

Chimera 격자 기법을 이용한 Car-like body 주위의 전체 유동 해석

Full flow analysis around a Car-like body using Chimera grid technique

○오 상욱¹⁾, 박 원규²⁾

S. W. Oh, W. G. Park

This paper describes analysis of complex flow around Car-like body using Chimera grid technique. As a computational algorithm, Pullboat and Chaussee's Diagonal algorithm is selected to reduce computational time. Introducing hole points flag to this Diagonal algorithm, an algorithm for Chimera grid is generated easily. This study solves 3-D unsteady incompressible Navier-Stokes equations on a non-orthogonal curvilinear coordinate system using second-order accurate schemes for the time derivatives, and third/second-order scheme for the spatial derivatives. The Marker-and-Cell concept is applied to efficiently solve continuity equation. The fourth-order artificial damping is added to the continuity equation for numerical stability. It has concluded that the results of present study properly agree with physical flow phenomena.

1. 서론

자동차 외형 설계에 있어서 자동차 주위의 유동은 공기역학적인 특성에 많은 영향을 주고 있으며 공력성능에 중요한 설계인자이다. 그러나 자동차 주위의 공기유동은 자동차 형상의 복잡성, 지면과 바퀴의 영향 등으로 인해 이론적 접근이 어렵다. 이에 본 연구에서는 자동차 주위 유동에서 박리를 생성시키는 주원인이 되는 후사경과 바퀴를 Chimera 격자기법을 사용하여 격자를 생성시켜 유동해석을 하고자 한다. 연구에 사용된 격자계는 Car-like body를 주격자로 하고 후사경, 바퀴를 보조격자로 나누어 각각에 대해 독립적으로 격자를 생성한 후 이들을 중첩(overlap)시켜 전체 해석대상을 계산하였다. 본 연구와 관련하여 선행된 연구들은 실험적 방법[1-3]에 의존하여 왔으나, 최근 수치적 기법의 개발과 컴퓨터의 급속한 발달로 인해 수치적 해석의 영역이 점차 확대되어져 가고 있다. 먼저 패널법을 이용한 연구로는 Ahmed와 Hucho[4]에 의해 밴 주위의 유동이 계산된 바 있고, 최근에는 3차원 형상에 대한 연구가 활발히 진행되어 Han[5]에 의해 3차원 Ahmed body 주위의 난류유동이 해석되었고 박원규 등[6]에 의해서는 측풍이 있는 3차원 고속전철 주위 난류유동이 해석되었으며 허남건 등[7]와 Nariaki 등[8], Kenji 등[9]에 의해 3차원 자동차 주위의 난류유동이 해석되었다. 특히 Nariaki에 의한 연구는 바퀴와 범퍼를 overlap격자를 사용하여 바퀴와 범퍼의 영향을 계산하였으며, Kenji에 의한 연구는 여러 가지 형상의 밴(van)에 대해 범퍼의 형상변화와 측풍의 영향도 함께 고려되었다.

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

3차원 비정상 상태의 비압축성 점성유동의 지배방정식은 나비에-스톡스방정식으로서, 이를 무차원화한후 일반화된 곡선좌표계로 나타내면 다음과 같다.

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

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)

여기서 q 는 p, u, v, w 를 포함하는 유동벡터이며, E, F, G 는 곡선좌표계에서의 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 유한차분화시키고 여기에 뉴턴 반복법을 적용시키면,

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

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.

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

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

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

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, C 에 독립적임을 알 수 있다.

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

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

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.

3. Chimera 알고리즘

주격자(major grid)가 부격자(minor grid)를 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 진행되지않게 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.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1} - \bar{q}^n) + i_b \delta_\xi \bar{E}^{n+m} + i_b \delta_\eta \bar{F}^{n+m} + i_b \delta_\zeta \bar{G}^{n+m} \\ = i_b \delta_\xi \bar{E}_v^{n+m} + i_b \delta_\eta \bar{F}_v^{n+m} + i_b \delta_\zeta \bar{G}_v^{n+m} \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)은 hole point에서 $i_b = 0$ 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 대한 큰 수정없이 벡터화에 유리해지게 된다.

