

Chimera 격자기법을 이용한 Car-like body 주위 유동장 및 공력소음 해석

Analysis of flow and aeroacoustic field around
a car-like body with Chimera grid technique

○안 민기¹⁾, 박 원규²⁾, 홍성훈³⁾

M. K. Ahn, W. G. Park, S. H. Hong

This paper describes the analysis of flow and aeroacoustic field around a car-like body. The governing equations, 3-D unsteady incompressible Navier-Stokes equations, are solved with the iterative time marching scheme. The Chimera grid technique has been applied to efficiently simulate the flow around the side-view mirror. After the flow field analysis has been converged, the aerodynamic noise analysis of the side-view mirror has been performed by solving Ffowcs Williams and Hawkins equation. From the present numerical simulation, the A- and C-pillar vortex are evidently shown and the aerodynamic noise level induced by the side-view mirror is predicted to about 100dB.

1. 서론

자동차 주위의 유동은 항력의 감소와 관련한 연료의 절감뿐만 아니라 외부의 유동소음 저감에 의한 안락감, 그리고 자동차 주행에 있어 조정성(handling)에 이르기까지 광범위한 관점에서 고려되어야 한다. 항력의 측면에서 지상운송체의 경우 주행속도가 증가함에 따라 바퀴의 마찰저항은 일정하나 공기저항에 의한 손실이 속도의 제곱에 비례하여 증가한다. 따라서 고속화 추세에 있는 자동차 주위의 유동에 대한 많은 연구가 이루어져야 한다. 그러나 자동차 주위의 공기유동은 자동차 형상의 복잡성, 지면과 바퀴의 영향 등으로 인해 이론적 접근이 매우 어렵다. 그리고 최근, 생활 수준의 향상으로 자동차의 수요가 증가하고 있으며, 소비자들이 요구하는 자동차의 성능 조건은 점점 까다로워지고 고급화되는 추세이다. 특히, 근래에는 승차 실내의 안락함을 위해 저 소음 차량에의 요구가 급증하고 있다. 이러한 요구에 부합하기 위하여 엔진, 트랜스 미션, 타이어, 머플러, 각종 부품소음 등의 소음은 점진적으로 저감되어 음에 따라 자연히 자동차 실외의 공기유동에 의해 발생하는 소음, 즉 유동소음(Aerodynamic noise, 혹은 Wind noise)에 대한 관심이 증가해 오고 있다.

본 연구와 관련하여 선행된 연구들은 실험적 방법[1-2]에 의존하여 왔으나, 최근 수치적 기법의 개발과 컴퓨터의 급속한 발달로 인해 수치적 해석의 영역이 점차 확대되어져 가고 있다. 먼저 패널법을 이용한 연구로는 Ahmed와 Hucho[3]에 의해 벤 주위의 유동이 계산된 바 있고, 최근에는 3차원 형상에 대한 연구가 활발히 진행되어 Han[4]에 의해 3차원 Ahmed body 주위의 난류유동이 해석되었고 박원규 등[5]에 의해서는 측풍이 있는 3차원 고속전철 주위 난류유동이 해석되었다. 정영래 등[6]에 의해서 3차원 미니벤 형상 주위의 점성유동이 해석되었고, 오상욱 등[7]에 의해서 Chimera 격자 기법으로 후사경이 포함된 Car-like body 주위의 유동이 해석되었다. 허남건 등[8]과 Horinouchi 등[9],

1) 부산대학교 대학원 기계공학과 전산유체실험실 (609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지)

Tel : (051) 510-3064

2) 부산대학교 기계공학부 (609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지) Tel : (051) 510-2457

3) 현대자동차 (주), 승용제품개발 제1연구소 (683-791, 울산광역시 북구 양정동) Tel : (052)280-2712

Okumura 등[10]에 의해 3차원 자동차 주위의 난류유동이 해석되었다. 특히 Horinouchi에 의한 연구는 바퀴와 범퍼를 중첩격자를 사용하여 바퀴와 범퍼의 영향을 계산하였으며, Okumura에 의한 연구는 여러 가지 형상의 밴에 대해 범퍼의 형상변화와 측풍의 영향도 함께 고려되었다. 공력소음에 대한 선행연구로 1952년 Lighthill[12]은 그의 제트 소음이론에서 제안한 음향학적 유사(acoustic analogy)로 유동영역에서 떨어진 소음발생의 지배방정식을 최초로 제공하였고, 공력소음해석을 위해 Lighthill 방정식은 Ffowcs Williams and Hawkings[13]에 의해 개선되었다. 이 지배방정식의 주된 효과는 고속 회전하는 프로펠러와 헬리콥터 로터 등과 같은 움직이는 표면을 고려한 회전하는 블레이드의 소음해석을 위해 사용되어왔다.

본 논문의 목적은 3차원 Car-like body 주위의 유동해석을 수행하여 자동차 주위 유동을 이해하며, 자동차 각 부품에 대한 공력소음을 해석하기 위한 코드개발에 있다.

