

## 후미경사각 변화에 따른 자동차주위 유동특성 해석

### Numerical Analysis of Flow Characteristic Around an Automobile with Variation of Slant Angle of Rear End

정영래\*, 강동민\*, 박원규\*\*  
Youngrae Jung, Dongmin Kang, Wangyu Park

#### ABSTRACT

In this paper, numerical analysis is used to find the effects of inclination of rear end on flow characteristic around an automobile. The reference slant angle of rear end is  $28.6^\circ$ , the slant angle of rear end is decreased to  $24^\circ$ ,  $26.6^\circ$  and also increased to  $31.6^\circ$ ,  $36.4^\circ$ . The 3-D incompressible Navier-Stokes equations are solved by the iterative time marching scheme. The computed surface pressure coefficients were compared with experimental results and a good agreement has been achieved. The A- and C-pillar vortex and other flow phenomena around the ground vehicle are evidently shown. The variation of aerodynamic coefficients of drag, lift with respect to inclination angle of rear end are systematically studied. The flow characteristic on the automobile surface with respect to change of inclination of rear end have been also studied.

주요기술용어 : Flow around an automobile(자동차 주위 유동), Incompressible turbulence flow(비압축성 난류유동), Iterative time marching scheme(시간 진행 반복 기법), Chimera grid technique(Chimera 격자기법), Slant angle of rear end(후미 경사각), Aerodynamic coefficients(공기역학적 계수)

#### Nomenclature

$\hat{q}$  : flow property vectors in computational domain  
 $\hat{E}, \hat{F}, \hat{G}$  : convective flux vectors in computational domain

$\hat{E}_v, \hat{F}_v, \hat{G}_v$ : viscous flux vectors in computational domain  
 $C_d$  : drag coefficient  
 $C_l$  : lift coefficient  
S : saddle point  
N : focus point

\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부

#### 1. 서론

현재까지의 지상운송체에 대한 공기역학적 연

구는 주로 주행중의 연료소모율을 줄일 수 있는 형상의 도출과 운송체의 주행안정성과 관련되어 왔다. 자동차의 주행안정성과 관련된 연구로는 고속 주행중인 자동차가 정풍, 측풍, 돌풍하에서 받게되는 공기역학적 힘들에 대한 안정성 연구이다. 이러한 자동차 주위의 일반적인 유동해석에 대한 연구는 주로 실험적 방법<sup>1)</sup>에 의존해 왔으나, 최근 수치기법의 개발과 컴퓨터의 급속한 발달로 인해 수치적 해석의 영역이 점차 확대되어져 가고 있다. 정풍에 대한 수치적 연구로는 박원규 등<sup>2)</sup>, 허남근 등<sup>3)</sup>, 김우승 등<sup>4)</sup>, Okumura 등<sup>5)</sup>의 연구가 있으며, 측풍 영향을 고려한 자동차 주위 유동장에 대한 연구는 박원규 등<sup>6)</sup>, Englar 등<sup>7)</sup>의 연구가 있었다. 한편, 연료소모율을 줄이기 위한 연구에서 공기역학적인 측면을 제외한 부분은 상당히 진척되어, 희박연소엔진과 같은 고연비의 엔진이 등장하고 알루미늄이나 복합재료의 사용으로 인해 차체의 경량화가 이루어지고 있는 실정이다. 그러나 자동차의 주행속도가 증가할수록 공기역학적 저항에 의한 에너지 손실이 급격히 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 주행속도의 고속화추세에 따라 공기역학적 항력에 의한 연료소모를 줄이는 것이 필수적이나 자동차 후미형상변화에 따른 유동특성에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 이러한 후미형상 변화에 대한 실험적 연구로는 Ahmed<sup>8)</sup>와 김대훈 등<sup>9)</sup>에 의해 수행되었다.

