

### 3차원 미니밴 형상 주위의 비압축성 점성 유동 해석

#### Incompressible Viscous Flow Analysis Around a Three Dimensional Minivan-Like Body

정영래\*<sup>1</sup>, 박원규<sup>2</sup>, 박영준<sup>3</sup>, 김종섭<sup>4</sup>

Y. R. Jung, W. G. Park, Y. J. Park, and J. S. Kim

The flow field around a three dimensional minivan-like body has been simulated. 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. A H-H type multi-block grid system is generated around a three dimensional minivan-like body. Turbulent flows have been modeled by the Baldwin-Lomax turbulent model. The simulation shows three dimensional vortex-pair just behind body. And the flow separation is also observed the rear of the body. It has concluded that the results of present study properly agree with physical flow phenomena.

## 1. 서 론

자동차 외형 설계에 있어서 자동차 주위의 유동은 공기역학적인 특성에 많은 영향을 주고 있으며 공력성능에 중요한 설계인자이다. 따라서 현재 자동차의 주행 안정성 및 항력 감소의 측면에서 이에 대한 많은 연구가 수행되어지고 있다. 그러나 자동차 주위의 공기유동은 비행체형상 주위의 유동과 비교해 볼 때 박리와 와류의 발생에서 큰 차이를 보인다. 작은 박리는 전조등, 거울, 문손잡이 등에서 발생되고 큰 박리는 차체 후미와 밑바닥 그리고 회전하는 바퀴 등에서 발생되는데 이러한 박리는 와류와 더불어 궁극적으로 자동차 성능 및 유동소음에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 정확한 예측과 해석이 중요하다. 최근 고속화되고 정숙화된 차량에서는 wind noise가 가장 문제가 되고 있는데, 이러한 소음을 해석하기 위해서는 자동차 주위의 유동에 대한 정도 높은 계산이 선행되어야 할 것이다. 국내에서는 최근 RV차량에 대한 선호와 함께 수요가 급증하고 있으나 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히 미니밴(minivan)이나 왜건(wagon)형 차량의 경우, 세단형 승용차에 비해 항력이 크게 작용되기 때문에 공력학적 해석이 중요하다. 본 연구와 관련하여 선행된 연구들은 실험적 방법[1~4]에 의존하여 왔으나, 최근 수치적 기법의 개발과 컴퓨터의 급속한 발달로 인해 수치적 해석의 영역이 점차 확대되어져 가고 있다. 먼저 패널법을 이용한 연구로는 Ahmed와 Hucho[5]에 의해 밴 주위의 유동이 계산된 바 있고, 이동호 등[6]에 의해 자동차 외형설계를 위한 연구가 있었다. 2차원 형상에 대한 연구로는 박우열[7]에 의해 나비에-스톡스 방정식과  $k-\epsilon$  난류모델을 이용한 수치해석이 있었고, 최근에는 3차원 형상에 대한 연구가 활발히 진행되어 Han[8]에 의해 3차원 Ahmed body 주위의 난류유동이 해석되었고 박원규 등[9]에 의해서는 측풍이 있는 3차원 고속전철 주위 난류유동이 해석되었으며 허남건 등[10]와 Nariaki 등[11], 그리고 Kenji 등[12]에 의해 3차원 자동차 주위의 난류유동이 해석되었다. 특히 Nariaki에 의한 연구

1. 부산대학교 대학원 기계공학과 (609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지 Tel: 051-510-3064)
2. 부산대학교 기계공학과 (609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지, Tel:051-510-2457)
3. 부산대학교 대학원 기계공학과 전산유체실험실
4. 부산대학교 대학원 기계공학과 전산유체실험실

는 바퀴와 범퍼의 영향을 고려하였으며, Kenji에 의한 연구는 여러 가지 형상의 밴(van)에 대해 범퍼의 형상변화와 측풍의 영향도 함께 고려되었다. 본 연구의 목적은 미니밴(Minivan) 주위의 유동장을 3차원 비정상상태 비압축성 난류유동을 적용하여 계산하여 미니밴 주위의 유동장을 이해하고 이를 바탕으로 외형설계에 대한 기초데이터 제공을 목적으로 한다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석 방법

3차원 비정상 상태의 비압축성 점성유동의 지배방정식은 나비에-스톡스방정식으로서, 이를 무차원화한후 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 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 편미분 방정식이므로 시간행진(time marching) 방법을 이용하여 유한차분화시키고 여기에 뉴턴 반복법을 적용시키면,

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

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  $\omega$  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.

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

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  $\omega$ 와 A, B, C에 독립적임을 알 수 있다.

