

Notchback자동차의 트렁크 높이와 공기속도가 차체 표면의 압력변화에 미치는 영향

Effect of Trunk Height and Approaching Air Velocity of Notchback Road Vehicles on the Pressure Distribution of the Car Surface

박종수*, 최병대*, 김성준**
Jongsoo Park, Byungdae Choi, Sungioon Kim

ABSTRACT

3-D numerical studies are performed to investigate the effect of the trunk height and approaching air velocities on the pressure distribution of notchback road vehicle. For this purpose, the models of test vehicle with four different trunk heights are introduced and PHOENICS, a commercial CFD code, is used to simulate the flow phenomena and to estimate the values of pressure coefficients along the surface of vehicle. The standard $k-\epsilon$ model is adopted for the simulation of turbulence. The numerical results say that the height variation of trunk makes almost no influence on the distribution of the value of pressure coefficient along upper surface but makes very strong effects on the rear surface. That is, the value of pressure coefficient becomes smaller as the height is increased along the rear surface and the bottom surface. Approaching air velocity make no differences on pressure coefficients. Through the analysis of pressure coefficient on the vehicle surfaces one tried to assess aerodynamic drag and lift of vehicle. The pressure distribution on the rear surface affected more on drag and lift than pressure distribution on the front surface of the vehicle does. The increase of trunk height makes positive effects on the lift decrease but negative effects on drag reduction.

주요기술용어 : Pressure coefficient(압력 계수), Drag(항력), Lift(양력), $k-\epsilon$ turbulent model($k-\epsilon$ 난류 모델), Trailing vortices(꼬리 와류)

Nomenclature

ν_t : turbulent kinematic viscosity
 C_μ : eddy viscosity factor
 k : turbulent kinetic energy
 ϵ : turbulent kinetic energy dissipation rate

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$: Prandtl-Schmidt number of k and ϵ
equation

C_p : pressure coefficient

P : pressure

ρ : density

* 회원, 강원대학교 대학원

** 회원, 강원대학교 기계 메카트로닉스 공학부

1. 서론

차량의 연료소비율은 엔진의 효율, 변속 시스템, 그리고 주행 저항 극복에 필요한 소요 동력 등의 요소에 달려 있다.

따라서 현재 자동차 산업에서는 차량의 연비의 향상을 위해 효율적인 엔진의 개발, 변속 시스템의 전달 효율 개선, 주행저항을 줄이기 위한 차체의 경량화 및 소형화 더불어 공기 역학적인 연구를 통하여 항력의 저감 및 주행 안정성 증대를 꾀하고 있다.

자동차 주위의 공기 역학에 대한 가능한 해석 방법 중 실제 도로상에서의 항력 측정, 풍동에 의한 실험 방법은 각각 시제품의 제작이 선행되어야 하는 어려움, 풍동 실험 장치의 막대한 비용 및 축소 모델의 한계 등으로 인해 실제 적용에 제약이 있다. 따라서 최근 컴퓨터 및 전산유동해석 기법의 발달과 더불어 차량 개발 기간 단축을 통한 경비 절감의 요구로 인해 전산유체역학을 이용하는 수치 계산 방법이 많이 이용되고 있다. 이는 개념설계 단계에서 바로 적용하여 설계 변경에 반영하는 것이 가능하므로 경비를 절감할 수 있다는 장점이 있기 때문이다.

최근의 국내외에서 수행한 승용차 공기 역학 수치해석 연구 성과들을 살펴보면 장¹⁰⁾ 등은 시판 승용차의 모형에서 유동가시화 실험 및 $k-\epsilon$ 난류 모델로 2차원 수치 계산을 하여 압력 계수 분포와 vortex의 형성을 구하였다. 류⁹⁾ 등은 자동차 하단부 형상의 변화에 따른 외부 유동을 RNG $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하여 2차원 수치 해석을 하여 자동차 하단부 앞부분의 변화는 주로 항력에 변화를 가져오고 뒷부분의 변화는 양력의 변화를 가져오게 됨을 밝혀 냈다. 명⁸⁾ 등은 Ahmed body 주위 유동에 대한 유한차분도식의 영향을 알아보기 위해 $k-\epsilon$ 난류 모델로 2차원 수치 계산을 하여 유한차분도식으로 Upwind Differencing Scheme, Second-Order Upwind Differencing Scheme, QUICK 도식을 사용함에 따라 점차 실험 값에 근접하는 결과를 얻어냈다. Han¹⁾ 등은 자동차 모델 표면의 압력 분포와 공기 저항을 예

