

H-분할법을 이용한 승용차의 고정도 공력특성 해석

김 태 훈* · 정 수 진**

Aerodynamic Analysis of Passenger Car with High Accuracy Using H-refinement

T. H. Kim* · S. J. Jeong**

Key words : H-refinement(H-분할법), Aerodynamics(공기역학), C.F.D(전산유체역학), Boundary layer meshing technique(경계층격자생성법)

Abstract

Three dimensional flow fields around passenger car body was computed by PAM-FLOW, well-known and validated computer program for thermal and fluid analysis. Regarding the computational method, a Navier-Stokes solver based on finite element method with various turbulent models and adaptive grid technique (H- refinement) was adopted. The results were physically reasonable and compared with experimental data, giving good agreement. It was found that three dimensional flow simulation with H-refinement technique had potential for prediction of flow field around vehicle and the ability to predict vortex in the wake, which is vital for CFD to be used for automobile aerodynamic calculation.

1. 서 론

저연비, 경량화 및 고속화를 추구하고 있는 자동차 설계의 현 추세에 발맞추어 자동차 주위의 유동은 공기역학적 측면에서 많은 영향을 주고 있으며 공력성능에 중요한 설계인자이다.

이 중에서 특히 주행 중 발생하는 공기항력이 커지면 연비 및 소음의 증대와 안정성의 저하를 가져와 결과적으로 제품질의 저하를 가져온다. 그러므

로 공기항력의 원인에 대해서 체계적인 연구가 필요하게 되었다.

자동차 주위의 유동현상에 대한 연구⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾는 주로 차량 후미에서 발생하는 후류(wake)의 구조적 특성해석에 있으며 박리가 일어나는 지점과 와류의 크기조절이 주요 관심사로 등장하고 있다.

자동차 주위의 공기역학의 해석은 컴퓨터의 용량 및 수치해법의 발달로 인하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용하

* 마산대학 자동차계열 (원고접수일 : 2000년 4월)

** 한양대학교 대학원 기계공학과

여 실차 실험 및 풍동 실험을 대체 또는 보완함으로써 이에 따른 비용 및 경비 절감을 꾀하고 있는 실정이다.^(4,5)

그러나, CFD를 사용한 해석 또한 현재로는 난류모델의 부정확성, 대류항 차분법의 수치적 오차 및 벽 근처에서의 난류 상태량 계산의 어려움, 그리고 격자 의존성으로 인하여 정량적인 정확도를 기대하기 어려운 실정이다. 또한 3차원의 복잡한 형상 주위의 계산 격자 형성에 상당한 노력과 시간이 들기 때문에 많은 어려움이 따르고 있다.

따라서 최근들어 이러한 단점을 극복하기 위해서 ESI(Engineering Systems International)에서는 복잡한 형상에 대하여 손쉬운 격자생성을 위하여 비구조 격자 생성법을 적용하고, 이산화법에 따른 수치오차 및 벽 근처에서의 부적절한 격자배열로 인한 부정확한 난류 물성치의 계산을 억제할 수 있는 H-분할법(H-refinement)과 경계층 격자 생성법(Boundary Layer Meshing Technique)을 적용한 상용 CFD 코드⁽⁶⁾들이 개발되기 시작하였다.

본 연구에서는 상용 FEM(Finite Element Method) CFD 코드인 PAM-FLOW⁽⁶⁾를 사용하여 notch-back 스타일의 승용차를 대상으로 외부 유동장 해석을 수행하여 항력 및 압력 계수(Cp)등을 실험치와 비교함으로써 그 예측 정확도를 검증하였으며 또한 H-분할법이 항력등의 예측 정확도에 미치는 영향 및 성능을 평가 하였다.

2. 지배방정식

자동차 주위의 공기유동은 고 레이놀즈의 비정상, 비압축성 난류 유동이다. 이것은 수학적으로 아래의 방정식으로 표현된다.

