

# Chimera 격자기법을 이용한 자동차 주위의 유동장 해석

안민기\*<sup>1</sup>, 박원규\*<sup>2</sup>

## Analysis of the flow field around an automobile with Chimera grid technique

M. K. Ahn and W. G. Park

This paper describes the analysis of flow field around an automobile. The governing equations of the 3-D unsteady incompressible Navier-Stokes equations are solved by the iterative time marching scheme. The Chimera grid technique has been applied to efficiently simulate the flow around the side-view mirror. To validate the capability of simulating the flow around a ground vehicle, the flows around the Ahmed body with 12.5° and 30° of slant angles are simulated and good agreements with experiment and other numerical results are achieved. To validate Chimera grid technique, the flow field around a cylinder was also calculated. The computed results are also well agreed with other numerical results and experiment. After code validations, the flow around an automobile has been simulated. The A- and C-pillar vortex and other flow phenomena around the ground vehicle are evidently shown. The flow around the side-view mirror is also well simulated using the Chimera grid technique.

**Key Words :** 자동차 주위유동 (Flow around the automobile), 비압축성 나비에-스톡스방정식(Incompressible Navier-Stokes equation), 시간 진행 반복 기법(Iterative time marching scheme), Chimera 격자기법(Chimera grid technique), 후사경(Side-view mirror), Baldwin-Lomax 난류모델(Baldwin-Lomax turbulent model), Ahmed Body 주위유동 (Flow around the Ahmed body)

### 1. 서 론

자동차 주위의 유동은 항력의 감소와 관련한 연료의 절감뿐만 아니라 외부의 유동소음 저감에 의한 안락감, 그리고 자동차 주행에 있어 조종성(handling)에 이르기까지 광범위한 자동차의 성능관점에서 고려되어야 한다. 항력의 측면

에서 지상 운송체의 경우 주행속도가 증가함에 따라 바퀴의 마찰저항은 거의 일정하나 공기저항에 의한 손실은 속도의 제곱에 비례하여 증가하므로 고속화 추세에 있는 요즈음에 있어서 항력감소에 대한 연구가 많이 진행되어오고 있다. 또한 최근 생활 수준의 향상으로 소비자들이 요구하는 자동차의 성능 조건은 점점 까다로워지고 고급화되는 추세에 있는데, 특히 정숙화된 차량에 대한 요구가 급증하고 있다. 이러한 요구에 부합하기 위하여 엔진, 트랜스미션, 타

\*1 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

\*2 정회원, 부산대학교 기계공학부

이어, 머플러, 각종 부품소음 등의 소음은 점진적으로 저감되어 음에 따라 자동차 실외의 공기유동에 의해 발생하는 소음, 즉 공력소음에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 이러한 공력소음을 해석하고 저감하기 위해 최근에는 전산해석적 방법에 의한 시뮬레이션에 의존하려고 하는 경향이 증가하고 있는데, 공력소음은 유동해석과 매우 밀접한 관계가 있고 자동차 주위의 공기유동은 자동차 형상의 복잡성, 지면과 바퀴의 영향 등으로 인해 이론적 접근이 매우 어려운 분야에 속한다. 따라서 자동차 주위의 유동해석은 항력감소는 물론이고 공력소음에 매우 중요한 분야로써 매우 정도 높은 계산이 필요하다. 본 연구와 관련하여 선행된 자동차 주위 유동해석 분야에 대한 연구들은 실험적 방법[1,2]이 예전에는 많았으나, 최근 수치 기법의 개발과 컴퓨터의 급속한 발달로 인해 수치적 해석의 영역이 점차 확대되어져 가고 있다. 수치해석에는 포텐셜 유동부터 N-S방정식을 이용한 해석까지 다양하게 분포되어 있으나, 최근에는 3차원 N-S방정식을 이용한 수치해석 연구가 주로 진행되어오고 있는데, Han[3]에 의해 Ahmed body 주위의 난류유동이 해석되었고, 정영래 등[4,5]에 의해서는 고속전철 및 미니밴(Minivan) 주위의 난류유동장이 계산되어졌다. 허남건 등[6]과 Horinouchi 등[7], 그리고 Okumura 등[8]은 3차원 자동차 주위의 난류유동을 해석한 적이 있다.

본 연구의 목적은 3차원 N-S방정식을 적용하여 자동차 주위의 유동장을 계산하여 자동차 주위의 유동장을 이해하고 특히 Chimera 격자기법을 이용하여 후사경과 같은 자동차 각 부품에 대한 상세한 유동정보를 얻을 수 있게 하는데 목적이 있으며, 코드의 검증용 위하여 12.5° 와 30° 의 slant angle을 가진 Ahmed body 주위 유동을 해석하여 실험치와 Han[3]의 결과 비교하여 타당성을 입증하였다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석 방법

3차원 비정상 상태 비압축성 점성 유동의 지배 방정식은 N-S방정식으로서, 이를 무차원화

한 후 일반화된 곡선좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\hat{E} - \hat{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\hat{F} - \hat{F}_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\hat{G} - \hat{G}_v) = 0 \quad (1)$$

여기서  $\hat{q}$ 는 유체변수이며  $\hat{E}$ ,  $\hat{F}$ ,  $\hat{G}$ 는 대류항을 의미하며,  $\hat{E}_v$ ,  $\hat{F}_v$ ,  $\hat{G}_v$ 는 점성항을 의미한다. 식(1)의 해를 구하기 위해, 시간진행 반복행진법(Iterative time marching)[9]을 사용하는데 먼저 운동량 방정식을 시간 행진(time marching) 방법을 이용하여 유한차분화시키고 여기에 다시 뉴턴 반복법을 적용시키면 다음으로 나타난다.

$$\frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1,k+1} - \bar{q}^n) + \delta_\xi \bar{E}^{n+1,k+1} + \delta_\eta \bar{F}^{n+1,k+1} + \delta_\zeta \bar{G}^{n+1,k+1} = \delta_\xi \bar{E}_v^{n+1,k+1} + \delta_\eta \bar{F}_v^{n+1,k+1} + \delta_\zeta \bar{G}_v^{n+1,k+1} \quad (2)$$