측하기 위해 세 가지의 시험 모델에 대해서 풍동에 의한 실험과 $k-\epsilon$ 난류 모델 및 RNG $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용한 수치 해석을 하여 Aerodynamic Drag에 대한 CFD 예측을 실험 값과 비교하였으며, 각 난류 모델의 특성을 비교하였다. 또 명⁷⁾ 등은 MIRA Vehicle Model 주위의 난류유동에서 유한차분도식과 난류모델의 영향을 살펴보기 위해 수치해석을 하여 전체 항력계수에 미치는 영향은 유한차분도식이 난류모델 보다 훨씬 더 크고, 바퀴의 유무에 따라 유동 특성이 크게 바뀌는 것으로 평가하였다. 전⁶⁾ 등은 MIRA Notchback Reference Car 1/4 축소 모델의 표면유동가시화 및 RNG $k-\epsilon$ 과 RSM 난류 모델을 이용하여 상용 코드인 FLUENT로 수치해석을 수행함으로써 3차원 유동 박리의 형상을 규명하고자 하여 레이놀즈 수에 따른 유동 박리와 재 부착의 발생 관계를 얻어냈다. 정⁵⁾ 등은 후미경사각의 변화에 따른 자동차 후미의 유동 특성을 고찰하기 위해 Baldwin-Lomax 난류 모델을 사용하여 수치 해석을 하였으며 공기 역학적 항력과 양력이 후미경사각에 따라 변화하는 경향을 제시하였다.

최근의 연구에서 트렁크 부분의 높이의 영향을 해석한 경우가 없어 본 연구에서는 시판되고 있는 Notchback차량의 주요 외형 치수에 트렁크 부분 높이를 임의로 달리한 모델들을 대상으로 상용 프로그램인 Phoenics를 사용하여 자동차 주위의 유동에 대해 3차원 수치 계산을 수행함으로써 자동차 표면에서 압력 분포 및 후류에서 와류의 생성 속도 벡터를 관찰하여, 트렁크 부분 높이의 변화가 항력과 양력에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 1²⁾은 차량 주위의 3차원 흐름을 나타내고 있으며 차량 후부의 꼬리 와류를 나타낸 그림이다. 이 꼬리 와류가 고려되지 않는 2차원적인 흐름과 비교하여 Fig. 2²⁾에 나타난 바와 같이 3차원 흐름에서는 와류가 압력을 낮게 하면서 차량의 뒷면에서부터 공기를 당기게 된다. 이와 같이 꼬리 와류는 3차원 유동이다. 따라서 자동차 차체 디자인을 위한 수치 해석은 반드시 3차원 해석을 수행해야 한다.

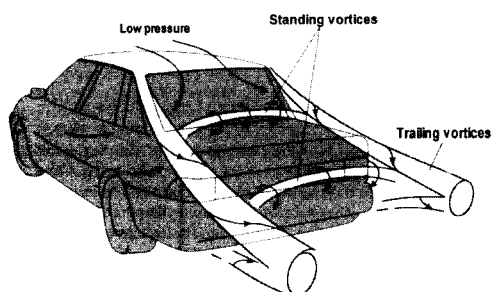


Fig. 1 The trailing vortices of the flow around a road vehicle²⁾

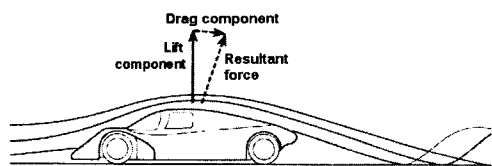


Fig. 2 Center-line flow pattern for three-dimensional flow²⁾

Table 1 Constants in k-ε model

C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_ϵ
0.09	1.44	1.9	1.0	1.3

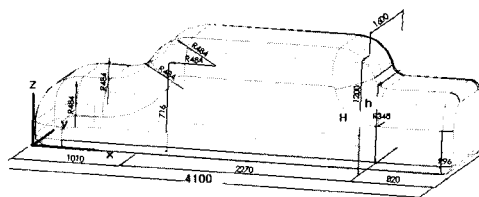


Fig. 3 The outline shape of notchback vehicle

$$+ \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \epsilon) \quad (4)$$

위의 $k-\epsilon$ 난류 모델에 사용된 상수들은 Table 1과 같으며,

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \text{ 이고, } G = -u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \text{ 이다.}$$

2. 수치해석

2.1 지배방정식

차체주위의 유동을 3차원 비 압축성, 정상 난류 유동으로 취급하고 직교좌표계를 채택하였으며 아래의 연속 방정식과 운동량 방정식을 지배 방정식으로 사용하였다.

