

## 주행조건에서의 자동차 모델 항력에 대한 수치해석적 연구

김범준\*·강성우\*·최형권\*\*·유정열†

(2003년 3월 18일 접수, 2003년 5월 26일 심사완료)

### Numerical Study on the Drag of a Car Model under Road Condition

Beomjun Kim, Sungwoo Kang, Hyounggwon Choi and Jung Yul Yoo

**Key Words :** Finite Element Method(유한요소법), Parallel Computation(병렬계산), Road Condition(주행조건), LES(큰에디모사)

#### Abstract

A parallelized FEM code based on domain decomposition method has been recently developed for large-scale computational fluid dynamics. A 4-step splitting finite element algorithm is adopted for unsteady flow computation of the incompressible Navier-Stokes equation, and Smagorinsky LES model is chosen for turbulent flow computation. Both METIS and MPI Libraries are used for domain partitioning and data communication between processors, respectively. Tiburon model of Hyundai Motor Company is chosen as the computational model at  $Re = 7.5 \times 10^5$ , which is based on the car height. The calculation is carried out under both the wind tunnel condition and the road condition using IBM SP parallel architecture at KISTI Super Computing Center. Compared with the existing experimental data, both the velocity and pressure fields are predicted reasonably well and the drag coefficient is in good agreement. Furthermore, it is confirmed that the drag under the road condition is smaller than that under the wind-tunnel condition.

---

#### 기호설명

---

$Re$  : 레이놀즈수 ( $= U_\infty H / \nu$ )

$\nu$  : 동점성계수

$U_\infty$  : 평균유속

$H$  : 자동차 모델의 높이

$L$  : 자동차 모델의 길이

$C$  : Smagorinsky 모델 상수

$C_d$  : 항력계수

$C_p$  : 압력계수

저연비, 고성능, 친환경적인 자동차의 개발을 위해 여러 가지 연구들이 수행되고 있는데, 자동차 주위의 유동 해석은 항상 중요한 비중을 차지하고 있다. 지금까지의 자동차 주위 외부 유동에 관한 연구는 주로 풍동을 이용한 실험적 연구와 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)을 기반으로 하는 수치해석적 연구로 구분되는데, 후자의 경우 계산량이 매우 크기 때문에 단순화된 모델 또는 정상유동과 같은 제한적인 조건에서만 수행되어왔다.

한편, 최근에 고성능의 병렬컴퓨터의 진보에 따라 많은 계산 시간과 기억용량을 요구하는 대규모 문제들이 해석되기 시작하고 있다.<sup>(1)</sup> 특히 과거에 비해 실제적인 대규모의 문제를 해석하는데 있어서 기억용량이 제한조건으로 되는 경우가 적어지면서, 유한차분법(FDM: Finite Difference Method)에 비해서 많은 기억용량을 요구하는 단점 때문에 열

---

\* 회원, 서울대학교 대학원

\*\* 회원, 서울산업대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail: jyyoo@plaza.snu.ac.kr

TEL: (02) 880-7112 FAX: (02) 888-2968

유체 해석에서 널리 사용되지 않았던 유한요소법(FEM: Finite Element Method)은 최근 들어 유용한 해석도구로 사용되고 있으며, 앞으로도 이런 경향은 더욱 확대될 것으로 여겨진다.<sup>(2)</sup> 이는 주로 복잡한 계산영역을 가지는 문제의 해석시 유한요소법이 유한차분법에 비해서 경계조건을 보다 정확하고 쉽게 처리하며, 복잡한 형상을 가지는 물체 주위의 유동장을 해석하기 위해서 비정렬격자계를 사용할 경우 선형요소로 2 차 정확도의 공간 차분을 자연적으로 얻어내는 이점이 있기 때문이다.

최근에 본 연구진은 유한요소법을 이용한 비압축성 유동해석 병렬코드를 개발하여 자동차 주위 유동에 적용하여 왔다.<sup>(3)</sup> 개발된 코드는 영역분할법을 이용하여 병렬화 되었으며 각 영역간의 데이터 교환을 위하여 MPI Library를 사용하였다. 영역 분할은 METIS Library<sup>(4)</sup>를 사용하였다.

