

## 래티스 볼츠만 방법을 이용한 자동차 외부공력특성 연구

이병천\* · 김무상\*\* · 이창호\*\*\*

### Calculation of The Car Aerodynamic Characteristics Using Lattice-Boltzmann method

B.C Lee\*, M.S Kim\*\* and C.H Lee\*\*\*

**Keywords :** DIGITAL PHYSICS, PowerFLOW, CFD, Aerodynamic Characteristic, 4pages(4 쪽)

#### Abstract

For the reduction of fuel consumption of high speed, the aerodynamic drag must be reduced. In early vehicle design process, it is very important to have information about aerodynamic characteristics of design models. In this phase CFD methods are usually used to predict the aerodynamic forces. But commercial programs using turbulence models cannot give a good agreement with experimental result and have also problems with convergence. PowerFLOW employs a new technology called DIGITAL PHYSICS, which provides a different approach to simulating fluids. DIGITAL PHYSICS uses a lattice-based approach (extended from lattice-gas and lattice-Boltzmann methods) where time, space and velocity are discrete. This discrete system represents the Navier-Stokes continuum behavior without the numerical instability issues of traditional CFD solvers, such as convergence. In this paper, aerodynamic performance of vehicles are simulated using PowerFLOW by Exa and results are compared with experimental wind tunnel data.

#### 1. 서론

자동차의 고속주행시 연비성능 향상을 위해 공기 저항 감소는 필수적인 요소로 간주되고 있으며, 저항력 차체를 개발하기 위한 설계 및 디자인 초기 단계에서 공력특성의 고찰은 중요한 요소로 부각되고 있다. 주행중인 자동차의 공기저항을 평가하는 방법으로 크게 풍동 시험(Wind Tunnel Test)에 의한 실험적 접근방식과 Computer Simulation에 의한 수치해석적 접근 방법으로 나눌 수 있다. 시험적 방법은 디자인 초기단계에서의 시험 모델의 확보의 어려움과 차체공력특성에 미치는 주요 인자를 파악하기에 어려운 점이 있다.

현재 각 자동차 회사들에서는 디자인 초기단계에서 CFD 해석기법을 도입하여 공력특성을 예측하고 개선함으로써 우수한 공력성능을 갖는 자동차를 개발하고 있다. 그러나 전통적인 CFD해석기법을 사용할 경우 모델 구성의 난이성, 제한된 난류모델의 사용 및 해의 수렴성 등의 문제로 정량적인 공기 저항 값을 평가하기 보다는 공력특성에 미치는 각 요인의 정성적인 경향을 파악하는 용도로 이용되고 있다. 이러한 상황에서 최근 Teixeira등이 "Digital Physics"라는 기존의 Lattice Gas Theory를 더욱 확장시킨 이론을 제시하였다. 이것은 편미분 방정식을 대수적으로 이산화시켜 유체의 거동을 해석하는 기존의 CFD와는 달리 입자충돌을 기반으로 하는 새로운 접근방

식으로 타 선진 업체에서 이 이론을 기반으로 만들어진 상용 프로그램인 PowerFLOW(美,EXA)를 사용하여 시험결과와 비교하여 정성적 경향 뿐만 아니라 정량적으로도 양호한 결과를 얻을 수 있음이 검증한 바 있다. 본 고에서는 MIRA 표준모델 및 당사 양산 차종의 공력특성에 대하여 해석하고 실차 풍동 시험결과와 비교하였다.

#### 2. 본론

##### 2.1 PowerFLOW 특징

PowerFLOW는 Digital Physics에 기초한 전산유체역학 코드로 기존의 CFD 코드에 비해 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 첫째, 기존의 해석코드는 Navier-Stokes방정식을 이용하여 유동장을 거시적관점에서 시뮬레이션하는 반면, PowerFLOW는 미시적관점에서의 유체입자의 운동학 관계를 다룬다. 둘째 기존에 비해 시뮬레이션의 수렴이 항상 이루어진다. 셋째, 정육면체의 유동장 격자를 자동으로 생성하며, 마지막으로 비정상 유동의 압력변동을 시간에 따라 포착할 수 있어 유동의 소음장 해석에 적용할 수 있다.

