

자동차 주위의 유동에 관한 수치해석적 연구

진원재*(홍익대 대학원 기계설계학과)

A Numerical Study on the Flow around Automobile

W. J. Jin(Mech. Des. Dept., HIU)

ABSTRACT

Conventional aerodynamic simulations have carried out by using Supercomputer and over a hundred grid point or wind tunnel experiment. It takes s long time to get a result. This paper has dealt on flow characteristics of automobile in the flow field. CFD(Computational Fluid Dynamics) has been able to apply to industrial field in these days. This new method has been applied to the aerodynamic simulation system, a designer has been able to carry out the practical on early designing phase of automobile. This paper has been focused on the necessity of rear-spoiler, the peculiarity of aerodynamic drag, and the level of drive safety.

Key Words : Arcodynamic Drag (공기역학적 항력), Rear-spoiler , CFD (전산유체역학),

1. 서론

유동장내의 물체 주위의 유동해석은 공기 역학적 최적 형상 설계를 위해 매우 중요한 연구라 할 수 있다. 이러한 연구는 학계에서만뿐만 아니라 산업계 등에서도 매우 관심을 갖고 있는 부분이다. 특히 오늘날 컴퓨터의 하드웨어 기술의 비약적 발전으로 자료의 처리속도가 점점 고속화되고 대용량의 데이터 처리능력을 갖게 되어 종래의 이론적 연구와 실험적 연구의 양면으로 발전해온 유동 연구는 해석학 중심의 이론적 연구를 대신해 수치해석적 연구가 비약적인 발전을 이루었다. 실험으로는 하기 힘든 문제를 수치해석 방법을 이용하면 값비싼 모형 제작 및 풍동실험을 상당부분 대체할 수 있어 제한된 실험 설비와 인력을 보다 경제적이고, 효율적으로 적은 비용과 시간을 들여 결과를 얻을 수 있다.

우리 생활에 밀접한 자동차 산업의 경우를 보더라도 이제는 경제적이며 환경 친화적인 설계에 관심이 집중되고 있다. 여기에 가장 관계 깊은 것이 에너지 소비 문제로 이는 우리에게 당면한 가장 큰 과제 중 하나이다. 대체 연료개발도 매우 중요하겠지만 현시점에서 보다 효과적인 방안은 차체에 작

용하는 공기역학적 항력특성에 관한 연구를 통해 에너지 손실을 최대한 줄이는 방법과 구동축의 동력손실을 포함한 역학적 손실을 감소시키는 두 가지로 크게 생각할 수 있다. 공기와 같이 유체속에서 자동차가 이동을 할 경우 자동차의 뒤쪽에는 후류가 발생을 한다. 이로 인해 자동차에 항력이 발생하고 추력손실이 생기게 되는데 이는 바로 에너지 손실과 연관된다. 포르쉐와 같은 유명자동차 메이커들을 살펴보면 수만시간이상의 simulation과정과 풍동실험을 통해서 양산형 자동차가 나오는 과정을 쉽게 볼 수 있다. 이것은 단지 공기의 저항을 덜 받으려는 설계를 하기 위한 것만은 아니다. 이미 실험적으로 항력이 감소하면 연비향상에 큰 효과가 있다는 것으로 알려져 있다. 따라서 모든 자동차 업계에서는 공기에 의한 자동차의 주행저항에 큰 관심을 갖고 있고 자동차의 디자인을 공기역학적 성능에 최적화 시키려고 많은 노력을 기울이고 있다. 이런 연구는 자동차 외형에 변화를 주어 공기저항을 줄이는 방법이 있으나 간단히 자동차에 Rear-spoiler를 부착하는 것만으로도 자동차의 자체 구조를 변화시키지 않고 큰 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 그 동안 실험으로 연구되어왔던 Rear-spoiler를 부착시와 미부착시의 유동해석을 전산유체 코드를 사용하여 연구하고자 하였다. 현재까지 알려진 바에 의하면 공기항력을 10% 감소시키면 연료소비를 4% 정도 감소시킬 수 있는 것으로 나타나 있다. 항력과 양력 같은 공기역학적 특성은 자동차의 안정성이나 연료소비와 같은 자동차 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 본 연구도 항력 감소와 연비향상에 초점을 맞출 것이다. 물론 자동차 뒷부분 경계층의 박리로부터 생기는 큰 후류영역, 차체와 지면사이의 복잡한 유동, 차체 측면에 발생하는 3차원적인 와류현상등이 공력 특성을 완벽히 예측하는데 어려움을 준다. 그러나 공기역학적 디자인은 주행성능이나 현대인의 미적인 추구를 위해 절실히 요구된다. 본 연구에서는 유한체적법(FVM : Finite Volume Method)을 쓰는 Fluent를 사용하여 유동해석을 하고자 하였다. 본 유동 연구는 공기저항감소를 통한 자동차의 경제적이고 공기역학적인 최적의 형상설계를 하기 위한 중요한 연구라 할 수 있다.