최근까지 자동차 주위 유동해석은 대부분의 경우 계산자원의 제한 때문에 유한체적법(FVM: Finite Volume Method)과 2-방정식 난류 모델을 사용하였다. Carr,<sup>(5)</sup> Ramnefors 등,<sup>(6)</sup> Han 등<sup>(7)</sup>은 유한체적법과  $k - \epsilon$  계열의 난류 모델을 사용하여 얻어진 결과를 실험값과 비교하였다. 여기서 계산된 항력은 실험값과 약 10 ~ 20 %의 차이를 보여주고 있다. 한편 컴퓨터 기술이 날로 발전함에 따라 더 높은 정밀도의 계산결과를 얻는 것이 가능해졌고 이에 따라 LES 모델을 이용한 자동차 주위의 비정상유동 계산에 대한 관심이 증대되고 있다. 그러나 방대한 계산량으로 인하여 아직은 선행 연구 결과들이 많이 보고되고 있지는 않다. 1995년에 Johnson과 Tezduyar은 Saturn 모델 주위의 유동에 대하여 Smagorinsky 모델을 채택한 LES 와 병렬화된 FEM 코드를 사용하여 정상상태의 계산을 수행하였다.<sup>(8)</sup> 그들이 예측한 항력계수는 풍동조건에서 실험 결과와 비교적 잘 일치하였다. 여기서 주의 할 점은 그들은 정상계산을 수행하였으므로 시간 평균된 항력계수만을 얻었고 시간에 따른 항력계수의 변화를 예측할 수는 없었다는 점이다. Krajenović과 Davidson<sup>(9)</sup>은 유한체적법과 LES 을 사용하여 단순화된 둔체모델(bluff - body model) 주위의 비정상 외부유동계산을 수행하여 속도와 압력에 대하여 실험과 비교적 일치하는 결과를 얻음으로써 자동차 외부유동에 대한 LES 의 적용가능성을 제시하였다. 그러나 여기서는 레이놀즈수가  $2.1 \times 10^5$  이기 때문에, 실제 자동차의 주행과 비슷한 조건에서의 연구를 위해서는 더 높은 레이놀즈수에 대한 계산이 필요하다고 생각된다. 2002년에 Choi 등은 MIRA(Motor Industry Research

Association) 모델 주위의 유동을 비정상 LES 로 계산하여 이전의 계산결과들보다 향상된 결과를 얻었다.<sup>(3)</sup>

풍동실험에서 자동차 모델이 정지되어 있는 경우를 풍동조건(Wind-Tunnel Condition), 주행할 때와 비슷하게 지면이 움직여서 바퀴를 회전시키는 경우를 주행조건(Road Condition)이라고 하는데, Elofsson과 Bannister<sup>(10)</sup>는 대부분 주행조건에서 항력이 풍동조건의 그것보다 작아짐을 확인하였다. 1998년에 Good 등<sup>(11)</sup>도 역시 실험을 통해서 주행 조건에서의 압력이 줄어드는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 풍동조건과 주행조건에서 각각 현대자동차의 Tiburon 모델 주위의 외부유동에 대한 계산을 수행하여 개발된 코드의 유용성을 검증하고자 한다. 실험 자료는 1/4 크기 모델을 이용한 결과이며, 본 CFD 에는 실물 크기 모델이 사용되었다.

## 2. 수치해석 기법

### 2.1 차분화 기법

본 연구에서 사용된 지배방정식은 공간에 대해 필터크기  $\Delta$  로 필터링된 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로서 잘 알려진 Smagorinsky 모델을 채택한 LES로 서술한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{U}_i \tilde{U}_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \tilde{\sigma}_{ij} \\ \tilde{\sigma}_{ij} &= -\tilde{p} \delta_{ij} + \tau_{ij} \\ \tau_{ij} &= 2\nu_e \tilde{S}_{ij}, \quad \nu_e = \nu + \nu_t \\ \nu_t &= c\Delta^2 |\tilde{S}|, \quad |\tilde{S}| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \\ \tilde{S}_{ij} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad \Delta = (volume)^{1/3} \end{aligned}$$

여기서  $\nu_e, \nu_t, \tilde{S}, \Delta$  는 각각 유효점성계수(effective viscosity), 와점성계수(eddy viscosity), 변형률 텐서(strain rate tensor), 유한요소 격자크기(characteristic length of a finite element)이고, " $\sim$ "는 필터링된 값을 의미한다.

수치해석 방법으로는 Choi 와 Moin<sup>(12)</sup>에 의해 제안되고, Choi 등<sup>(13)</sup>에 의해 P1P1 유한요소법에 적

용된 Fully Implicit 4-Step Splitting Method 를 적용한다. 그 내용은 다음과 같이 정리된다.

① 이전 시간에서의 압력장이 주어졌을 때 분리 계산법의 첫 번째 단계에서는 비선형 비압축성 운동량 방정식을 다음과 같이 푼다.

$$\int \left( W \frac{D\tilde{U}_i}{Dt} + \frac{\partial W}{\partial x_i} \tilde{\sigma}_{ij} \right) d\Omega = 0 \quad (1)$$

$$W \in V_h, \quad V_h = \{v_h \mid v_h \in H^1, v_h = 0 \text{ on } \Gamma_g\}$$

$$\tilde{\sigma}_{ij} = -\tilde{p}'' \delta_{ij} + \tau_{ij}, \quad \tau_{ij} = 2\nu_e \tilde{S}_{ij}$$

모든  $W$ 에 대해 이 식을 만족하는  $\tilde{U}_i (\in H^1)$ 를 구한다.

