

중형 차량의 외부 유동특성에 관한 연구 Investigation of Aerodynamic Characteristics of a Medium-Size Vehicle

이 동 렬
D. R. Lee

Key Words : Aerodynamics(공기역학), CFD(전산유체역학), Unstructured Grid System(비정렬 격자계), External Flow Analysis of a Automotive Body(차체 외부 유동 해석), Drag Coefficient of an Air(공기 저항 계수)

Abstract : Computer simulation of the air flow over an automotive vehicle is now becoming a routine process in automotive industry to assess the aerodynamic characteristics of a medium-size vehicle such as C_d and C_l and aslo to investigate the possibility of improving aerodynamic performance of the vehicle as a preliminary design for the production line. Mainly due to its contribution in saving time and cost in the development of new cars, computer simulation of the air flow over a vehicle is usually done well before a production car is introduced to the market and in gaining more and more attention as powerful computer resources are getting readily available nowadays. To aerodynamically design a car is mainly related with reducing a drag coefficient of car. A well designed car usually has a C_d value in the range of 0.3~0.4. It is understandable that automotive industry is rushing to reduce a drag coefficient as reducing even a small fraction of the C_d value can have an enormous overall impact on many areas. Actually, the present research model was able to achieve a C_d value in the range of 0.3~0.36 for flow velocities of 60 km/h~100 km/h by strategically removing the possible factor hazardous to lower C_d value. Prediction of the medium-size vehicle aerodynamics using CFD was performed when an actual car model was in the development stage and three-dimensional modeling was also performed to optimize it as the best model in terms of the best aerodynamic performance.

1. 서 론

연비향상을 위한 자동차 업계의 노력은 그간 치열하게 전개되어 왔으며 특히 자동차의 스타일링 개선을 통한 항력 계수(C_d)의 감소는 자동차 디자인과 맞물린 중요한 성공 사례로 인식되어왔다. 이러한 연비저감을 위한 공기역학적 특성의 개선수단으로는 풍동실험(Wind tunnel test)과 CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학기술)를 이용한 수치모사(Computer simulation)를 들 수가 있으며 이중 CFD를 이용한 유동장 해석은 그간 눈부시게 발전해 온 컴퓨터의 계산속도와 디자인 개념 설계 과정에서 쉽게 적용할 수 있다는 장점 때문에 자동차 형상설

계에 있어서 중요한 수단으로 자리잡아가고 있는 현실이다. 특히 컴퓨터 기술의 비약적인 발전에 힘입어 상세한 3차원 형상에 대한 모델링과 해석이 짧은 시간 내에 저렴한 비용으로 가능하게 되었다.^{1,2,3,4,5)}

차량에 대한 공기 유동의 컴퓨터에 의한 해석적 연구는 차량의 양산 단계 전에 항력 계수(C_d) 및 양력 계수(C_l) 같은 공기 역학 특성을 이해하고 또한 공기역학적 성능을 향상시키려는 목적으로 자동차 산업에서의 필수적인 설계적 절차가 되어 왔다. 신차량개발에 개발비용과 시간 절약에 이점이 있는 이유로 컴퓨터에 의한 공기 유동의 해석적 연구는 양산 차량이 자동차 시장에 소개되기 전에 수행되었고 최근에 강력한 컴퓨터 기술이 도입되면서 관련분야 종사자의 관심을 얻게 되었다.

중형 차량을 공기 역학적으로 설계하는 것은 주로 차량의 항력 계수의 감소에 관련이 있다. 잘 설계되

접수일 : 2006년 3월 11일
이동렬(책임저자): 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail : dlee@cu.ac.kr Tel. 053-850-2717