연속 방정식

$$\frac{\partial (U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

난류 모델로는 그 안정성이 비교적 잘 확인되어 있는 $k-\epsilon$ 난류모델을 채택하였다.

난류 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \epsilon \quad (3)$$

난류 에너지 소산률 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]$$

2.2 수치해석방법

일반적으로 차량은 차체 뒷부분의 형상에 따라 notchback, fastback, squareback 세 가지로 분류하는데,¹³⁾ 본 연구에서는 그 중 Notchback차량을 대상으로 하였으며, 대상 차량의 주요 치수를 Fig. 3에 표시하였다. x 방향은 자동차의 길이 방향으로 하고 y 방향은 자동차의 폭 방향으로 하였으며 z방향은 자동차의 높이 방향으로 하였다. 여기서 자동차의 전체 높이 1200mm를 H로 표시하고 트렁크 부의 높이를 h로 표시하였으며 트렁크의 무차원 높이 h/H를 수치 실험 변수로 그 값을 0.56, 0.60, 0.64과 0.68로 변화시키면서 상용코드인 Phoenics를 사용하여 자동차 주위의 유동에 대해 3차원 수치 계산을 하였다. 모델 차량의 대칭면이 x-z 평면이므로 사용 격자수를 줄여 계산 시간을 단축하기 위해 대칭면에서 절단한 모델 차량의 절반을 대상으로 수치해석 하였고, 차량 앞부분과 뒷부분 그리고 바퀴 부분들을 따로 분리하여 CAD로 만든 형상 파일을 Phoenics에서 읽어서 사용하였는데 차체 부분의 치수를 Fig. 4에 표시하였다.

계산 영역 크기는 10m×2m×3m로 하였는데 이

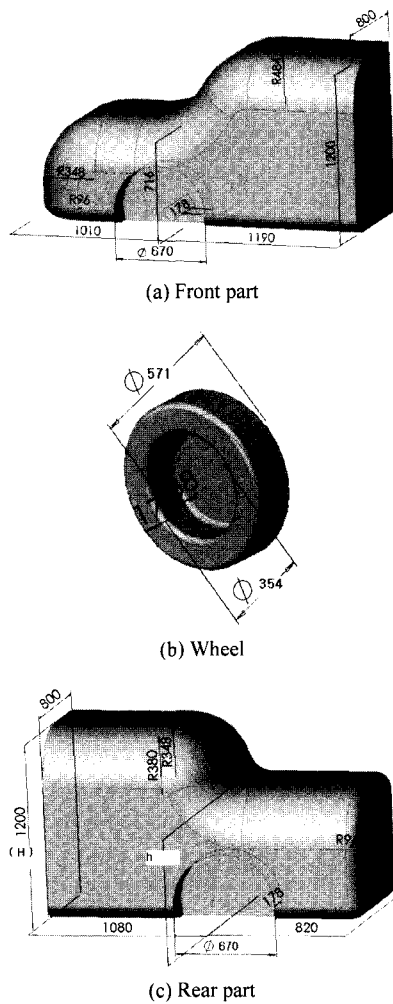


Fig. 4 The dimensions of vehicle model



Fig. 5 Computational grid system

는 계산 영역의 크기가 충분히 커서 영역의 경계가 차체 주위의 유동에 영향을 미치지 않도록 하였다. 차량 밑면은 실제 바퀴의 크기를 고려하여 바닥에서 0.16m 떨어지도록 하였다. 수치 계산을 위해 Fig. 5와 같이 비균일 격자망을 구성하였고 유동 변화가 심한 차체 표면 근처에 격자를 집

중시킨 230×12×97 (267,720개)의 격자망을 사용하였다. 대류항 차분법으로는 수치 계산의 안정성과 계산 시간을 고려하여 하이브리드 차분법을 사용하였으며 행렬 풀이 기법으로는 Elliptic_CCM기법¹²⁾을 사용하였다. 수렴 조건은 질량 잔류값으로 하였고 그 값은 질량 유동량의 10⁻³으로 하였다. CPU용량 700 Mhz의 PentiumIII 컴퓨터로 계산했을 때 반복 계산 횟수는 1200이었고 계산 시간은 15시간 정도이었다. 계산 영역 내 공기의 밀도 값은 20℃, 1 atm에서의 값인 1.189 kg/m³을 사용하였다. 공기 유동 속도가 차체 표면에서의 압력 분포에 미치는 영향을 분석하기 위해 주행 조건을 시내 주행, 고속 도로 상에서의 주행 및 최대 주행 속도로 가정하여 공기 속도 값을 각각 60km/h, 100km/h, 150km/h 세 가지로 선택하여 각각의 공기 속도에서 차체 주변의 유동장을 수치해석 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 Notchback 자동차를 대상으로 트렁크의 무차원 높이(h/H)가 차체 표면에서의 압력 계수에 미치는 영향을 수치 해석하였다. 여기서 압력 계수를 다음과 같이 정의하였다.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (5)$$