중간 (intermediate) 속도의 경계 조건은  $\tilde{U}_i = \tilde{U}_i^{n+1}$  이다. 이는 시간 증분에 대해 2 차의 정확도를 가지며 자세한 내용은 Choi 등<sup>(13)</sup>을 참고 한다. 식 (1)에서 높은 레이놀즈수의 유동에서 안정된 해를 구하기 위해서 안정화 기법으로 SUPG(Streamline Upwind Petrov/Galerkin)<sup>(14)</sup> 방법을 사용한다. LES 로는 고정계수 Smagorinsky 모델을 사용하였으며, 모델상수로는 유동장 형태에 상관 없이  $C = 0.01$  을 사용하였다. 식 (1)로부터 얻어지는 비대칭 행렬은 병렬예조건화된 Bi-CGSTAB 을 이용하여 푼다<sup>(15,16)</sup>. 병렬예조건화로는 Block ILU 를 사용하였다.

② 두 번째 단계에서는 중간속도의 경계조건이 시간에 대해 2 차 정확도<sup>(13)</sup>를 가지도록 이전 단계에서 구한 압력장으로부터 다음과 같은 식을 추가로 푼다.

$$\frac{U_i^* - \tilde{U}_i}{\Delta t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \tilde{p}'' \quad (2)$$

③ 마지막 단계에서는 divergence-free 조건으로부터 얻어진 압력방정식을 풀어 생신된 압력장으로부터 중간속도를 수정함으로써 다음 시간단계에서의 속도를 구한다.

$$\frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial^2 \tilde{p}^{n+1}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial U_i^*}{\partial x_i} \quad (3a)$$

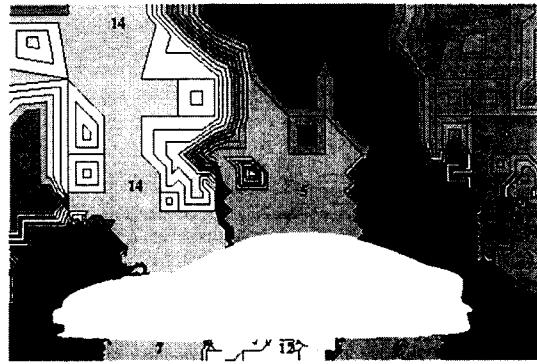


Fig. 1 Mesh partitioning around Tiburon model

$$\frac{\tilde{U}_i^{n+1} - U_i^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \tilde{p}^{n+1} \quad (3b)$$

출구에서의 압력 경계조건은 traction-free 조건으로서, 중간속도는 다음 시간단계에서의 속도와 같다는 조건을 이용하여 다음과 같이 주어진다:

$$\tilde{p}^{n+1} \delta_{ij} = \tau_{ij}^{n+1} = \tau_{ij} \quad (4)$$

벽에서의 압력 경계조건은 점착조건으로부터 다음과 같이 주어진다:

$$\frac{\partial p^{n+1}}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

차의 높이를 기준으로 한 레이놀즈수(Re)는  $7.5 \times 10^5$  이다.

## 2.2 병렬화 기법

생성된 비정렬 격자계를 분할하기 위해 METIS Library 를 사용하였으며 processor 간의 data communication 을 위해서는 MPI Library 를 사용하였다. Fig. 1 은 16 개의 processor 를 사용하여 계산한 경우 METIS Library 를 이용하여 분할된 계산 영역을 보여준다. 병렬 계산의 효율을 향상시키기 위하여 운동량방정식 및 압력방정식을 풀 때 Block ILU 병렬예조건인자(parallel preconditioner)를 사용하였다. 병렬예조건인자에 대한 좀 더 자세한 내용은 Kang 등의 논문<sup>(15)</sup>을 참고한다. 계산은 KISTI 슈퍼컴퓨팅센터의 IBM SP Machine 을 사용하였으며, CPU 는 16 개를 사용하였다. 계산 시간 간격은 0.003 초로 380 만개의 격자수를 기준으로 1 초 진행하는데 약 24 시간이 소요되었다.

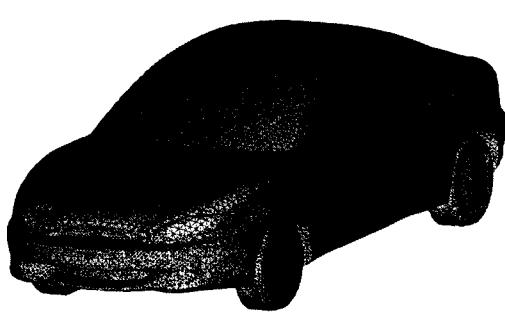


Fig. 2 Surface mesh of Tiburon model

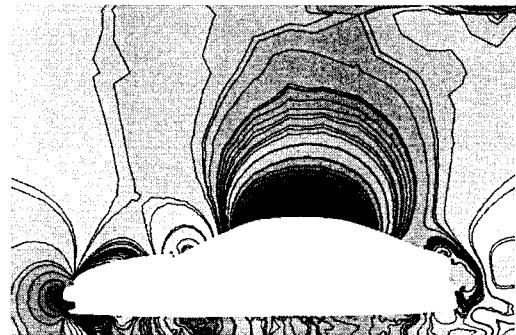
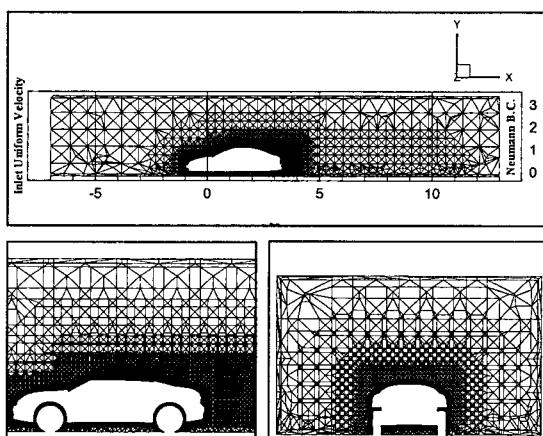
Fig. 5 Pressure field on the center plane ( $z = 0$ )