2. 유동의 지배방정식 및 수치해석 방법

3차원 비정상 상태의 비압축성 점성유동의 지배방정식은 나비에-스톡스 방정식으로서, 이를 무차원화한 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 q 는 p, u, v, w 를 포함하는 유동벡터이며, E, F, G 는 곡선 좌표계에서의 대류항이며 E_v, F_v, G_v 는 점성항이다. 식(1)의 지배방정식을 수치해석으로 해를 구하기 위해 우선 먼저 모멘텀 방정식을 유한차분화 시키는 과정을 보면 다음과 같다. 모멘텀방정식은 시간에 대해 포물선형태(parabolic type)의 편미분방정식이므로 시간행진(time marching) 방법을 이용하여 유한차분화 시키고 여기에 뉴턴 반복법을 적용시키면,

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

여기서 윗첨자 $n+1, n$ 은 시간 level을 의미하며 $k+1$ 은 반복 level을 의미한다. 그리고 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 ω 는 완화계수(relaxation factor)이며 A, B, C 는 다음과 같이 정의되는 Jacobian 행렬이다.

$$\bar{A} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{E} - \bar{E}_\nu) \quad \bar{B} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{F} - \bar{F}_\nu) \quad \bar{C} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{G} - \bar{G}_\nu)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{R}^{n+1,k} = & -\frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1,k} - \bar{q}^n) - (\delta_\epsilon \bar{E}^{n+1,k} + \delta_\nu \bar{F}^{n+1,k} + \delta_\zeta \bar{G}^{n+1,k}) \\ & + (\delta_\epsilon \bar{E}_\nu^{n+1,k} + \delta_\nu \bar{F}_\nu^{n+1,k} + \delta_\zeta \bar{E}_\nu^{n+1,k}) \end{aligned} \quad (4)$$

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

연속방정식은 비압축성 유동해석을 효율적으로 수행하기 위해 Marker-and-Cell(MAC)의 개념을 다음과 같이 이용하였다.

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

여기서 β 는 완화계수이다. 식(3)과 (4)를 서로 연결시켜 $\Delta q = (\Delta p, \Delta u, \Delta v, \Delta w)$ 에 대해 다시 쓰면, 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$[M] \{ \Delta q \} = \{ R \} \quad (6)$$

여기서 $\{ R \}$ 가 'n+1'시간과 'k'반복 level에서 비정상 나비에-스톡스 방정식이므로 Δq 가 영(zero)으로 간다면, 본 알고리즘이 'n+1'시간에 대해 정확히 지배방정식을 만족시킴을 알 수 있다.

본 연구에서 대류항은 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convection Kinematics)방법을 이용하여 유한 차분화 시켰으며, 점성항은 공간적 중앙 차분화를 이용하였다. 그리고 연속 방정식은 중앙차분을 이용하였으며, 본 알고리즘의 안정화를 위해 4차의 인공감쇠항을 첨가하였다. 난류유동 모델을 위해서는 Baldwin - Lomax모델이 사용되었다.

2. Chimera 격자기법

영역분할기법 중의 하나인 Chimera, 혹은 overlaid(overset) 격자기법은 해석대상 물체를 주격자와 보조격자로 나누어 각각에 대해 독립적으로 격자를 생성한 후, 이들을 중첩시켜 전체 해석대상을 계산하는 방법으로써, 넓은 의미로는 격자의 중첩뿐만 아니라 지배방정식의 중첩도 포함한다. Chimera 기법은 복잡한 물체주위 유동, 상대운동이 있는 유동, 적응격자의 하나로 사용하는 경우, 혹은 변수연구(parametric study) 등에 매우 적합한 방법으로 알려져 오고 있다. Chimera 격자기법은 우선 주격자(major grid)와 부격자(minor)를 따로 격자 생성하여 중첩시키는데 주격자가 부격자를 포함하는 경우, 부격자에서 보간을 위한 경계나 사용자가 정한 위치가 결정되면 이러한 경계의 내부에 해당하는 주격자들은 hole point로 구분되고 계산과정에서 제외된다. 이러한 hole point들을 blank point로서 $i_b=0$ 로 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 유동정보가, 2차원인 경우 bilinear interpolation, 3차원인 경우 trilinear interpolation을 통해 주격자계로 입력된다. 이러한 유동정보의 전달은 부격자의 계산에서도 부격자의 경계조건을 위해 주격자에서 부격자로 이동되게 된다. 이러한 알고리즘은 식(2)에서 blank point인 i_b 를 도입하여 수정을 가함으로써 간단히 만족시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta\tau}(\bar{q}^{n+1} - \bar{q}^n) + i_b\delta_\xi \bar{E}^{n+m} + i_b\delta_\eta \bar{F}^{n+m} + i_b\delta_\zeta \bar{G}^{n+m} \\ = i_b\delta_\xi \bar{E}_\nu^{n+m} + i_b\delta_\eta \bar{F}_\nu^{n+m} + i_b\delta_\zeta \bar{G}_\nu^{n+m} \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)는 hole point에서 $i_b = 0$ 이 되어 $\bar{q}^{n+1} = \bar{q}^n$ 이 된다. 따라서 유동벡터는 계산 후에 값이 변화하지 않게 된다. 이와 같이 Chimera 기법은 blank point인 i_b 의 도입만으로 알고리즘이 만들어지므로 기존의 프로그램에 대한 큰 수정을 가할 필요가 없다는 장점을 가지고 있다.

