

에어댐의 높이가 차체 표면의 압력변화에 미치는 영향

Effect of the Heights of Air Dam on the Pressure Distribution of the Vehicle Surface

박종수* 김성준**
Park, Jong-Soo Kim, Sung-Joon

Abstract

3-D numerical studies are performed to investigate the effect of the air dam height and approaching air velocities on the pressure distribution of notchback road vehicle. For this purpose, the models of test vehicle with four different air dam 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 show that the height variation of air dam makes almost no influence on the distribution of the value of pressure coefficient along upper and rear surface but makes strong effects on the bottom surface. That is, the value of pressure coefficient becomes smaller as the height is increased along the bottom surface. Approaching air velocity makes no differences on pressure coefficients. Through the analysis of pressure coefficient on the vehicle surfaces, one tries to assess aerodynamic drag and lift of vehicle. The pressure distribution on the bottom surface affects more on lift than the pressure distribution on the upper surface of the vehicle does. The increase of air dam height makes positive effects on the lift decrease but no effects on drag reduction.

키워드 : 압력 계수, 항력, 양력, 꼬리 와류, 꼬리 와류 항력, 공기 저항
Keywords : Pressure Coefficient, Drag, Lift, Trailing Vortices, Trailing Vortex Drag, Aerodynamic Drag

1. 서론

엔진의 효율, 변속 시스템, 그리고 주행저항 극복에 필요한 소요 동력 등은 연료소비율에 지대한 영향을 미친다. 따라서 현재 자동차 산업에서는 차량의 연비의 향상을 위해 효율적인 엔진의 개발, 변속 시스템의 전달효율 개선, 주행저항을 줄이기

위한 차체의 경량화 및 소형화 더불어 공기역학적인 연구를 통하여 항력의 저감 및 주행 안정성 증대를 꾀하고 있다.

자동차 주위의 공기역학에 대한 가능한 해석 방법은 실험적 방법과 수치 계산 방법으로 분류되는데 실험적 방법은 실제 도로상에서의 항력 측정, 풍동 실험에 의한 방법으로 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 전산유동 해석 기법의 발달과 더불어 차량 개발기간 단축을 통한 경비 절감의 요구로 인해 전산유체역학을 이

* 강원대학교 산업대학원, 석사과정
** 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 교수, 공학박사

용하는 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 공기역학 수치해석 연구 성과들을 살펴보면 장[10] 등은 시판 승용차의 모형에서 유동가시화 실험 및 $\kappa-\epsilon$ 난류 모델로 2차원 수치 계산을 하여 vortex의 형성과 압력계수의 분포를 얻어냈다. 류[9] 등은 자동차 하단부 형상의 변화에 따른 외부 유동을 RNG $\kappa-\epsilon$ 난류 모델을 적용하여 2차원 수치 해석을 하여 자동차 하단부 앞부분의 변화는 주로 항력에 변화를 가져오고 뒷부분의 변화는 양력의 변화를 가져오게 됨을 밝혀냈다. 명[8] 등은 Ahmed body 주위 유동에 대한 유한차분도식의 영향을 알아보기 위해 $\kappa-\epsilon$ 난류 모델로 3차원 수치 계산을 하여 유한차분도식으로 Upwind Differencing Scheme, Second-Order Upwind Differencing Scheme, QUICK 도식을 사용함에 따라 점차 실험 값에 근접하는 결과를 얻어냈다. Han[1] 등은 자동차 모델 표면의 압력 분포와 공기 저항을 예측하기 위해 세 가지의 실험 모델에 대해서 풍동에 의한 실험과 $\kappa-\epsilon$ 난류 모델 및 RNG $\kappa-\epsilon$ 난류 모델을 적용한 수치 해석을 하여 공기 저항에 대한 CFD 예측을 실험 값과 비교하였으며, 각 난류 모델의 특성을 비교하였다. 또 명[7] 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. 전[6] 등은 MIRA Notchback Reference Car 1/4 축소 모델의 표면유동가시화 및 RNG $\kappa-\epsilon$ 과 RSM 난류 모델을 이용하여 상용코드인 FLUENT로 수치 해석을 수행함으로써 3차원 유동 박리의 형상을 규명하고자 하여 레이놀즈 수에 따른 유동 박리와 재 부착의 발생 관계를 얻어냈다. 정[5] 등은 후미경사각의 변화에 따른 자동차 후미의 유동 특성을 고찰하기 위해 Baldwin-Lomax 난류 모델을 사용하여 수치해석을 하였으며 공기역학적 항력과 양력이 후미경사각에 따라 변화하는 경향을 제시하였다.