본 연구에서는 수치적 방법을 사용하여 후미경사각의 변화에 따른 자동차 후미의 유동 특성에 대해 고찰하였다. 유동코드의 검증을 위해 정풍하에서 자동차 주위 압력계수를 계산하여 실험결과<sup>10)</sup>와 비교하였다. 또한 후미경사각의 변화에 따른 자동차의 저저항설계를 위한 기본 자료의 제공을 위해서 공기역학적 계수(aerodynamic coefficients)를 계산하여 후미경사각의 변화에 따라 비교하였다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석 방법

3차원 비정상상태 비압축성 점성 유동의 지배 방정식은 Navier-Stokes 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  $\hat{q}$ 는 유동벡터이며  $\hat{E}$ ,  $\hat{F}$ ,  $\hat{G}$ 는 대류항을 의미하며,  $\hat{E}_v$ ,  $\hat{F}_v$ ,  $\hat{G}_v$ 는 점성항을 의미한다. 식(1)의 지배방정식을 수치해석으로 해를 구하기 위해 운동량방정식을 시간행진(time marching) 방법<sup>2,9)</sup>을 이용하여 유한차분화시키고 여기에 뉴턴 반복법을 적용시키면

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

여기서 윗첨자  $n+1$ ,  $n$ 은 시간 level을 의미하며  $k+1$ 은 반복 level을 의미한다. 그리고 윗식들 '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, C는 Jacobian 행렬이고  $\bar{R}^{n+1,k}$ 는 잔류벡터이다. 연속방정식은 비압축성 유동해석을 효율

적으로 수행하기 위해 Marker-and-Cell(MAC)의 개념을 다음과 같이 이용하였다.

$$\Delta p = -\beta(\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad (4)$$

여기서  $\beta$ 는 완화계수이며 난류유동을 위해서는 Baldwin-Lomax모델을 사용하였다. 그리고 후사경이 포함된 3차원 자동차 형상에 대한 효과적인 격자생성과 효율적인 계산을 위해 chimera 격자기법을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 유동해석코드의 지상운송체 유동에 대한 검증과 chimera 격자기법에 대한 설명과 검증은 참고문헌<sup>2)</sup>에 자세히 언급되었다.

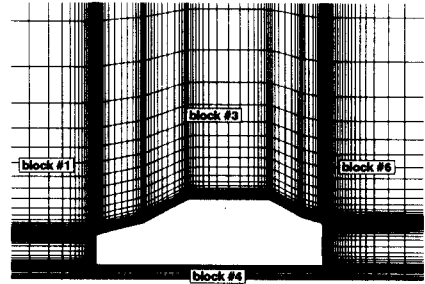
### 3. 초기조건과 경계조건

초기조건으로는 자유유동조건을 사용하는데 레이놀즈수는 자동차 길이에 대해서  $1.68 \times 10^6$ 의 값을 가진다. 원거리 유입경계조건으로 역시 자유유동조건을 사용하였으며, 유출경계조건은 속도의 외삽과  $p = p_\infty$ 로부터 구하였다. 자동차 표면과 지면에서는 점착조건(no slip)과 표면의 법선 압력구배가 영(zero)이라는 조건을 이용하였다.

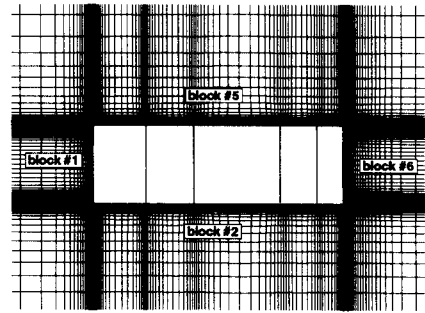
본 연구에서는 계산을 위한 격자계는 Fig.1(a)와 (b)에서 보듯이 전방( $30 \times 111 \times 67$ )과 후방( $45 \times 111 \times 67$ ), 자동차 상면( $78 \times 47 \times 32$ ), 자동차 하면( $78 \times 47 \times 14$ ), 자동차의 양 측면( $78 \times 33 \times 67$ )으로 구성되는 총 6개의 다중블록격자로 생성시켰으며 Fig.1(c)와 같이 chimera 격자기법을 이용하여 후사경 주위에 O-H형격자( $48 \times 37 \times 13$ )를 생성시켰으며 총격자점은  $1.1 \times 10^6$ 이다. Fig.1 (d)에서는 계산과 실험에서 사용된 모델의 치수를 mm 단위로 나타내었다. 본 연구에서는 후미경사각에 대한 유동해석을 정풍조건하에서 계산하였으므로 대칭조건에 의해 자동차의 반(half)평면에 대해서만 지배방정식을 풀었다.