3. 유동소음 해석

Ffowcs Williams and Hawkings식은 물체의 표면이 움직일 때 소음을 계산하는데 널리 알려진 방법으로 지배방정식은 다음과 같다.

$$\square^2 p = \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 v_n |\nabla f| \delta(f)]}_{\textcircled{1}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left[P_{ij} \frac{\partial f}{\partial x_j} \delta(f) \right]}_{\textcircled{2}} + \underbrace{\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)]}_{\textcircled{3}} \quad (8)$$

여기서 $\square^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p$: 파동 연산자

$f(\vec{x}, t)$: 표면 방정식

$v_n = -(\partial f / \partial t) / |\nabla f|$

$P_{ij} = p\delta_{ij} + \tau_{ij}$: Compress stress tensor

Heaviside function, $H(f) = \begin{cases} 1, f > 0 & \text{물체의 외부} \\ 0, f < 0 & \text{물체의 내부} \end{cases}$

$\delta(f)$: Dirac delta function

$T_{ij} = P_{ij} + \rho U_i U_j - c^2(\rho - \rho_0)\delta_{ij}$: Lighthill stress tensor

를 의미한다. 식(8)의 오른쪽의 비제차(inhomogeneous)항은 파동방정식의 음원(source term)을 나타내는데, 다음과 같은 세가지 종류의 음원으로 나눌 수 있다. ①항은 일정체적을 유지하는 고체면이 회전하면서 유체의 체적을 주기적으로 변화시켜서 발생하는 Monopole 음원을 나타낸다. 일명 Thickness noise라고 한다. ②항은 표면에 분포하는 힘이 비정상적(unsteady)으로 그 세기나 방향이 바뀌면서 발생하는 Dipole 음원을 나타낸다. Loading noise라고도 한다. ③항은 유동장에 분포하는 비정상 유동, 난류 또는 국부적인 충격파의 발생에 의한

Quadrupole 음원을 나타낸다.

일반적으로 매우 작은 마하수에서는 ①항과 ②항의 음원세기에 비해 ③항에 의한 음원은 무시할 수 있으므로, 본 연구에서는 Quadrupole 음원을 무시한 선형 Ffowcs Williams and Hawkings식을 이용한다. Thickness noise 음원을 loading noise 음원으로 결합하기 위하여 ISOM[14] 방법을 이용하여 식(8)을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\square^2 p = - \frac{\partial}{\partial x_i} [\rho_0 c^2 n_i |\nabla f| \delta(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[P_{ij} \frac{\partial f}{\partial x_j} \delta(f) \right] \quad (9)$$

이 식을 여러 단계의 수학적 유도과정을 통하면 다음과 같은 적분 방정식으로 표현 된다.

$$4\pi p(\vec{x}, t) = \int \left[\frac{\bar{P}}{r^2} \left\{ \frac{(1 + M_r) \cos \theta - M_n}{(1 - M_r)^2} + \frac{(M_r^2 - M^2) \cos \theta}{(1 - M_r)^3} \right\} \right] r^2 dS \quad (10)$$

여기서

$$\bar{P} = P + \rho_0 c^2$$

\vec{n} : 물체에서의 단위 법선 벡터

\vec{r} : 방사방향의 벡터

$$\cos \theta = n_i \cdot \hat{r}_i$$

$$M_r = \frac{V_r}{c} = \frac{V_i \cdot \hat{r}_i}{c}$$

[]_r 는 지연시간(retarded time)을 의미한다.

