion Technique," *Phys. Fluids*, A 4.
- (9) Kato, M. and Launder, B. E., 1993, "Modeling Flow-Induced Oscillations in Turbulent Flow around a Square Cylinder," *Proc. Forum in Unsteady flow, ASME Fluids Engrg Conf.*, Washinton DC.
- (10) Peric, M., 1985, "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts," Ph. D. Thesis, Imperial College.
- (11) 김찬중, 노승탁, 1995, "압력보정방정식의 수치해를 위한 MCGS 행렬해법," 대한기계학회 '95 춘계학술대회논문집(Ⅱ), pp. 203~207.