

## Defrost nozzle의 영향을 고려한 3차원 승용차 실내 유동 및 온도 해석

3-D Numerical analysis of flow and temperature field  
in the cabin of the automobile with defrost nozzle discharged air

\*강규태\*<sup>1)</sup>, 배인호<sup>1)</sup>, 황지은<sup>1)</sup>, 박원규<sup>2)</sup>, 장기룡<sup>2)</sup>

Kyu-Tae Kang, In-Ho Bae, Ji-Eun Hwang, Warn-Gyu Park

The velocity and temperature profiles in the cabin of the automobile affect greatly to the comfort of the passenger. In this paper, the three dimensional flow and temperature analysis in the cabin of the automobile which is geometrically complicated was performed to investigate and predict the velocity and temperature profile. The three dimensional Navier-Stokes code used in this case was validated by performing of a 1/5 experimental scale model vehicle flow analysis successfully. The temperature field of cavity was analyzed for Energy-equation code validation. The comparison of the results are made with the pulished computational data and give a coincided one.

## 1. 서론

자동차가 점점 고급화 될 수록 안락한 실내와 쾌적한 공조 시스템을 요구하게 된다. 이러한 요구를 해결하기 위해서는 자동차 실내에 대한 정확한 유동해석이 선행되어야 하며 또한 공조 시스템에서 공급되는 열원에 대한 실내의 온도분포에 대해서도 해석이 되어야 한다. 자동차 내부의 제상성능 및 공조시스템 성능평가를 위한 연구들은 많이 수행되어 왔으나 주로 단순화된 모델에 대한 실험과 계산이 이루어졌으며, 실제 자동차 내부의 CAD 데이터를 사용하여 정확한 형상에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히 근래에는 수출법규가 강화됨에 따라 제상성능의 중요성이 더욱 증대되고 있는데 제상성능은 defrost nozzle과 더불어 자동차 내부 특히 전방유리면과 c/pad 형상에 따라 크게 영향을 받게 되므로 내부의 정확한 형상에 대한 유동 및 온도 해석이 요구된다고 하겠다. 이와 관련하여 Komoriya등[1,2]이 1/5 scale 모델차량에 대하여 실험 및 수치해석을 한 바 있으며, Okada등[4]이 실제차량에 대하여 수치해석한 바 있다.

본 연구에서는 실제 차량 내부 형상 데이터(CATIA 데이터)를 이용하여 20개의 블록으로 격자를 구성함으로써 실제 형상에 최대한 일치하는 격자를 구성하였고, 본연구에서 사용된 프로그램의 검증에 위해 단순자동차 모형에 대한 선행 연구결과와 비교하여 타당성 검토를 하였다. 프로그램의 타당성 검토후에 실제 defrost nozzle에서 분사되는 유동정보를 사용하여 내부 유동 및 온도장을 계산하였다.

## 2. 지배방정식

## 2.1 유동장 지배방정식

유동해석을 위한 지배방정식으로 3차원 비정상상태의 비압축성 점성유동의 Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 이를 무차원화하여 일반화된 곡선 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{E} - \bar{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\bar{F} - \bar{F}_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\bar{G} - \bar{G}_v) = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\bar{q}$  는 유동벡터,  $\bar{E}$ ,  $\bar{F}$ ,  $\bar{G}$  는 대류항이며,  $\bar{E}_v$ ,  $\bar{F}_v$ ,  $\bar{G}_v$  는 점성항을 의미한다. 식 (1)의 해를 구하기 위해 시간진행(Time Marching) 방법을 사용하였다. 우선, 운동량 방

- 1) 부산대학교 기계공학과 대학원
- 2) 부산대학교 기계공학부
- 3) 현대자동차

정식만을 생각해 보면 이 방정식은 포물선형 편미분 방정식이므로 아래와 같이 시간진행(Time Marching)방법을 이용하고, Newton 반복법을 적용하여 선형화 시키면 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{\Delta \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} \bar{A} + \frac{\partial}{\partial \eta} \bar{B} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \bar{C}\right) \Delta \bar{q} = \omega \bar{R}^{n+1,k} \quad (2)$$