차체의 형상에 관한 최근의 연구에서 에어뎀 부분의 높이의 영향을 해석한 경우가 없어 본 연구에서는 시판중인 노치백 차량의 모델에 높이를 달리한 에어뎀을 설치하여 상용 프로그램인 Phoenics를 사용하여 자동차 주위의 유동에 대해 3차원 수치 계산을 수행함으로써 자동차 표면에서 압력 분포 및 후류에서의 와류의 생성 속도 벡터를 관찰하여, 에어뎀 높이의 변화가 항력과 양력에 미치는 영향을 분석하였다.

차량 대부분에서는 아래 면 보다 윗면에서의 압력이 더 낮게 되는데 공기의 흐름은 아래의 높은 압력 때문에 옆면으로 올라와 윗면을 향해 흐르는 경향이 있다. 이로 인해 차량 후부에는 꼬리 와류가 형성되는데, 이 꼬리 와류가 고려되지 않는 2차원적인 흐름과 비교하여 3차원 흐름에서는 와류가 압력을 낮게 하면서 차량의 윗면에서부터 공기를 당기는 꼬리 와류 항력이 작용한다. 이와 같이 꼬리 와류는 3차원 유동이다. 따라서 자동차 차체 디자인을 위한 수치해석은 반드시 3차원 해석을 수행해야 한다.

에어뎀의 주요한 목적은 차량 아래의 압력을 감소시켜 양력과 꼬리 와류 항력을 저감시키는데 있다. 에어뎀으로 인해 앞부분에서 차량과 바닥 사이의 간격이 줄면서 공기의 속도는 증가하고, 뒤로 가며 간격이 커지면서 공기의 속도는 점차 감소한다. Bernoulli 관계에서 이는 차량 아래의 앞부분 압력은 뒷부분 보다 낮다는 것을 의미한다. 차량 아래의 낮아진 압력은 특히 앞부분에서 양력을 저감시키는 효과를 가져오고, 차량 후부에서 꼬리 와류 항력이 저감되는 효과가 가능하다.[2]

2. 수치 해석

2.1 지배 방정식

차체주위의 유동을 3차원 비압축성, 정상 난류 유동으로 취급하고 직교좌표계를 채택하였으며 아래의 연속방정식과 운동량방정식을 지배방정식으로 사용하였다.

연속방정식

$$\frac{\partial(U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

운동량 방정식

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.2)$$

난류모델로는 그 안정성이 비교적 잘 확인되어 있는 $\kappa-\epsilon$ 난류모델을 채택하였다.

난류 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_j k) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \epsilon \quad (2.3)$$

난류 에너지 소산률 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \epsilon) \quad (2.4)$$