여기서  $\bar{q}$ 는 운동량 방정식만에 의한 유체변수로서  $\bar{q} = \{u/J, v/J, w/J\}$ 를 의미하고, 윗첨자  $n+1$ ,  $n$ 은 시간 단계를 의미하며  $k+1$ 은 반복 단계를 의미한다. 다음으로 윗식의  $\bar{E}$ ,  $\bar{F}$ ,  $\bar{G}$ ,  $\bar{E}_v$ ,  $\bar{F}_v$ ,  $\bar{G}_v$ 를 'n+1' 시간과 'k' 반복 횟수에 대해 부분적으로 선형화를 시키면

$$\left( \frac{1}{\Delta \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} \bar{A} + \frac{\partial}{\partial \eta} \bar{B} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \bar{C} \right) \Delta \bar{q} = \omega \bar{R}^{n+1,k} \quad (3)$$

를 얻는다. 여기서  $\Delta \bar{q} = \bar{q}^{n+1,k+1} - \bar{q}^{n+1,k}$ 를 의미하고,  $\omega$ 는 완화 계수(relaxation factor)이며 A, B, C는 다음과 같이 정의되는 Jacobian 행렬이다.

$$\bar{A} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{E} - \bar{E}_v); \quad \bar{B} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{F} - \bar{F}_v);$$

$$\bar{C} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{G} - \bar{G}_v)$$

그리고  $\bar{R}^{n+1,k}$  는 잔류벡터로 불리며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \bar{R}^{n+1,k} = & -\frac{1}{\Delta\tau} (\bar{q}^{n+1,k} - \bar{q}^n) \\ & - (\delta_\xi \bar{E}^{n+1,k} + \delta_y \bar{F}^{n+1,k} + \delta_z \bar{G}^{n+1,k}) \\ & + (\delta_\xi \bar{E}_v^{n+1,k} + \delta_y \bar{F}_v^{n+1,k} + \delta_z \bar{G}_v^{n+1,k}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 만약  $\Delta q$ 가 영(zero)으로 간다면 잔류벡터  $\bar{R}^{n+1,k}$ , 즉 비정상 운동량 방정식이 정확하게 만족됨을 알 수 있고, 그 해는  $\omega$  와  $A, B, C$  에 독립적임을 알 수 있다.

연속방정식은 비압축성 유동 해석을 효율적으로 수행하기 위해 Marker-and-Cell(MAC)의 개념[10]을 다음과 같이 이용하였다.

$$p^{n+1,k+1} - p^{n+1,k} = -\beta(\nabla \cdot \bar{V}) \quad (5)$$

여기서  $\beta$ 는 완화계수를 의미한다. 이 식에서 만약  $\Delta p$  가 영(zero)으로 접근한다면 연속방정식이 비정상 상태에서도 정확히 만족함을 알 수 있다.

본 연구에서 대류항은 QUICK방법[11]을 이용하여 유한 차분화 시켰으며, 점성항은 공간적 중앙 차분화를 이용하였다. 그리고 연속 방정식은 중앙차분을 이용하였으며, 본 알고리즘의 안정화를 위해 4차의 인공감쇠항(artificial damping)을 첨가하였다. 난류유동 해석을 위해서는 Baldwin - Lomax모델[12]이 사용되었다.

### 3. Chimera 격자 기법

영역분할기법 중의 하나인 Chimera, 혹은 overlaid(overset) 격자기법은 해석 대상 물체를 주격자와 부격자로 나누어 각각에 대해 독립적으로 격자를 생성한 후, 이들을 중첩시켜 전체 해석 대상을 계산하는 방법으로써, 넓은 의미로는 격자의 중첩뿐만 아니라 지배방정식의 중첩도 가능하며 복잡한 물체주위의 유동, 상대운동이 있는 유동, 적응격자의 하나로 사

용하는 경우, 혹은 변수연구(parametric study) 등에 매우 적합한 방법으로 알려져 오고 있다. Chimera 격자기법은 우선 주(major)격자와 부(minor)격자를 따로 격자생성하여 중첩시키는데 주격자가 부격자를 포함하는 경우, 부격자에서 보간을 위한 경계나 사용자가 정한 위치가 결정되면 이러한 경계의 내부에 해당하는 주격자들은 hole point로 구분하고 계산과정에서 제외된다. 이러한 hole point들을 blank point로서  $i_b = 0$ 으로 지정되고, 정상적인 격자점은  $i_b = 1$ 로 지정된다. 즉 정상적인 격자점에서는 계산을 수행하다가 hole point를 만나면  $i_b = 0$ 에 의해 계산이 진행되지 않게 된다. 또한 이러한 hole point들의 경계로 구성되는 fringe point가 계산의 경계면으로 설정되고, 이 fringe point들을 통해 부격자의 유동 정보가, 2차원인 경우 bilinear interpolation, 3차원인 경우 trilinear interpolation을 통해 주격자계로 입력된다. 이러한 유동정보의 전달은 부격자의 계산에서도 부격자의 경계조건을 위해 주격자에서 부격자로 이동하게 된다. 이러한 알고리즘은 식(2)에서 blank point인  $i_b$ 를 도입하여 수정을 가함으로써 간단히 만족시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta\tau} (\bar{q}^{n+1,k+1} - \bar{q}^n) + i_b \delta_\xi \bar{E}^{n+1,k+1} + i_b \delta_y \bar{F}^{n+1,k+1} \\ + i_b \delta_z \bar{G}^{n+1,k+1} = i_b \delta_\xi \bar{E}_v^{n+1,k+1} + i_b \delta_y \bar{F}_v^{n+1,k+1} \\ + i_b \delta_z \bar{G}_v^{n+1,k+1} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)은 hole point에서는  $i_b = 0$ 이 되어  $\bar{q}^{n+1} = \bar{q}^n$ 이 된다. 따라서 유동벡터는 계산 전후에 값이 변화하지 않게 된다. 이와 같이 Chimera 기법은 blank point인  $i_b$ 의 도입만으로 알고리즘이 만들어지므로 기존의 프로그램에 큰 수정을 가할 필요가 없다는 장점을 가지고 있다.