##### 2.2 이론적 배경

전산유체역학을 이용하여 유동장 해석을 위해 전통적으로 사용하는 방법은 유체운동을 나타내는 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식 (1)을 다양한 수치 해석 방법으로 이산화시켜 근접 모사 한다.

\* 현대자동차 기능시험2팀, daffy@hyundai-motor.com

\*\* 현대자동차 기능시험2팀, mooskim@hyundai-motor.com

\*\*\* 현대자동차 기능시험2팀, promec@hyundai-motor.com

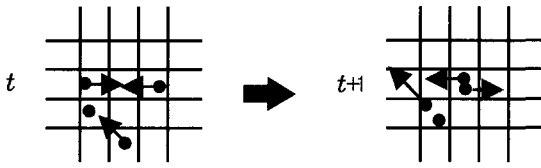
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot \rho \bar{u} \bar{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{u} \quad (1)$$

그러나 위와 같은 방식들은 근본적으로 수치 해석 기법 자체의 truncation error와 round-off error를 가지며, 또한 수렴 불안정성을 항상 갖고 있다. PowerFLOW는 기존 전산유체역학 코드들과는 다르게 Lattice-Boltzmann 방정식을 이용하여 공기 분자들의 상호 작용을 통한 유동장 시뮬레이션 code이며, 그 이론적 배경은 다음과 같다.

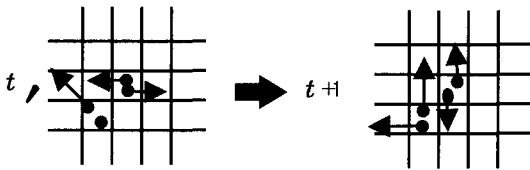
유체 운동은 이동과 충돌 2단계로 구성 된다.

임의시간  $t$ , 위치  $\bar{x}$ 에서 에너지  $j$  갖고  $i$  방향으로 움직이는 유체입자들을  $N_{ji}(\bar{x}, t)$  라고 하면

$$\text{이동 : } N_{ji}(\bar{x}, t) \rightarrow N_{ji}(\bar{x} + \bar{c}_{ji}, t + 1) \quad (2)$$



$$\text{충돌 : } N_{ji}(\bar{x}, t) \rightarrow N_{ji}(\bar{x}, t) + \Omega_{ji}\{N_{ji}(\bar{x}, t)\} \quad (3)$$



여기서,  $\Omega_{ji}$ 는 질량, 모멘텀 보존을 유지시켜 주는 충돌 인자이다.

입자 충돌 후 위치를 이동하면 다음과 같은 형태의 식이 된다.

$$N_{ji}(\bar{x} + \bar{c}_{ji}, t + 1) = N_{ji}(\bar{x}, t) + \Omega_{ji}\{N_{ji}(\bar{x}, t)\} \quad (4)$$

PowerFLOW는 이런 일련의 반복 과정을 거쳐서 계산하는 것으로써 일반화된 형태는 다음과 같다.

Lattice-Boltzmann form :

$$N_{ji}(\bar{x} + \bar{c}_{ji}, t + \Delta t) = N_{ji}(\bar{x}, t) + \Omega_{ji}\{N_{ji}(\bar{x}, t)\} \quad (5)$$

$$\text{여기서 질량보존 : } \rho(\bar{x}, t) = \sum_{ji} N_{ji}(\bar{x}, t) \quad (6)$$

$$\text{모멘텀 보존 : } \rho \bar{u}(\bar{x}, t) = \sum_{ji} \bar{c}_{ji} N_{ji}(\bar{x}, t) \quad (7)$$

으로 나타낸다.

### 2.3 해석 방법

PowerFLOW를 이용하여 외부유동 해석시의 대략적 과정은 그림1과 같다.

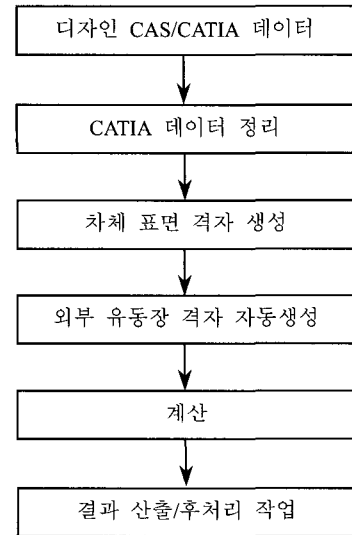


Fig 1. Flow chart for analysis

해석시 외부 유동장은 그림 2와 같은 Digital Wind Tunnel로 정의되어 자동 생성된다. Digital Wind Tunnel의 크기는 전방으로 차길이의 6배 그리고 후방으로 차 길이의 11배로 하였으며, 막힘비는 0.1%로 하였다.