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

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \text{ 이며,}$$

$$G = - \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \text{ 이다.}$$

Table 1 Constants in $k-\epsilon$ model

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

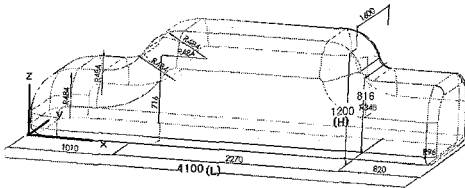


Fig. 1 The outline shape of notchback vehicle

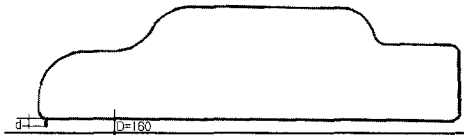


Fig. 2 The height of air dam

2.2 수치 해석 방법

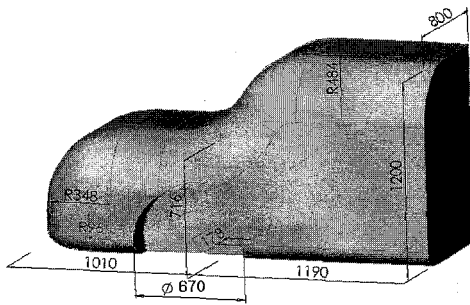
본 연구에서 대상으로 하고있는 자동차의 형상을 Fig. 1에 표시하였다. 일반적으로 차량은 차체 뒷부분의 형상에 따라 notchback, fastback, squareback 세 가지로 분류하는데[13], 본 연구에

서는 그 중 Notchback차량을 대상으로 하였으며, x 방향은 자동차의 길이방향으로 하고 y 방향은 자동차의 폭 방향으로 하였으며 z 방향은 자동차의 높이 방향으로 하였다.

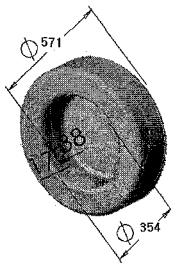
여기서 자동차의 전체 높이 H는 1200 mm, 전체 길이 L은 4100mm, 트렁크 부의 높이는 816 mm로 하였으며 이 모델 차량의 아래 면 앞에 에어댐을 부착하였는데 Fig. 2에서와 같이 바닥에서 차량 밑면과의 거리 160 mm를 D로 표시하고 에어댐의 높이를 d로 표시하였으며 에어댐의 무차원 높이 d/D 를 수치 실험 변수로 하여 그 값을 0.00, 0.20, 0.40과 0.60으로 변화시키면서 상용코드인 Phoenics를 사용하여 자동차 주위의 유동에 대해 3차원 수치 계산을 하였다.

모델 차량의 대칭면이 x-z 평면이므로 사용 격자수를 줄여 계산 시간을 단축하기 위해 대칭면에서 절단한 모델 차량의 절반을 대상으로 수치해석하였고, 차량 앞부분과 뒷부분 그리고 바퀴 및 에어댐 부분들을 따로 분리하여 CAD로 만든 형상 파일을 Phoenics에서 읽어서 블록으로 사용하였는데 차체 부분의 치수를 Fig. 3에 표시하였다. 대칭면에서 절단한 에어댐의 형상 파일은 균일한 두께 6mm로 폭 704mm인 평판의 바깥 끝에 곡률 반경 318mm 만큼 곡면을 붙인 구조이며, 차량의 수치해석 시 바퀴의 유무에 따라 항력 계수, 속도장, 압력장 등 유동 특성이 크게 바뀌는 것으로 알려져 있어[7] 바퀴를 실제 형상과 유사하게 제작하여 사용하였다.

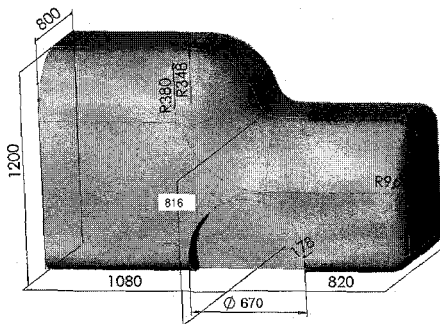
계산영역 크기는 10m×2m×3m로 하였는데 이는 계산영역의 크기가 충분히 커서 영역의 경계가 차체 주위의 유동에 영향을 미치지 않도록 하였다. 차량 밑면은 실제 바퀴의 크기를 고려하여 바닥에서 0.16m 떨어지도록 하였다. 수치계산을 위해 Fig. 4와 같이 비균일 격자망을 구성하였고 유동변화가 심한 차체표면 근처에 격자를 집중시킨 230×12×97 (267,720개)의 격자망을 사용하였다. 대류항 차분법으로는 수치 계산의 안정성과 계산 시간을 고려하여 하이브리드 차분법을 사용하였으며 행렬풀이기법으로는 Elliptic_CCM기법[12]을 사용하였다. 수렴조건은 질량 잔류값으로 하였고 그 값은 질량 유동량의 10^{-3} 으로 하였다. CPU용량 700 Mhz의 PentiumIII 컴퓨터로 계산했을 때 반복 계산 횟수는 1200이었고 계산시간은 15시간 정도이었다. 계산영역 내 공기의 밀도값은 20 °C, 1 atm에서의 값인 1.189 kg/m³을 사용하였다. 공기 유동 속도가 차체 표면에서의 압력 분포에 미치는 영향을 분석하기 위해 주행조건을 시내 주행, 고속도로 상에서의 주행 및 최대 주행 속도로 가정하여 공기 속도 값을 각각 60 km/h, 100 km/h, 150 km/h 세 가지로 선택하였다. 각각의 공기 속도에서 차체 주변의 유동장을 수치해석 하였다.