2. 수치해법

2.1 지배방정식 및 수치해석방법

Fluent는 유한체적법을 사용하는 프로그램으로 격자가 원활하지 않은 경우에도 적용될 수 있고, 사용이 간단하며, 경계조건도 적용하기 매우 쉽다. 이 방법은 격자점을 정점에 갖는 육면체의 작은 셀을 검사체적으로 취하여 적분형으로 쓰여진 기초방정식을 이용한 검사체적에서 질량보존의 법칙, 운동량 보존의 법칙, 에너지 보존의 법칙을 적용하면 다음과 같은 적분방정식을 얻을 수 있다.

연속 방정식

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \right) d\Omega = 0$$

운동 방정식

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \mathbf{u} \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} dS = \int_{\Omega} \rho \mathbf{f} d\Omega + \int_{\partial\Omega} \mathbf{n} \cdot \Phi dS$$

에너지 방정식

$$\int_{\Omega} \frac{\partial e}{\partial t} d\Omega + \int_{\partial\Omega} \mathbf{e} \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} dS = \int_{\Omega} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{f} d\Omega + \int_{\partial\Omega} (\mathbf{n} \cdot \Phi \cdot \mathbf{u} + k \frac{\partial T}{\partial n}) dS$$

이 세가지 방정식을 이용하여 Navier-Stokes 방정

식을 유도할 수 있다.

$$U_t + E_x + F_y = \left(\frac{1}{Re} \right) (R_x + S_y)$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ m \\ n \\ e \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \frac{m^2}{\rho} + p \\ mn \\ \frac{\rho}{m(e+p)} \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \frac{nn}{mn} \\ \frac{n^2 \rho}{\rho} + p \\ \frac{n(e+p)}{\rho} \end{bmatrix}$$

$$R = \left[0 \quad \tau_{xx} \quad \tau_{yx} \quad u\tau_{xx} + v\tau_{yx} + \frac{\gamma\mu}{Pr} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right]^T$$

$$S = \left[0 \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yy} \quad u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + \frac{\gamma\mu}{Pr} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right]^T$$

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ 는 점성응력성분이며,

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3} \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad \tau_{yy} = \frac{2}{3} \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right),$$

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

Re 는 Reynolds 수로 $Re = \frac{\rho_{\infty} U_{\infty} L}{\mu_{\infty}}$

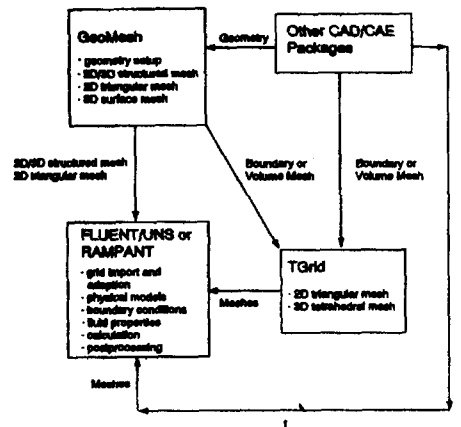


Fig.1 Fluent code Roadmap

2.2 격자생성

Fluent Code는 Preprocessor(전처리), Solver(해석), Postprocessor(후처리)로 나눌 수 있다. Preprocessor는 Gambit이 담당하고 Geometry Modeling, 격자생성, 경계조건 등을 줄수 있고, Solver는 Flunet로 경계조건을 줄수 있고 계산을 한다. Postprocessor는 결과의 가시화를 담당한다.