어진 차량의 항력 계수는 0.3~0.4 의 범위에 존재한다. 전 세계의 도로에서 흔히 볼 수 있는 차량들의 연료소비를 고려해 볼 때 자동차 산업에서는 심지어 아주 미미한 양이라도 항력계수를 감소시키기 위하여 앞 다투어 항력계수 감소에 관한 연구에 몰두하고 있는 것이 현실이다. 차량의 양산조건에서 실용성을 배제하지 않고 항력 계수는 공기역학적으로 0.2 이하로도 감소시킬 수 있다. 사실, 미국의 포드사는 특정한 차종에서 낮은 항력 계수를 위해 불필요한 모든 설계 요소들을 제거하여 항력 계수를 0.15 까지 감소시킬 수 있었다.⁶⁾

과거에 CFD가 개발되지 않았을 때 낮은 항력 계수의 차량을 설계하기 위하여 축소 원형모델(scaled-down prototype model)을 이용한 다수의 풍동실험을 수행하여야만 하였다. 하지만, 원형모델에 대한 모든 가능한 설계 사양을 고려한 풍동 실험은 엄청난 시간과 경비를 소모하여야 했다. 차량에 대한 공기 유동의 컴퓨터 수치모사(Computer Simulation)데이터는 풍동실험에 드는 시간과 경비를 절약할 수 있고 또한 차량 디자이너들에게 유사한 차량 스타일링 중에서 실제로 추구하여야 할 차량 디자인을 결정할 수 있도록 많은 정보를 제공할 수 있다. 예컨대, 수치모사 기술은 다양한 선택 원형 모델을 비교할 수 있고 풍동실험에서 모든 선택 원형 모델의 불필요한 작업을 제거하여 최상의 공기역학적 성능에 의하여 최적의 원형모델을 결정할 수 있다. 하지만, 컴퓨터 수치모사가 가까운 미래에 풍동실험을 완전히 대체할 수 있지는 불확실하다. 그러나, 차량 디자인 방법에 유용한 정보를 제공함으로써 차량의 유동의 해석에 수치모사방법은 차량 설계에 필수불가결한 공정이 될 것이다.⁷⁾

CFD를 이용한 차량의 공기역학 특성의 예측은 차량이 개발 단계에 있을 때 수행되어 진다. 본 연구는 실제 차량의 외부 유동에 대한 공기역학적 특성의 향상에 대한 가능성을 발견하기 위하여 현존 모델(S 자동차 S 모델)의 공기역학적 특성을 분석하는데 목적을 두었다. 본 연구는 실제 3차원 실차 S 모델에 대해서 수행되었다.

2. 수치 해석

이번 연구를 수행함에 있어서 격자계 생성 작업은 I-DEAS와 Fluent사의 preprocessor인 Geomesh를 사용하였다. 우선 IGES형태로 변환된 CAD 데이터

를 I-DEAS를 통해 간단히 수정한 뒤 Geomesh로 읽어 들여 표면 격자(surface mesh)작업을 수행하였고, T-Grid를 사용하여 내부 Grid를 완성하였다. Geomesh는 정렬 격자계(structured grid system)와 비정렬 격자계(unstructured grid system)의 생성이 가능한 preprocessor로서 2차원의 경우에는 hybrid mesh도 가능하며 Fluent/UNS 에서는 prism 형태의 격자도 지원되어 3차원 형상에서도 hybrid mesh가 적용가능하다고 한다.

CAD 데이터 중에서 너무 상세한 형상은 단순화시켜 표면격자를 생성하였으며 타이어, 그릴(grill), 측면 백미러(side mirror), 안개등, 번호판 부착위치는 생략하거나 단순화시켰다. 표면격자의 생성은 메모리의 한계 때문에 부분별로 나누어서 실시되었으며 특히 Geomesh에서 본래의 표면을 구현해주도록 하는 기능인 Association도 메모리의 증설이 이루어져서 전체 표면을 띄워놓고 작업을 수행할 여건이 된다면 현재의 격자계를 구현가능하게 됨으로서 보다 개선된 결과를 얻게 되리라 기대된다. 차체 밑(Underbody)부분은 실제 차에서는 불규칙적인 형상이지만 본 계산에서는 평면으로 단순화하였다.