즉, 연속방정식

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

Navier-Stokes 방정식,

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{u})\vec{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u} \tag{2}$$

이때 Re는 레이놀즈 수이며 t, p, \vec{u} 는 각각 시간, 압력, 속도벡터를 의미한다.

속도계산을 위한 대류항 차분은 4차 정도를 지닌 Ros flux-splitting scheme⁽⁶⁾을 사용하였다.

위의 2개의 방정식으로는 압력장을 얻을 수 없으므로 아래와 같이 Poisson 방정식을 계산하여 압력을 처리한다.

$$\nabla \cdot \rho \vec{v}^{n+1} = 0 \tag{3}$$

속도수정으로부터 새로운 압력은 아래와 같이 구한다.

$$\rho \frac{v^{n+1} - v^*}{\Delta t} + \nabla(p^{n+1} - p^n) = 0 \tag{4}$$

따라서 Poisson 방정식은 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$\nabla^2(p^{n+1} - p^n) = \frac{\nabla \cdot \rho \vec{v}^*}{\Delta t} \tag{5}$$

이때 v^* 는 예측된 속도(predicted velocity)이며, v, ρ 는 각각 속도 및 밀도를 의미한다.

따라서 식(4)는 속도장을 수정하는데 사용될 수 있으며 식(5)에 포함되어 있는 Laplacian 연산자를 계산하기 위하여 PCG(Preconditioning Conjugate Gradient) 알고리즘을 이용한다.

난류 유동장을 모델링하기 위하여 본 연구에서는 아래와 같은 k- ϵ 난류 모델을 사용하였다.

$$(\rho k)_{,t} + \vec{n} \cdot \nabla \rho k = \nabla \cdot \frac{v_t}{\sigma_k} \nabla \rho k + P - \rho \epsilon \tag{6a}$$

$$\begin{aligned} (\rho \epsilon)_{,t} + \vec{n} \cdot \nabla \rho \epsilon = & \nabla \cdot \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \rho \epsilon + c_1 \frac{(\rho \epsilon)}{(\rho k)} \\ & + P - c_2 \frac{(\rho \epsilon)^2}{(\rho k)} + c_3 \nabla(\rho v) \end{aligned} \tag{6b}$$

$$v_t = c_\mu \frac{(\rho k)^2}{(\rho \epsilon)}, \quad P = v_t (v_j + v_i) v_j$$

$$c_\mu = 0.09, \quad c_1 = 1.44, \quad c_2 = 1.92, \quad c_3 = 0.80$$

$$\sigma_k = 1.00, \quad \sigma_\epsilon = 1.30, \quad \sigma_T = 0.90$$

여기서 P, k, ϵ 는 각각 난류 생성항, 난류 운동에너지, 난류 소산율이며 v_t 는 eddy viscosity를 의미한다.

위의 k-epsilon 방정식은 벽면에서는 아래식들과 같은 벽함수(wall function)를 사용하여 계산을

한다.

$$\text{Momentum : } (v-w) \cdot n = 0 \quad (7)$$

$$\text{Shear stress : } \tau_w = \rho u_\tau^2,$$

$$\frac{U}{u_\tau} = -\frac{1}{k} \ln \frac{U}{u_\tau} - \frac{1}{k} \ln \frac{\rho U y^+}{\mu} + 5.5 \quad (8)$$

$$k : u_\tau^2 / \sqrt{c_\mu} \quad (9)$$

$$\varepsilon : u_\tau^3 / \sqrt{k y^+} \quad (10)$$

여기서, w 는 벽면속도(wall velocity), n 은 수직 벡터이며 $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$, $y^+ = y \frac{u_\tau}{\nu}$ 이다.

3. 계산 격자

3-1. H-분할법

CFD 해석에 있어서 가장 중요한 결정 중의 하나는 기하학적 형상을 잘 표현할 수 있는 격자의 배열이다. 따라서 CFD 해석용 격자 생성시에는 일반적으로 박리나 역압력 구배가 형성될 가능성이 있는 해석 영역에 격자를 밀집시켜 이산화에 따른 오류를 최소화 시키고 있다. 그러나 이러한 경험적인 격자생성법은 실제로 많은 격자수를 필요로 하며 따라서 많은 계산시간을 필요로 한다.

