

## 난접근 영역에서의 유동구조

### A Study on the Flow Structures in the Narrow Region

이 강 덕†  
Kang-Duck Ih

**Key Words** : Lattice Boltzman method (러티스 볼츠만법),  $k-\epsilon$  model (2-방정식 모델), Wall function (벽함수), Aeroacoustics (공력소음)

#### ABSTRACT

Flows are studied to understand the flow structure in the narrow region that any experimental approaches are hard to access. Effects on the vehicle commodities from the flows are anticipated in the point of aerodynamics and aero-acoustics. PowerFLOW, which was well validated commercial software, was used to simulate the flow field in the small region, for example, the inner region of the fender panel, the inner region around the front door and the inner region of the trunk lid. Flows in the narrow region could be origins of door sealing problem and dust piling problem.

#### 1. 서론

일반적인 공기역학적 실험이나 전산유체역학에서는 실험장비가 접근할 수 있는 영역에 주로 관심을 두고 연구를 수행해 왔다. 그러나 PIV 나 열선 유속계 혹은 압력포인트 등 사용하는 광선이나 기기가 접근하기 곤란한 좁고 복잡한 영역의 연구는 아주 드문 실정이다.

본 연구에서는 자동차에서 주로 문제가 되나 유동구조에 대한 파악이 곤란한 영역에서의 유동에 대해 다루었다. 여기에 해당되는 영역으로는 펜더 패널 안쪽 공간에서의 유동과 도어 주변에 있는 좁은 공간 및 트렁크 리드 파팅라인 안쪽 공간이 있다. 이 영역에서의 유동구조를 파악하기 위해 상용 프로그램 중의 하나인 PowerFLOW를 사용하였다.

난접근 영역에서의 유동구조 파악을 통해 자동차 공력소음에 미치는 영향을 추정할 수 있었으며 먼지 쌓임 등의 오염원인이 유동에 있다는 것을 파악할 수 있었다.

#### 2. 수치적 방법

##### 2.1 러티스-볼츠만법

비정상 유동장을 풀기 위해 CFD 코드 중의 하나인 PowerFLOW를 사용하였다. 이 코드는 러티스-볼츠만법에 기초를 두고 있다. 러티스-볼츠만 법은 10 여 년 전에 복잡한 유동장에 대한 전형적인 CFD

코드를 대체하는 대안 중의 하나로 제안되었다. 거시적 관점의 연속방정식에 기초한 전형적인 방법과는 달리, 러티스-볼츠만법은 거시적인 유동장을 풀기 위해 중미시적 관점에서 출발하는 볼츠만 방정식에 기초를 두고 있다. 러티스-볼츠만 방정식은 다음과 같다.

$$f_i(\bar{x} + \bar{c}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\bar{x}, t) = C_i(\bar{x}, t) \quad (1)$$

여기서  $f_i$ 는  $i$ -방향으로 움직이는 유한개의 이산적인 속도벡터 집합  $\{\bar{c}_i : i=1, b\}$ 에 따른 입자의 분포함수이다.  $\bar{c}_i \Delta t$ 와  $\Delta t$ 는 각각 공간과 시간 증분을 나타낸다. 식 (1)에서 우변의 충돌항은 다음과 같은 Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) 모델을 사용하였다. (1,4,6)

$$C_i(\bar{x}, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(\bar{x}, t) - f_i^{eq}(\bar{x}, t)] \quad (2)$$

여기서  $\tau$ 는 시간 완충인자이고  $f_i^{eq}$ 는 국소적인 유동특성에 의한 국소평형 분포함수이다. 기본적인 유동량인 밀도나 속도는 다음과 같이 모멘트의 합으로부터 구할 수 있다. 즉,

$$\rho(\bar{x}, t) = \sum_i f_i(\bar{x}, t), \quad \rho \bar{u}(\bar{x}, t) = \sum_i \bar{c}_i f_i(\bar{x}, t) \quad (3)$$

파장이 긴 저주파인 경우 적절한 이산적인 속도벡터의 집합은  $Ma$ 수가 0.4 미만인 영역에서 Chapman-Enskog 전개를 통해 압축성 Navier-Stokes 방정식을 얻을 수 있다. 에너지 방정식은 이

† 교신저자; 현대자동차(주) 기능시험 1팀  
E-mail : baramsolee@hyundai-motor.com  
Tel : (031) 368-6461

상기체 상태방정식,  $p = \rho T$  를 만족한다. 동점성 계수는 시간 완충인자  $\tau$  와 관련이 있다. (3,4,5,6)

$$v = (\tau - 1/2)T \quad (4)$$

식(1)~식(4)의 조합은 PowerFLOW 의 지배방정식인 러티스-볼쪼만 방정식을 구성한다.