### 4. 결과 및 고찰

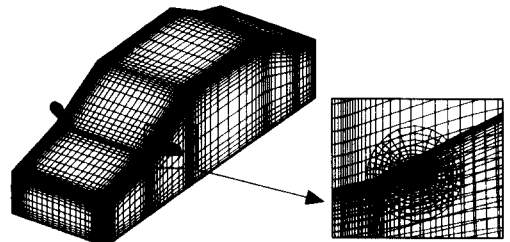
본 연구에서는 개발된 3차원 유동해석 코드를



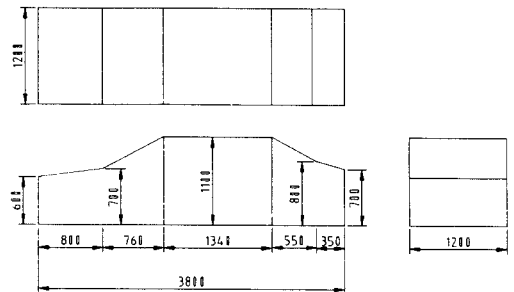
(a) Side view



(b) Top view



(c) Chimera grid around a side-view mirror



(d) Dimensions of automobile

Fig. 1 Grid system and dimensions of the automobile

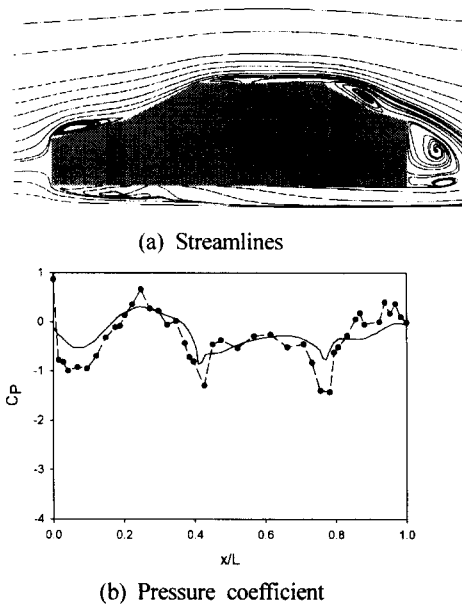


Fig. 2 Streamlines and pressure distribution along the streamwise direction ( · · · Exp.<sup>10</sup>, --- Present)

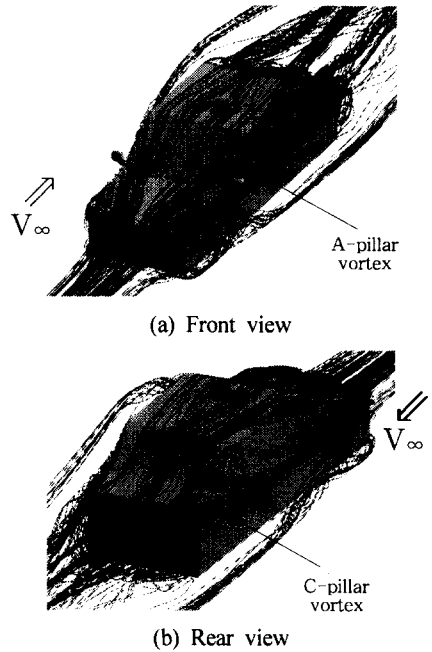


Fig. 3 3-D streamlines around the automobile

자동차와 같은 지상운송체의 유동해석 검증을 위해 참고문헌<sup>2)</sup>에서 Ahmed형상에 대해 계산하여 실험 및 타 연구자의 계산결과와 비교하였으며, chimera 격자기법의 타당성 검증을 위해 역시 참고문헌<sup>2)</sup>에서 실린더 주위의 유동에 대해 계산하여 실험 및 타 연구자의 계산결과와 비교하여 타당한 결과를 얻었다.

Fig.2(a)에서는 후미경사각이 28.6° 인 자동차의 중앙단면을 따라서 유선을 나타내었고 Fig.2(b)에서는 상면의 압력계수를 계산하여 실험<sup>10)</sup>과 비교하였다. Fig.2(a)를 통해서 후드(hood)상면과 루프(roof) 시작부분 그리고 후방 유리창 상면에서 유동박리를 볼 수 있고 이러한 박리영역은 압력이 낮게 분포되고 있음을 Fig.2(b)에서 확인할 수 있다. 본 연구에서 계산된 압력계수(Fig.2(b)의 실선)를 동일한 모델의 실험결과(Fig.2(b)의 점선)와 비교하면 전반적인 경향은 잘 일치하지만 유동의 박리영역에서 다소 차이를 보이는데 이것은 난류모델이 박리영역에서 예측성능이 떨어지기 때문으로 판단된다.