격자시스템은 비정렬 격자계를 채택하였다. 격자의 모양은 사면체의 형상이다. 사면체의 격자는 표면격자를 만들어 주면 표면간의 공간을 채우는 체적 격자는 자동으로 만들 수 있는 장점(auto mesh generation)이 있다. 이 격자계는 그동안 수렴성이나 해의 정확성이 떨어지는 것으로 알려진 반면 복잡한 형상에서의 격자계 생성의 용이성에 힘입어 점점 그 활용 범위를 넓혀가고 있다. 다만 격자가 자동으로 형성되는 특성으로 말미암아 사용자의 격자 제어(grid control)여지가 줄어들어 격자의 질이 정렬격자에 비해 많이 떨어지는 단점이 있다. 격자의 질을 향상시키기 위해 드는 시간을 수치모사 담당자는 연구기간 결정에 포함시켜야 할 것이다. 일반적으로 비정렬 격자계가 3배 정도의 격자계를 구성해야 하는 것으로 알려져 있는데 컴퓨터 성능의 향상정도와, 정렬 격자계의 경우 차체 전체 모델(Full car model)의 격자 생성에 비정렬 격자계 생성에 보다 많은 시간이 소요되는 점을 고려한다면 비정렬 격자계의 입지가 점점 커질 전망이다.^{8,9,10)}

Fluent/UNS는 정렬 격자계만을 쓸 수 있는 기존의 Fluent code이후 나온 해석용 코드로서 비정렬 사면체형 격자계의 해석이 가능하며 산업계 전반에 응용이 가능한 범용 코드로서 점성, 비압축성 문제들

주 해석분야로 삼고 있다. 난류모델로서는 Two equation model인 $k-\epsilon$ 과 RNG $k-\epsilon$ Model을 사용하고 벽에서는 일반적인 wall function과 two layer을 이용했다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 유한 체적법을 이용하고 전산 수치 해석 코드를 이용하여 차체 외부의 압력분포 및 항력 계수에 대해 정량적인 해석을 하였으며 또한 차체 후류의 와류(vortex)구조와 난류장에 대해 정성적인 해석을 수행하였다.

3차원 자동차 형상을 중심선을 따라 2등분하여 대칭(symmetric)경계 조건을 주었고 입구 경계조건과 출구 경계조건 그리고 벽 경계조건을 사용하였다. 유동의 조건은 Table 1 에 나타낸 바와 같은 조건으로 수행되었다. 두 경우 모두 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며 inlet 부에서 난류강도는 5%, 기준길이는 차폭의 절반인 0.8로 주었다.

벽에서는 점착 조건(no slip condition)을 주었으며 표준 벽함수(standard wall function)를 사용하였다. 해석은 두 경우 모두 IBM SP Machine의 1 node를 사용하였으며 수렴하는데 각각의 경우 91번과 198번의 반복 계산(iteration)이 필요했다. 소요된 시간은 각각 4시간 35분과 13시간 42분이다.

Table 1 Flow Condition and Grid Size of a Vehicle Body

	Grid Size	Inlet Velocity	Scheme
CASE 1	234,218	60 km/h	First Order Upwind
CASE 2	345,275	100 km/h	Second Order Upwind