### 4. 초기조건 및 경계조건

본 연구에서는 초기조건으로 자유유동조건

을 이용하며, 격자의 외부경계가 자동차로부터 충분히 먼 거리에 있다고 하여 원거리 유입 경계조건으로 역시 자유유동조건을 사용하였으며, 유출 경계조건은 속도의 외삽과  $p=p_{\infty}$ 로부터 구하였다. 자동차 표면에서는 점착조건(no slip)과 표면의 법선 압력구배가 영(zero)이라는 조건을 이용하였고, 지면에서는 지면과 자동차의 상대운동을 고려하기 위해 자유유동과 같은 속도를 주었다.

본 연구에서 계산을 위한 격자는 Fig.10(a)와 (b)에서 보듯이 multiblock으로 전방( $30 \times 57 \times 67$ )과 후방( $45 \times 57 \times 67$ ), 자동차 밑 부분( $78 \times 25 \times 14$ ), 자동차 주위( $78 \times 25 \times 32$ ), 자동차 옆부분( $78 \times 33 \times 67$ )으로 구성되는 5개의 blocked grid로 생성시켰으며, 후사경의 유동을 해석하기 위해서 Fig.10(d)와 같이 Chimera 격자 기법을 이용해서 후사경의 주위에 O-H격자( $45 \times 37 \times 13$ )를 생성시켰다. 또한 측풍이 없다는 조건하에 대칭조건을 이용하여 자동차의 반(half)평면에 대해서만 지배방정식을 풀었다.

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 Ahmed body를 이용한 코드 검증

유동해석 코드를 검증하기 위하여  $12.5^\circ$ 와  $30^\circ$ 의 slant angle을 가진 Ahmed body 주위 유동을 해석하였는데, Fig.1은 Ahmed body의 표면격자를 나타내고 있다. 먼저 slant angle  $12.5^\circ$ 에 대한 결과로, Fig.2는 표면압력을 실험치 [13] 그리고 Han[3]의 수치해석 결과와 비교하였는데, 비교적 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 후미에서 비록 Han의 수치해와 본 연구결과는 서로 잘 일치하는 결과를 얻었지만, 실험치와는 상당히 차이를 보이고 있는데 이는 후미에서 난류모델이 광범위한 영역에서 발생하는 유동박리 현상 및 강한 와류유동을 정확히 예측하지 못하기 때문인 것으로 여겨진다. Fig.3과 Fig.4는 slant angle  $30^\circ$ 에 대한 수직단면에서 속도벡터를 실험과 비교한 그림으로써 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig.5(a)는 Hucho[1]에 의해 제시된 Ahmed body의 후미에

서 발생하는 일반적인 유동 특징을 스케치한 것이며, Fig.5(b)는 본 연구의 Ahmed body의 후미의 유동 특성인데, slant angle을 가진 일반적인 차량 형상에서 보여지는 후미의 유동 경향이 비교적 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러므로 본 수치해석방법이 자동차등의 지상운송체 주위 유동해석에 적당함을 보여주고 있다.

### 5.2 Chimera 격자기법 검증을 위한 Cylinder 주위 유동해석

Chimera 격자기법을 이용한 유동해석 코드의 검증을 위해 실린더 주위의 유동을 해석하였다. Fig.6은 2차원 실린더의 Chimera 격자를 나타내고 있으며, Table 1은 실린더의 양력과 항력계수, Strouhal 수를 타 연구자의 결과와 비교한 것으로 비교적 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig.7은 실린더 표면에서 압력계수를 나타낸 그림으로 실험치와 잘 일치함을 보여 주고 있다. Fig.8은 레이놀즈수 200일 때 Karman 보텍스 유동을 보여주는 것으로 Rogers와 Kwak [17]의 결과와 본 연구에서 수행한 단일(Single) 격자와 Chimera 격자의 결과를 비교한 것으로 모두 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig.9는 Fig.8의 각 시간대의 표면압력계수를 단일격자와 Chimera 격자로 비교한 것으로, 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 그러므로 본 유동해석코드에 Chimera 격자기법 적용이 만족할 만한 결과를 주고 있다고 결론지을 수 있었다.

[Table 1] Lift, drag coefficient, and Strouhal number of the flow over the circular cylinder at  $Re=1000$ .

공력특성값 연구자별		$C_D$	$C_L$	St
		Koike et al [15]	$1.47 \pm 0.21$	$\pm 1.3$
古池 et al [16]		$1.5 \pm 0.2$	$\pm 1.4$	0.24
Cox et al [17]		$1.56 \pm 0.19$	$\pm 1.45$	0.24
Present	Single	$1.43 \pm 0.14$	$\pm 1.14$	0.23
	Chimera	$1.44 \pm 0.17$	$\pm 1.28$	0.23