Fig. 3 Computational mesh around Tiburon model

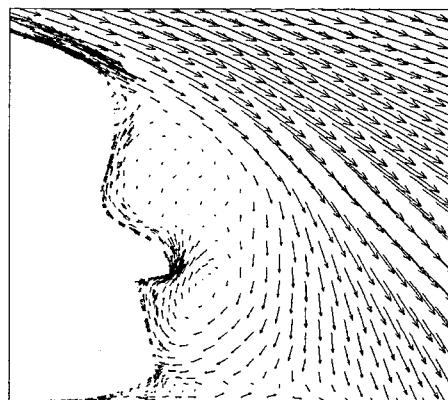


Fig. 6 Velocity field downstream of the rear body

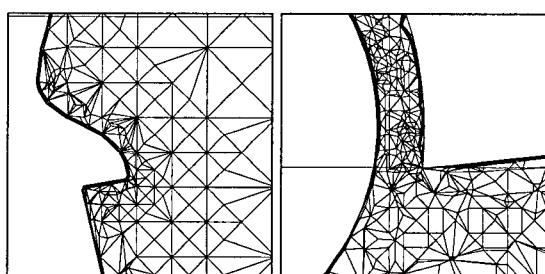


Fig. 4 Boundary layer mesh near the model surface

### 3. 풍동 조건에서의 수치해석

#### 3.1 Tiburon 모델의 개요

본 연구에서는 실제 자동차 모델인 Tiburon 모델을 채택하여 계산을 수행하였다. 4 면체를 이용한 두 가지 비정렬격자계에서 사용한 절점(node) 수는 약 160 만개와 380 만개이다. 경계층과 자동

차 뒷 부분의 와류를 세밀하게 분해하기 위해 자동차 표면 주위 와류생성지역에 격자를 집중적으로 분포시켰다. 자동차가 들어있는 채널의 크기는  $20 \times 3.6 \times 6$  (length  $\times$  height  $\times$  width) (m)이다. Fig. 2는 모델 표면의 격자 모습이며, Fig. 3은 완성된 160 만개의 비정렬격자계를 여러 단면에서 잘라서 본 그림이다. 자동차 모델의 크기는  $4.435 \times 1.790 \times 1.315$  (length  $\times$  height  $\times$  width) (m)이다. 경계층을 분해하기 위해 자동차 표면주위로 3 개의 유한요소로 구성된 얇은 격자 층을 쌓았다. Fig. 4는 자동차 주위의 얇은 격자 층을 보여준다. 격자 생성을 위하여는 상용프로그램인 ICEM-CFD를 사용하였다.

#### 3.2 풍동조건에서의 계산결과

시간간격을 0.003 초로 하여 약 21 초까지 유동을 계산하였다. Fig. 5는 자동차 중앙의 대칭면을 따라 잘린 평면에서의 압력분포를 보여준다. 출구에서의 압력을 0으로 하였다. 곡률의 변화가 심한 자동차 표면에서 압력구배의 절대치가 큼을 볼 수

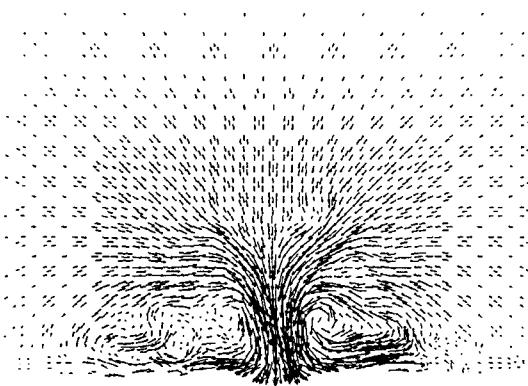


Fig. 7 Velocity field on the y-z plane at  $0.25 L$  behind the car model, where  $L$  is the length of the model

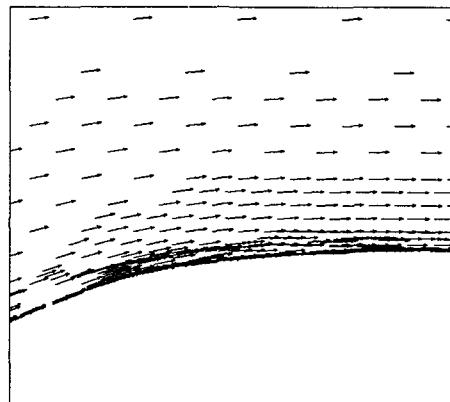


Fig. 10 Velocity field over the front roof (Fig. 8, B)