Fig. 1 Grid of the Symmetric View at case 1

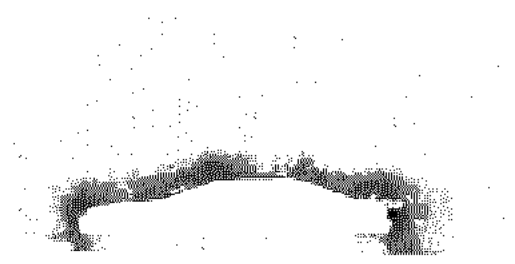


Fig. 2 Grid of the Symmetric View at case 2

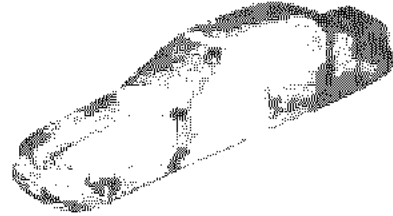


Fig. 3 Grid of the Surface of the body

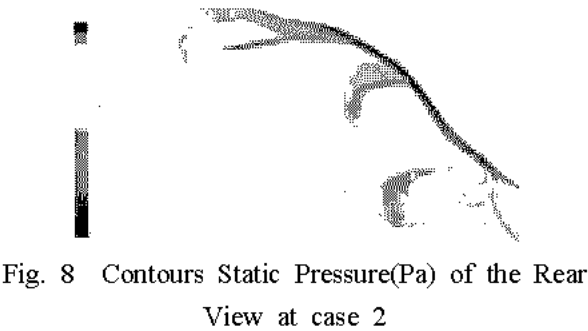


Fig. 4 Grid of the Total View of the Body

향후에는 현재 가동되고 있는 4개의 node를 활용한 컴퓨터에서의 속도 향상도 확인해 볼 예정이다.

RNG $k-\epsilon$ 모델은 기존의 $k-\epsilon$ 모델을 수정한 모델로서 곡률(curvature)이 큰 유동에서 개선된 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. Fig. 1과 Fig. 2에서는 각 case의 대칭 평면(symmetric plane)에서의 격자계를 보여주고 있는데 case 2가 case 1에 비해서 보다 조밀한 격자계를 앞뒤 범퍼 부위와 후드(hood)부분에 구성하고 있음을 알 수 있다. 격자계의 개수는 기존의 발표된 해석결과에 사용된 70만~120만개를 사용하는 것과 비교하면 그리 많지 않은 수임을 알 수 있으나 현 시스템에서 70만개의 격자계를 써서 40~50시간씩 수렴을 시키는 것보다 이 정도의 격자 개수가 적절하다고 생각된다. Fig. 3에서는 자동차 전, 후반부 표면에서의 형성된 격자계를 보여주고 있다. 군데군데 보이는 조밀한 격자계는 표면이 교차하는 부분으로 여러 개의 edge가 존재해서 발생하는 현상이다. Fig. 4는 수치모사에 사용된 전체 계산영역을 보여주고 있다.

Table 1에 주어진 두 개의 유동조건 모두 수렴조건으로서 residual criteria로 10^{-3} 으로 주었으며 각각 91번, 198번만에 residual criteria를 만족하였다. Fig. 5와 6에서는 두 case에 대한 차체의 전면부의 표면 압력분포를 보여주고 있으며 Fig. 7, 8에서는 두 case에 대한 차체의 후면부의 표면 압력분포를 보여주고 있다. 이 그림들에 의하면 범퍼의 선단부에서 압력이 가장 높고 후드와 앞면 유리(windshield)의 경계지역, 그리고 뒷면 유리(back window)와 범퍼의 접경에서 압력이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 두 경우를 비교해보면 정성적인 특징에서는 큰 차이가 없으나 정량적인 면에서는 약간의 차이를 보이고 있는데 공기역학적 특성치들이 60km/h이상에서는 일정하다고 본다면 격자계의 특성에 기인한다고 볼 수 있다. 표면 압력분포 계산은 자유 유동 속도 $U_{\infty}=60\text{km/h}$ 및 $U_{\infty}=100\text{km/h}$ 의 두 경우(CASE1, CASE2)에서 행해졌는데. 이는 차체의 전장(L)을 특성 길이를 기준으로 하는 Reynolds No.로서 각각 $Re=3.3 \times 10^6$ 및 5.5×10^6 에 해당된다. 압력 계수(C_p)를 나타내는 식은 다음과 같다.



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

여기서 p_{∞} 과 U_{∞} 는 각각 자유 유동의 압력과 속도를 의미한다.