4. 결과 및 고찰

Table1은 Chimera 격자기법을 이용한 유동해석 코드의 검증을 위해 타 연구자들의 결과인 레이놀즈수 200일 때 실린더의 양력과 항력계수, Strouhal 수를 나타낸 것이다. Fig.1은 주기적으로 변하는 유선을 나타낸 것으로서 Kwak[17]의 결과와 매우 잘 일치한다. Fig.2는 실린더 표면에서 압력계수를 나타낸 그림으로써 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig.3은 Car-like body의 표면 격자와 Chimera 격자를 이용한 후사경의 표면격자를 보여주고 있다. 그리고 확대한 그림은 후사경 격자와 자동차 격자가 서로 중첩하고 있음을 잘 보여 주고 있다. Fig.4는 유동방향의 압력계수 값을 나타내고 있다. Fig.5의 위의 그림은 전방에서 본 3차원 유선을 나타내고 있으며, 밑의 그림은 후미의 복잡한 유선을 보여준다. 그리고 확대한 그림은 후사경의 뒤에서 바라본 유선을 나타낸 것이다. 후사경으로 인한 복잡한 유선을 잘 보여주고 있다. Fig.6의 (a)는 측면에서 본 A-pillar vortex를 나타내고 있다. 이 A-pillar vortex는 유동소음발생의 원인이라고 알려져 있다. (b)는 후면에서 본 C-pillar vortex를 나타내고 있다. Fig.7은 Car-like body의 표면유선을 나타내고 있다. Fig.8은 Car-like body와 후사경에 대한 등압력선을 나타내었다. 등압력선은 Car-like body의 앞 범퍼에서 가장 높고, 후사경과 앞쪽 유리창에서 대체적으로 높게 나타나고 있다. Fig.9의 (a)에서는 후사경의 표면속도벡터와 표면유선을 후사경 전방에 대해 나타내었고, (b)에서는 후사경의 표면속도벡터와 표면유선을 후사경 후방에 대해 나타내었다. 전방에서는 후사경의 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. 후사경 후방에서는 부착면과 후사경의 빈 공간에서 가속된 공기가 박리되면서 매우 광범위한 와류유동이 형성되는데 이는 Fig.10에서 확인할 수 있다. Fig.9(b)의 후사경 미러면의 표면유선에서 볼 수 있듯이 이러한 와류형성은 소음 관점에서는 매우 바람직하지 않는 유동이다. 그러나 후사경 미러면에 빗물 등이 미러면 바깥 경계면으로 흘러 나가도록 하여 운전자에게 적당한 후방시야를 제공하는 장점이 있다. Fig.10의 (a), (b), (c), (d)는 각 단면에서의 속도 벡터와 유선을 나타낸 것이다. Fig.11은 후사경의 음압파동(sound pressure fluctuation)을 시간에 대하여 나타내고 있으며 주기적으로 변하는 것을 보여주고 있다. 음압레벨은 약 100.029 dB 이다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 비압축성 점성 유동의 나비에-스톡스 방정식을 사용하며 Car-like body 주위의 유동해석을 효과적으로 수행하였다. 후사경의 유동해석을 위해 Chimera 격자기법을 사용하였다. 운동량 방정식은 시간 행진 방법을 사용하였고 연속방정식은 Marker-and-Cell의 개념을 사용하였다. 그리고 대류항은 QUICK방법을 이용하여 차분화 하였으며 점성항은 공간적 중앙차분을 이용하였다. Chimera 검증을 위하여 실린더 주위의 유동을 해석하였다. 유동소음 해석은 유동해석결과 후사경 뒤쪽에서 발생하는 박리와 3차원 와류가 발생되었고, 이러한 박리가 소음의 주요한 원인이 되는 것을 알 수 있었다. 후사경 주위의 유동을 보면 아직 유동이 완전히 발달하지는 않았지만 A-pillar vortex가 생기는 조짐을 볼 수 있었다. 지금까지의 유동해석결과를 보면 Chimera 격자기법으로 격자를 쉽게 생성하고 후사경 주위의 유동을 잘 해석할 수 있었다. 후사경에 대한 유동소음을 해석하였다.

6. 후기

본 연구과제는 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 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.

7. 참고 문헌

- [1] W. H. Hucho, (1987) "Aerodynamics of Road Vehicles : from fluid mechanics of road vehicle engineering," Butterworths.
- [2] S. R. Ahmed, (1981) "Wake Structure of Typical Automobile Shapes," Journal of Fluids Engineering, Vol. 103, pp 162-169.
- [3] S. R. Ahmed and H. Hucho, (1971) "The Calculation of the Flow Field past a Van with the Aid of a Panel Method," SAE Tr. 770390, Vol. 86, pp 1672-1692.
- [4] T. Han, (1989) "Computational Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flow Around a Bluff Body in Ground Proximity," AIAA Journal, Vol. 27, No. 9, pp 1213-1219.
- [5] W. G. Park, Y. R. Jung, S. D. Ha, (1998) "Numerical Viscous Flow Analysis Around a High-Speed Train with Crosswind Effects," AIAA Journal, Vol. 36, No. 3, March, pp 477-479.