## 2.2 난류모델

난류유동을 모사하기 위해 러티스-볼쪼만 방정식의 분자단위의 시간 완충인자를 유효난류 시간 완충인자로 대체한다. 즉,  $\tau \rightarrow \tau_{eff}$ . 여기서  $\tau_{eff}$  은 재규격화군 이론에 의해 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\tau_{eff} = \tau + C_\mu \frac{k^2 / \varepsilon}{T(1 + \tilde{\eta}^2)^{1/2}} \quad (5)$$

여기서  $\tilde{\eta}$  는 변형을 계수  $\eta = k|S|/\varepsilon$  과 와도 계수  $\eta_\omega = k|\Omega|/\varepsilon$  및 나선운동 계수의 조합으로 이루어진다.

난류 모델은 다음과 같은 수정된  $k-\varepsilon$  모델이 사용되었다. (6)

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\rho v_0}{\sigma_{k_0}} + \frac{\rho v_T}{\sigma_{k_T}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\rho v_0}{\sigma_{\varepsilon_0}} + \frac{\rho v_T}{\sigma_{\varepsilon_T}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - \left[ C_{\varepsilon_2} + C_\mu \frac{\tilde{\eta}^3(1 - \tilde{\eta}/\eta_0)}{1 + \beta \tilde{\eta}^3} \right] \rho \frac{\varepsilon^3}{k} \quad (7)$$

여기서  $v_T = C_\mu k^2 / \varepsilon$  는 난류점성 계수이다.

## 2.3 경계조건 및 벽면 전단력 모델링

벽면에서의 경계조건은 다음과 같은 실험적인 경계조건을 사용한다. (2)

$$k^+ = \frac{k}{u_\tau^2} = \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} - e^{-0.1y^+} \left( \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} + 0.29y^+ \right) \quad (8)$$

$$\varepsilon^+ = \frac{\varepsilon v_0}{u_\tau^4} = 0.04y^+ - 0.0033y^{+2} + 1.04y^{+3}/10^4 - 1.14y^{+4}/10^6 \quad (9)$$

그리고 벽면에서의 전단응력 모델은 대수벽 법칙을 사용한다. (7)

$$U^+ = f\left(\frac{y^+}{A}\right) = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y^+}{A}\right) + B \quad (10)$$

$$A = 1 + f\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)$$

## 3. 모델 구성

### 3.1 펜더 내부 모델링

펜더 내부유동 구조를 파악하기 위해 엔진룸과 펜더 패널 안쪽을 그림 1과 같이 정밀 모델링 하였다.

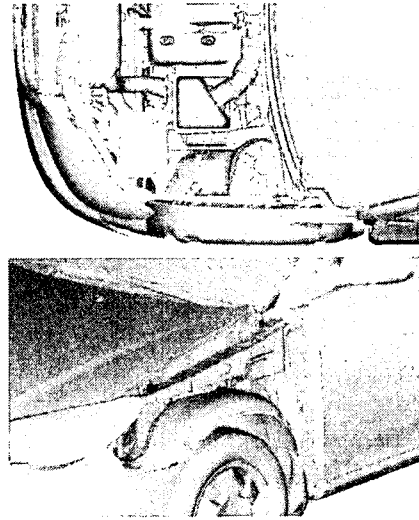


Fig. 1 엔진룸 및 펜더 내부 모델링

펜더 패널 안쪽 유동은 도어의 힌지부로 연결되는 유동의 상류에 해당하며 펜더 패널의 유동구조 파악 즉, 입구와 출구에 대한 이해는 경제적인 소음 대책 수립에 큰 역할을 할 수 있다.

### 3.2 도어 주위 모델링

펜더 패널 안에서 흘러온 유동은 도어 주변을 맴돌아 도어 차음성능을 악화시키고 먼지 쌓임 등의 부수적인 문제를 야기한다. 또한 도어 하단의 배수

구를 통해 도어 내부 유동이 형성된다.