Fig. 9, 10 은 Case.1 및 Case.2 의 차체의 전장(L)에 대한 차체의 윗면(Upper Surface)의 압력계수를 나타내고 있다. 이 그림들에 의하면 Reynolds No의 변화에 따른 정량적인 압력계수의 수치는 변화했으나 정성적인 압력계수의 경향은 거의 일치함을 알 수 있었다. Fig. 9, 10 은 또한 앞 범퍼에서 압력 정체 영역이 나타나고 차체 후드 윗부분에서 차체의 루프 전반부까지 역압력 구배가 생성되었으며 차체의 루프 여러 구간 및 차체의 후면에서의 여러 구간

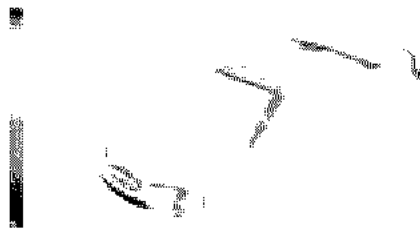


Fig. 5 Contours of Static Pressure(Pa) of the Front View at case 1



Fig. 6 Contours of Static Pressure(Pa) of the Front View at case 2

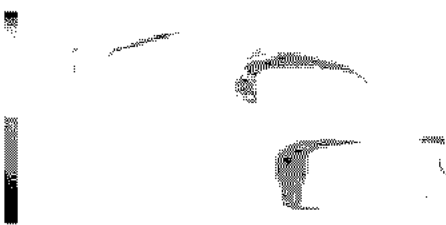


Fig. 7 Contours Static Pressure(Pa) of the Rear View at case 1

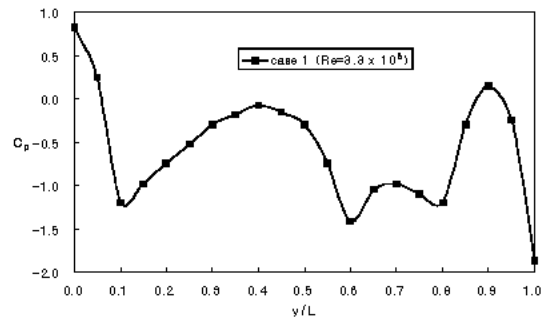


Fig. 9 Pressure Coefficient on the upper surface at case 1

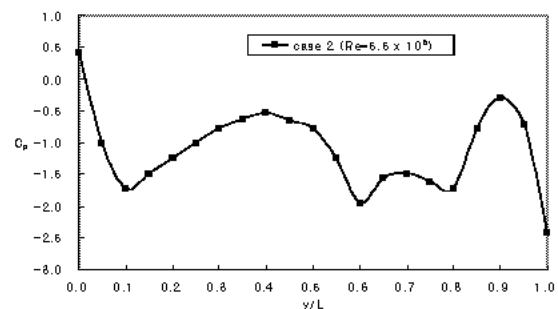


Fig. 10 Pressure Coefficient on the upper surface at case 2

에서도 부압이 발생하는 것을 보여 주었다. 또한 차체의 뒷 창문과 트렁크 영역에서는 유동의 박리에 의해 다시 심한 역압력 구배가 형성됨도 알 수 있다. 이런 압력 계수의 결정으로 인해 압력의 정체 영역을 파악하여 외부 흡입 공기에 의한 차량 냉각 정도를 예측할 수 있으며 외부 흡입공기의 유입 정도를 결정하여 공기 흡입구의 최적 위치 결정에 기여할 수 있으리라 판단된다.

Fig. 11, 12는 대칭 평면에서의 유적선(path line)을 도시하였는데 case 1의 경우에는 관측되지 않았던 곡률(curvature)이 매우 큰 유동이 case 2에서는 관측되었고 재순환 영역은 관측되지 않았다. 이러한 유동의 관측은 Tsukada⁶⁾가 수행한 연구의 Ford 사 차량의 유동해석에서도 유사한 현상이 관측되었다. 이러한 현상은 향후 연구의 실험을 통한 검증이 필요하다고 생각된다.