3. 계산결과 및 고찰

Gambit을 이용하여 자동차 모델을 3차원으로 모델링 한 후 Fluent에서 유동을 해석하기 쉽도록 짧은 Edge는 이어진 나머지 Edge에 붙이고, 작은 면적도 주위의 면적에 합쳐 넓은 부분에 통합하여 모델링을 하였다. Fluent에서는 Edges가 서로 떨어져 있으면 해석이 되지 않으므로 이런 부분들을 모두 찾아서 수정작업을 거쳐 모델을 완성하였다. 그리고 자동차의 외부에 사각형의 공간을 만들어 그 안에서 모델이 외부에서 받는 힘들을 계산할 수 있도록 했다. 격자 생성은 Gambit을 이용하여 구성한다. 격자는 structured type과 unstructured type 두 가지가 있다. structured type의 경우는 Quad와 Hexahedral의 격자를 structured type의 경우에는 tri와 tri-surface의 격자를 사용한다. Gambit에서 격자는 이런 다양한 형태를 사용해서 복잡한 형상의 Volume을 Meshing 하는데 적합하다. 또한 대부분의 경우는 사용자가 지정하지 않아도 Gambit에서 격자를 자동으로 생성해주며 특히 자세하게 연구되어야 할 부분에는 모델 주위에 밀집격자를 생성했다. 본 연구에서는 자동차의 외부 유동을 해석하는데 그 목적이 있으므로 자동차의 표면에 삼각형의 격자를 Pave type으로 격자를 생성했다. 자동차 외부의 사각형 모양은 유동의 흐름을 파악하기 위해 만들어졌고 Tet/Hybrid volume mesh를 형성했다. 또한 자세히 연구되어야 할 자동차의 선단과 후미에 격자간격을 작게하여 사용하여 밀집격자를 구성했고, 유동해석은 자동차의 아래 부분은 보다 덜 중요하기 때문에 선단부터 자동차의 윗부분과 후미에 걸쳐 격자를 생성했다. 자동차의 경계부근에서는 물리적인 변화가 많이 일어나므로 경계부근에서 격자를 집중시켰다. 경계조건은 사각형의 앞, 뒤 벽면에 압력 분포를 Symmetry Plane로 설정해서 앞면을 Pressure inlet, 뒷면을 Pressure outlet으로 설정해서 공기가 앞에서 뒤쪽에 걸쳐 흐르도록 설정했다. 또한 외부 사각형의 윗부분도 symmetric하게 설정하여 압력의 분포를 파악할 수 있도록 설정했다.

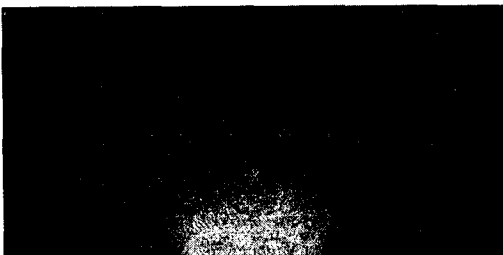


Fig.2 Grid Display

본 연구는 스포일러가 자동차의 주행시 안정성과 공기 저항과의 관계를 알아보고자 스포일러가 부착된 것과 부착되지 않은 자동차 모델을 가지고 연구하였다. 스포일러 부착시가 미부착시보다 자동차의 끝단에서 압력을 더 받는 것으로 나타났다. 스포일러를 경계로 위쪽에서 흐르는 회전 유동과 아래쪽에서 올라오는 회전 운동이 생기게 되는 것을 볼 수 있었다. 이 두 개의 회전 운동을 하는 흐름이 자동차의 후미에서 서로 작용하여 양력의 증가를 감소시키는 것을 알 수 있었다. 이것은 고속 주행시 스포일러가 부착되어 있으면 스포일러에 받는 압력이 자동차의 후미를 누르는 역할을 해 주행안정성을 증가시키는 것을 알 수 있다. 스포일러가 부착되지 않은 자동차는 후미에 양력이 발생하게 되는데 스포일러를 부착함으로써 양력을 억제 시켜 고속 주행시에 차체가 뜨는 것을 방지하므로 주행안정성이 높아지게 된다. 또한 저속보다는 고속에서 스포일러의 영향이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 스포일러의 각도 또한 항력에 영향을 미치는 것을 볼 수 있었다. 0 ~ 20. 사이로 5. 간격으로 스포일러의 각도를 변화시켜 해석을 해보았다. 그 결과 15. 일 때 가장 큰 항력의 감소를 볼 수 있었다. 이처럼 항력의 감소를 관찰할 수 있었지만 항력의 감소만을 강조하면 자동차 핸들링에도 영향을 미칠 수 있을 것이므로 최적의 상태를 유지할 수 있도록 설계시 고려가 필요할 것이다. 또한 운전석 쪽의 방풍유리의 각도도 항력감소에 관계가 있다는 것을 알았다. 각도를 20. ~ 40. 로 10. 씩 변화를 주어 해석해 본 결과 항력이 30. 부근에서 가장 적게 나오는 것을 볼 수 있었다. 또한 이 경사각은 자동차 후드와 그릴 부분의 압력분포에도 지대한 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 여기에서 방풍유리의 각도도 유동의 흐름에 매우 중요한 영향을 미친다는 것을 알았다. 또한 자동차의 표면은 균일하고 매끄럽다고 가정하여 모델링을 했다. 차체의 표면이 매끄러울수록 울퉁불퉁한 표면보다 와류의 형성이 적을 것이다. 스포일러나 차체에 이어진 방풍유리의 각도 등의 형상을 통해 또한 전체적인 형상 설계를 통해 적은 항력계수를 얻고자 노력이 필요할 것이다.