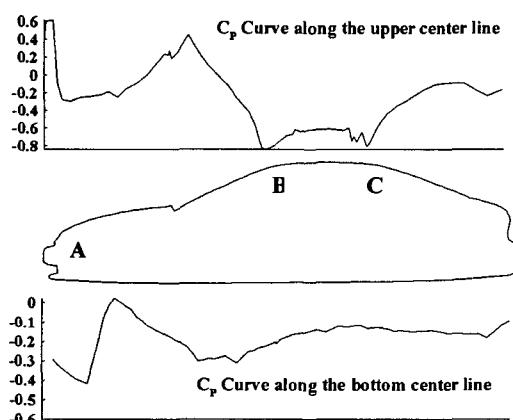


Fig. 8  $C_p$  curve along the center lines

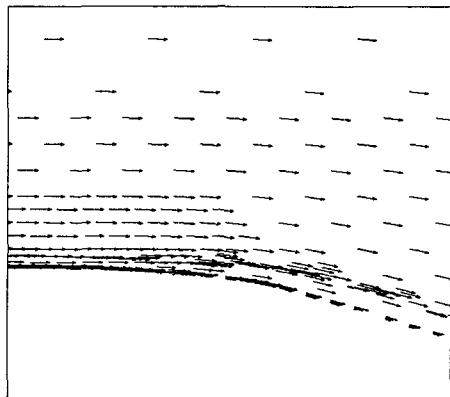


Fig. 11 Velocity field over the rear roof (Fig. 8, C)

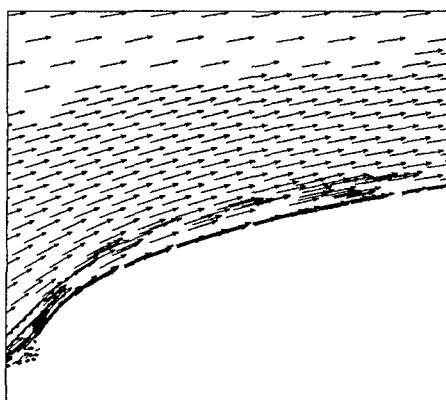


Fig. 9 Velocity field over the bonnet (Fig. 8, A)

있다. Fig. 6 은 자동차 뒷 부분에서 생성된 복잡한 와류의 형태를 보여준다. Fig. 7 은 풍동 출구에서 차 뒤의 한 단면( $x = \text{const.}$ )에 나타난 속도장으로 자동차 유동에서 대표적으로 볼 수 있는 와류의 쌍을 명확히 보여준다.

Fig. 8 은 380 만개 절점을 사용하여 계산한 경우 자동차의 윗면과 아래면에서 한 주기동안 시간 평균한 압력 계수를 나타낸다. 자동차 윗 표면의 경우 A, B, C 세 곳에서 역압력 구배가 존재하지만 모델의 형상이 유선형에 가까워 그 강도는 약하다 따라서 Choi 등<sup>(13)</sup>이 MIRA 모델에 대해서 얻은 결과와 달리 A, B, C 세 곳에서 와류가 거의 형성되지는 않는 것을 Fig. 9, 10, 11로부터 확인할 수 있다.