일반적으로 효율적인 격자계란 주어진 자유도를 가지고 최대의 정확도를 얻을 수 있는 격자망을 말한다. 이러한 격자계를 얻기 위해서 본 연구에서는 격자계에 사용되는 자유도를 증가시킴으로써 해석결과의 정확도를 높여나갈 수 있는 H-분할법을 사용하였다. H-분할법은 해석에 사용된 보간 함수(interpolation function)의 차수(order)는 변화시키지 않고 해당요소를 더 작은 여러 개의 요소들로 세분화(subdivide) 시킴으로써 자유도를 늘려나가는 방법⁽⁷⁾⁽⁸⁾이며, 이는 기존의 프로그램을 쉽게 보완하여 사용할 수 있는 장점이 있다. H-분할법은 첫번째 계산격자의 중간지점에 새로운 격자점을 추가 시킴으로써 격자를 세분화 시킨다. 본 연구에서 사용된 격자는 비조각 격자 체계를 사용한 사면체이므로 격자의 각 모서리를 이등분하는 모서리 이등분법(edge bisection)⁽⁹⁾을 사용한다.

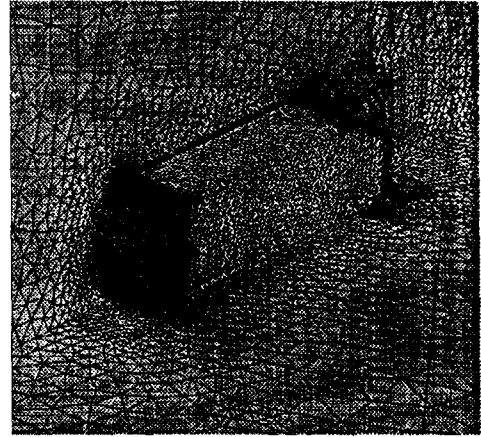


Fig. 1 Computational grid system by H-refinement

격자의 분할은 아래식과 같이 밀도, 마하수, 와류, 압력 및 속도와 같은 물성치를 기준으로 한 오차 한계식에 의하여 구하여 진다.

$$\text{error} = \frac{h^2 |\text{second derivatives}|}{h |\text{first derivative}| + \varepsilon_1 |\text{mean value}| + \varepsilon_2} \quad (11)$$

여기서 h 는 요소의 크기를 나타내며 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 는 각 물성치의 큰 구배 만을 선택적으로 세분화 할 수 있는 여과인자(filter parameter)이다. 이러한 H-분할법을 유동해석에 적용함으로써 압력, 속도 및 밀도가 급격히 변화하는 박리 영역이나 충격파 영역에 계산이 진행되며 격자가 자동으로 밀집, 분할되므로 계산의 정확도를 높이고, 계산 시간을 줄일 수 있는 잇점이 있다.

Fig.1에 Ahmed body의 유동을 해석을 위한 격자계를 나타내었다. 그림에서 보듯이 유동이 박리되는 rear slant부분과 정체압이 걸리는 모델 앞면에 밀집격자가 형성되어 있는 것을 볼 수 있다.

3-2. 경계층격자

Boussinesque 와점성근사(eddy viscosity approximation)를 근간으로 하는 난류 모델들은 벽에서의 난류 상태량을 결정하기 위하여 벽함수를 사용하게 되며 이때 정확도는 벽함수가 적용되는 log-layer와 완전난류영역을 격자계가 얼마나 정확히 표현할 수 있는가에 달려있다.

따라서 일반적으로 해석 대상 벽면에서는 격자를 밀집시키고 벽면으로 멀어질수록 격자의 간격을 완화시키며 격자를 배열하고 있으나 해석대상의 형상이 복잡할 경우, 이런 수동적인 적용은 매우 많은 시간과 불필요한 격자를 생성하게 된다.