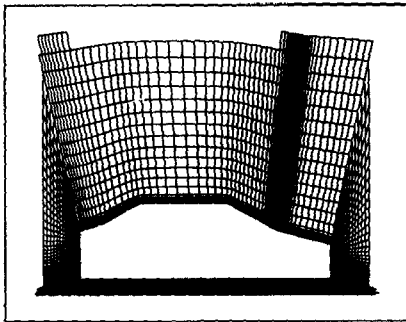
4. 초기조건 및 경계조건

본 연구에서는 초기조건으로 자유유동조건을 이용하며, 격자의 외부경계가 Car-like body로부터 충분히 먼 거리에 있다고 하여 역시 자유유동조건을 원거리 유입경계조건으로 사용하였으며, 유출 경계조건은 속도의 외삽과 $p = p_\infty$ 로부터 구하였다. Car-like body 표면에서는 점착조건(no slip)과 표면의 법선 압력구배가 영(zero)라는 조건을 이용하였고, 지면에서는 지면효과를 고려하기 위해 바람과 같은 속도를 주었다. 본 연구에서의 격자는 Car-like body의 전방과 후방에 H-H격자(50×26×36, 56×26×36)와 Car-like body 주위에 O-H격자(72×86×30)를 각각 blocked grid로 생성시켰으며 블록간 보간은 선형보간법을 이용하였다. 또한 측풍이 없다는 조건하에 대칭조건을 이용하여 Car-like body의 반평면에 대해서만 지배방정식을 풀었다. side mirror의 유동을 해석하기 위한 격자는 Chimera 기법을 이용해서 후사격의 주위에 O-H격자(45×37×13)를 생성시켰으며 후사경 표면에는 점착조건(no

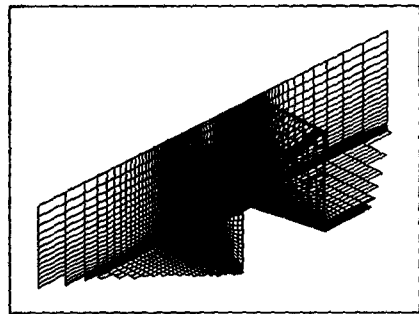
slip)을 주었다. Fig.1에서는 (a), (b)에서 각각 symmetric line에서의 격자와 전체 다중블럭격자계를 나타내었고 (c)에서는 부격자계인 mirror에 대해 나타내었다.

5. 예비결과 및 고찰

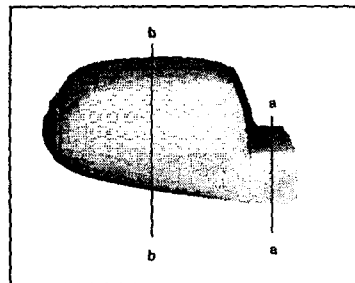
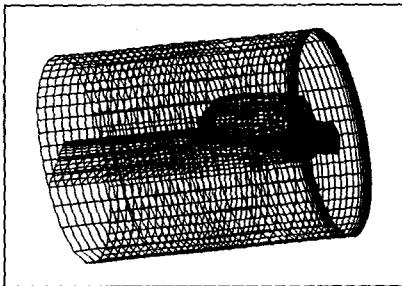
유동해석후 결과를 보면 Fig.2(a)에서는 mirror주위의 속도벡터를 나타내었고 (b)에서는 전체 등압력선을 나타내었는데 역시 자동차의 범퍼에 해당하는 부분이 가장 압력이 높고 앞유리와 mirror부분도 높은 것을 볼 수 있다. Fig.3(a)에서는 후사경의 표면속도벡터와 표면유선을 전방에 대해 나타내었고, (b)에서는 후사경의 표면속도벡터와 표면유선을 후방에 대해 나타내었다. 전방에서는 후사경의 부착면 부근에서 정체점이 형성되었으며, 이러한 정체점은 표면유선을 통해 더욱 잘 관찰할 수 있다. 정체점을 지나면서 매끄러운 표면을 따라 가속이 이루어지고 후사경 상면에서 떨어져 나감을 볼 수 있다. 후방에서는 부착면과 후사경의 빈 공간에서 가속된 공기가 박리되면서 복잡한 유동을 보이며, 후방에서는 후사경의 상면과 하면, 그리고 측면을 통해 흘러온 공기가 박리됨으로 해서 넓은 후류영역을 형성함을 볼 수 있다. Fig.4(a)에서는 부착면 부근에서의 후사경 단면속도벡터를 나타내었고, Fig.4(b)에서는 후사경 중앙단면에서의 속도벡터를 나타내었다. 부착면 부근에서는 부착면과 후사경사이의 빈 공간에서 가속된 상면의 흐름이 하면의 흐름보다 강하여 하면에서 상면으로 감기는 유동이 발생되어 와류를 생성시키고 중앙단면에서는 상면과 하면에서 흘러온 유동이 각각 와류를 생성시켜서 두 개의 와류가 존재하는 것을 볼 수 있다.



(a) Enlarged grid at the symmetry plane

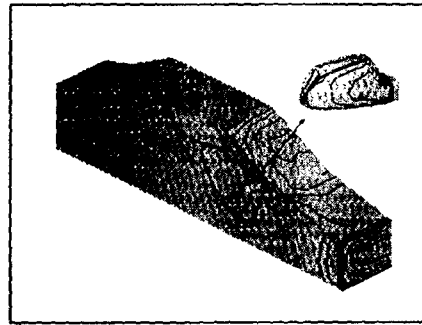
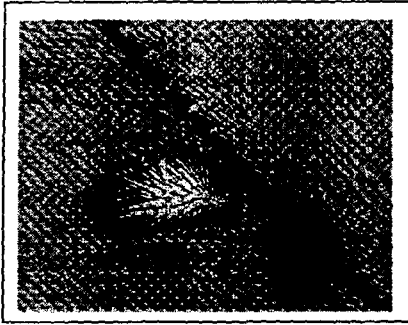