Fig. 12 는 시간에 따른 항력계수의 변화를 나타낸 그림으로 160 만개의 경우 0.307, 380 만개의 경

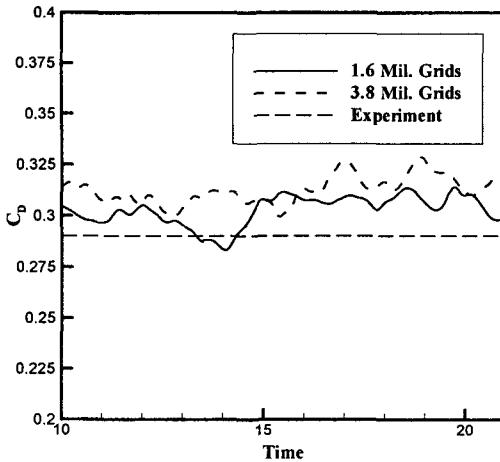


Fig. 12 Variation of drag coefficient with time for the wind-tunnel condition

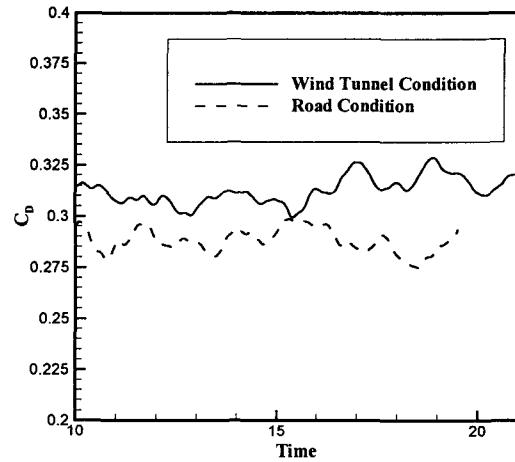


Fig. 14 Variation of drag coefficient with time for the road condition

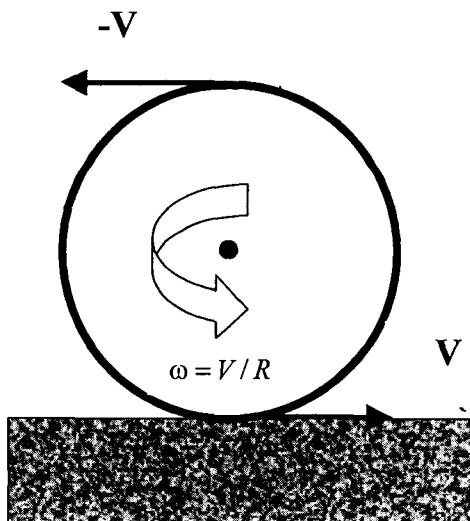


Fig. 13 Schematic diagram of the road condition

우 0.318로, 이는 1/4 크기 모델에 대한 풍동실험 값인 0.29에 오차 5~10% 이내로 예측된 수치이다. 한편, 절점수가 많은 격자계가 실험값과 약간 더 많은 차이를 보여주고 있어 절점수 약 700 만개로 구성된 격자계로 차후에 추가 계산을 수행함으로써 보다 수렴된 항력계수를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

#### 4. 주행 조건에서의 수치해석

##### 4.1 주행 조건의 적용

주행 조건(road condition)은 풍동 조건과 달리 지

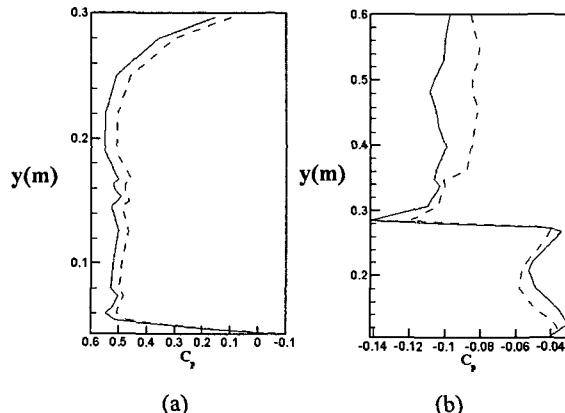
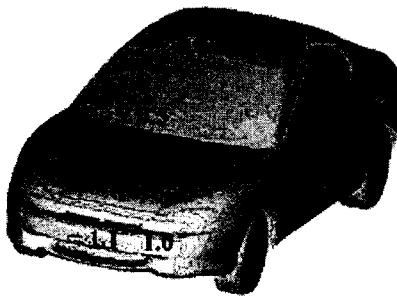


Fig. 15  $C_p$  curve along (a) the front bumper, and (b) the trunk and rear bumper (—, wind-tunnel condition; ---, road condition)

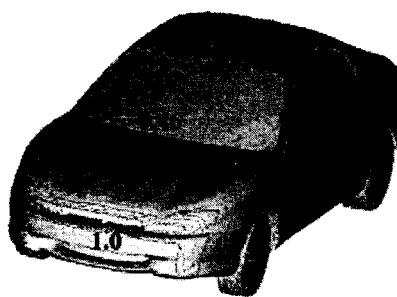
면을 움직이고 바퀴를 회전시켜 실제 자동차가 도로를 주행하는 것과 같은 조건을 부여하는 것이다. 그러면 유체의 자유유동속도( $U_\infty$ )와 같은 속도인  $V = U_\infty$ 로 움직이게 하고 바퀴의 회전속도는 지면에서 미끄러짐이 없다는 가정 하에 Fig. 13 으로부터  $\omega = V/R$  ( $R$ 은 바퀴의 반경)로 주어진다.

##### 4.2 계산 결과

약 380 만개의 절점을 가지는 격자계를 이용하여 주행조건 하에서 계산을 수행하였다. Fig. 14로 부터 약 10 초 동안 평균 항력계수는 0.288로 풍동조건의 항력 계수 0.318보다 약 10% 만큼 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 Elofsson 과



(a)

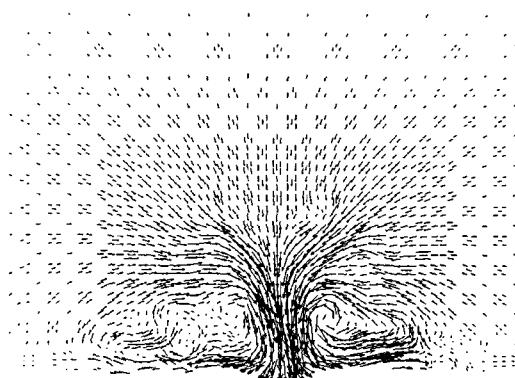


(b)