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

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

여기서  $\beta$ 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  $\Delta q$ 가 영(zero)으로 간다면, 본 알고리즘이 'n+1'시간에 대해 정확히 지배방정식을 만족시킴을 알 수 있다.

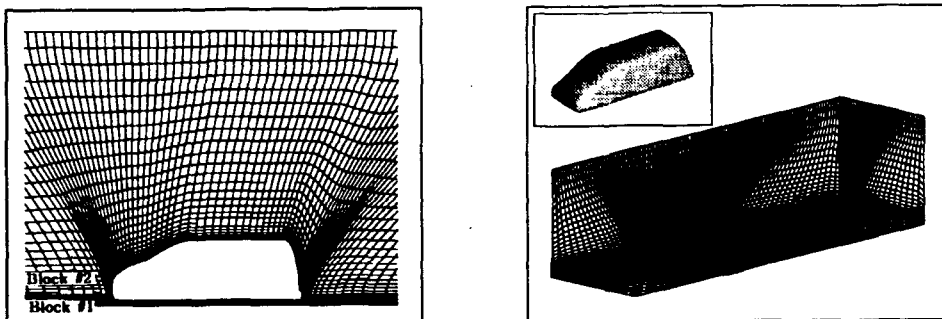
본 연구에서 대류항은 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation For Convection Kinematics)방법 [13]을 이용하여 유한 차분화 시켰으며, 점성항은 공간적 중앙 차분화를 이용하였다. 그리고 연속 방정식은 중앙차분을 이용하였으며, 본 알고리즘의 안정화를 위해 4차의 인공감쇠항을 첨가하였다. 난류유동 모델을 위해서는 Baldwin - Lomax모델[14]가 사용되었다.

### 3. 초기조건 및 경계조건

본 연구에서는 초기조건으로 자유유동조건을 이용하며, 격자의 외부경계가 자동차로부터 충분히 먼 거리에 있다고 하여 역시 자유유동조건을 원거리 유입경계조건으로 사용하였으며, 유출 경계조건은 속도의 외삽과  $p = p_\infty$ 로부터 구하였다. 자동차 표면에서는 점착조건(no slip)과 표면의 법선 압력구배가 영(zero)라는 조건을 이용하였고, 지면에서는 지면효과를 고려하기 위해 바람과 같은 속도를 주었다. 본 연구에서의 격자는 H-H격자(110×37×10, 110×37×25)를 미니밴 주위에 멀티블럭으로 생성시켰으며 블록간 보간은 선형보간법을 이용하였다. 또한 측풍이 없다는 조건하에 대칭조건을 이용하여 자동차의 반(Half)평면에 대해서만 지배방정식을 풀었다.

### 4. 결과 및 고찰

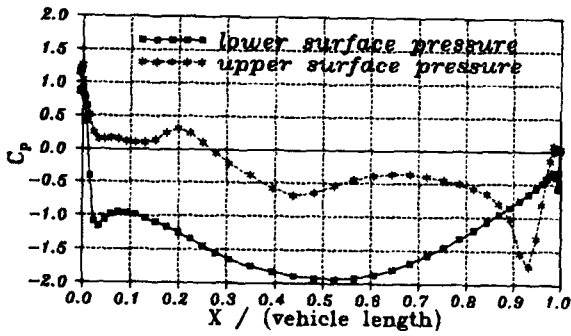
본 연구에서 3차원 미니밴 주위의 유동해석을 위한 레이놀즈수는 속도 100km/hr 자동차 길이(L)에 근거하여  $9 \times 10^6$ 이다. Fig.1은 미니밴 주위에 생성시킨 격자로서, H-H의 멀티블럭격자(110×37×10, 110×37×25)를 타원형 격자생성법을 이용하여 생성시켰다.