(b) Blocked grid system around Car-like body



(c) Grid system of mirror

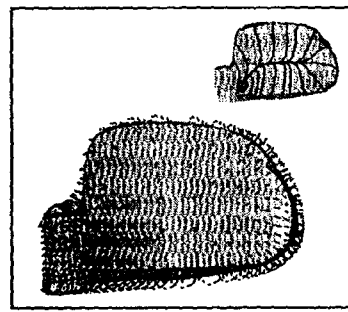
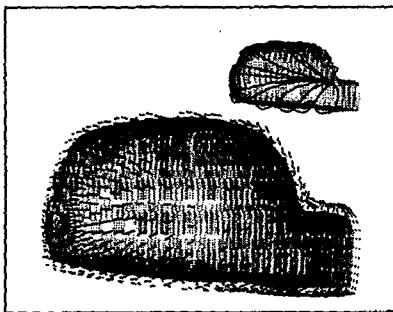
Fig.1 Grid system



(a) Velocity vector around mirror

(b) Pressure contour around Car-like body

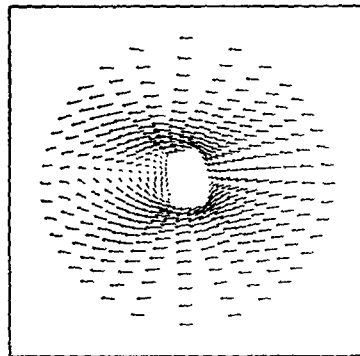
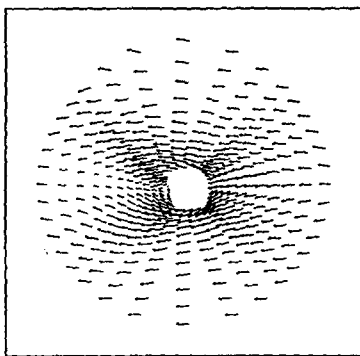
Fig.2 Velocity vector and Pressure contour



(a)Front side of mirror

(b)Behind side of mirror

Fig.3 Velocity vector and streamlines around mirror



(a)Velocity vector at the A-A section

(b)Velocity vector at the B-B section

Fig.4 Cross-sectional Velocity vector

6. 결론

본 연구에서는 Car-like body 주위의 유동해석을 위해 3차원 비압축성 점성 유동의 나비에-스톡스 방정식을 사용하고 후사경의 유동해석을 위해 Chimera 격자기법을 사용하였다. 운동량 방정식은 시간 행진 방법을 사용하였고 연속방정식은 Marker-and-Cell의 개념을 사용하였다. 그리고 대류항은 QUICK 방법을 이용하여 차분화 하였으며 점성항은 공간적 중앙차분을 이용하였다. 유동해석결과 mirror 뒤쪽에서 발생하는 박리와 3차원 와류가 발생되었고,

이러한 박리가 소음의 주요한 원인이 되는 것을 알 수 있었다. mirror 주위의 유동을 보면 아직 유동이 완전히 발달하지는 않았지만 A-pillar vortex가 생기는 조짐을 볼 수 있었다. 지금까지의 유동해석결과를 보면 Chimera 격자기법으로 격자를 쉽게 생성하고 mirror주위의 유동을 잘 해석할 수 있었지만 예전보다 향상된 Chimera 알고리즘을 사용해도 계산시간이 상당히 걸리는 것을 알 수 있었다.

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.
- [4] 김근호, 노오현, 조경국, (1983) "풍동실험에 의한 승용차의 최적 외형 결정에 대한 연구," 한국자동차공학회지, Vol. 5, No. 2.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 정영래, 박원규, 김홍원, 하성도, (1995) "측풍영향을 고려한 고속전철 주위의 비압축성 점성 유동 해석," 한국전산유체공학회 1995년도 추계학술대회 논문집, pp 55-63
- [8] 허남건, 윤성영, 조원국, 김광호, (1992) "3차원 자동차 주위의 유동장에 관한 수치적 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp 172-176.
- [9] Nariaki H., Yoshihiro K., Sayoko S., Tsuguo K., and Yuichi T., (1995) "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System," SAE Paper 950628.
- [10] Kenji O. and Toshihiko K., (1995) "Practical Aerodynamic Simulations(C_D , C_L , C_{YM}) Using a Turbulence Model and 3rd-Order Upwind Scheme," SAE Paper 950629.
- [11] Baldwin, B. S. and Lomax, H., (1978) "Thin-Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 79-257.
- [12] 최성욱, 성봉주, "Chimera 격자를 이용한 항공기 주위의 비점성 유동해석." 한국항공우주학회지. 제 23권, 5호, 1995, pp 9-19.
- [13] O. Baysal, K. Foula, and V. R. Lessard, "Multigrid and Upwind Viscous Flow Solver on Three-Dimensional Overlapped and Embedded Grids," AIAA Journal, Vol. 29, NO. 6, 1991, pp 903-910.