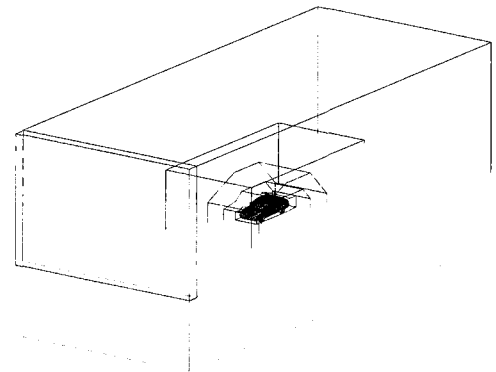


Fig 2. The Car body in the digital wind tunnel

해석시 사용되는 격자는 그림 3에서와 같이 Voxel이라 불리는 정육면체의 격자와 Voxel과 차체 표면격자 facet.과의 경계처리를 위한 Surfcel 구성된다.

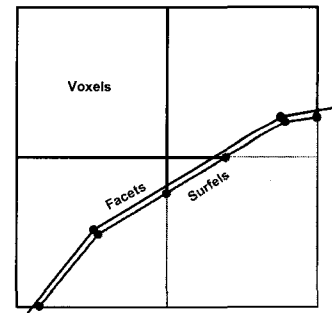


Fig 3. Definitions: Facets, Voxels, Surfels

그림 4에서와 같은 방법으로 Voxel의 밀집도를 조절하여 복잡한 차체 형상 및 흐름이 급변하는 주요 부분은 격자를 집중시켜 조밀하게 구성함으로써 계산 정도를 향상시키며, 그

외 부분은 성글게 구성하여 실제 계산에 소요되는 격자의 수와 메모리를 줄일 수 있다.

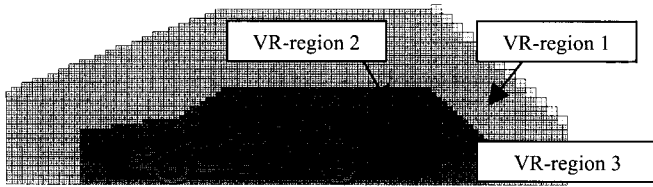


Fig 4. Computational lattices

## 2.4 MIRA 표준모델

PowerFLOW를 이용하여 Notch Back 및 Square Back 형상의 MIRA 표준모델에 대하여 외부유동해석을 실시하여 실차풍동 시험결과와 비교하였다.

표 1은 해석에 필요한 격자수를 비교한 것으로 실차 해석 시 1500만~2000만개 정도의 격자가 사용된다.

Table 1. Size of computational lattices

	Voxel	Surfel	Memory
MIRA 표준모델	700 만개	80 만개	1.6Gb
실차모델	1200 만개	100 만개	3.9Gb

표 2에 MIRA 표준모델에 대하여 해석과 시험에서 얻은 공기저항계수를 비교하였다. 해석과 시험과의 오차는 약 5% 이내로 예측 할 수 있음을 알 수 있다.

Table 2. Aerodynamic coefficients of MIRA model

모델	공기저항 계수, $C_D$		
	계산	시험	오차 (%)
Notch Back	0.318	0.316	+ 0.6
Square back	0.39	0.37	+ 5.4

그림5,7에서 보는바 와 같이 해석에서 얻은 차체표면 압력 계수분포는 시험값과 양호하게 일치함을 알 수 있다. 그림5의 MIRA Notch Back 모델의 시험과 해석의 압력계수의 차이는 그림 6에서와 같이 roof부근의 가속영역에 격자가 성글게 구성되어 생긴 결과이며, 격자를 조밀하게 구성할 경우