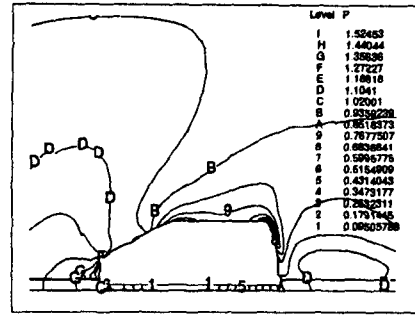
(a) Configuration of minivan

(b) An isometric view of H-H grid system

Fig.1 H-H type grid system

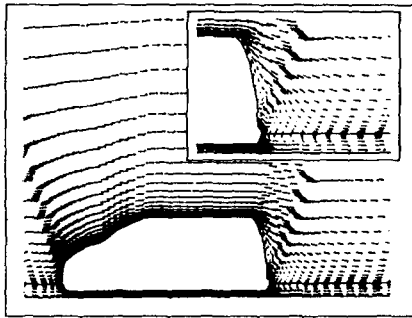


(a) Surface pressure coefficient

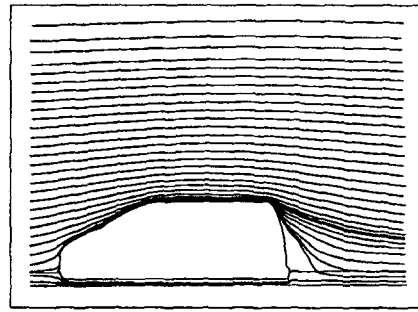


(b) Pressure contours

Fig.2 Pressure coefficient and contours at the symmetry-plane



(a) Velocity vectors



(b) Streamlines

Fig.3 Velocity vectors and streamlines at the symmetry-plane

Fig.2 (a)는 대칭단면에서의 상면과 하면에서의 표면 압력계수( $C_p$ )를, Fig.2 (b)는 등압력선도를 나타낸 것이다. 상면에서는 Fig.4와 같이 보면 선두부에서 정체압력이 발생되고 이 때의 최대압력이 점차 속도로 변환되어 가속이 이루어짐을 알 수 있으며, 앞유리 부분에서 압력이 잠시 증가하였다가 유리 앞부분을 지나면서 서서히 팽창되며 최대가속점인 루프를 지나면서 다소 팽창되었다가 후미의 상면에서 급격한 팽창이 이루어진다. 하면에서의 압력은 선두부에서 급격히 가속이 이루어짐을 알 수 있고 중앙부에서 가속이 최대가 되어 최소압력을 보인다. 미니밴은 전체적으로 상면과 하면의 큰 압력차에 의해 상면에서 지면을 향하는 음의 양력을 많이 받게 되며 이것은 자동차가 지면과의 마찰을 이기고 나아가는데 많은 동력이 소모됨을 의미한다. 그러나 차체를 누르는 힘은 자동차의 안정성 면에서는 유리한 인자로 작용될 수도 있다. Fig.3은 대칭단면에서의 속도벡터와 유선을 나타낸 것으로 후미의 상면에서부터 유동이 박리 되어 후방에서 웨이크 영역을 형성한다. 선두부나 상면의 곡률이 변하는 부분에서 박리는 일어나지 않았다. Fig.4는 자동차 표면에서의 등압력분포로서, 자동차 형상의 영향으로 선두부의 정체부분이 넓게 분포되며 모서리와 앞면 유리부분을 통해 팽창이 이루어짐을 알 수 있다. 자동차 벽면에서도 하면과 상면의 압력차에 의해 하면에서 상면으로 치우치는 흐름이 발생되며, 이것이 벽면을 타고 말려 올라가며 후미로 전달되어 후미에서의 3차원 와류를 생성시킨다. 이러한 와류는 Fig.5와 Fig.6 (a)에서 잘 관찰된다. Fig.5는 차체에서 벤 길이의 1/3만큼 떨어진 후방의 단면에서 단면방향으로의 속도벡터로서 차체를 따라 흘러온 유동이 유입되면서 차체와 박리 되어 와류를 형성한 것으로 단면의 3차원 와류를 속도벡터를 통해서 확인한 그림이다. Fig.6은 3차원 유선으로서 Fig.6 (a)에서는 후미의 3차원 와류의 발생을 보여준다. 후미에서의 3차원 와류는 Ahmed body 유동이나 세단형 및 왜건형 자동차의 유동을 연구한 선행연구자들의 후미 와류와 유사한 형태의 와류를 보였다. Fig.6 (b)은 전면에서 본 3차원 유선으로 본 연구에서는 형상의 단순화를 위해 전조등과 후향거울을 제외시켰기 때문에 와류의 발생 없이 미니밴 형상을 따라 유연하게 흐르고 있다.