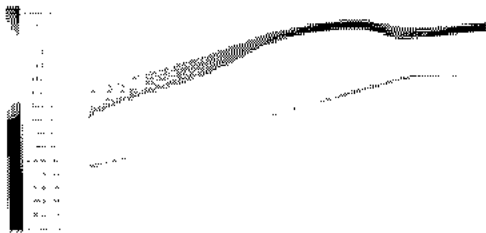


Fig. 11 Path Lines of the Symmetric Plane at case 1

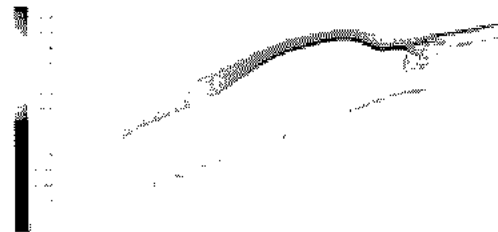


Fig. 12 Path Lines of the Symmetric Plane at case 2



Fig. 13 Contours of Pressure(Pa) at y=-1, 0.4, 1.2, and 2.4

Fig. 13은 y=-1, 0.4, 1.2, 2.4, 인 위치에서의 압력장을 보여주고 있는데 자동차의 후류에서 발생하는 와류의 존재를 짐작할 수 있게 하는 천정(roof)의 압

력분포가 자동차 측면부의 압력보다 낮게 형성되어 있어서 결국 자동차 후면에서 볼 때 밖에서 안쪽으로 말려 내려가는 와류(vortex)가 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 14와 Fig. 15는 각각 y=4, 6 인 위치에서의 와류(vortex)를 보여주고 있다. 특이하게 y=4인 위치에서는 강한 1차 와류에 의한 2차 와류가 형성되는 것도 관찰 가능하였다. 이러한 현상은 2차원 모델링(modeling)에서는 찾아볼 수 없는 3차원 유동장만의 독특한 현상이다.

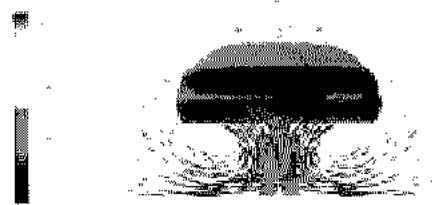


Fig. 14 Velocity Vectors(m/s) of the Rear View at y=4

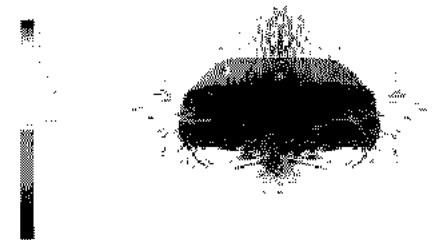


Fig. 15 Velocity Vectors(m/s) of the Rear View at y=6

Fig. 16, 17은 대칭 평면(symmetric plane)에서의 속도 벡터(velocity vector)를 도시하였다. 이 경우 유동의 3차원 효과에 의한 부분과 상당부분은 비정렬 격자계의 격자배치에 의한 것으로 생각되어 지며 보다 조밀한 격자계를 사용한 해석결과나 정렬격자계를 사용한 해석 결과를 통한 검증이 필요할 것 같다.

Fig. 18, 19은 y방향(유동방향) 속도 성분의 contour 그림이다. 고속 유동 지역과 정체지역을 잘 보여주고 있다.

항력계수를 구하기 위한 자동차의 전면부 면적은 아래의 식을 사용하였다.

$$A = f \cdot (b \cdot h) \quad (2)$$

여기서 f는 85대의 유럽형 차의 평균치를 내어서 구한 변수로서 0.81을 사용하였으며 b와 h는 각각 차폭과 높이이며 계산결과는 2.0m²에 근사한 값으로 중형차(medium size)에 속하는 것을 알 수 있다. 계산

된 결과는 Table 2에 표시되어 있다.