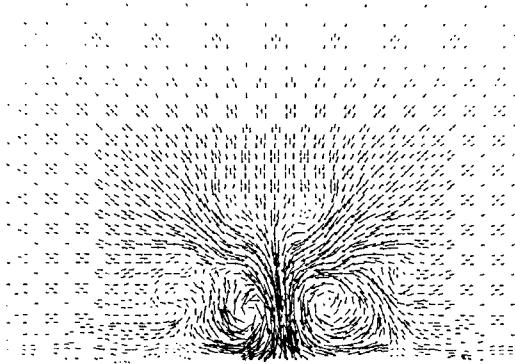
**Fig. 16** Pressure distribution on the model surface: (a) wind-tunnel condition, (b) road condition

Bannister<sup>(10)</sup>가 실험으로 측정한 결과와 정성적으로 잘 일치한다. 그들은 풍동실험을 통해, 자동차의 형상에 따라 다르지만, 주행조건에서의 항력이 풍동조건의 항력보다 대체로 약 5~10% 감소한다는 것을 보고하였다.<sup>(10)</sup> Good 등<sup>(11)</sup>도 실험을 통해서 주행 조건에서 항력이 감소하는 것을 보여주었다. 이러한 결과들을 참고하면, 다른 레이놀즈수에서도 정성적으로 비슷한 결과를 얻을 수 있을 것이라고 예측할 수 있다.

Fig. 15 는 항력 감소의 원인을 알아보기 위해 대략 한 주기 동안 시간평균한 압력장 데이터를 이용하여 자동차의 앞 범퍼와 트렁크 뒷 범퍼를 따라가면서 표면압력계수( $C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5\rho U^2}$ )를 그린 것이다. 앞 범퍼에서는 주행조건일 때 압력이 줄어들고 차 뒷 부분에서는 주행조건일 때 압력이



(a)



(b)

**Fig. 17** Velocity field viewed at  $x/L = 0.25$ : (a) wind-tunnel condition, (b) road condition

약간 커지는 것을 알 수 있다. (Fig. 15(a)와 15(b) 횡축의 눈금의 차이에 유의할 것) 따라서 결과적으로 차가 받는 항력은 주행조건에서 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig. 16 은 두 조건에서 차의 표면에서의 압력 분포를 보여준다. 역시 풍동조건일 때의 압력이 앞 범퍼와 유리창 부근에서 주행조건일 때 보다 높아짐을 알 수 있다.

특히 앞 범퍼에서의 압력이 더 많이 올라가는 것을 알 수 있다. Fig. 17 은 자동차 뒤 끝단에서  $0.25L$  만큼 멀어진 단면에서 그린 속도장이다. 여기서  $L$ 은 자동차의 길이이다. Fig. 17 의 속도장에서 보듯이 주행조건에서 생성된 와류의 크기 및 강도는 풍동조건의 그것보다 작고 약하다. 이는 Fig. 18 의 같은 단면에서 얻어진 압력분포로부터도 확인할 수 있다. 따라서 주행조건의 경우 풍동 조건보다 유동장의 압력이 와류 부분에서 좀더 많

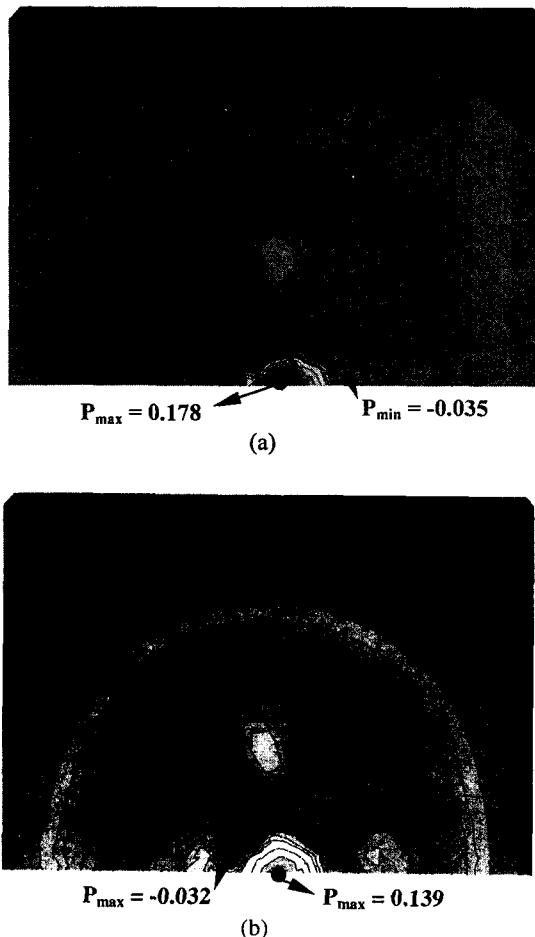


Fig. 18 Pressure field at  $x/L = 0.25$ : (a) wind-tunnel condition, (b) road condition

이 회복됨을 알 수 있고 이는 Fig. 15에서의 압력 계수 분포를 설명해 준다고 여겨진다. 또 하나 흥미로운 차이는 Fig. 17에서 볼 수 있듯이 풍동조건에서는 와류가 좌우로 확대되어 타원형에 가까운 반면 주행조건의 와류는 원에 가까운 형태를 가진다.