(a) Front part



(b) Wheel



(c) Rear part



(d) Air dam

Fig. 3 The dimensions of vehicle model

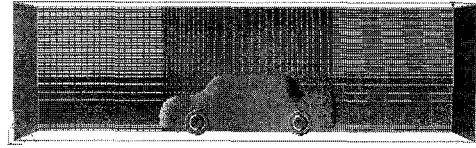


Fig. 4 Computational grid system

3. 결과 및 고찰

본 연구의 차량을 대상으로 에어댐의 무차원 높이(d/D)가 차체 표면에서의 압력 계수에 미치는 영향을 수치 해석하였다. 여기서 압력 계수를 다음과 같이 정의하였다.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (3.1)$$

여기서 U_∞ 와 p_∞ 는 자유유동의 속도와 압력이다. 차체의 윗면, 아래면과 뒷면은 Fig. 5에서 정의하였고, a, b, c, d 와 e는 차체 표면에서의 위치를 나타내는 점들로 Fig. 6에서 정의하였다. a는 엔진룸 후드의 곡면 부분이고 b는 차량 앞유리, c는 앞유리와 루프가 만나는 곡면, d는 루프 패널이 뒷유리와 만나는 곳, e는 트렁크 표면이다.

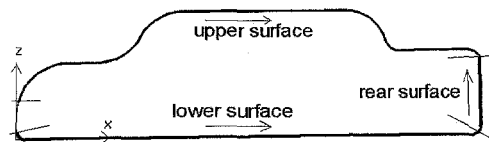


Fig. 5 Definition of surface

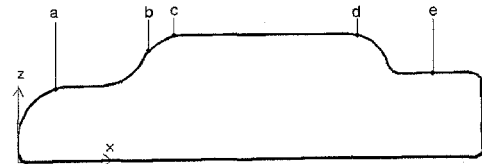


Fig. 6 The points of vehicle surface

공기 속도 150 km/h에서 수치해석 하였을 경우 후류부 y-z면에서의 속도 분포를 Fig. 7에 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 양

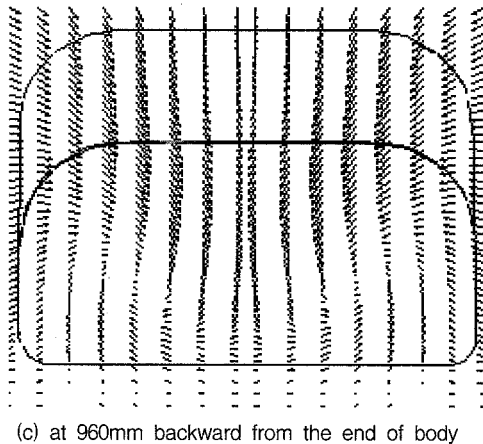
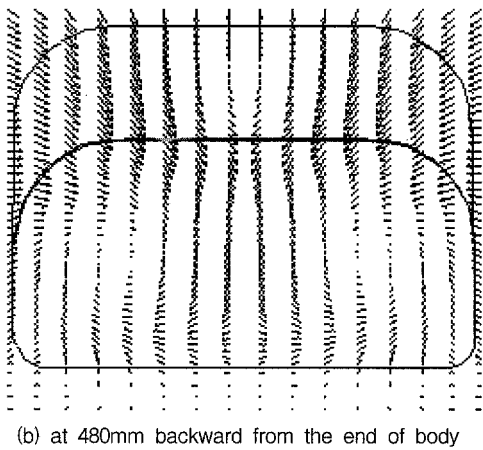
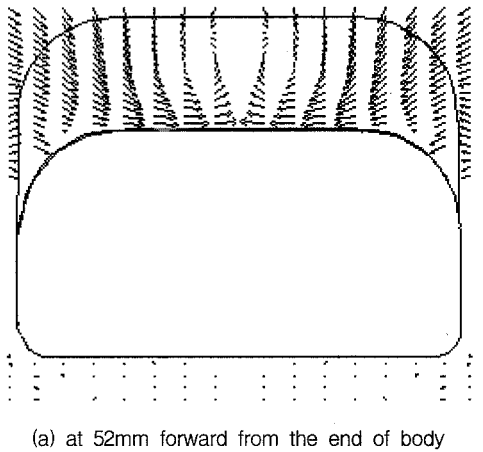