본 연구에서는 $y^+ < 150$ 이하가 되도록 경계층 영역 내의 격자수를 조절하였으며 따라서 부적절한 격자배열로 인한 벽면에서의 표면 마찰(skin friction)의 계산오차를 최대한으로 억제하였다.

3-3. 전방향 격자생성

본 연구에서 계산 격자법은 완전 자동격자 생성을 원칙으로 한다. 단지 CAD 데이터의 곡선과 표면을 close하는 것으로 격자 생성을 위한 작업이 끝나게 된다.

Fig.2에서 보듯이, 해석 영역을 표시하는 표면으로부터 수직한 방향으로 격자를 자동으로 형성해 나가기 시작한다. 우선 경계층 격자를 해석 대상 표면위에 형성하기 시작하며, 형성된 요소의 skewness 및 distorsion등이 심한 요소를 검사하여 제거 재 형성시킨 후 전방향격자 생성법(advancing front generating technique)을 사용하여 전체 해석 영역에 사면체의 체적요소(volume mesh)를 형성하여 격자계를 완성한다.⁽⁶⁾

3-4. 계산조건

본 연구에 사용한 경계조건은 아래 Table 1과 같다.

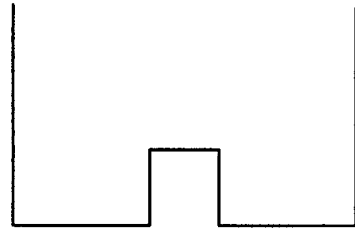
본 논문의 해석 대상인 승용차의 표면 격자는 Fig.3과 같으며, 그림에서 확인 할 수 있듯이 승용차의 하부구조(배기시스템)까지 자세히 표현을 하였다.

본 연구에서는 해석 모델의 대칭성을 고려하여 반쪽모델(half model)만을 해석하였다.

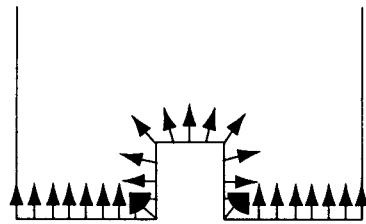
우선, H-분할법의 성능 평가를 하기 위하여 3가지 경우의 격자계에 대해서 각각 같은 경계조건을 가지고 해석을 수행한 후 각각의 경우에 대해서 실험결과와 비교를 하였다.

Table 2에 각각의 모델에 대한 격자계의 사양에 대해서 나타내었다

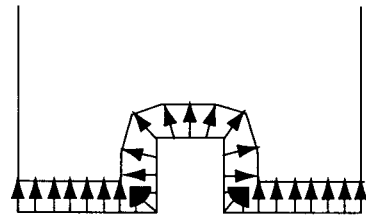
위의 표에서 볼 수 있듯이 모델1은 기본 격자로



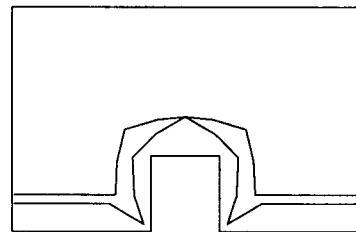
(a) Definition of surface and spatial distribution of element size/shape



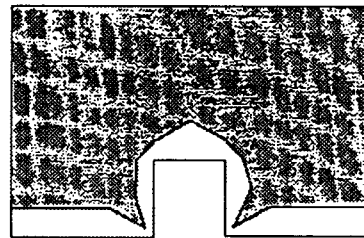
(b) Compute surface normals



(c) Obtain boundary layer mesh



(d) Remove bad boundary layer element



(e) Complete the mesh using advancing front generator

Fig. 2 Procedure of full automatic mesh generation

Table 1. Boundary condition

	Velocity	Pressure
Inlet	$u=1, v=w=0$	$\partial p/\partial n=0$
Outlet	$\partial u/\partial n=0$	$p=0$
Body surface	$\vec{u}=0$	$\partial p/\partial n=0$
Others	$u=1, v=w=0$	$\partial p/\partial n=0$