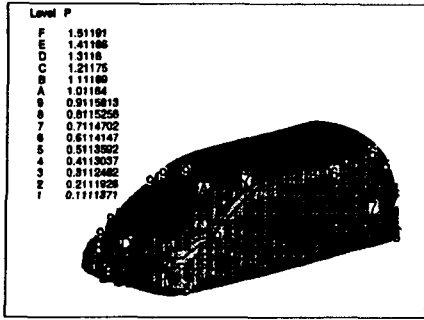


Fig.4 Pressure contour distribution on the body surface

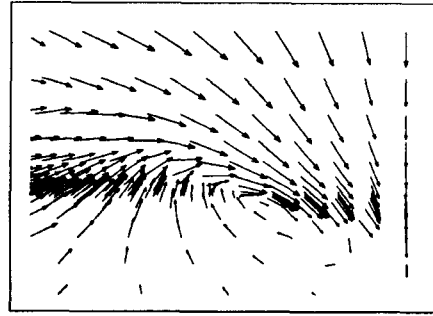
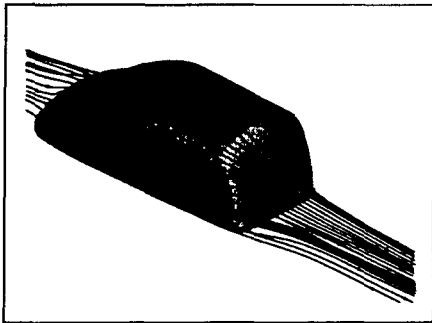
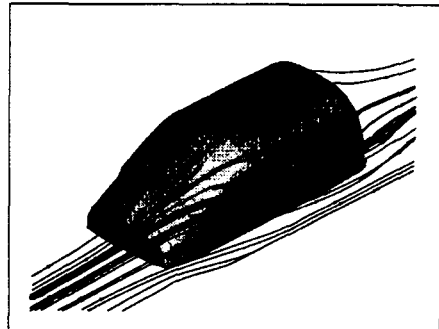


Fig.5 Cross-sectional velocity vectors in the wake region



(a) 3D streamlines viewing from the oblique-back side



(a) 3D streamlines viewing from the front side

Fig.6 3D streamlines past a minivan

## 5. 결론

본 연구에서는 미니밴 주위의 유동해석을 위해 3차원 비압축성 점성 유동의 나비에-스톡스 방정식을 사용하였다. 운동량 방정식은 시간 행진 방법을 사용하였고 연속방정식은 Marker-and-Cell의 개념을 사용하였다. 그리고 대류항은 QUICK방법을 이용하여 차분화 하였으며 점성항은 공간적 중앙차분을 이용하였다. 또한 해의 안정화를 위해 4차의 인공감쇠항을 첨가하였다. 유동해석결과 자동차 후미에서 박리와 3차원 와류가 발생되었고, 이러한 박리는 미니밴의 기능성과 용도로 볼 때, 불가피한 에너지 손실로 여겨진다. 자동차 성능 면에서 미니밴(minivan)은 상면의 높은 압력과 하면의 낮은 압력의 차이에 의한 차량을 누르는 힘이 발생되어 자동차가 지면과의 마찰을 이기고 나아가는데 과도한 동력의 소모를 초래할 것으로 예측되었다. 따라서 하면에서의 낮은 압력은 자동차 바닥에서의 흐름을 적절히 변화시켜 높일 수 있고, 상면과의 압력차를 줄여서 차량을 누르는 힘을 어느 정도까지 제거할 수 있다. 그러나 차량의 안정성 면에서 신중히 고려되어야 한다. 즉 선두와 후미의 차바닥은 기존의 상태를 유지하고 중앙에서의 차바닥은 속력이 감소되도록 많은 공간을 확보시키면 박리 없이도 압력을 높일 수 있을 것으로 보인다.

## 6. 참고문헌

- [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] 최정명, (1985) "승용차의 항력감소를 위한 공기역학적 실험연구," 인하대학교 대학원 공학석사 학위 논문.
- [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] 이동호, 강신영, (1984) "패널법을 이용한 자동차의 외형설계," *한국자동차공학회지*, 제21권, 제2호, pp 9-17.
- [7] 박우열, (1991) "2차원 자동차모형주위 유동장에 관한 수치적 연구," *한양대학교 대학원 공학석사 학위 논문*.
- [8] 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.
- [9] 정영래, 박원규, 김홍원, 하성도, (1995) "측풍영향을 고려한 고속전철 주위의 비압축성 점성 유동 해석," *한국전산유체공학회 1995년도 추계학술대회 논문집*, pp 55-63
- [10] 허남건, 윤성영, 조원국, 김광호, (1992) "3차원 자동차 주위의 유동장에 관한 수치적 연구," *대한기계학회 추계학술대회 논문집*, pp 172-176.
- [11] Nariaki H., Yoshihiro K., Sayoko S., Tsuguo K., and Yuichi T., (1995) "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System," *SAE Paper 950628*.
- [12] 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*.
- [13] Leonard, B. P., (1979) "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 19, pp 59-98.
- [14] Baldwin, B. S. and Lomax, H., (1978) "Thin-Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," *AIAA Paper 79-257*.