도어 주변 유동장 해석에서는 유동에 의해 발생할 수 있는 제반 문제를 고찰하고 효율적인 대책에 대한 제안을 부분적으로 하고자 한다.

모델링은 도어 내부 공간이 형성되도록 도어 내측 패널과 외측 패널을 상세 모델링 하였고 도어 내부와 외부를 연결하기 위해 배수구 및 핸들 가이드 부에 홀을 모델링 하였다.

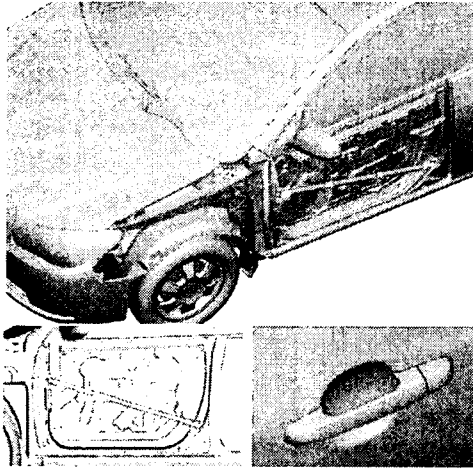


Fig. 2 도어 주변 및 내부 모델링

### 3.3 트렁크 주변 모델링

트렁크 리드와 쿼터 판넬이 이루는 공간은 빗물 배수용으로 주로 이용한다. 주행 중 이 공간 내 유동은 공동소음의 발생이나 먼지 쌓임 등에 영향을 주는 주된 원인이 된다. 따라서 트렁크 주변 유동구조 파악을 통해 공동소음의 발생 원인과 먼지쌓임에 미치는 영향을 고찰해볼 필요가 있다.

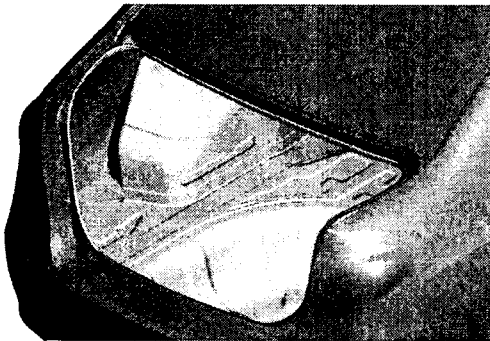


Fig. 3 트렁크 모델링

## 4. 계산 결과

### 4.1 펜더패널 내부 유동

#### (1) 유동개요

펜더패널의 내부에 형성되는 유동의 구조를 보기 위해 벡터-플롯을 Fig. 3 에 나타내었다. 거시적인 유동개요를 보면, 펜더내 유동은 크게 두 가지 경로를 통해 진입하고 있다. 라디에터 그릴을 통해 헤드램프 후방으로 들어오는 경로와 카울탑 커부를 따라 들어오는 경로가 있는 것으로 나타났다. 펜더로 들어온 유동은 복잡하게 내부를 휘감다가 대부분이 도어 힌지부 면에 부딪힌 후 도어 하부로 빠져나가고 일부는 휠커버의 안내를 받아 엔진룸을 거쳐 휠하우스로 빠져 나간다. 헤드램프 후방으로 진입하는 유동은 속도가 매우 느리나 카울커버 사이드로 진입하는 유동은 상대적으로 빠른 유동 특성을 보인다.

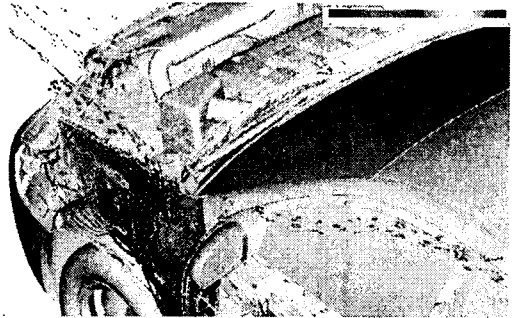
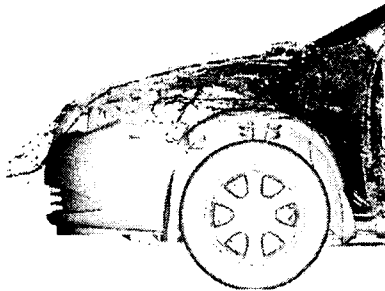
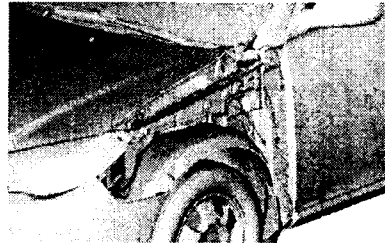


Fig. 4 펜더 패널 내부 유동구조

#### 4.2 도어 주변 유동

도어 주변 유동구조를 Fig. 5 에 나타냈다.