여기서 U_∞ 와 p_∞ 는 자유 유동의 속도와 압력이다.

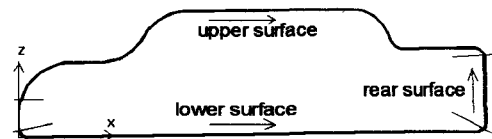


Fig. 6 Definition of surface

차체의 윗면, 아래 면과 뒷면은 Fig. 6에서 정의하였고, a, b, c, d와 e는 차체 표면에서의 위치를 나타내는 점들로 Fig. 7에서 정의하였다. a는 엔진룸 후드의 곡면 부분이고 b는 차량 앞 유리, c는 앞 유리와 루프가 만나는 곡면, d는 루프 패

널이 뒤 유리와 만나는 곳, e는 트렁크 표면이다. 트렁크 부 높이의 변화는 Fig. 8에 나타내었다.

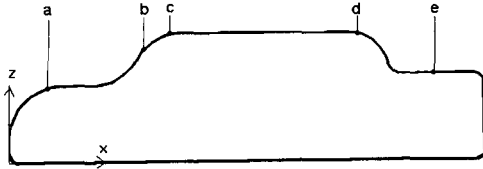


Fig. 7 The points of vehicle surface

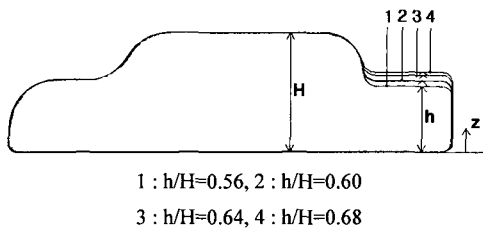
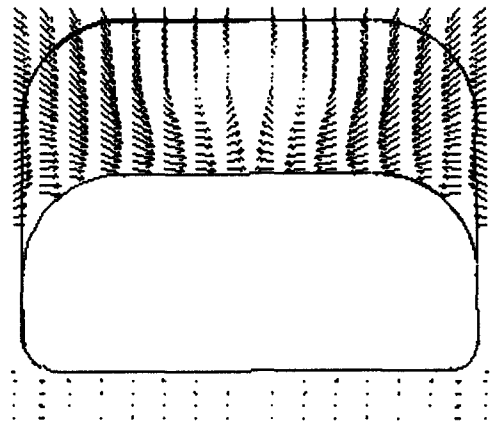


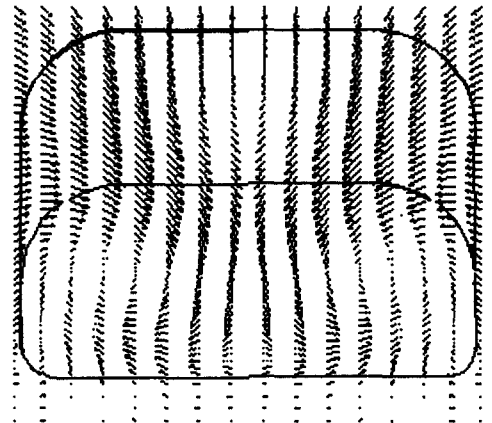
Fig. 8 Variations of trunk height

h/H 비가 0.56인 차량을 공기 속도 150 km/h에서 수치 해석하였을 경우 후류부 y-z면에서의 속도 분포를 Fig. 9에 나타내었는데 (a)는 트렁크 끝에서 52mm 앞 단면에서 (b)는 차량 뒤 480 mm 부분, 그리고 (c)는 차량 뒤 960 mm 부분에서의 속도장을 나타내고 있다. (a)에서는 꼬리 와류가 아직 형성되고 있지는 않고 트렁크 상단에서 속도장이 바깥쪽에서 안쪽으로 향하고 있음을 확인할 수 있다. (b)에서는 좌우 양쪽으로 꼬리 와류가 뚜렷이 나타나 있으며 (c)에서는 와류의 중심이 (b)보다 아래로 약간 내려온 것을 알 수 있었다. Fig. 10은 공기 속도가 150Km/h이고 h/H 가 0.68 일 경우 후류부 x-z면에서의 속도장을 나타내고 있는데 시계 방향의 standing vortices를 관찰할 수 있다.