## 5. 결 론

(1) 비압축성 Navier-Stokes 방정식의 해석을 위한 유한요소해석 코드<sup>(13)</sup>에 LES를 도입하고 병렬화 작업을 추가하여 대규모의 유동장을 계산하기 위한 병렬 코드를 확립하였다. 병렬화 작업에는 METIS와 MPI Library들을 활용한 영역분할 방법을 적용하였다.

(2) Tiburon 모델을  $Re = 7.5 \times 10^5$ 에서 약 160 만 개와 380 만개의 절점을 사용하여 계산한 결과 얻

어진 항력은 기존의 실험치와 비교할 때 약 10% 이내의 오차를 가진다.

(3) 바퀴의 회전과 지면이 움직이는 효과를 고려한 주행조건에서 얻어진 항력은 풍동조건에서 얻어진 항력보다 작아짐을 확인하였으며, 이는 기존의 실험결과와 정성적으로 잘 일치한다.

(4) 주행조건에서는 차의 뒷 범퍼와 트렁크 부근에서 풍동조건보다 약한 강도의 와류가 생성된다. 이는 좀 더 많은 압력 회복이 트렁크 부근에서 이루어지게 하고 결국 항력계수는 감소하게 된다.

## 후기

본 연구는 산업자원부와 과학기술부의 차세대자동차기술개발사업, 한국과학기술정보연구원(KISTI) 슈퍼컴퓨팅센터의 제4차 슈퍼컴퓨팅 응용 전략과제 지원 프로그램 및 마이크로열시스템연구센터의 지원을 받았으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Tezduyar, T. E., Behr, M., Mittal, S. and Johnson, A. A., 1992, "Computation of Unsteady Incompressible Flows with the Stabilized Finite Element Methods – Space-Time Formulations, Iterative Strategies and Massively Parallel Implementations," *In New Methods in Transient Analysis* (Edited by Smolinski, P., Liu, W. K., Hulbert, G. and Tamama, K.), AMD-Vol. 143, ASME, New York, pp. 7~24.
- (2) [http://www.aem.umn.edu/Solid-Liquid\\_Flows](http://www.aem.umn.edu/Solid-Liquid_Flows), "Direct Simulation of the Motion of Particles in Flowing Liquids," *NSF KDI/New Computational Challenge (1998-2001)*.
- (3) Choi, H. G., Kang, S. W. and Yoo, J. Y., 2002, "Parallel Dynamic Large Eddy Simulation of Turbulent Flow around MIRA Model," *2002 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, FEDSM2002-31100.
- (4) <http://www-users.cs.umn.edu/~karypis/metis/>
- (5) Carr, G., 1992, "Validation of CFD Codes for Predicting Aerodynamic Performance," *Automotive Engineer*, 17, pp. 46~49.
- (6) Ramnefors, M., Bensryd, R., Holmberg, E., Perzon, S., 1996, "Accuracy of Drag Predictions on Cars Using CFD – Effect of Grid Refinement and Turbulence Models," *SAE Paper 960681*.
- (7) Han, T., Sumantran, V., Harris, C., Kuzmanov, T., Huebler, M. and Zak, T., 1996, "Flow-Field Simulations of Three Simplified Vehicle Shapes and Comparisons with Experimental Measurements," *SAE Paper 960678*.
- (8) Johnson, A. A. and Tezduyar, T. E., 1997, "Parallel Computation of Incompressible Flows with Complex

- Geometries," *Inter. J. for Numerical Methods in Fluids*, 24, pp. 1321~1340.
- (9) Krajnović, S. and Davidson, L., 2001, "Large-Eddy Simulation of the Flow around a Ground Vehicle Body," *SAE Paper 2001-01-0702*.
- (10) Elofsson, P. and Bannister, M., 2002, "Drag Reduction Mechanisms Due to Moving Ground and Wheel Rotation in Passenger Cars," *SAE Paper 2002-01-0531*.
- (11) Le Good, G. M., Howell, J. P., Passmore, M. A. and Cogotti, A., 1998, "A Comparison of On-Road Aerodynamic Drag Measurements with Wind Tunnel Data from Pininfarina and MIRA," *SAE Paper 980394*.
- (12) Choi, H. and Moin, P., 1994, "Effects of the Computational Time Step on Numerical Solutions of Turbulent Flow," *J. Comp. Phys.*, 113, pp. 1~4.
- (13) Choi, H. G., Choi, H. and Yoo, J. Y., 1997, "A Fractional Four-Step Finite Element Formulation of the Unsteady Incompressible Navier-Stokes Equations Using SUPG and Linear Equal-Order Element Methods," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 143, pp. 333~348.
- (14) Brooks, A. N. and Hughes, T. J. R., 1982, "Streamline Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Dominated Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 32, pp. 199~259.
- (15) Kang, S. W., Choi, H. G. and Yoo, J. Y., 2003, "Parallel Preconditioner for the Domain Decomposition Method for Discretized Navier-Stokes Equation," to appear in *Trans. KSME B*.
- (16) Kang, S. W., Choi, H. G. and Yoo, J. Y., 2002, "Parallelized Dynamic Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Around a Vehicle Model," *Proc. KSME 2002 Spring Annual Meeting*, 02S260, pp. 1562~1567.