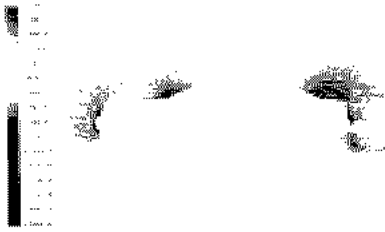


Fig. 16 Velocity Vectors(m/s) of the Symmetric Plane at case 1



Fig. 17 Velocity Vectors(m/s) of the Symmetric Plane at case 2

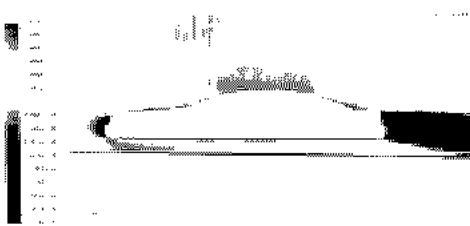


Fig. 18 Contours of Velocity(m/s) at Flow Direction at case 1

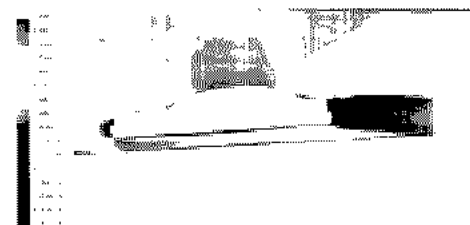


Fig. 19 Contours of Velocity(m/s) at Flow Direction at case 2

Table 2 Drag and Lift Coefficient for Flow Condition of a Vehicle Body

	Drag Force(N)	Lift Force(N)	C_d	C_l
CASE 1	61.68	82.16	0.36	0.057
CASE 2	145.36	85.65	0.30	0.021

여기서 사용된 힘값은 Fluent/UNS에서 제공하는

함수(Function)를 사용하여 구했으며 격자계가 보다 세밀한 case 2의 경우가 보다 정확한 값을 제공한다고 볼 수 있다. 속도가 커질수록 후류 영역이 줄어들어 항력 계수가 작아지는데 결과는 이를 잘 나타내주고 있다. 계산된 항력 계수값은 전면 범퍼(front bumper)부의 공기 흡입부와 그릴(grill)부의 생략과 차체 밑(Underbody)부분의 단순화된 형상을 고려하고 박리(separation)가 발생하지 않았다는 점을 고려하면 실제보다 적은 값으로 계산되었다고 생각되며 실험치보다 계산치들이 큰 값을 나타내는 것을 고려한다면 타당한 결과라고 볼 수 있다. 타이어와 측면 백미러(side mirror)가 첨가될 경우 항력 계수가 약간 상승될 것이다. S 모델과 형상이 거의 유사한 일본 N사의 C차의 경우 풍동실험을 통해 측정된 항력 계수가 0.31인데 수치모사를 통한 자동차의 항력계수 값은 실험치보다 더 큰 값이 나오는 것으로 알려져 있으므로 위 의 계산 결과는 수렴성을 실험적으로 검증한 매우 타당한 결과이다. 이는 실험 결과가 수치 모사 결과의 항력계수 값보다 훨씬 작게 나오는 것을 고려하면 지금까지의 연구가 모두 바른 궤도를 밟았음을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후 과제

S 모델에 대한 유동장 해석에 들어가기 전 세단형의 단순화된 3-D 물체를 대상으로 수치 모사를 해본 결과 일반적으로 알려져 왔던 것처럼 비정렬 격자계의 수렴성 면에서는 비정렬 격자계나 정렬 격자계 모두 큰 차이가 없었으며 단지 계산 시간에 있어서 정렬 격자계가 우위를 보였다. 이제 CFD를 이용한 완성된 중형 차량의 유동해석은 실험결과의 검증의 차원이나 보조적인 수단으로서가 아니라 자동차 외형 변경을 통한 공기 역학적 특성을 개선하는 적극적인 수단으로서 자리잡을 수 있는 발판이 되었다고 사료되며 차후 개선된 연구 환경 하에서는 보다 정밀한 모델링이 가능하리라 기대된다. 그러나 여전히 많은 논문들에서 제시해왔던 데로 정확한 박리(separation)위치의 예측에는 상당한 어려움이 있다고 생각된다. 이러한 현상은 먼저 격자계와 벽함수(wall function), 그리고 채용된 수치해석 방법(numerical scheme)과 난류모델자체의 문제에서 기인한다. 이러한 문제에 대해서는 그간 많은 연구가 진행되어 왔고 많은 상용코드들도 개선된 모델들을 앞 다투어 개발하고 있는 상황이다.