펜더 패널 안쪽 공간을 통해 들어 온 유동은 도어 힌지 마운팅 면에 부딪혀 90% 이상이 도어 하부로 유도된다. 프레임을 타고 올라가는 유량은 상대적으로 작으나 유속이 빠르다.

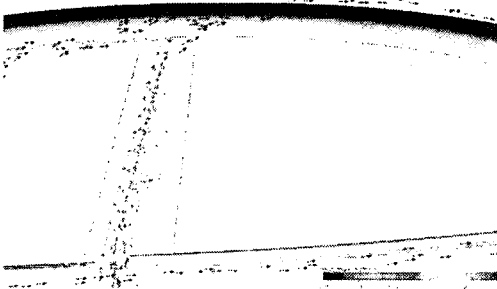
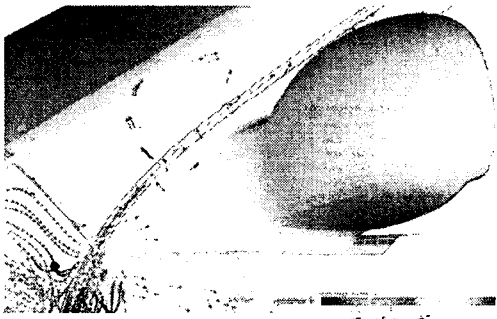
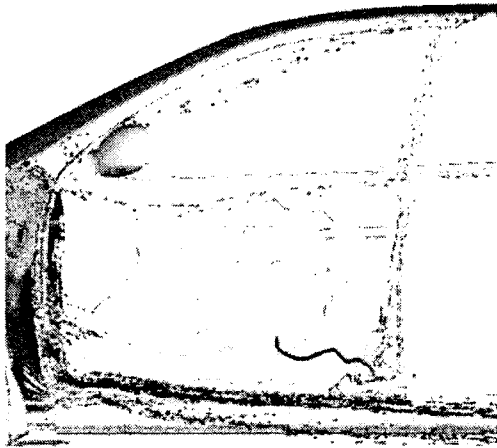


Fig. 5 도어 주변 유동 구조

도어 하부로 이동하는 유동의 일부는 도어 파팅을 빠져나가 주류에 합류한다. 이 경우, 날카로운 순유 성분은 공력소음이 발생할 수 있다. 도어 하부 공간으로 유도된 유동은 다시 'B'-필라를 타고 상승하는 유동이 형성된다. 속도는 비교적 느리게 상승

하다 점점 가속하여 벨트라인 상부에서는 비교적 빠른 유속을 나타낸다. 이와 같이 빠른 유속은 도어 씰링기능을 악화시켜 공력소음에 악영향을 미칠 수 있다.

배수구를 통해 도어 내부에도 유동이 발생하도록 하였다. 그 결과 Fig. 6 와 같은 유동이 도어 내부에 형성되는 것을 알 수 있다. 도어 하부에는 4 개의 배수구가 있으며 해석 결과 이 중 앞에서 3 개까지의 배수구는 도어 내부 유동의 탈출구 역할을 하고 4 번째 배수구는 외부 유동이 도어 내부로 들어오는 입구 역할을 한다. 도어 핸들 가이드 부에 있는 틈새도 내부 유동이 빠져나가는 통로 역할을 한다.