### 5.3 자동차 주위 유동해석

지상운송체 유동해석코드와 Chimera 격자기법 적용에 대한 검증이 끝난 후, 자동차 주위 유동해석을 수행하였다. Fig.10은 자동차의 표면 격자와 Chimera 격자를 이용한 후사경의 표면 격자를 보여주고 있으며, Fig.11은 유동방향으로의 표면 압력계수 값을 나타내고 있는데,  $J=2$ 는 대칭평면(symmetric plane)을 의미한다. Fig.12는 자동차 주위의 3차원 유선을 나타내고 있는데, Fig.12(a)의 정면에서 본 유선그림을 보면 자동차의 앞쪽범퍼 부근에서 정체점이 형성되고 있으며, 앞쪽 유리창에서 부딪힌 주(main) 유동이 전면 유리창의 옆을 타고 넘으면서 박리와 재부착에 의해 A-pillar 보텍스가 발생하는 것을 보여주고 있다. 이러한 A-pillar 보텍스의 발생과정은 Fig.13(a)에서 더욱 잘 확인할 수 있다. Fig.12(b)의 후방에서 본 유선그림을 보면 자동차 측면을 따라 흘러온 유동이 후방유리창으로 흘러들면서 C-pillar 보텍스가 형성되고 있음을 잘 볼 수 있는데, 이는 다시 Fig.13(b)에서 확인할 수 있다. Fig.13은 자동차 전면유리창 코너주위와 후방 유리창 코너주위에서 생기는 A-pillar 보텍스와 C-pillar 보텍스를 보여주고 있는데, 이들 보텍스가 공력소음 발생에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Fig.14는 자동차의 표면유선을 나타내고 있으며, Fig.15는 자동차와 후사경에 대한 등압력선을 보여주고 있다. 등압력선은 자동차의 앞 범퍼의 정체점 유동에서 가장 높고, 후사경과 앞쪽 유리창에서도 대체적으로 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig.16은 Chimera 격자기법을 이용하여 해석한 후사경 주위 유동에 대한 해석결과로써 Fig.16(a)는 후사경의 표면속도벡터와 표면유선을 후사경 전방에 대해 나타내었고, Fig.16(b)는 후사경 후방에 대해 나타내었다. Fig.16(a)에 의하면 후사경의 차체 부착면 부근에서 정체점이 형성되었으며, 이러한 정체점은 표면유선을 통해 더욱 잘 관찰할 수 있다. 정체점을 지나면서 매끄러운 표면을 따라 가속이 이루어지고 후사경 상면에서 떨어져 나감을 볼 수 있다. Fig.16(b)에서 보면 부착면과 후사경의 빈 공간에서 가속된 공기가 박리되면서 매우 광범위한

와류유동이 형성되는데, 이는 다시 Fig.17과 Fig.18에서 확인할 수 있으며 이러한 와류유동이 후사경 소음에 커다란 영향을 미치게 되나, Fig.16(b)의 후사경 미러면의 표면유선에서 볼 수 있듯이 후사경 미러면에 빗물 등이 미러면 바깥 경계면으로 흘러 나가도록 하여 운전자에게 적당한 후방시야를 제공하는 장점도 있다. Fig.17의 (a), (b), (c), (d)는 후사경의 각 단면에서의 속도 벡터와 유선을 나타낸 것이고, Fig.18은 후사경의 3차원 유선을 나타낸 것으로 후사경의 상면과 하면에서 박리가 발생하면서 매우 큰 와류유동을 형성하고 있는 것을 보여주고 있다.

### 6. 결론

본 연구에서는 3차원 비압축성 점성 유동의 N-S방정식을 사용하여 자동차 주위의 유동해석을 효과적으로 수행하였다. 후사경 주위의 유동해석을 효과적으로 수행하기 위해 Chimera 격자기법을 사용하였다. 유동해석 코드 검증을 위하여 Ahmed body의 유동을 해석하였고, Chimera 검증을 위하여 실린더 주위의 유동을 해석하였으며, 두가지 경우 모두에서 실험치 및 타 연구자의 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 이상의 검증된 코드를 이용하여 자동차 주위의 유동해석 결과에 의하면 후사경 뒤쪽에서 발생하는 박리와 3차원 와류, A-/ C-pillar 보텍스 등의 발생을 확인할 수 있었고, Chimera 격자기법을 이용하여 후사경 주위의 유동을 잘 해석할 수 있었다.

### 7. 후기

본 연구과제는 한국학술진흥재단의 대학부설 연구소 중점 연구과제(총괄 과제명: 자동차 부품의 설계 및 제작을 위한 CAE기법의 개발에 관한 연구)로의 세부연구과제(세부 과제명: 자동차 주위 유동해석 및 공력소음해석을 위한 CAE기법 개발)로 이루어졌으며, 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Hucho, W. H., "Aerodynamics of Road Vehicles : from fluid mechanics of road vehicle engineering," Butterworths, (1987).
- [2] Ahmed, S. R., "Wake Structure of Typical Automobile Shapes," Journal of Fluids Engineering, Vol. 103, (1981), pp 162-169.
- [3] Han, T., "Computational Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flow Around a Bluff Body in Ground Proximity," AIAA Journal, Vol. 27, No. 9, (1989), pp 1213-1219.
- [4] Jung, Y. R., Park, W. G., and Ha, S. D., "Numerical Viscous Flow Analysis Around a High Speed Train with Crosswind Effects," AIAA Journal, Vol. 36, No. 3, (1998), pp. 477-479.
- [5] 정영래, 박원규, 박영준, 김종섭, 홍성훈, "3차원 미니벤 형상 주위의 비압축성 점성유동," 한국전산유체공학회지 제2권, 제1호, (1997), pp 46-53.
- [6] 허남건, 윤성영, 조원국, 김광호, "3차원 자동차 주위의 유동장에 관한 수치적 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, (1992), pp 172-176.
- [7] Horinouchi, N., Kato, Y., Shinano, S., Kondoh, T., and Tagayashi, Y., "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System," SAE Paper 950628, (1995).
- [8] Okumura, K. and Kuriyama, T., "Practical Aerodynamic Simulations( $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_{YM}$ ) Using a Turbulence Model and 3rd-Order Upwind Scheme," SAE Paper 950629, (1995).
- [9] Park, W. G., "A Three-Dimensional Multigrid Technique For Unsteady Incompressible Viscous Flows," Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, March, (1993).
- [10] Harlow, F. H. and Welch, J. E., "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow with Free Surfaces," Physics of Fluids, Vol. 8, No. 12, (1965), pp 2182-2185.
- [11] Leonard, B. P., "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 19, (1979), pp 59-98.
- [12] Baldwin, B. S. and Lomax, H., "Thin-Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 78-0257, (1978), pp. 79-257.
- [13] Ahmed, S. R., Ramm, G., and Faltin, G., "Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake," SAE Paper 840300, Feb., (1984).
- [14] Koike, H., Ishihara, K., Goto, T. and Takano, Y., "數値解析による流體音の音原分布の解析," 日本機械學會論文集 B編, 62卷, 595号, (1996), pp. 992-998.
- [15] 古池 外 2 名, 川崎重工技報, 116 (1993)
- [16] Cox, J. S., Rumsey, C. L., Brentner, K. S., and Younis, B. A., "Computation of Sound Generated by Viscous Flow Over a Circular Cylinder," NASA Technical Memorandum 110339, (1997).
- [17] Rogers, S. E. and Kwak, D., "Upwind Differencing Scheme for the Time-Accurate Incompressible Navier-Stokes Equations," AIAA Journal Vol. 28, No. 2, February, (1990), pp. 253-262.
- [18] 정세민, 이영길, 이승희, "중첩격자계를 사용한 2차원 복수 물체주위 유동장의 수치 계산," 한국전산유체공학회 춘계학술대회 논문집, (1996), pp.105-110.