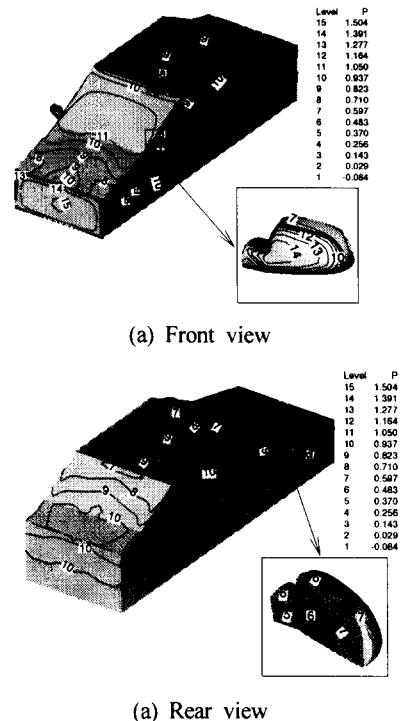


Fig. 4 Pressure contour distribution on the vehicle and the side-view mirror

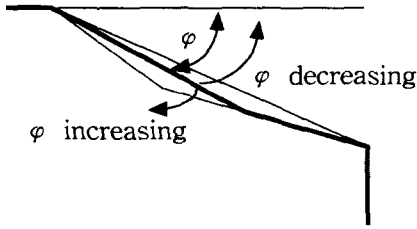


Fig. 5 Slant angle ( $\varphi$ ) of rear end

Fig.3에서는 자동차주위 유동에 존재하는 일반적인 유동특성을 파악하기 위해 자동차 주위의 3차원 유선을 전방과 후방에서 나타내었다. Fig.3(a)에서는 유리창 중심에서 양측면으로 분리되는 유동과 측면의 아래에서 위로 흐르는 유동이 A-pillar에서 만나면서 떨어져나가는 A-pillar vortex의 생성을 볼 수 있고, Fig.3(b)에서는 후면유리창의 하면에서 상면쪽으로 역류되는 유동과 측면에서 후면유리창으로 흘러들어가는 유동이 C-pillar에서 합해져서 떨어져 나가는 C-pillar vortex의 생성을 역시 볼 수 있다. 이러한 A-pillar vortex와 C-pillar vortex는 pillar부분에서 모서리의 곡률반경이 작아야 발생하는 유동현상인데 본 연구에서 사용된 모델의 모서리 곡률반경은 영(zero)이므로 아주 잘 관찰되고 있다. Fig.4는 자동차 표면에서의 등압력선도를 전방과 후방에서 나타낸 것으로, 3차원 유선을 나타낸 Fig.3과 같이 보면 자동차의 앞범퍼 중앙과 후사경 전면 중앙에 정체점이 발생되며 후드 시작 모서리와 루프 시작 모서리 부분에 박리영역이 생성되었음을 볼 수 있다.

Fig.5는 자동차 후미 경사각(Slant angle of rear end,  $\varphi$ )과 후미 경사각의 변화를 설명하는 그림으로서, 후미 경사각은 기준 경사각을  $\varphi = 28.6^\circ$  로 하고  $\varphi = 26.6^\circ$ ,  $\varphi = 24.0^\circ$  로 감소시킬 때와  $\varphi = 31.6^\circ$ ,  $\varphi = 36.4^\circ$  로 증가시키는 경우로 변화시켰다.