본 연구를 통해 차체 표면과 주위에 공기 유동 현상과 압력의 분포를 알 수 있어 차량의 항력 계수를 결정할 수 있었으며 이를 통해 연료의 절약 및 차량의 효율적인 냉각을 위한 차체 외형의 최적 설계 기반기술에 토대를 마련하였으며, 공기 저항, 역압력 구배, 압력 정체 영역, 박리현상 및 후류(wake)를 직접적으로 파악하여 자가 운전자들이 차체에 용이하게 탈부착할 수 있는 에어댐, 에어 스포일러, 에이프런, 스키 캐리어 등의 부착물들의 유동장에 미치는 영향을 파악하여 연료 및 주행효율의 향상에 반영할 수 있으며 경주용 차량 및 차체 튜닝 관련자들의 경쟁력 있는 차량 설계변경 및 제작을 위한 용이한 설계 변경에 크게 기여할 수 있으리라 기대되며 차량의 안락성과 청결성을 위해 먼지나 유해 가스의 차량에 유입될 수 있는 가능성을 고려해 최적의 흡입 및 통풍구 위치를 설계하는 데도 기여하리라 예측된다.

향후엔 기 수행된 해석결과를 바탕으로 자동차 차체 밑(Underbody)부분이 유동에 미치는 영향, hip-up angle의 영향, 차량 전반부의 형상변경의 영향, Air Spoiler/Dam 부착여부에 따른 차량 공기 유동 현상, 실제 차와 같이 타이어와 측면 백미러가 장착된 경우도 유동해석을 수행할 예정이다.

참고 문헌

1. W. Hucho, L. Janssen, H. Emmelmann, 1979, "The Optimization of Body Details-A Method for Reducing the Aerodynamics Drag of Road Vehicles", SAE/PT-79/181.
2. 최장섭, 최도형, 박승오, 1988, "자동차 중앙 대칭 단면 부근의 3차원 경계층 계산", 한국자동차공학회 논문집, 제10권, 제2호, pp. 61~69.
3. 유정열, 김사량, 강신형, 백세진, 이택식, 김웅서, 1989, "단순화된 2차원 자동차형 물체 주위의 유동에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집, 제13권, 제1호, pp. 178~189.
4. 장성원, 유정열, 이택식, 1990, "승용차 모형 주위의 유동에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집, 제12권, 제3호, pp. 53~62.
5. 안이기, 정형호, 김광호, 1994. "냉각유동이 자동차항력에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제2호, pp. 405~413
6. T. Tsukada, J. Sakagami, Y. Arai, and H. Takaha, 1986, "Aerodynamic Characteristics of Subaru XT", SAE Technical paper 860216, USA
7. J. Summa, 1993, "Aerodynamic Simulation", Automotive Engineering, 19-23.
8. R. Himeno, M. Takagi, K. Fujitani, H. Tanaka, 1990, "Numerical Analysis of the Airflow around Automobiles Using Multi-block Structured Grids", SAE Technical paper 900319, USA
9. Y. Jiang, Z. Wang, and A. Przekwas, 1996, "Pressure-Based High Order Accuracy Flow Solver on Adaptive, Mixed Type Unstructured Grids", AIAA-96-0417, 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Jan., Reno, NV, USA
10. A. Przekwas, Y. Jiang, and Z. Tan, 1997, "Unstructured Adaptive Grid Solution Methodology for Automotive Aerodynamics", SAE Technical paper 970142, USA