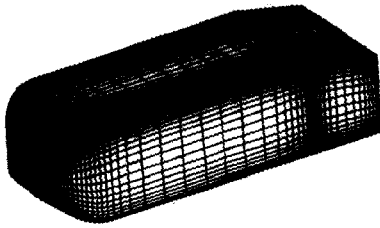


Fig. 1 The surface grid of Ahmed body

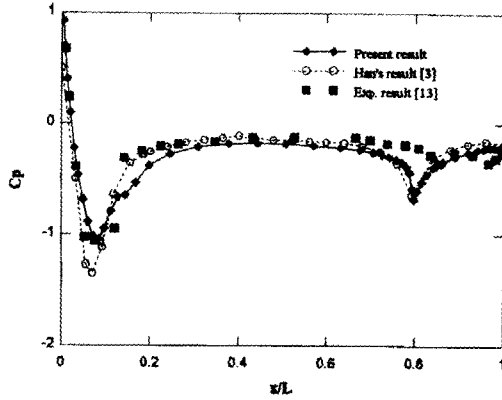


Fig. 2 Comparison of surface pressure distribution with 12.5° slant angle

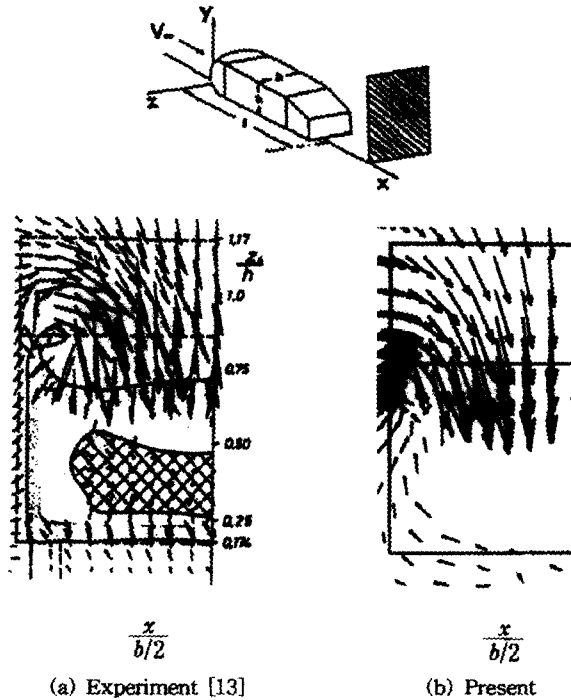


Fig.3 Comparison of cross-flow velocity distributions in the transverse plane at  $X/L=1.077$  (30-deg. slant angle)

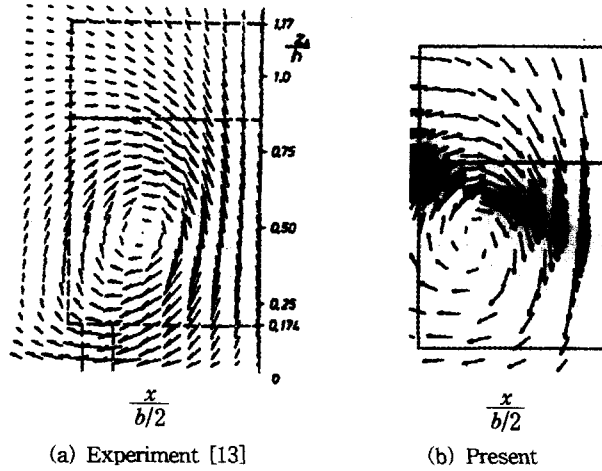


Fig.4 Comparison of cross-flow velocity distributions in the transverse plane at  $X/L=1.479$  (30-deg. slant angle)

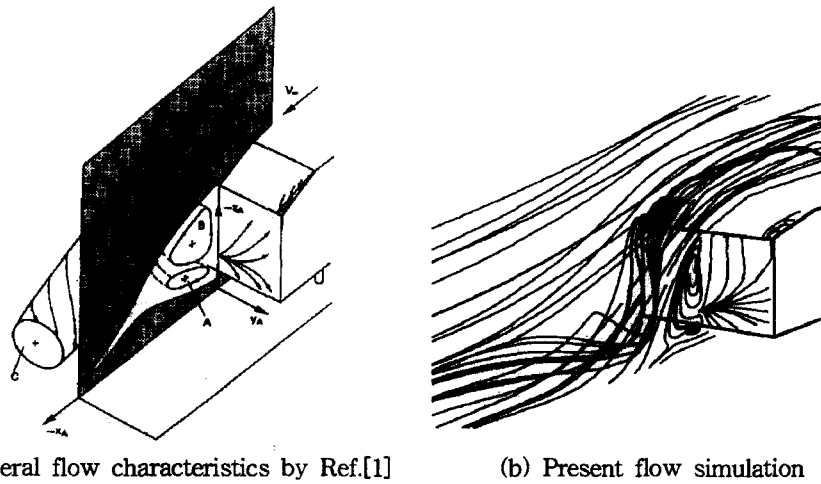


Fig.5 Schematic of flow characteristics at the ahmed body.