Table 2. Characteristics of grid system

	Model 1	Model 2	Model 3
Boundary Layer Meshing	O	O	O
Local Mesh Refinement	x	O	x
H-refinement	x	x	O

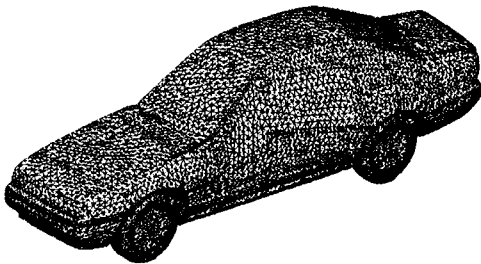


Fig. 3(a) Surface mesh on the car body

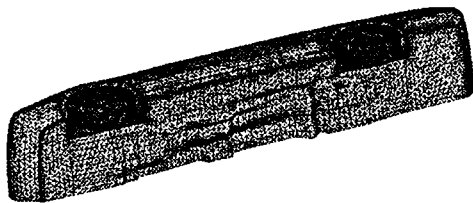


Fig. 3(b) Surface mesh on the under-body of car

써 여타의 밀집격자를 사용하지 않았고, 모델2는 자동차 후류 영역의 정확한 계산을 위해서 계산격자를 밀집시킨 모델로써 현재 많이 쓰여지고 있는 방법이다.

모델3는 H-분할법을 적용한 모델로써 자동적으로 속도, 압력 및 밀도 구배가 급격히 변하는 영역에 자동적으로 밀집격자를 형성할 수 있도록 설정된 모델이다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 목적은 전술하였듯이 notch-back 형상의 승용차의 외부 유동장을 해석하여 항력 및

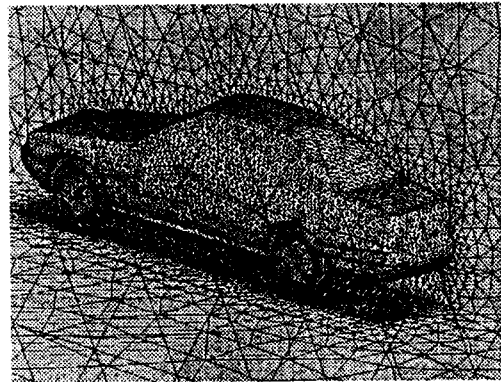


Fig. 4 Standard tetrahedral mesh for aerodynamic calculation (Model 1)

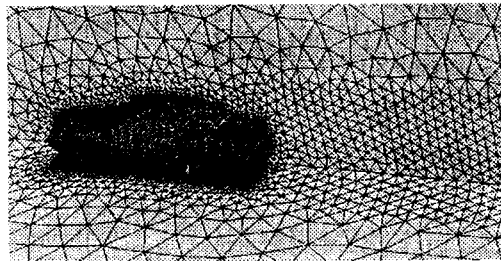


Fig. 5 Local refined mesh system for aerodynamic calculation (Model 2)

압력계수를 구하여 실험값과의 비교평가 및 H-분할법의 성능 평가를 하는데 있다.

Fig.4에 모델 1에 대한 자동차 표면 및 주의의 풍동 터널 내의 격자 배열을 나타내었고, Fig.5에 국부 집중 격자계를 표시하였다

Fig.6에는 H-분할법을 사용한 계산격자를 입구속도 및 차량의 전장으로 무차원 시킨 시간($T = t \cdot v_{in}/L$) 별로 표시하였다. 본 연구에 사용된 프로그램은 명시적 코드이므로 시간대 별로 해석이 진행된다. 이는 거의 모든 유동이 비정상적인 것에 기인하며 H-분할법 역시 시간이 경과함에 따라 변화하는 유동 패턴에 따라 압력 및 유속이 급격히 변화하는 영역을 추적하여 계산격자를 자동적으로 분할하므로 사용자가 유동패턴을 추측하여 격자를 밀집 시키는데 따른 수치적 오류 및 불필요한 격자생성을 억제 시킬 수 있으므로 고정도 해석을 경제적으로 수행 할 수 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 계산 시간이 진행 됨에 따라 차량 후미의 재순환 영역이 점차 그 세력을