Fig.6은 자동차의 후미경사각 변화에 따른 자동차 중심 단면에서의 속도벡터와 유선을 나타낸 그림이다. 자동차 후방의 후류(wake)영역의 유

동은 상면에서 흘러온 유동에 의한 큰 와류와 하면에서 흘러온 유동에 의한 작은 와류가 쌍(pair)을 이루는 쌍와류(twin vortex)의 특징을 가진다. 후미 경사각의 변화에 따라 후류 유동은 상단의 큰 와류와 하단의 작은 와류의 상대적인 크기와 거동특성은 변화하지만 큰 와류와 작은 와류가 이루는 후류영역의 절대적인 크기는 거의 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig.6에서 자동차 대칭단면의 속도벡터와 유선을 나타내었기 때문에 C-pillar vortex에 의한 3차원 박리의 영향이 빠져있기 때문이며 실제적으로는 자동차의 유동에서는 후미의 3차원 박리유동에 의해 항력이 증가되는 것으로 알려져 있다. 이러한 3차원 박리 유동은 후방 유리나 트렁크에 해당하는 후미 표면에서의 유동을 통해서 파악될 수 있다.

Fig.7에서는 후미경사각 변화에 따른 후미에서의 유동특성을 파악하기 위해 자동차 표면 마찰력선을 나타낸 그림이다. 자동차 후미의 표면 마찰력선도에서 볼 수 있는 특이점은 마찰력선의 유입과 유출이 있는 saddle point(S)와 마찰력선이 회전되면서 와유출이 있는 focus point(F), 그리고 마찰력선의 유입만이 있는 node point(N)이 있다. 본 연구에서 계산한 5가지 후미 경사각의 경우, 모두 saddle point는 S1, S2, S3, S4의 4개가 대칭선상에 위치하고 S2, S3, S4의 위치는 고정되어있지만 S1의 경우는 후미 경사각이 변화함에 따라 위치가 계속적으로 이동되고 있다. 그리고 루프 시작부분에서 focus point F3과 F4가 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 후미 경사각이 변화됨에 따라 후미에서의 특이점의 분포는 S1과 S2는 모두 존재하고 경사각을 감소시켰을 때는 F1과 F2가 존재하지만 경사각을 증가시켰을 때는 F1과 F2가 사라지고 N1과 N2가 존재하고 있다. 특히 기준 경사각인  $\varphi = 28.6^\circ$  에서는 S1이 트렁크 끝단부근까지 이동되어 있으며 유동이 재부착되는 N1과 N2가 양측면으로 밀려나 있음으로써 3차원 박리가 강할 것으로 예측된다.