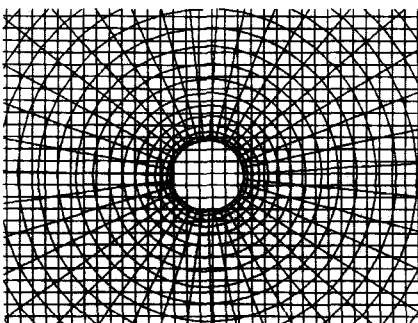


Fig.6 Chimera grid of 2D cylinder

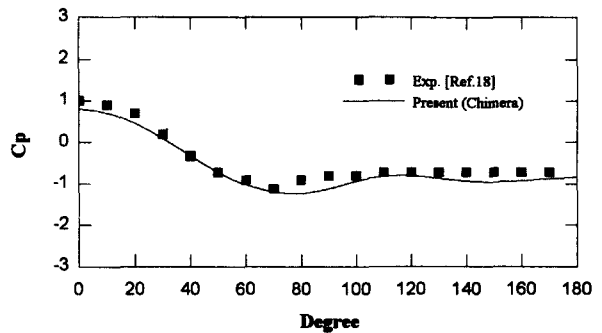


Fig.7 Coefficient of pressure distribution on the cylinder surface at  $Re=2800$



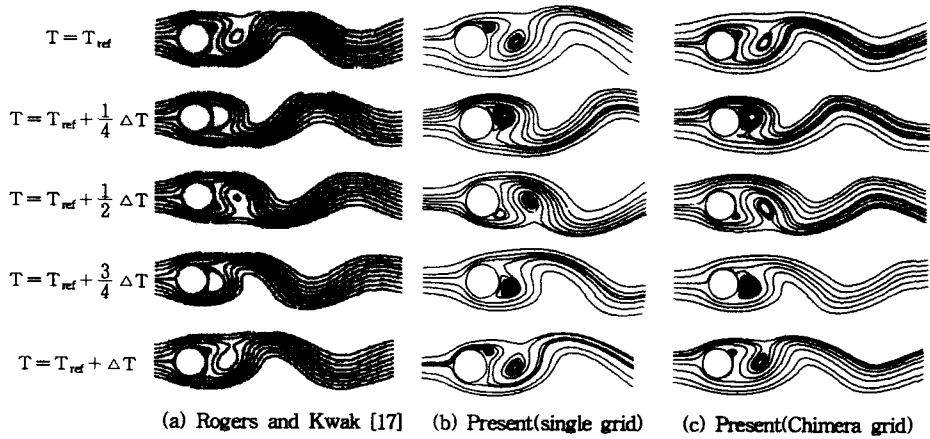


Fig.8 Streamlines of the flow over the circular cylinder at  $Re=200$

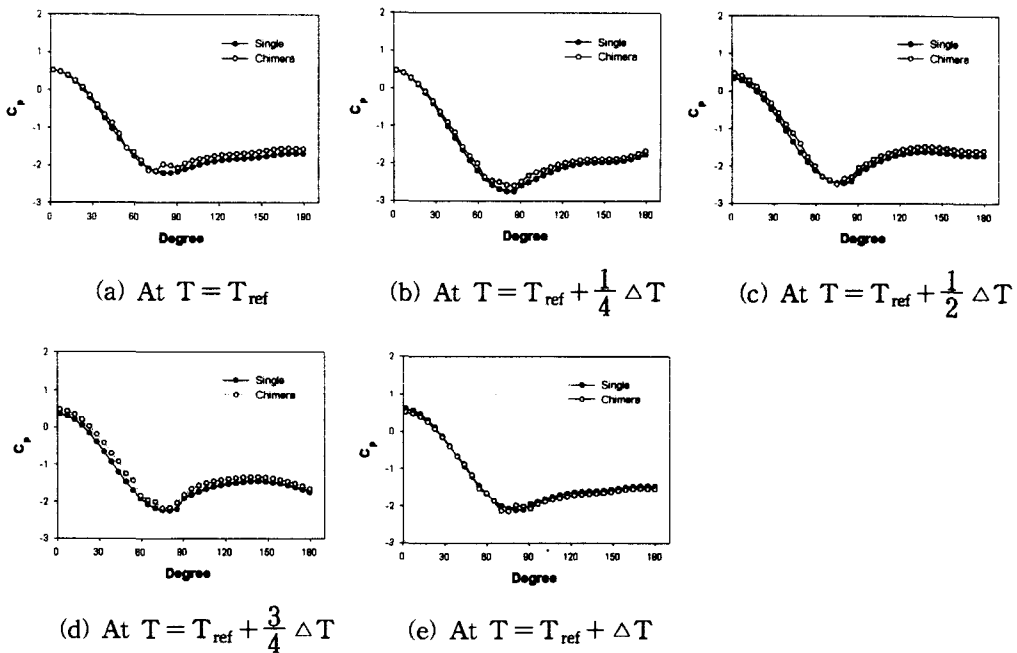


Fig.9 Coefficient of pressure distribution on the cylinder surface at several time elapsed ( $Re=200$ )