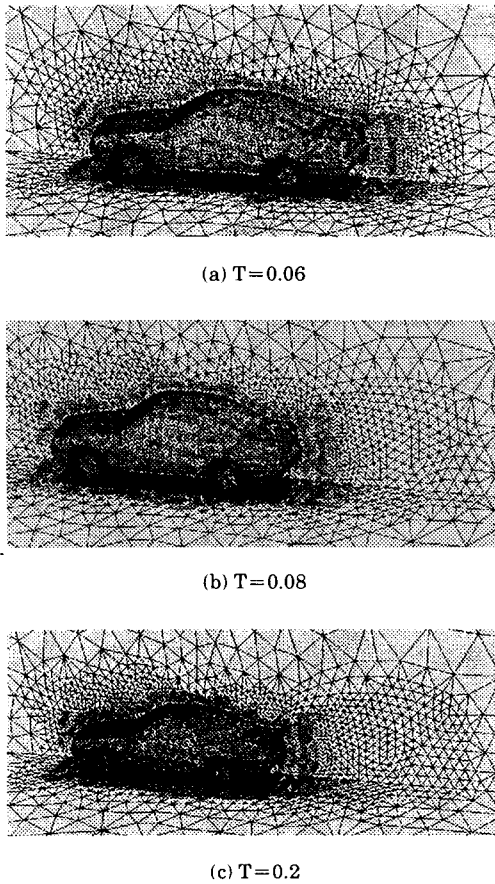


Fig. 6 Temporal variation of optimized mesh systems by H-refinement

Table 3. Computer Resources

Model	Number of points	Number of elements
1	59,547	298,676
2	67,096	339,107
3	77,385	399,571

하류로 확장시켜 가므로 외부와 후류(wake)내의 압력 및 유속의 차이가 심화되고 이로 인하여 이 영역에서의 밀집격자가 점차 하류로 확대 형성되어 가고 있음을 확인 할 수 있다.

각 경우에 대한 생성된 점(point) 및 격자수(element)를 아래 Table3에 나타내었다.

Fig.7에 차체 표면과 후미의 속도장을 각각의 모델의 경우에 대해서 나타내었다.

그림에서 보듯이 H-분할법에 의한 격자모델의 계산결과가 타 모델의 경우에 비해서 후향천정도

서리(rear roof edge)에서의 박리로 인한 뒤쪽 유리표면에서의 급격한 속도구배 및 짐칸(trunk deck)후미에서의 와류 분산(vortex shedding) 현상을 잘 표현 해 주고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 와류의 점성 소산이 결국 압력강하를 가져오고 따라서 항력의 원인이 되므로 이러한 후류에서 와류표현능력(vortex capturing capability)은 결국 정확한 항력을 예측할 수 있는 원천이 된다.

Fig.8에 각 모델에 대한 중심면에서의 압력장(Cp)을 나타내었다

그림에서 볼 수 있듯이 차체의 후미에서의 복잡한 와류의 생성과 소산으로 인한 압력장의 복잡한 형태는 H-분할법에 의해서만이 계산되어 질 수 있음을 확인할 수 있다. 이로부터 기존의 격자 체계로서는 고려할 수 없었던 박리 영역에서의 유동 패턴을 PAM-FLOW를 이용하여 성공적으로 계산할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구의 이러한 유동장 해석결과를 검증하기 위하여 Fig.9에 차체 표면에서의 압력계수를 실험값⁵⁾과 비교하였다.