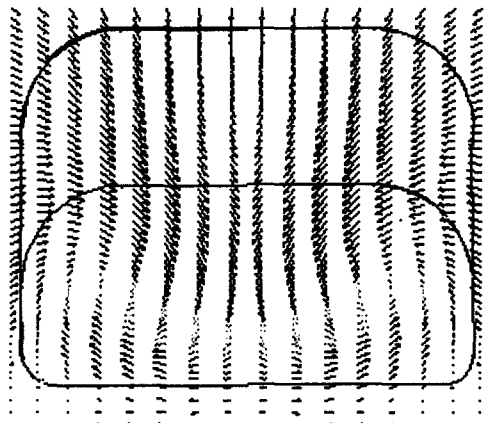
Fig. 11은 각각의 유속에서 차체의 길이방향으로 차량 윗면의 압력 계수 변화를 도시한 것이며 여기서 점선은 차량 윗면의 형상을 표시한다. 속도가 다른 (a), (b)와 (c)를 서로 비교하였을 때 압력 계수 변화가 거의 동일하여 그 차이를 확인하기 어려웠다. 그러나 트렁크 부의 높이 값이 변화함에 따라 Fig. 7의 e지점에서 즉 트렁크 표면



(a) At 52mm forward from the end of body



(b) At 480mm backward from the end of body



(c) At 960mm backward from the end of body

Fig. 9 The vortex contour in the wake region (y-z plane)

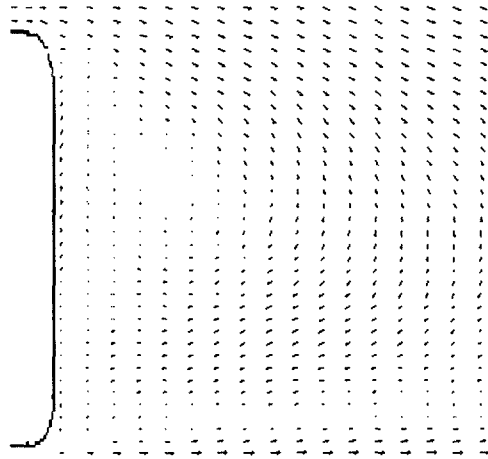
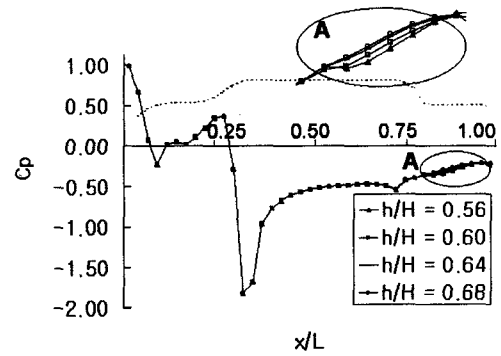


Fig. 10 The velocity vectors in the wake region (x-z plane)

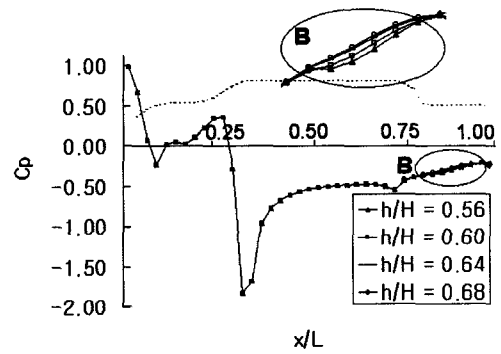
에서 압력 계수 값의 차이를 확인 할 수 있었는데, 트렁크 부의 높이 값을 크게 할수록 즉 h/H 의 비가 커질수록 압력 계수 값이 커지는 경향을 보였다. 압력 계수의 변화를 살펴보면 차량 전면에서는 양의 값을 보이다가 a점 즉 엔진룸 후드의 곡면 부분에서 일시적으로 음의 값이 된다. 이후 b점 즉 차량 앞 유리 부분까지 압력 계수의 값이 증가하며 b점 이후 다시 감소하는 경향을 보였다. c점 즉 앞 유리와 루프가 만나는 곡면 부분에서 최소 값을 가지며 이후의 급격한 상승을 볼 수 있었다. c-d 구간에서는 완만한 상승이 계속 되었고 d점 즉 루프 패널이 끝나는 점에서 다소 떨어졌다가 바로 상승함을 알 수 있었다.