Fig. 7 The velocity vectors in the wake region (y-z plane)

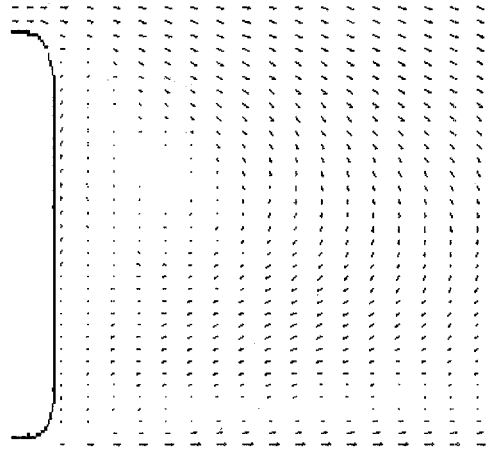
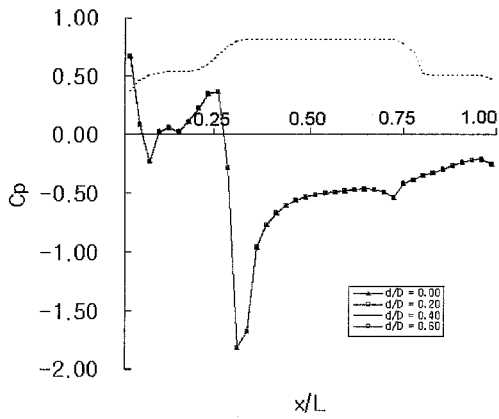


Fig. 8 The velocity vectors in the wake region(x-z plane)

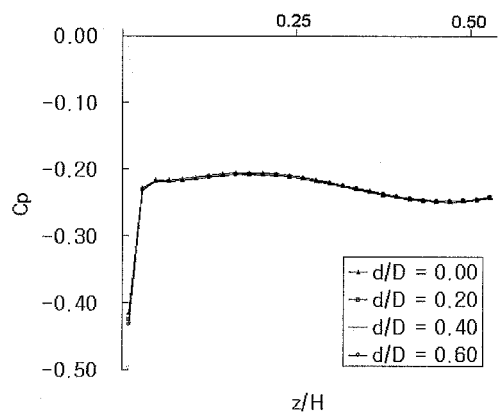
쪽으로 꼬리 와류가 뚜렷이 나타나있으며 (c)에서는 와류의 중심이 (b)보다 아래로 약간 내려온 것을 알 수 있었다. Fig. 8은 공기 속도가 150km/h 일 경우 후류부 x-z면에서의 속도장을 나타내고 있는데 시계 방향의 정체 와류(standing vortices)를 관찰할 수 있다.