- [6] 정영래, 박원규, 박영준, 김종섭, 홍성훈, (1997) "3차원 미니벤 형상 주위의 비압축성 점성 유동해석," 한국전산유체공학회지 제2권 제1호, pp. 46-53.
- [7] 오상욱, 박원규, (1997) "Chimera 격자 기법을 이용한 Car-like body 주위의 전체 유동 해석," 한국전산유체공학회 추계학술대회 논문집, pp 86-91.
- [8] 허남건, 윤성영, 조원국, 김광호, (1992) "3차원 자동차 주위의 유동장애 관한 수치적 연구," 대기환경학회 추계학술대회 논문집, pp 172-176.
- [9] N. Horinouchi, Y. Kato, S. Shinano, T. Kondoh, and Y. Tagayashi, (1995) "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System," SAE Paper 950628.
- [10] K. Okumura and T. Kuriyama, (1995) "Practical Aerodynamic Simulations(C_D , C_L , C_{YM}) Using a Turbulence Model and 3rd-Order Upwind Scheme," SAE Paper 950629.
- [11] B. S. Baldwin and H. Lomax, (1978) "Thin-Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 79-257.
- [12] M. J. Lighthill, (1952) "On sound generated aerodynamically. I," General theory. Proc. Roy. Soc. A 221, pp564-587
- [13] J. E. Ffowcs Williams and D. L. Hawkings, (1969) "Sound Generated by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. A264, pp.321-342.
- [14] M. P. Isom, (1975) "The Theory of Sound Radiated by a Hovering Transonic Helicopter Blade," Polytechnic Institute of New York Rept. Poly-AE/AM No. 75-4
- [15] F. Farassat and P. A. Nystrom, (1980) "Isom's Thickness Noise Formula for Rotating Blades with Finite Thickness at the Tip," Journal of Sound and Vibration, Vol.72, pp.550-553.
- [16] 정세민, 이영길, "2차원 복수 원주주위 유동의 중첩격자계를 이용한 차분해석," 선박유체연구회, pp.9-32.
- [17] S. E. Rogers and D. Kwak, (1990) "Upwind Differencing Scheme for the Time-Accurate Incompressible Navier-Stokes Equations," AIAA Journal Vol. 28, No. 2, February, pp.253-262.

[Table 1] Lift and drag coefficient and Strouhal numbers for circular cylinder flow at Reynolds number 200

		C_D	C_L	St
Present	Single	1.12 ± 0.05	± 0.50	0.145
	Chimera	1.14 ± 0.05	± 0.35	0.146
Rogers and Kwak	3rd order	1.29 ± 0.05	± 0.75	0.16
	5th order	1.23 ± 0.05	± 0.65	0.185
Rosenfeld		1.46 ± 0.05	± 0.69	0.211
Lecoince and Piquet	2nd order	1.46 ± 0.04	± 0.70	0.227
	4th order	1.58 ± 0.0035	± 0.50	0.194
Martinez		1.27 ± 0.0035	—	—
Lin et al.		1.17	—	—
Thoman and Szewczyk		1.17 ± 0.05	—	0.19
Wille (Exp.)		1.3	—	—