뒷면에서의 압력 계수 변화를 트렁크 높이를 변수로 Fig. 12에 도시하였다. 트렁크 부의 높이 값을 크게 할수록 즉 h/H 의 비가 커질수록 압력 계수 값이 작아지는 경향을 보여 차체가 받는 전체 항력이 증가될 수 있음을 알 수 있었다.

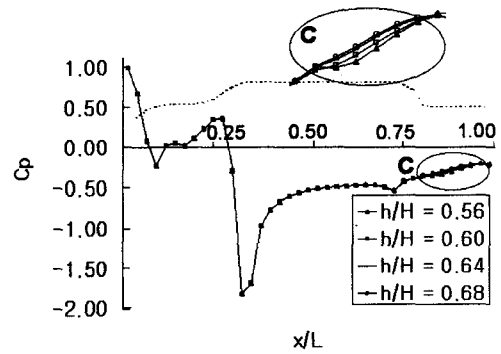
차체 아래 면에서의 압력 계수의 변화를 Fig. 13에 도시하였다. 압력 계수 값을 관찰한 결과 차체 아래 면에서는 차량의 앞부분보다는 뒤로 갈수록 압력 계수가 커지는 경향을 보이므로 앞바퀴보다는 뒷바퀴 부분이 양력의 영향을 많이 받을 수 있다는 것을 알 수 있었고, 차체 앞부분의 압력 분포는 트렁크 부분의 높이에 거의 영향을



(a) At the air speed of 60 Km/h



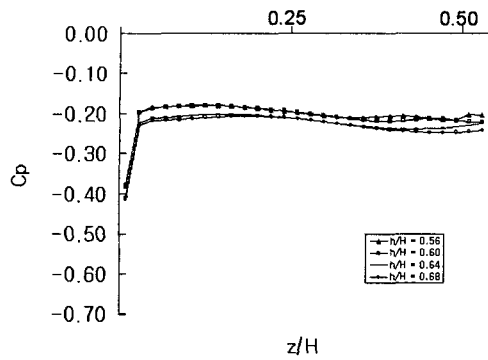
(b) At the air speed of 100 Km/h



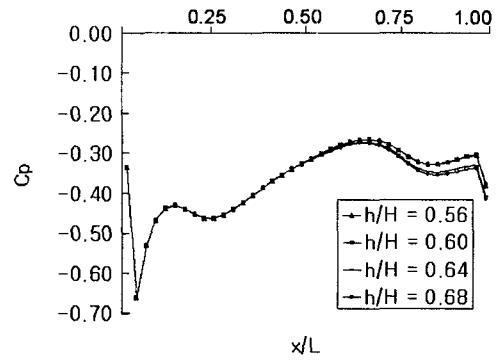
(c) At the air speed of 150 Km/h

Fig. 11 The variations of pressure coefficient along the upper surface of vehicle (The dotted line is the upper surface of body shape)

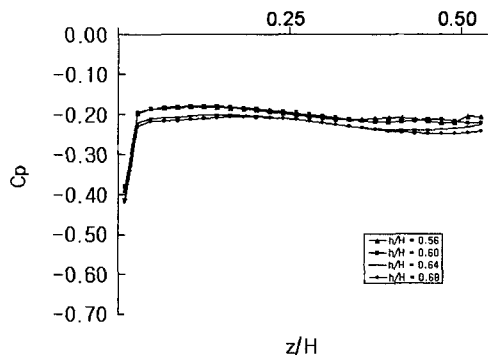
받지 않아 서로 다른 트렁크 높이에도 불구하고 압력 계수 값 분포의 차이가 거의 없으나 차체 뒷 부분에서는 트렁크 높이가 높아짐에 따라 압력 계수가 작아지게 되는 것을 알 수 있었다. 따라서 트렁크 높이가 앞바퀴 부분의 압력 분포에 미치