Fig. 9는 각각의 유속에서 차체의 길이방향으로 차량 윗면의 압력계수 변화를 도시한 것이며 여기서 점선은 차량 윗면의 형상을 표시한다. 속도가 다른 (a), (b) 와 (c)를 서로 비교하였을 때 압력계수 변화가 거의 동일하여 그 차이를 확인하기 어려웠다. 또한 에어뎀 높이 값의 변화에 따른 압력계수의 변화도 극히 작아 그 차이를 확인하기 어려웠다. 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 계속되었고 d점 즉 루프 패널이 끝나는 점에서 다소 떨어졌다가 바로 상승함을 알 수 있었다.

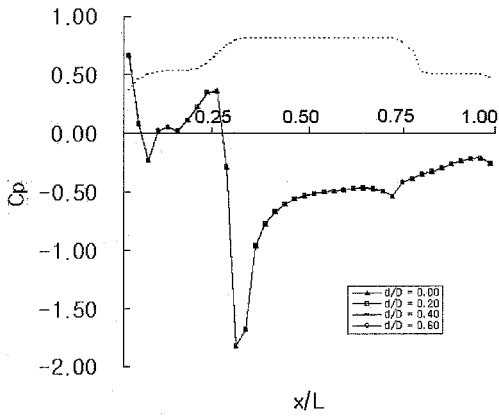
뒷면에서의 압력 계수 변화를 에어뎀 높이를 변수로 Fig. 10에 도시하였다. 에어뎀의 높이 값, 즉 d/D의 비가 변화하여도 압력 계수 값의 변화가 거의 동일하여 에어뎀의 설치로 인해 차량 후부에서 꼬리와류항력이 저감되는 효과는 거의 없음을 알 수 있었다. 차체 아래 면에서의 압력 계수의 변화를 Fig. 11에 도시하였다. 차체 아래 면에서의 압력 분포는 차체 뒷부분에서는 에어뎀의 높이에 거의 영향을 받지 않아 서로 다른 에어뎀 높이에도