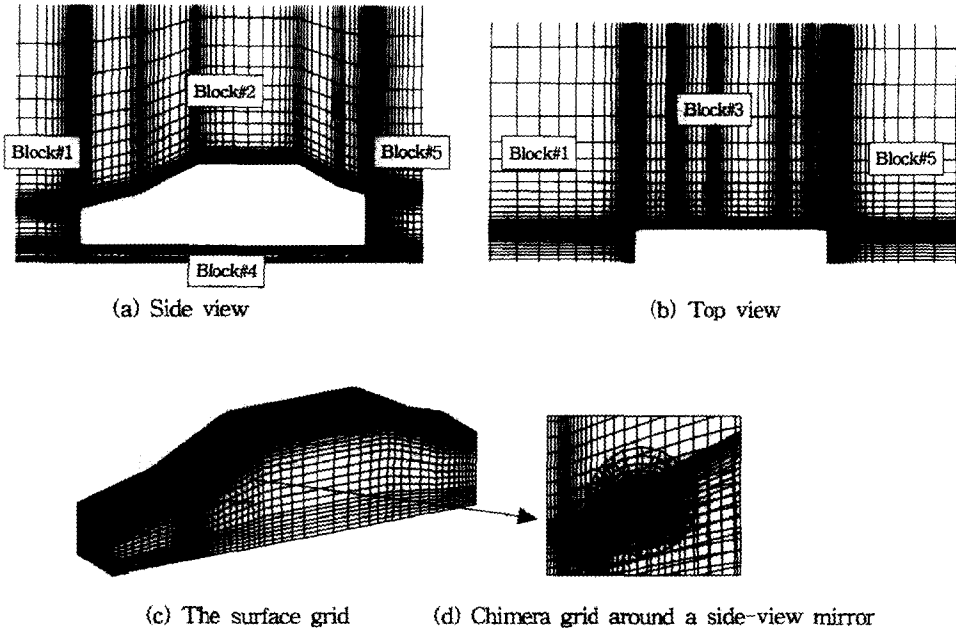


Fig.10 Grid system of the automobile

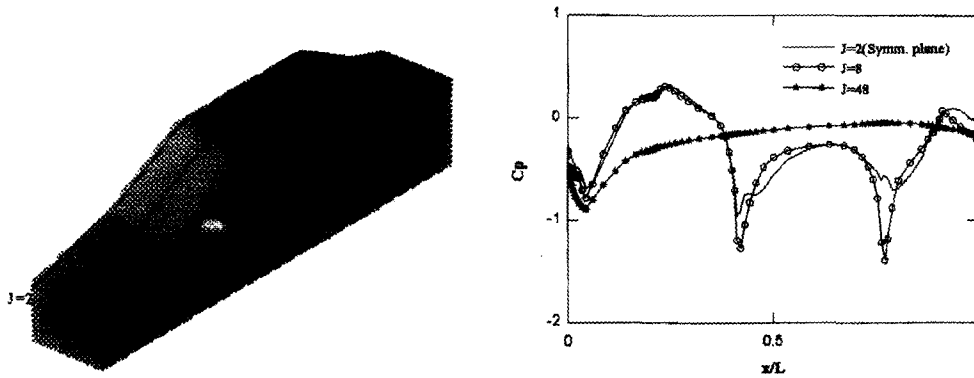
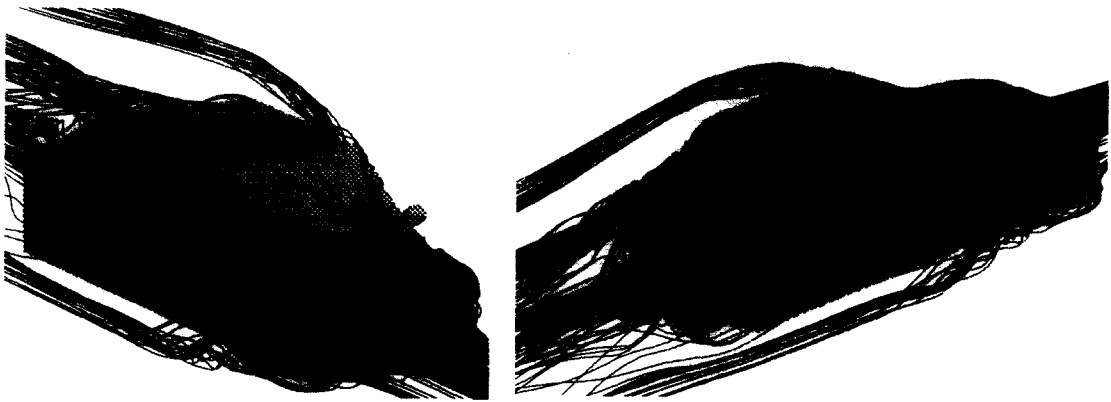


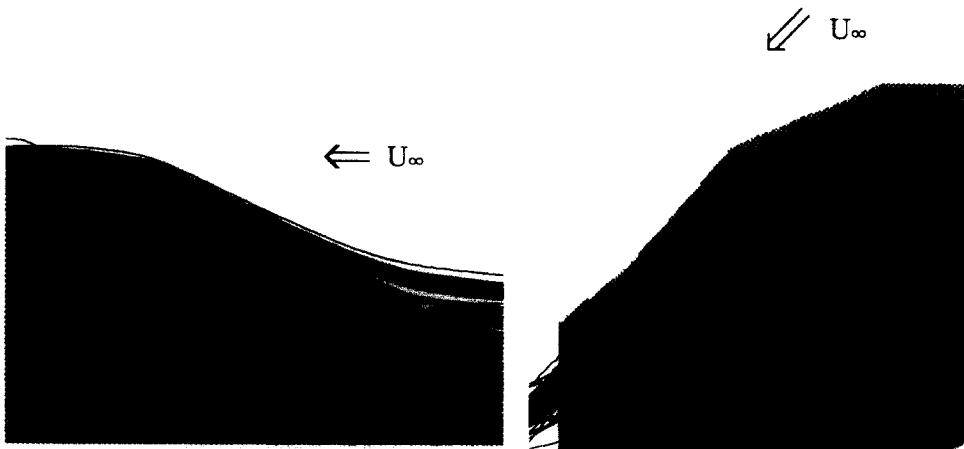
Fig.11 Coefficient of surface pressure along several streamwise directions