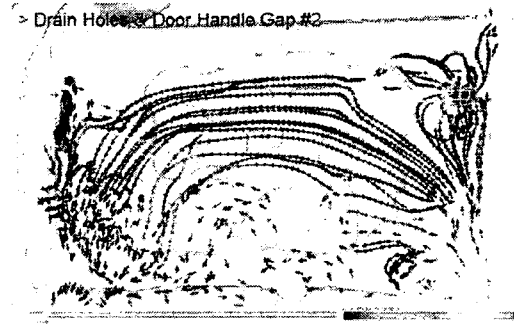


Fig. 6 도어내부 유동구조

이와 같은 유동구조는 도어 주변 먼지적체에 영향을 준다. 소일링 해석에 의한 먼지의 주요적체 위치는 Fig. 7 에 표시하였다. 먼지적체는 카울사이드에서 도어의 힌지 마운팅 면에 집중해서 발생하고 도어 외판의 하방에 주로 적체 되는 것을 볼 수 있다. 'B'-필라의 벨트라인 상부에 까지 먼지가 날아가 적체 된다. 먼지 쌓임에 의한 상품성 저하를 고려하기 위해서는 이와 같은 유동구조를 이해하는 것이 필수적이다.

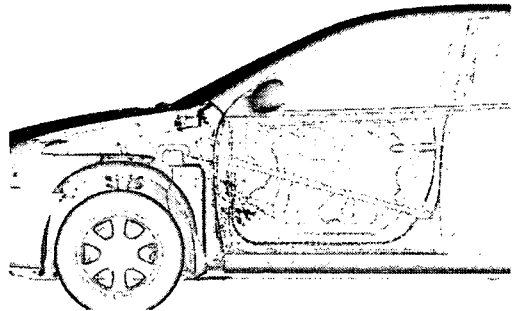


Fig. 7 도어 주변 먼지적체 위치

#### 4.3 트렁크 주변 유동

트렁크 상부의 유동 구조를 Fig. 8 에 표시하였다.

루프를 타고 넘어 온 유동은 뒤 유리를 따라 내려오면서 박리유동 영역과 부착유동 영역으로 나뉜다. 박리영역에서는 뒤 유리 하부에 박리영역이 생겨 트렁크 리드 패널 내부 배수로로 유동진입 발생하지 않으나 부착유동에서는 배수로로 직접 유동이 진입한다. 배수로상 박리유동과 부착유동의 경계지점을 기점으로 서로 반대 방향의 유동이 배수로를 타고 흐르게 되며 박리영역에서는 박리영역의 회전유동에 휩쓸려 나오는 유동 현상이 있고 부착유동 영역에서는 측 방향의 유동이 적체되면서 유량이 배수로를 넘쳐 흘러 주류에 합류한다.

부착유동 영역의 유동은 트렁크 선단 공동소음의 발생원인이 된다. 배수구 공간으로 밀려드는 유동은 순간적인 밀도의 변화를 야기하고 공동소음의 발생 구조

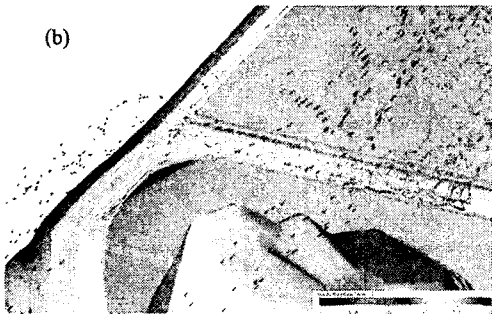
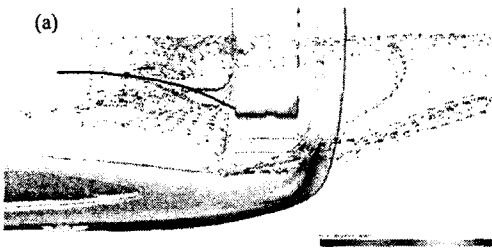


Fig. 8 트렁크 상부 유동구조

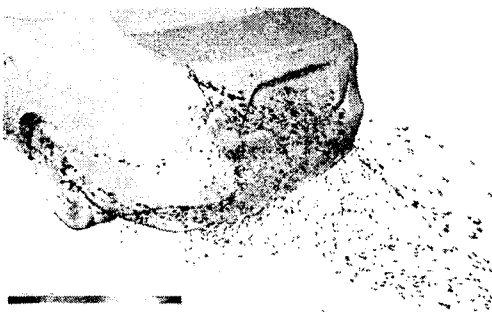


Fig. 9 트렁크 후방 유동구조

트렁크 측 하방에서는 보다 복잡한 유동이 형성된다. 차량 하부와 측면 부를 따라 흐르는 주류는 Fig. 9 과 같이 차량 후미 부에 이르러 차량 후류에 크게 휘감기는 구조를 나타낸다. 후류에 휘감기는 유동 중 일부는 트렁크 리드 패널 내부로 빨려 들어 간 후 Fig. 8 의 상부에서 내려 온 유동과 부딪혀 트렁크 리드 측면으로 빠져 나오고 주류와 합류한다.