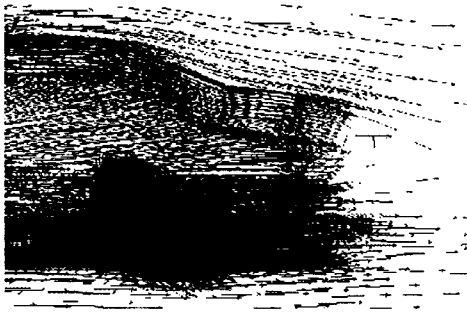
비교결과, 박리가 일어나는 $x/L=0.7$ 부분 이상의 후류 영역에서의 표면 압력장이 실험값과 거의 일치하고 있음을 확일 할 수 있다. 이는 역압력구배가 형성되는 박리영역에서 발생할 수 있는 벽함수(wall function)로 인한 오류를 H-분할법 및 경계층 격자를 이용함으로써 최소화 함으로써 결국 $k-\epsilon$ 난류모델의 단점인 역압력구배 영역에서의 skin friction의 오류를 최대한 억제할 수 있음을 의미하는 것이다. 따라서 박리영역에서의 난류 에너지의 과대평가로 인한 후류에서의 압력장 계산의 오류가 최소화되었다고 할 수 있다.

아래 Table 4에 차량의 항력을 각 모델의 계산값과 실험값⁵⁾을 비교하여 나타내었다.

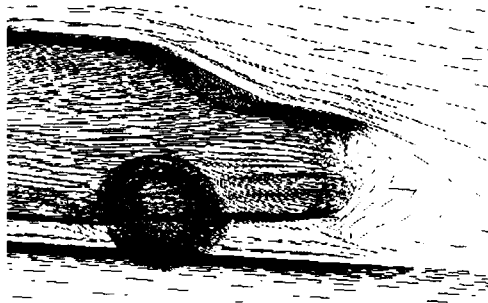
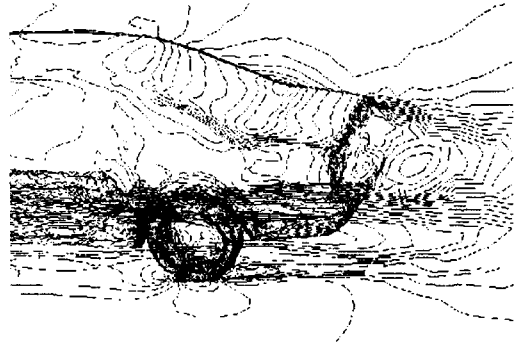
위의 표로부터 H-분할법을 쓴 해석의 경우는 해석결과와 오차가 0.35%에 불과함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

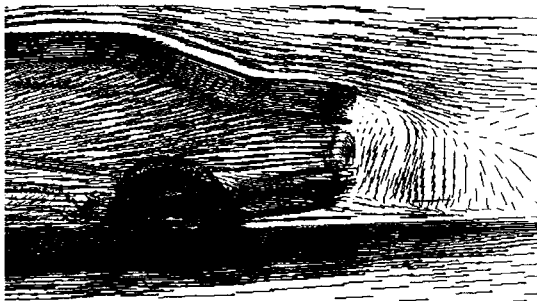
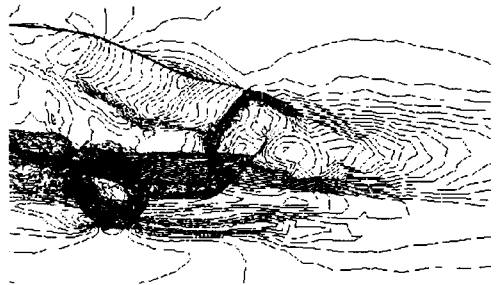
본 연구에서는 PAM-FLOW코드를 사용하여 승용차의 외부 유동장 해석을 수행하였다. 격자생



(a) Model 1(standard model)



(b) Model 2(local refinement)



(c) Model 3(optimized mesh by H-refinement)

Fig. 7 Flow velocity vector and contour field on centerline

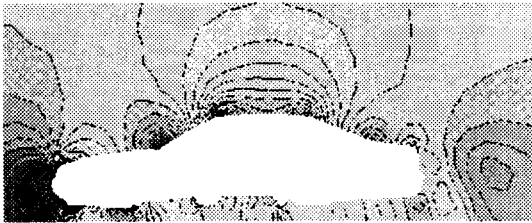
성법에 따른 해석정도를 비교하고 H-분할법의 경제성 및 정확도를 평가하기 위해서 표면 압력계수와 항력을 실험값과 비교하였다.