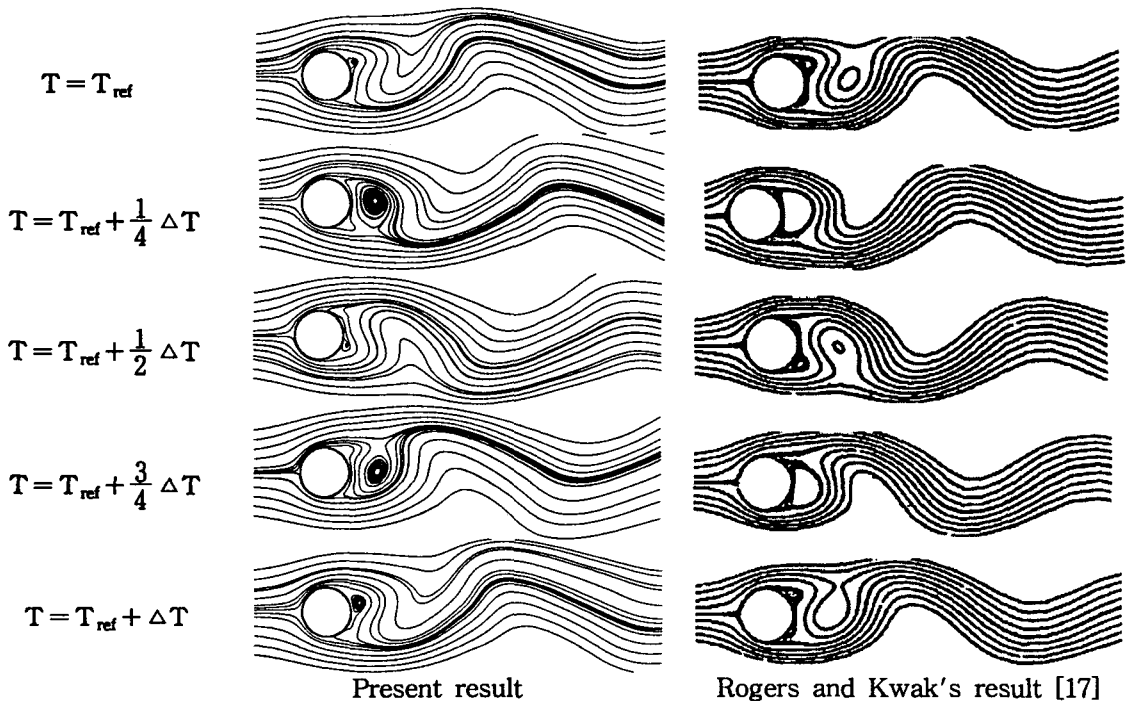


Fig.1 Streamlines for flow over the circular cylinder at $Re=200$

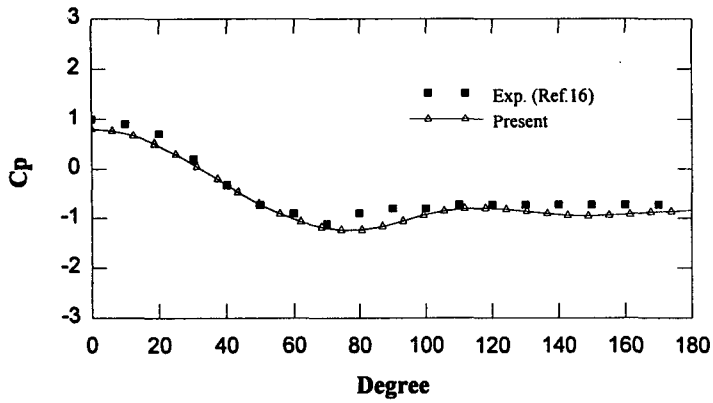


Fig.2 Coefficient of pressure distribution on cylinder surface at $Re=2800$

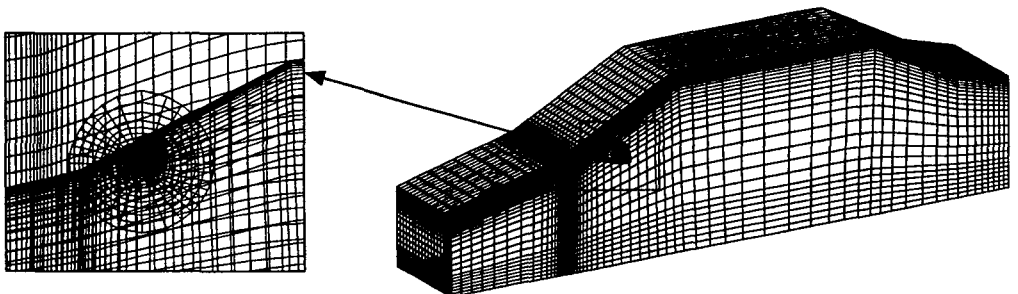


Fig.3 Grid system and Chimera grid

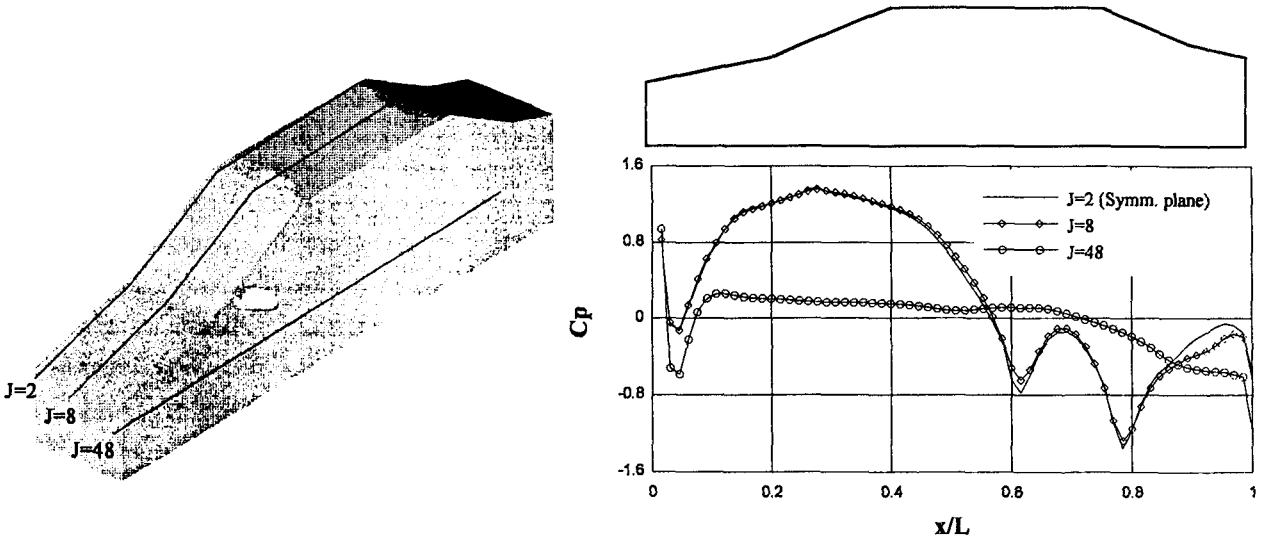