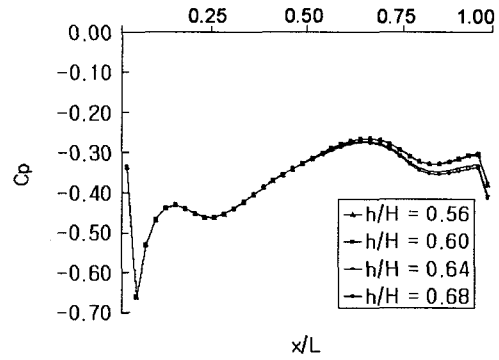
(a) At the air speed of 60 Km/h



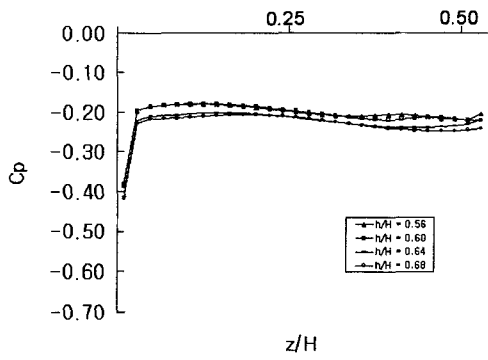
(a) At the air speed of 60 Km/h



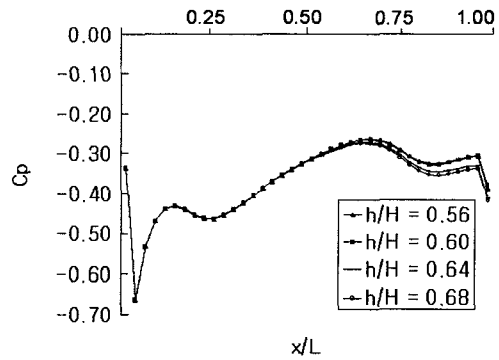
(b) At the air speed of 100 Km/h



(b) At the air speed of 100 Km/h



(c) At the air speed of 150 Km/h



(c) At the air speed of 150 Km/h

Fig. 12 The variations of pressure coefficient along the rear surface of vehicle

Fig. 13 The variations of pressure coefficient along the lower surface of vehicle

는 영향은 없으나 뒷바퀴 부분에 미치는 영향은 지대하였고 압력 계수 값이 트렁크 높이가 높아 질수록 작아지므로 후륜 구동 차량의 경우는 트렁크 부분의 높이를 높임으로써 구동 바퀴의 지면 점착력을 증대시킬 수 있는 장점이 있다.

트렁크의 무차원 높이 h/H 가 0.56일 경우 윗면과 아래 면의 압력 계수를 Fig. 14에서 비교 도시하였다. 앞 유리와 루프가 만나는 곡면 부분까지는 윗면에서의 압력 계수의 값이 아래면 보다 더 크며 이후 뒷 유리가 트렁크와 만나는 부분까지