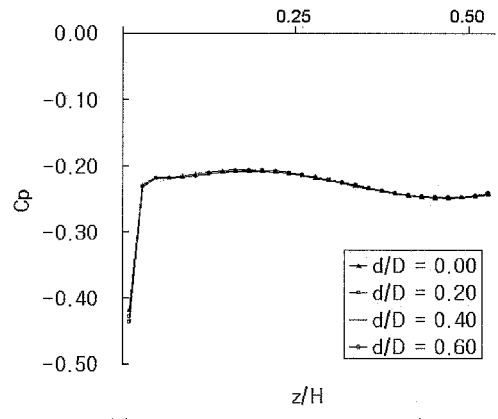
(a) at the air speed of 60 km/h



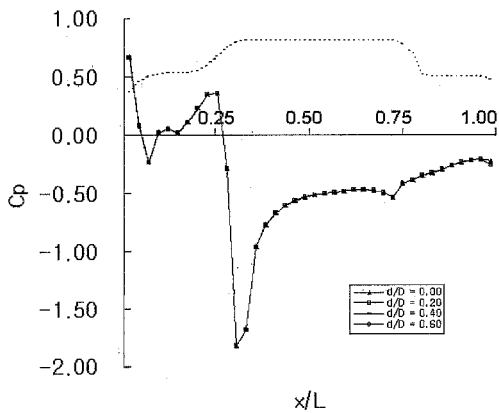
(a) at the air speed of 60 km/h



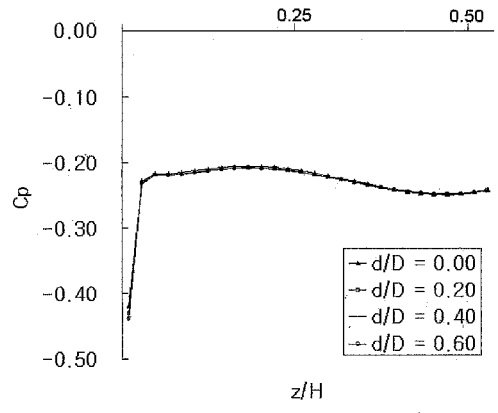
(b) at the air speed of 100 km/h



(b) at the air speed of 100 km/h



(c) at the air speed of 150 km/h

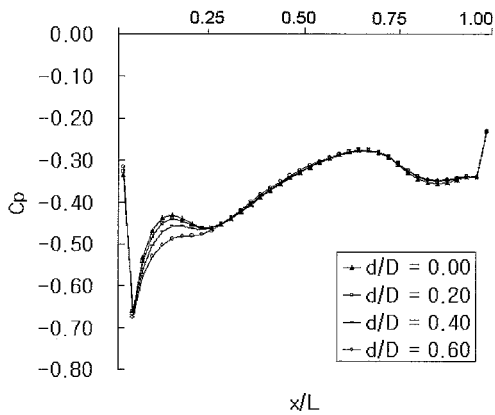


(c) at the air speed of 150 km/h

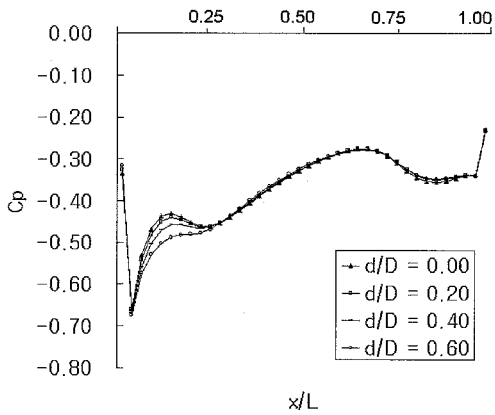
Fig. 9 The variations of pressure coefficient along the upper surface of vehicle.
(The dotted line is the upper surface of body shape.)

Fig. 10 The variations of pressure coefficient along the rear surface of vehicle.

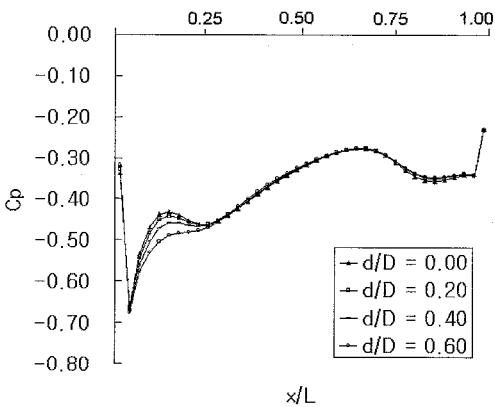
에어댐의 높이가 차체 표면의 압력변화에 미치는 영향



(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 lower surface of vehicle.

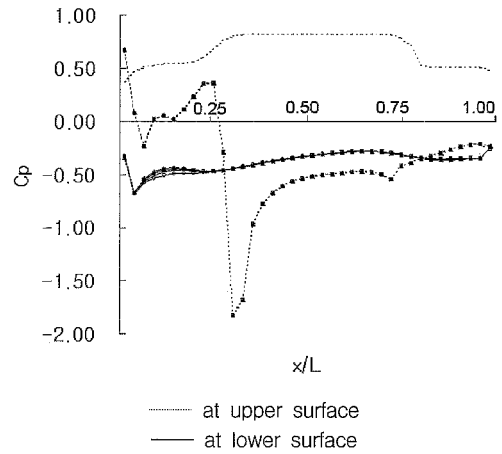


Fig. 12 The effect of variation of pressure coefficient for various heights of air dam at the air speed of 150 km/h