Fig.4 Coefficient of pressure at several spanwise cross section

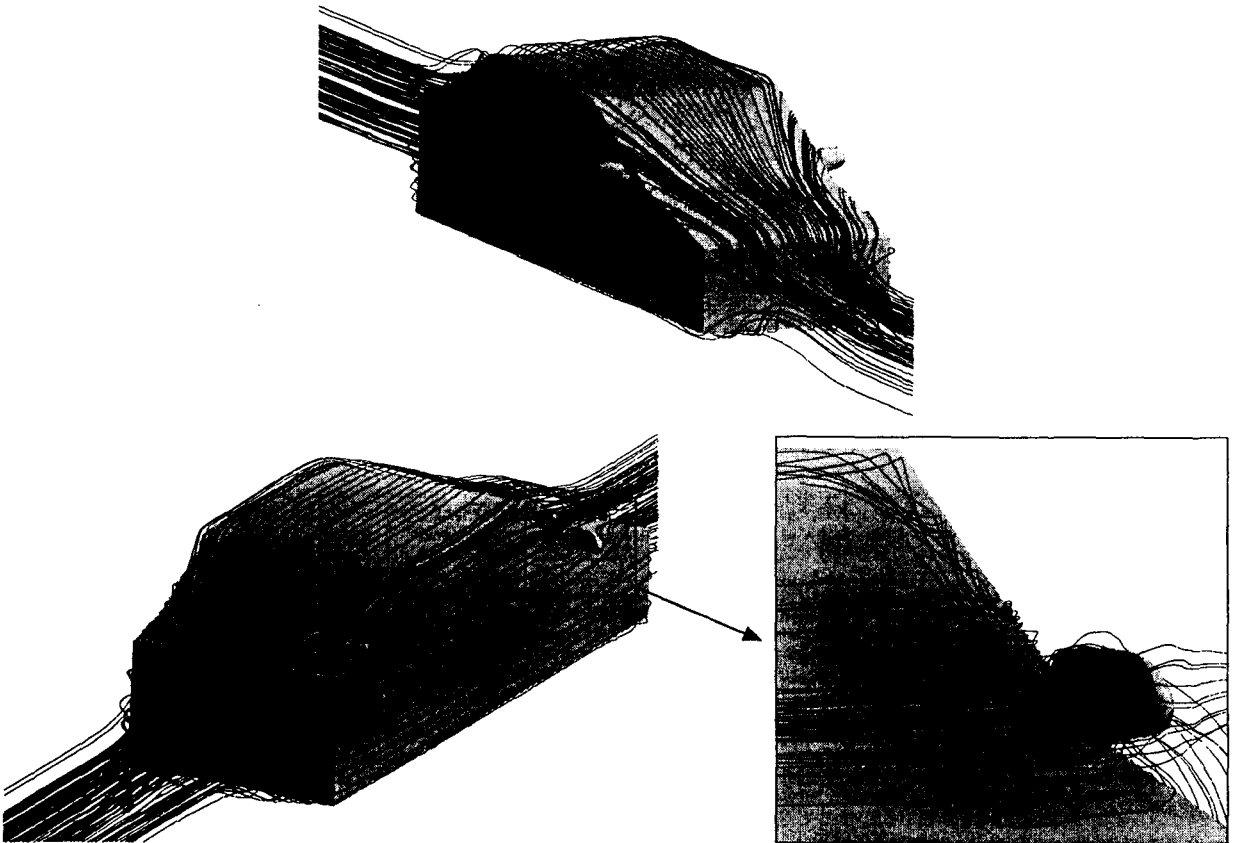
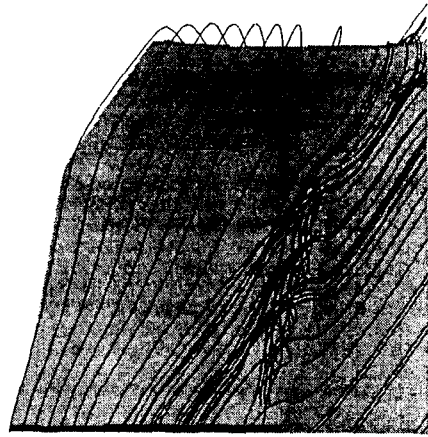


Fig.5 3-D streamlines of the car-like body



(a) A-pillar vortex



(b) C-pillar vortex

Fig.6 A-pillar vortex and C-pillar vortex

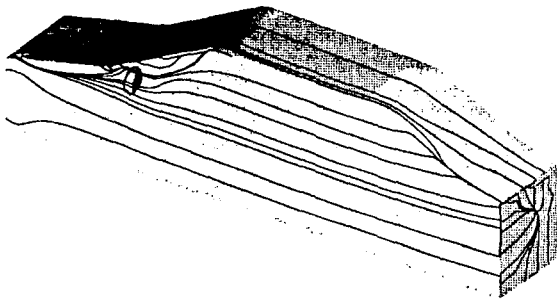
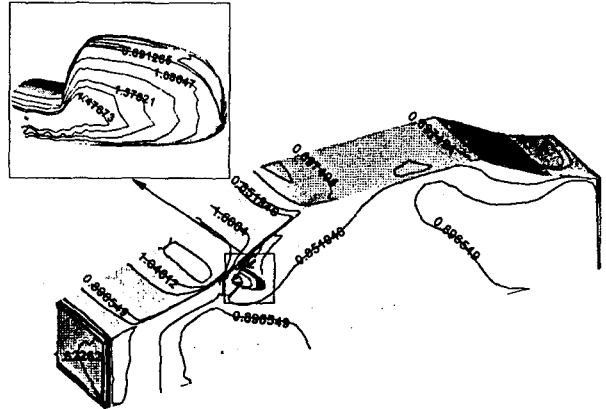