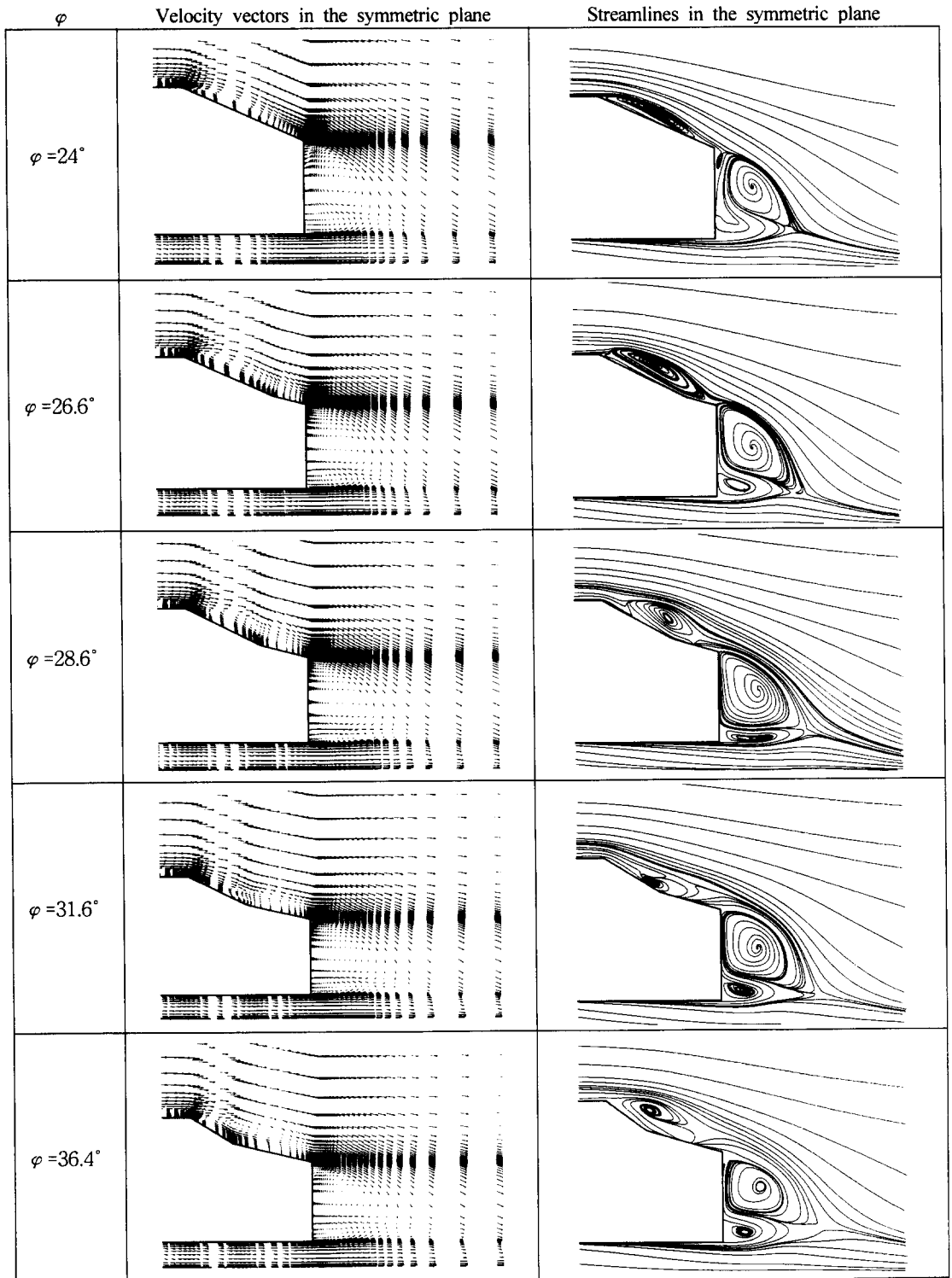


Fig. 6 Influence of slant angle of rear end on velocity vectors and streamlines

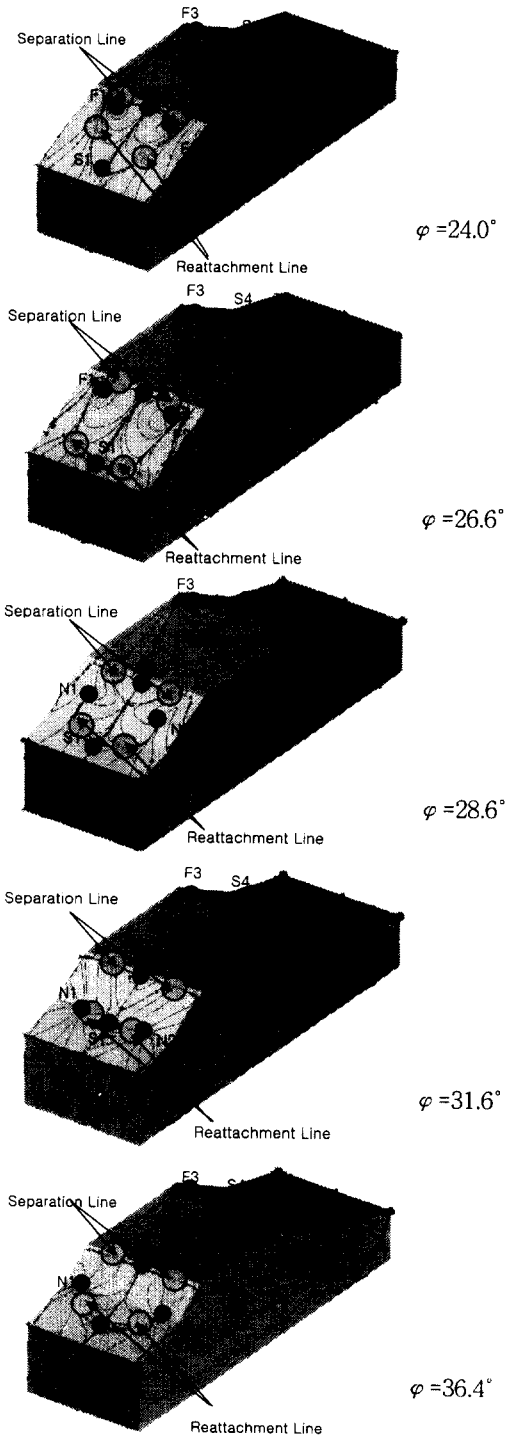
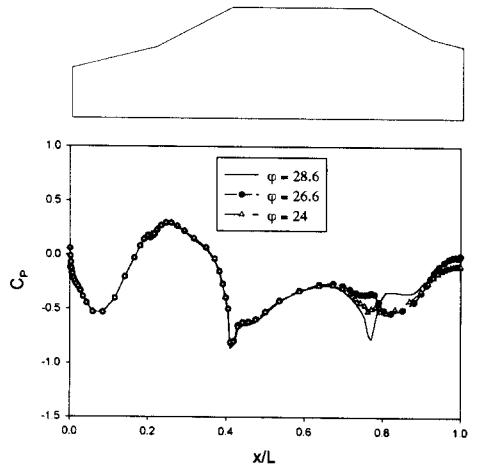
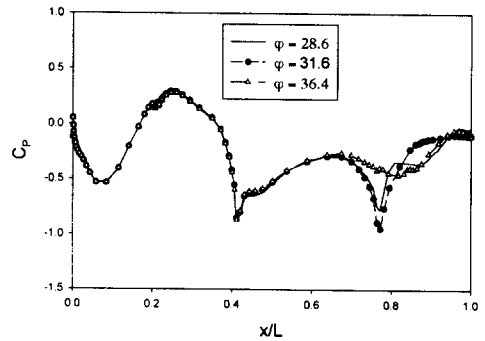