해석결과, 본 연구에서 사용한 H-분할법과 경계층격자(boundary layer mesh)기법은 해석의 종

속변수가 급변하는 박리 및 재순환영역에서의 계산을 정확하게 하며, 벽면에서의 잘못된 격자배열로 인하여 발생할 수 있는 벽함수의 계산오류를 억제할 수 있어, 기존의 난류 모델이 갖고 있는 한계를 극복할 수 있음을 확인하였다.



(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3

Fig. 8 Pressure(C_p) distribution on centerline

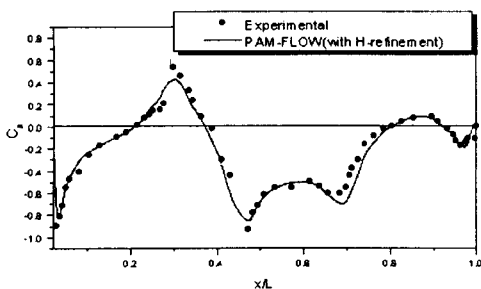


Fig. 9 Profiles of surface pressure coefficient on the centerline(H-refined mesh)

Table 4 Comparison of drag coefficient

Model	Computation	Experiment
1	0.472	0.291
2	0.364	0.291
3	0.292	0.291

항력 계수의 경우 실험값과의 오차는 H-분할법을 사용하였을 경우, 0.34%를 나타내었으며 차체 표면에서의 압력계수 분포 역시 실험값에 근접하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 1999년도 마산대학 자체 연구비 지원에 의해 연구 되었음

참고문헌

1. Toshio Kobayashi et al., "A Review of CFD Methods and Their Application to Automobile Aerodynamics", SAE Paper 920338, 1992
2. Takuya Yamada, "Computational Analysis of Flow around a Simplified Vehicle-like Body", SAE Paper 930293, 1993
3. 정수진, 김우승, "승용차 후향 거울 주위의 3차원 유동장 해석", 한국 자동차 공학회 논문집, 제5권 3호, 1997
4. Ming Zhu et al., "Finite-Difference Simulation of 3D Vortical Flows Past Road Vehicles", SAE Paper 920339, 1992
5. 流體技術專門委員會, "Comparison of CFD Commercial Codes-Benchmark CFD Study of Aerodynamics and Engine Cold Flow-", JSAE Symposium, pp. 70~79, 11월 5일, 1997
6. PAM-FLOW v99.0 Release note, PAM system International S.A., 1999
7. Diaz, A.R. et al., "A Method of Grid Optimization for Finite Element Methods", Computer Methods in Applied Mechanics, pp.29~45, 1983
8. J.D.Baun et al., "Adaptive H-refinement on 3-D Unstructured Grids for Transient Problems", Int. J. Meth. Fluids, Vol.14, pp.1407~1419, 1992
9. Timothy J. Baker, "Mesh adaptation strategies for problems in fluid dynamics", Finite Elements in Analysis and Design, Vol.25, pp.243~273, 1997
10. David C. Wilcox, "Turbulence modeling for CFD", DCW Industries, Inc., California, 1993.

저 자 소 개



김태훈(金台勳)

1962년 11월 8일생. 1986년 한양대학교 공과대학 기계공학과 졸업(공학사). 1988년 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1995년 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1994년~현재 마산대학 자동차계열 조교수, 당학회 회원.



정수진(丁守鎭)

1965년 2월 28일생. 1991년 인하대학교 공과대학 기계공학과 졸업(공학사). 1993년 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1993. 8~1997. 3 쌍용자동차 중앙연구소 차량연구개발실 주임연구원. 1994. 2~1994. 8 한국과학기술원(KIST) 객원 연구원. 1986. 6~현재 한국 ESI(주) 선임연구원. 1997. 3~현재 한양대학교 대학원 기계공학과(박사과정), 당학회 회원.