Fig. 7 Limiting streamline on the vehicle surface



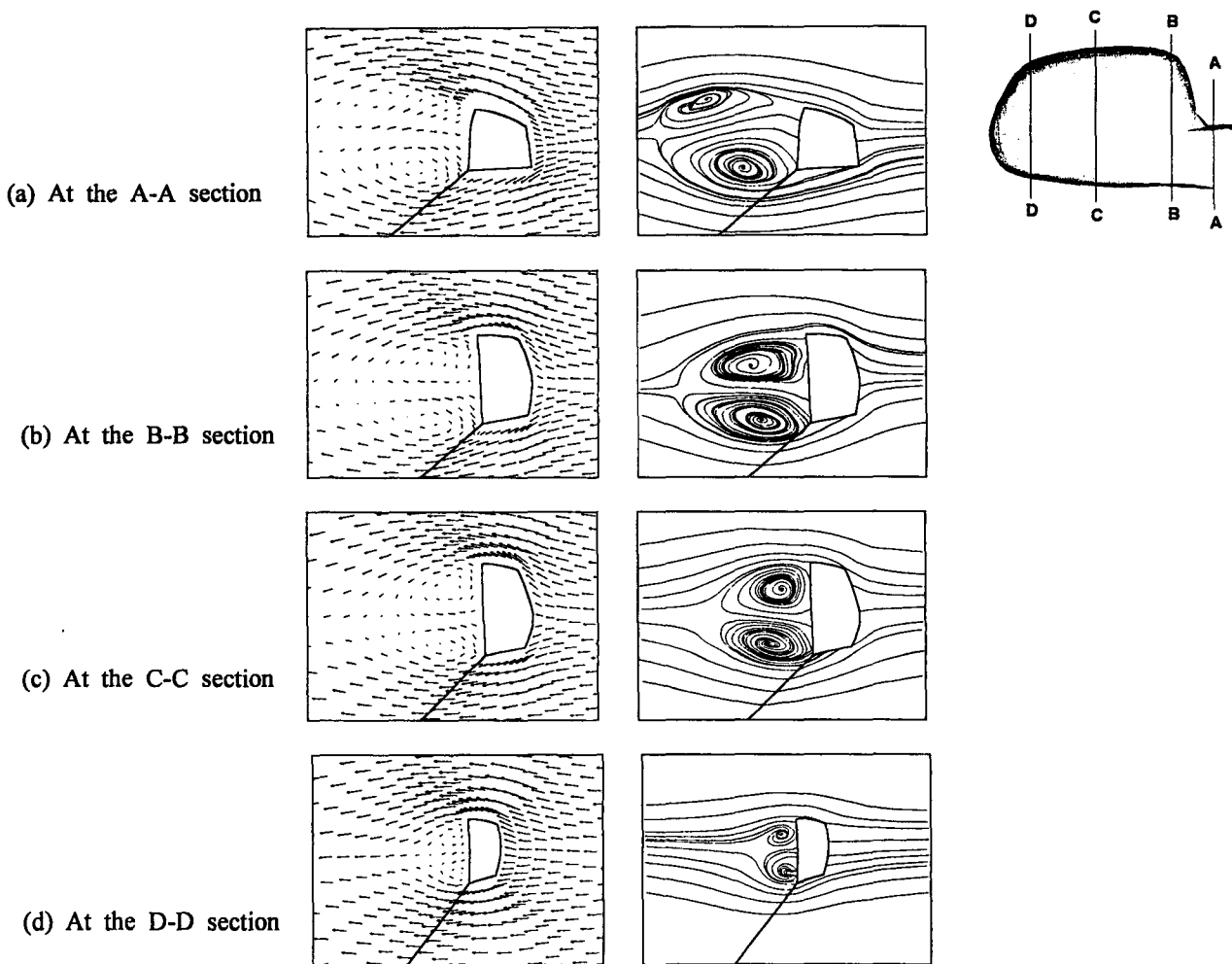


Fig.10 Streamlines at several cross-section of the side-view mirror

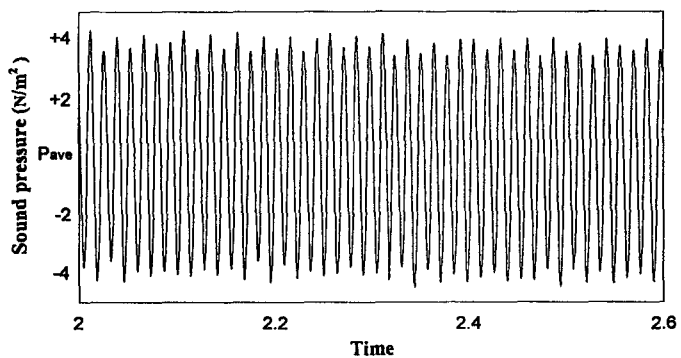


Fig.11 Sound pressure fluctuation of the side-view mirror