Fig. 7 Influence of slant angle of rear end on limiting streamlines



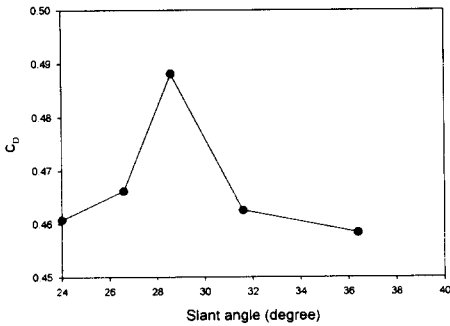
(a) In case of decreasing of slant angle



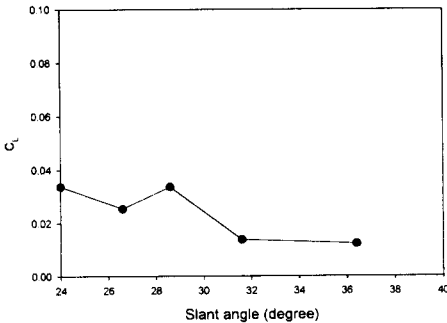
(b) In case of increasing of slant angle

Fig. 8 Pressure distribution on the upper surface with variation of slant angle of rear end

Fig.8은 자동차 후미 경사각을 증가시킬 때와 감소시킬 때, 자동차 중앙단면의 상면 압력계수를 나타내었다. 본 연구에서는 후미의 형상을 변화시켰기 때문에 선두부에서는 압력이 고정되어 있으므로 후미에서의 압력변화가 항력에 영향을 줄 것으로 판단된다. 후미 경사각이 28.6°, 31.6° 에서 후미의 큰 압력강하가 이루어지고 있는데, 경사각이 31.6° 에서는 떨어진 압력이 곧바로 회복이 이루어지지만 경사각이 28.6° 에서는 압력회복이 크게 일어나지 못하기 때문에 항력이 크게 나타날 것으로 예측되는데 이것은 후미 경



(a) Drag coefficient (C<sub>d</sub>)



(b) Lift coefficient (C<sub>l</sub>)

Fig. 9 Influence of slant angle of rear end on drag coefficient (C<sub>d</sub>) and lift coefficient (C<sub>l</sub>)

사각의 변화에 따른 항력과 양력을 나타낸 Fig.9에서도 잘 나타난다. 경사각 변화에 따른 항력은 기준 경사각인 28.6°에서 급격히 증가됨을 볼 수 있는데, 이것은 전술된 바와 같이 3차원 박리 유동과 표면 압력의 급격한 강하의 결과로 보여진다. 양력은 기준 경사각인 28.6°에서 역시 커지고 있지만 증가되는 경향이나 크기(order)가 항력에 비해서 심하지는 않다. 항력은 주행속도가 빨라짐에 따라 공기역학적 손실에 밀접한 관련을 가지는데, 후미 경사각이 28° < φ < 30° 사이에서 급격하게 증가하였다. 이러한 형상은 설계에서 가급적 피해야함을 알 수 있고 양력은 자동차의 주행안정성과 관련을 가지는데, 후미 경사각이 증가함에 따라 감소되는 경향을 보였다. 따라서 공기역학적 손실과 주행안정성을 모두 고