또한 모델링을 통해 해석하는 과정은 Euler 방정식을 이용한 수치해석 계산이므로 경계부근에서 상

당한 오차가 발생한다. 이것을 줄이기 위해 격자 형성시 주의를 요했다. 따라서 모델의 주변으로 물리적 변화가 많이 일어나는 곳은 밀집 격자를 형성하여 오차를 줄이려고 노력했다. 그러나 너무 조밀하게 밀집격자를 형성하면 오히려 프로그램 수행시 계산시간만 많이 소비하게 되므로 이점을 감안하여 0.03으로 격자생성을 하고, 해석을 하였다. 실험으로 할때는 많은 시간과 노력이 들지만 CFD를 통해 수치해를 구해보니 상당히 유용하고 효율적이라는 것을 알 수 있었다. 물론 아주 복잡한 형상같은 것들은 컴퓨터의 한계 때문에 해석이 어려워 모델의 단순화 작업을 거쳐야 하지만 시간적 경제적인면을 감안한다면 CFD는 앞으로 보다 많은 기술과 지식 확보에 많은 도움이 되리라 생각한다.

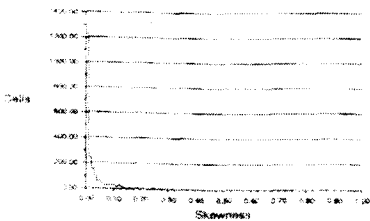


Fig.3 Skewness Display

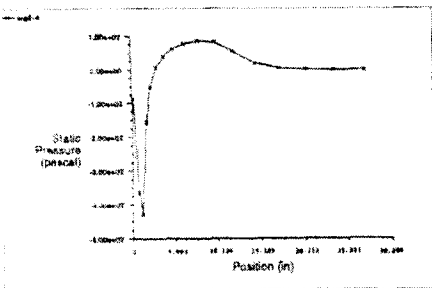


Fig.4 Static Pressure on the other wall

4. 결론

Rear-spoiler를 부착하였을 경우 미부착시보다 차체의 뒤쪽에서 하강하는 유동과 상승하는 유동이 만나 자동차의 양력을 감소시켜 안정성을 높여준다. Rear-spoiler를 부착한 경우 저속일 때 보다는 고속에서 그 영향이 뚜렷하게 나타나고 이것은 자동

차의 고속에서의 주행안정성을 증가시켜준다.

Rear-spoiler의 각도 15. 에서 양력이 가장 적은 값을 보여준다.

회전 왕복운동을 하는 소용돌이가 Rear-spoiler를 경계로 두 개가 생기며 이주위의 공기 흐름으로 낮은 항력값을 얻을 수 있다.

방풍유리의 경사각은 후드와 그릴의 압력분포에 영향을 미친다.

방풍유리의 각도는 30. 에서 가장 낮은 항력값을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. Edited by C.R.Burrows, K.A.Edge., "Modeling and Simulation," John Wiley & Sons INC, 1993.
2. Tlusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517-521, 1990.
3. Hucho, W. H., "Aerodynamics of Road Vehicles", Butterworth-Heinemann, 1987.
4. Ahmed, S. R., "Wake Structure of Typical Automobile Wakes", SAE paper 840301, 1984.
5. J. Wiedemann and Ewald, "Turbulence Manipulation to Increase Effective Reynolds Numbers in Vehicle Aerodynamics", AIAA Journal, Vol. 27, No.6, pp. 763-769, 1989.
6. H. D. Papenfuss and M. Kronast, "Moving-Model Technique used in Automobile Aerodynamics for Measurement of Ground Effects". Experiments in Fluids 11, pp. 161-166
7. Wei Shyy, H.S.Udaykumar, Madhukar M.Rao, Richard W. Smith "Computational Fluid Dynamics with Moving Boundaries" Taylor&Francis, 1998
8. Frank M.White "Fluid Mechanics" Mcgraw-Hill, 1994
9. John.Haberman "Introduction to Fluid Mechanics" PRENTICE-HALL, 1991
10. J.F., Thompson, Z.U.A., Warsi and C.W., Mastin. "Numerical Grid Generation", North_Holland,N.Y., 1985
11. Sato, H. and Takagi, M., "Airflow Measurement around Passenger Car Models Using A Two-Channel Laser Doppler Velocimeter", SAE paper 930297, 1993
12. Duell, E. G. and George, A. R., "Measurement in the Unsteady Near Wakes of Ground Vehicle Bodies", SAE paper 850280, 1996.