(a) Front view

(b) Rear view

Fig.12 3-D streamlines over the vehicle



(a) A-pillar vortex

(b) C-pillar vortex

Fig.13 A- and C-pillar vortex

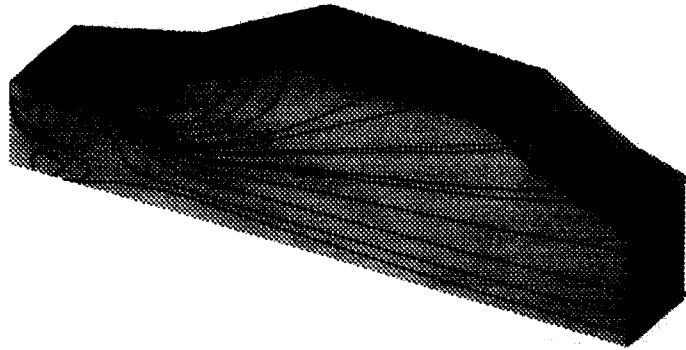


Fig.14 Limiting streamline on the vehicle surface

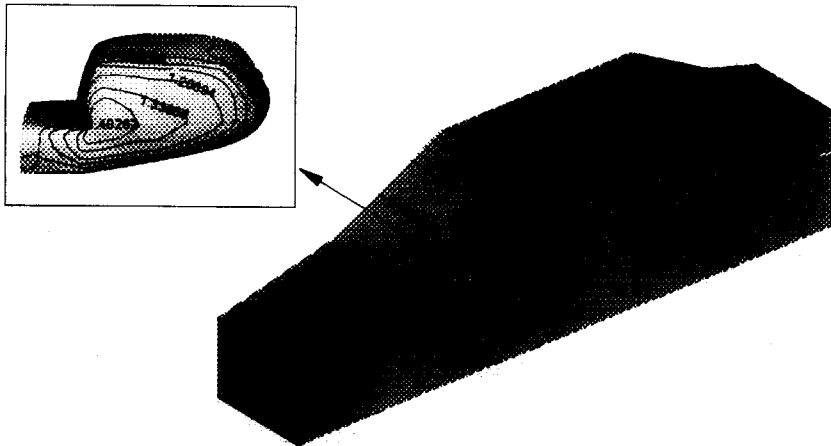


Fig.15 Pressure contour distribution



(a) Front view

(b) Rear view

Fig.16 Velocity vectors and limiting streamlines on the side-view mirror

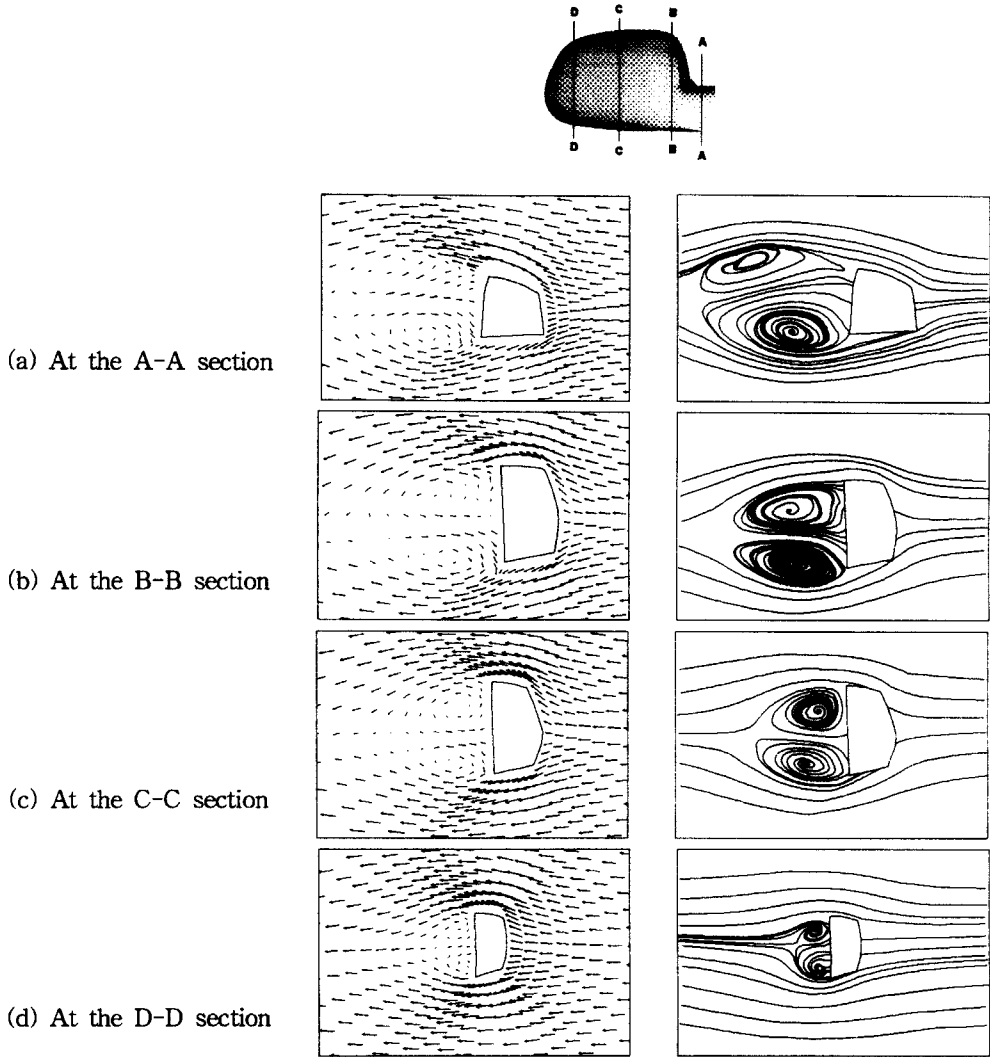


Fig.17 Velocity vectors and 2-D streamlines at several cross-sections of the side-view mirror

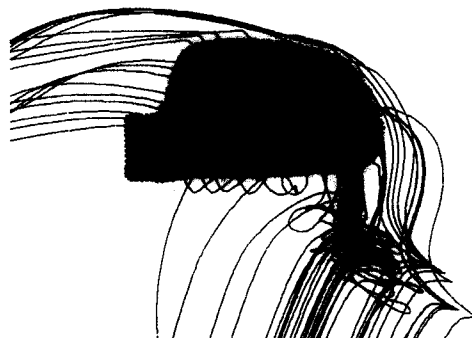


Fig.18 3-D streamlines of the side-view mirror