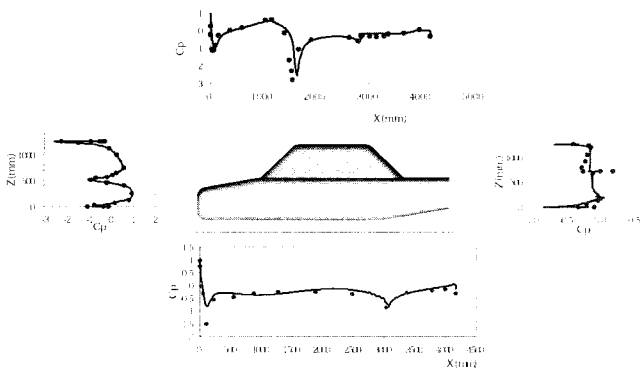


Fig 5. Comparison between the measured and predicted pressure coefficient at notch back model

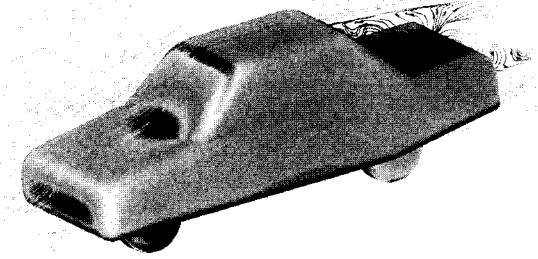


Fig 6. Velocity contour and streamlines at notch back

그림7과 같이 양호한 분포를 보이게 된다. Square back에서의 저장값의 차이는 Square back 차량이 Base 부근에서 unsteady 유동특성을 갖는것에 기인하는 것으로 사료된다.

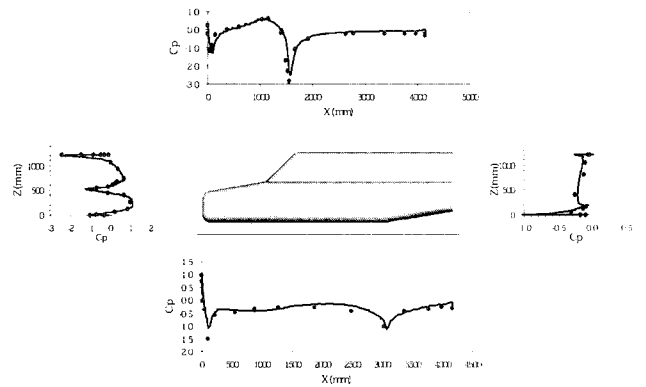


Fig 7. Comparison between the measured and predicted pressure coefficient at square back model.

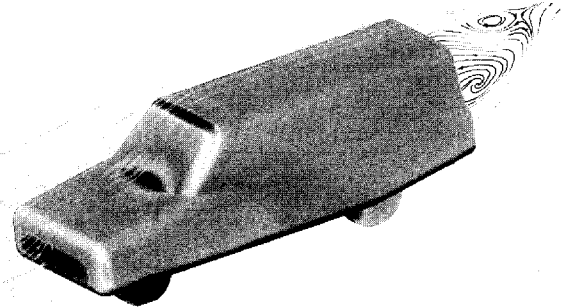


Fig 8. Velocity contour and streamlines at square back

## 2.5 실차 모델

PowerFLOW를 이용하여 그림9와 같은 형상의 실제 자동차와 유사한 Underbody 형상을 갖는 차량에 대하여 해석을 수행하여 실차 풍동 시험결과와 비교하였다.

표3에 실차 모델에 대하여 해석과 시험에서 얻은 공기저항계수를 비교하였다. 시험과 비교하여 근소한 차이로 공기저항 계수를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Table 3. Aerodynamic Coefficients of Real Car model