불구하고 압력 계수 값 분포의 차이가 거의 없으나 에어댐이 설치된 차체 앞부분에서는 에어댐의 높이가 높아짐에 따라 압력 계수가 작아지게 되는 것을 알 수 있었다. 따라서 에어댐의 높이가 뒷바퀴 부분의 압력 분포에 미치는 영향은 적으나 앞바퀴 부분에 미치는 영향은 컸고, 압력 계수 값이 에어댐 높이가 높아질수록 작아지므로 전륜 구동 차량의 경우는 에어댐 부분의 높이를 높임으로써 양력의 저감 효과를 기대할 수 있어 구동 바퀴의 지면 접촉력을 증대시킬 수 있는 장점이 있다. 공기 속도가 150 km/h 일 경우 윗면과 아래 면의 압력 계수를 Fig. 12에서 비교 도시하였다. 점선으로 나타낸 차체 윗면에서의 압력 계수 값 분포는 에어댐의 높이가 변화하여도 그 차이가 극히 적으나, 실선으로 나타낸 차체 아래 면의 압력 계수 값 분포의 차이는 차체 앞부분에서 에어댐의 높이가 높아짐에 따라 압력 계수가 작아지게됨을 알 수 있다. 앞 유리와 루프가 만나는 폭면 부분까지는 윗면에서의 압력계수의 값이 아래면 보다 더 크며 이후 뒤 유리가 트렁크와 만나는 부분까지는 아래면에서의 압력 계수가 윗면보다 큰 상태로 유지되다가 트렁크 뒷부분에서는 다시 윗면의 압력 계수가 다소 아래 면의 압력 계수 값 보다 커진다. 차량 앞 유리 부분까지와 트렁크 뒷부분을 제외한 대부분에서 아래면 압력 계수 값이 윗면 보다 컸다. 이는 차량 후부에 꼬리 와류가 형성될 수 있음을 의미한다.

4. 결론

차량의 에어뎀 높이와 공기유속이 차체 표면의 압력계수 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상용 프로그램인 Phoenics로 차체주위의 3차원 유동에 대해 수치 해석을 수행하였다.

- 1) 에어뎀 높이 변화가 차체 윗면 및 뒷면에서의 압력 계수에 미치는 영향은 거의 없었다.
- 2) 아래 면에서 에어뎀 높이의 영향은 차체 뒷부분보다 앞부분에서 더 크고 에어뎀 높이가 높아짐에 따라 압력 계수가 작아짐을 알 수 있었다.
- 3) 속도변화가 압력 계수에 미치는 영향은 거의 없었다.

압력 계수 변화를 관찰한 결과 에어뎀의 높이의 증가는 뒷면에서의 압력 계수에 미치는 영향이 거의 없으므로 항력에 별 영향을 미치지 못하였으나, 아래 면에서는 에어뎀 높이가 증가함에 따라 압력 계수가 작아지므로 양력은 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Taeyoung Han, V.Sumantran, Clark Harris, Ted Kuzmanov, Mark Huebler, and Thomas Zak, "Flow-Field Simulations of Three Simplified Vehicle Shapes and Comparisons with Experimental Measurements", *SAE paper 960678*, 1996.

[2] R. H. Banard, *Road Vehicle Aerodynamic Design*, Longman, London, pp. 1~100, 1998.

[3] B. E. Launder and D. B. Spalding, *Mathematical Models of Turbulence*, London and Newyork, Academic Press, pp. 90~106, 1979.

[4] P. Bradshaw, T. Cebeci, and J. H. Whitelaw, *Engineering Calculation Methods for Turbulent Flow*, London, Academic Press, pp. 1~76, 1981.

[5] 정영래, 강동민, 박원규, "후미경사각 변화에 따른 자동차주위 유동특성 해석", *한국자동차 공학회논문집*, 제9권 제1호, pp. 75~93, 2001.

[6] 진중환, 김용환, 조광륜, 노상길, 이용호, "MIRA Notchback Referecne Car 표면유동 가시화", *대한기계학회논문집(B)*, 제24권 10

호, pp.1309~1316, 2000.

[7] 명현국, 진은주, "MIRA Vehicle Model 주위의 3차원 난류유동 예측", *한국자동차공학회 논문집*, 제6권 제5호, pp. 86~96, 1998.

[8] 명현국, 박희경, 진은주, "Ahmed body 주위의 3차원 난류유동 해석", *대한기계학회논문집(B)*, 제20권 11호, 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", *한국자동차공학회지*, Vol 12. No 3, pp. 53~62, 1990.

[11] 한국자동차공학회 편역, *자동차 기술 핸드북 제1권*, pp 206~213, 1996.

[12] CHAM, *TR-326 PHOENICS-VR Reference Guide*, pp. 53, 1999.

[13] W. H. Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, SAE International, pp.133-139, 1998.