이 유동은 Fig. 10 과 같이 차량 하부와 측면에서 날아온 먼지를 쌓이게 만드는 주요 원인으로 추정할 수 있다.

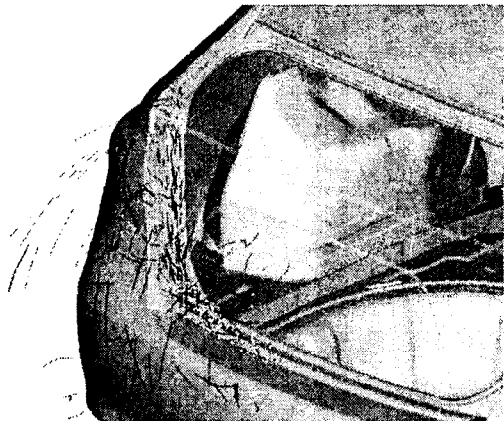


Fig. 10 트렁크 부 먼지 쌓임 부위

## 5. 결 론

PowerFLOW 를 이용하여 접근이 곤란한 영역에서의 유동구조를 파악하였다. 난접근 영역에서의 유동은 공력소음, NVH, 먼지 쌓임 등 차량의 상품성과 관련한 개선 시 반드시 고려해야 할 사항이다. 난접근 영역 유동해석을 통해 얻을 수 있는 결론을 부위별로 정리하면 다음과 같다.

(1) 팬더패널 내부 유동은 카울 사이드로 들어오는 유동과 어퍼 사이드 멤버를 타고 넘어오는 경로가 있으며 이 중, 카울사이드로 들어오는 유동은 유속이 빠르고 유량도 많기 때문에 공력소음과 먼지 유입의 주된 통로 역할을 한다.

(2) 도어 주위 유동구조를 파악한 결과, 도어 주변을 맴도는 유동장이 존재하며 이는 도어 실링 성능을 악화시키는 원인이 된다. 또한 엔진 룸과 차량 전방으로부터 유동에 실려온 먼지 쌓임의 원인이 된다.

도어 내부 유동은 도어 배수구의 위치 별로 유입구와 배출구로 대별되며 핸들 부 틈새도 유동 배출구의 역할을 한다.

(3) 트렁크 주변 유동은 뒤 유리를 타고 내려오는

유동이 벽면에서 박리유무에 따라 다른 유동특성을 갖게 된다. 부착 유동의 경우, 공기저항계수의 개선에는 도움이 되겠지만 공동소음의 발생원인이 될 수 있다.

차량하부와 측면에서 불어오는 유동은 트렁크 하부 먼지적재의 원인이다.

## 후 기

본 연구는 *exa-korea* 의 협조로 진행되었으며 이에 사의를 표합니다.

## 참 고 문 헌

(1) Bhatnagar, P., Gross, E. and Krook, M., " A model for collision processes in gases. I. small amplitude processes in charged and neutral one-component system" , Pys. Rev., vol.94, pp.511-525, 1954.

(2) Chen, H., " Extensions in Turbulent Wall Modeling" Exa internal publication, 1998.

(10) Chen, S. and Doolen, G., " Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows," Ann. Rev. Fluid Mech., vol.30, pp.329-364, 1998.

(3) Chen S., Chen, H., Martinez, D. and Matthaeus, W., " Lattice Boltzmann model for simulation of magneto hydrodynamics," Phys. Rev. Lett., 67 (27), 1991, pp. 3776-3779.

(4) Frisch, U., Hasslacher, B. and Pomeau, Y., " Lattice-gas Automata for the Navier-Stokes Equations," Phys. Rev. Lett., Vol. 56, 1986, pp.1505-1508.

(5) Qian, Y., d' Humieres, D. and Lallemand, P., " Lattice BGK Models for Navier-Stokes Equation," Europhys. Lett., 17, 1992, pp. 479-484.

(6) Rubinstein, R. and Barton, J. M., " Nonlinear Reynolds Stress Models and the Renormalization Group" Phys. Fluids A, Vol. 2, No. 8, 1990. pp. 1472-1476.