모 델	공기저항 계수, $C_D$
	계산 및 시험 오차 (%)
A Car	+0.4
B Car	+7.3

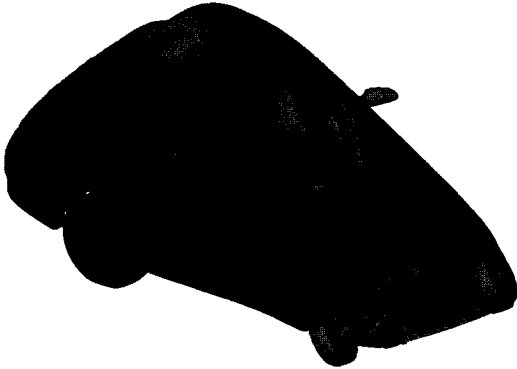


Fig 9. The real car model with full underbody geometry

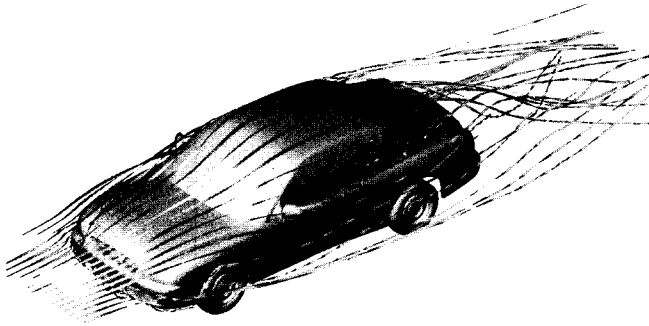


Fig 10. Streamlines of the real car model

그림 11은 차체표면 유선분포도이다. 사이드 윈도우부근에서의 A-Pillar Vortex 흐름과 재부착 라인을 잘 보여주고 있다. 비정상상태 해석을 통해 Vortex 흐름에 의한 압력변동 값을 구할 수 있으며 이를 토대로 그림 12와 같은 음압 레벨의 계산도 가능하다.

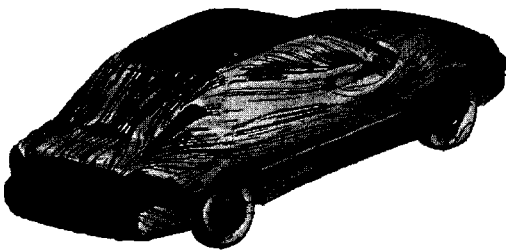


Fig 11. Velocity vectors in car body surface

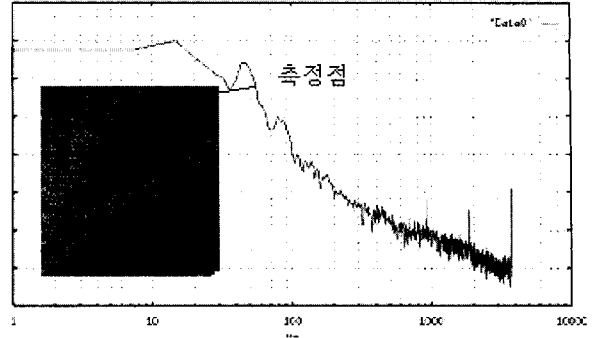


Fig 12. Sound pressure level for wind noise analysis

### 3. 결 론

Lattice-Boltzmann 방법을 이용한 PowerFLOW를 사용하여 디자인 및 설계 초기 단계에서의 차량의 공력특성을 예측할수 있음을 실차 품동시험 결과와 비교를 통하여 그 타당성을 검증하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모델 구성시 차체 형상 격자만 구성함에 따라 기존 CFD 코드 사용시 모델링에 소요되는 시간이 크게 단축시킬 수 있었다.
- (2) 단순차체 형상인 MIRA 표준모델 뿐만 아니라 실차 수준의 정밀도를 갖는 정밀 모델에 대해서도 실험과 잘 일치하는 결과를 얻었다.
- (3) 비정상상태의 유동해석 결과를 토대로 공력소음해석이 가능하다.
- (4) 본 해석기법을 통해 설계 및 디자인 초기단계에 적용하여 공력특성의 개선을 용이하게 제시할 수 있어 기존의 연구 방법에 비해 개발 기간 단축 및 시행착오를 크게 감소시킬 수 있다.

### 참고문헌

- [1] Andrew Anagnost의 5명, "Digital Physics Analysis of the Morel Body in Ground Proximity" SAE Paper 970139.
- [2] Ales Alajbegovic의 3명, "The Study of Benchmark Laminar Flows Using Digital Physics", ASME Paper FEDSM97-3648.
- [3] Digital Physics 매뉴얼, Exa Corporation, 1997
- [4] S Noeting, "A Digital Physics Resolution Study of the Flow Over the ASMO-II Body", ICS GmbH, 1997