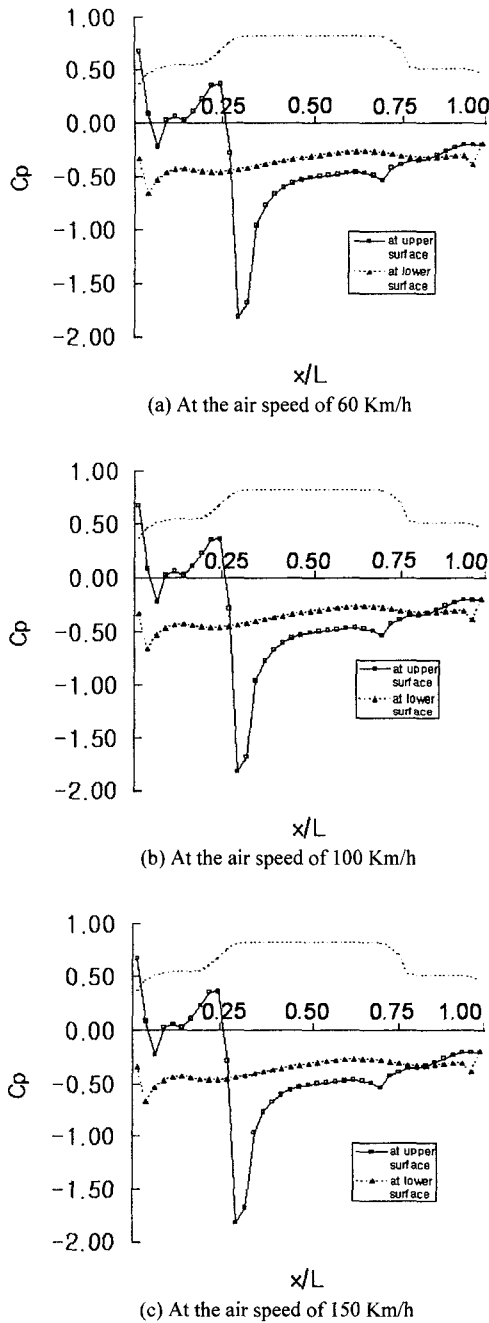


Fig. 14 The effect of air velocity on the variation of pressure coefficient

는 아래 면에서의 압력 계수가 윗면보다 큰 상태로 유지되다가 트렁크 뒷부분에서는 다시 윗면의 압력 계수가 다소 아래 면의 압력 계수 값 보

다 커진다. 차량 앞 유리 부분과 트렁크 뒷부분을 제외한 대부분에서 아래면 압력 계수 값이 윗면보다 컸다. 이는 차량 후부에 꼬리 와류가 형성될 수 있음을 의미한다. 압력 계수의 계산 결과는 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14에서와 같이 속도의 변화가 전체 표면에서의 압력 계수에 영향을 미치지 못하고 일정함을 알 수 있다.

4. 결론

Notchback 차량의 트렁크 높이가 공기 유속이 차체 표면의 압력 계수 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상용 프로그램인 Phoenics로 차체 주위의 3차원 유동에 대해 수치 해석을 수행하였다.

- 1) 트렁크 높이 변화가 차체 윗면에서의 압력 계수에 미치는 영향은 거의 없었다. 다만 트렁크 표면에서는 압력 계수 차이가 있었는데, 트렁크 높이가 클수록 압력 계수가 커지는 경향을 보였다.
- 2) 트렁크가 높아질수록 뒷면에서의 압력 계수는 낮아지는 경향을 보였다.
- 3) 차체 아래 면에서는 차량 앞부분보다는 뒤로 갈수록 압력 계수가 커지며, 트렁크 높이의 영향은 차체 앞부분보다 뒷부분에서 더 크고 트렁크 높이가 높아짐에 따라 압력 계수가 작아짐을 알 수 있었다.
- 4) 속도 변화가 압력 계수에 미치는 영향은 거의 없었다.

압력 계수 변화를 관찰한 결과 트렁크 후미 형상이 항력과 양력에 영향을 주는 다른 요소들을 무시할 때, 트렁크 높이는 높일수록 차체가 받는 전체 항력의 증가 및 양력의 감소에 영향을 미칠 수 있음을 확인 할 수 있었다.

참고 문헌

- 1) T. Han, V. Sumantran, C. Harris, T. Kuzmanov, M. Huebler, T. Zak, "Flow-Field Simulations of Three Simplified Vehicle Shapes and Comparisons with Experimental

- Measurements," SAE 960678, 1996.
- 2) R. H. Banard, "Road Vehicle Aerodynamic Design," pp.1-49, Longman, London, 1998.
 - 3) B. E. Launder, D. B. Spalding, "Mathematical Models of Turbulence," pp.90-106, London and Newyork, Academic Press, 1979.
 - 4) P. Bradshow, T. Cebeci, J. H. Whitelaw, "Engineering Calculation Methods for Turbulent Flow," pp.1-76, London, Academic Press, 1981.
 - 5) 정영래, 강동민, 박원규, "후미경사각 변화에 따른 자동차주위 유동특성 해석," 한국자동차공학회논문집, 제9권 제1호, pp.75-93, 2001.
 - 6) 전중환, 김용환, 조광륜, 노상길, 이응호, "MIRA Notchback Referecne Car 표면유동가시화," 대한기계학회논문집(B), 제24권 제10호, pp.1309-1316, 2000.
 - 7) 명현국, 진은주, "MIRA Vehicle Model 주위의 3차원 난류유동 예측," 한국자동차공학회논문집, 제6권 제5호, pp.86-96, 1998.
 - 8) 명현국, 박희경, 진은주, "Ahmed body 주위의 3차원 난류유동 해석," 대한기계학회논문집(B), 제20권 제11호, pp.3589-3597, 1996.
 - 9) 류종우, 조성권, 양준모, 최해천, 유정열, 이준식, "자동차 하단부 형상이 항력과 양력에 미치는 영향," 한국자동차공학회논문집, 제4권 제1호, pp.134-146, 1996.
 - 10) 장성원, 유정열, 이택식 "승용차 모형주위의 유동에 관한 연구," 자동차공학회지, 제12권 제3호, pp.53-62, 1990.
 - 11) 한국자동차공학회 편역, 자동차 기술 핸드북, 제1권, pp.206-213, 1996.
 - 12) CHAM, TR-326 PHOENICS-VR Reference Guide, p.53, 1999.
 - 13) W. H. Hucho, "Aerodynamics of Road Vehicles," pp.133-139, SAE, 1998.