려하면, notchback에 해당하는 후미 경사각 φ = 36.4°이 가장 바람직한 형상임을 알 수 있고 이러한 형상은 세단형 자동차의 후미형상과 유사함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3차원 비압축성 점성 유동의 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 자동차 주위의 유동해석을 수행하였으며 자동차 후미 경사각의 변화가 유동특성과 공기역학적 저항에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 본 연구에서 개발된 유동해석용 코드는 선행연구들을 통해 여러 차례 검증되었으며, 계산에 사용된 것과 동일한 형상에 대한 실험결과를 비교하여 잘 일치하는 결과를 얻었다. 유동해석의 결과로 3차원 와류, A-/C-pillar vortex 등의 변화를 확인할 수 있었으며, 자동차 후미 경사각 φ가 28° < φ < 30° 사이에서 자동차의 공기역학적 항력이 급격히 증가함을 알 수 있었고, 양력은 후미 경사각이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 따라서 공기역학적 손실을 최소화하고 주행안정성을 확보하기 위한 형상으로는 경사각이 φ = 36.4°일 때가 우수함을 알 수 있었다. 또한 본 연구의 결과는 자동차 후미 형상 변화에 따른 저저항 설계를 위한 기초자료로 제공될 수 있다.

#### 후 기

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 개발의 일부연구)로 이루어졌으며, 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1) W. H. Hucho, "Aerodynamics of Road



- Vehicles : from fluid mechanics of road vehicle engineering," Butterworths, 1987.
- 2) 안민기, 박원규, "Chimera 격자기법을 이용한 자동차 주위의 유동장 해석," 한국전산유체공학회지, 제3권, 제2호, pp. 39-51, 1999.
  - 3) 허남근, 윤성영, 조원국, 김광호, "3차원 자동차 주위의 유동장에 관한 수치적 연구," 대한기계학회 '92년도 추계학술대회 논문집(II), pp. 172-176, 1992.
  - 4) 정수진, 김우승, "승용차 후향거울 주위의 3차원 유동 특성 해석," 한국자동차공학회 논문집, 제5권, 제3호, pp. 35-46, 1997.
  - 5) K. Okumura and T. Kuriyama, "Practical Aerodynamic Simulations (CD, CL, CYM) Using a Turbulence Model and 3rd-Order Upwind Scheme," SAE Paper 950629, 1995.
  - 6) 강동민, 정영래, 박원규, 하성도, "측풍의 편향각 변화에 따른 자동차 주위의 유동 해석," 한국전산유체공학회지, 제4권, 제3호, pp.1-11, 1999.
  - 7) R. J. Englar, M. J. Smith, C. S. Niebur and S. D. Gregory, "Development of Pneumatic Aerodynamic Concepts for Control of Lift, Drag and Moments plus Lateral/ Directional Stability of Automotive Vehicles," SAE Paper 960673, 1996.
  - 8) S. R. Ahmed, "Wake Structure of Typical Automobile Shapes," Journal of Fluids Engineering, Vol.103, pp.162-169, 1981.
  - 9) 김대훈, 장진혁, 고주현, "승용차 후미형상이 공력특성에 미치는 영향력에 관한 연구," 한국자동차공학회 1997년도 춘계학술대회 논문집(97380155), pp.333-341, 1997.
  - 10) 김경천, 지호성, 부산대학교 실험결과 내부교환, 1999.
  - 11) W. G. Park, Y. R. Jung and S. D. Ha, "Numerical Viscous Flow Analysis Around a High Speed Train with Crosswind Effects," AIAA Journal, Vol.36, No.3, pp. 477-479, 1998.
  - 12) 전중환, "표면유동가시화를 통한 박리유동의 고찰," 한국전산유체공학회 1998년도 추계학술대회 논문집, pp.1-6, 1998.