여기서  $\omega$ 는 완화계수(relaxation factor)이고  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$ 는 Jacobian 행렬로 다음과 같다. 그리고, 여기서  $\bar{R}^{n+1,k}$ 는 잔류벡터라 불리는 항으로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \bar{R}^{n+1,k} = & -\frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1,k} - \bar{q}^n) \\ & -(\delta_\xi \bar{E}^{n+1,k} + \delta_\eta \bar{F}^{n+1,k} + \delta_\zeta \bar{G}^{n+1,k}) \\ & +(\delta_\xi \bar{E}_v^{n+1,k} + \delta_\eta \bar{F}_v^{n+1,k} + \delta_\zeta \bar{G}_v^{n+1,k}) \end{aligned} \quad (3)$$

연속 방정식은 비압축성 유동해석을 효율적으로 수행하기 위해 MAC(Marker-and-Cell) 방법의 개념을 이용하면,

$$p^{n+1,k+1} - p^{n+1,k} \equiv \Delta p = -\beta(\nabla \cdot V) \quad (4)$$

여기서  $\beta$ 는 완화계수(relaxation factor)를 의미하며, 난류 유동장 해석을 위해 Baldwin-Lomax 난류모델이 사용되었다.

## 2.2 온도장 지배방정식

3차원 비정상상태 에너지 방정식을 사용하였고, 대류항은 2차 정확도를 가지는 중앙차분을 점성항은 4차의 정확도를 가지는 역시 중앙차분을 시행하였으며, 중앙차분으로 인한 수치적 불안정성을 막기 위한 4차 정확도의 explicit 댐핑항과 2차 정확도를 갖는 Implicit damping을 추가하였다.

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla h - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (5)$$

여기서  $h$ 는 엔탈피(J/kg) 이다

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 코드 검증

#### 3.1.1 유동코드 검증

본 연구에서 Defrost 노즐유동에 의한 실제 자동차 내부의 유동해석을 수행하기 위한 프로그램의 검증에 위해 선행연구[1,2]에서 제시된 1/5 scale 자동차 모델과 유동조건을 사용하였다. 검증을 위한 유동장의 레이놀즈(Re)수는 7100이며 선행연구에서 제시된 노즐 입구 길이 0.006 m, 노즐토출속도 3.5 m/sec, 공기점성계수  $1.5 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/sec를 기준으로 하였다.

#### 3.1.1.1 격자계구성

대수방법을 이용하여 총 13개의 독립된 다중블럭(Multi-block)으로 격자를 구성하고, 격자의 조밀도(Quality)를 높이기 위해 730,800 개의 격자수와 Elliptic기법을 적용하여 직교성(Orthogonality)을 높이고 과도한 찌그러짐(Skewness)을 줄여 수치적 오차를 감소시켰다. 또한 자동차 전방유리면(Windshield)과 상단벽면에 격자를 밀집시킴으로서, Defrost노즐에서 나오는 주유동을 정확히 해석할 수 있도록 하였다.

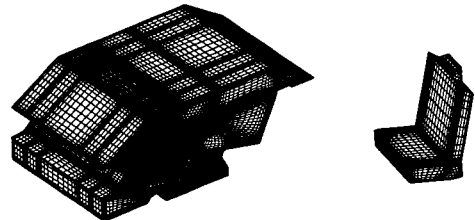


Fig. 1 1/5 scale model vehicle grid system

#### 3.1.1.2 초기조건 및 경계조건

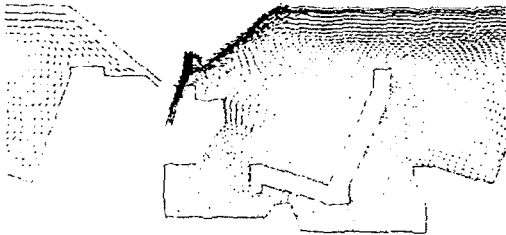
내부유동을 계산하기 위한 초기조건은 노즐출구 속도의 10%로 주었고, 자동차실내의 초기압력은 대기압 조건을 주었다. 선행연구에서 사용한 노즐 토출속도를 그대로 실내유입 속도조건으로 사용하였으며 실내유입 압력조건은 Neumann 조건을 사용하였다. 그리고 실내유출 속도조건은 유량 일정조건을 사용하여 출구속도를 결정하였다. 출구압력조건은 역시 Neumann조건을 부여하였다. 블록간 경계에서는 격자계를 일치시켜 블록간 선형보간을 수행하였으며, 자동차내부 표면에서의 속도는 점착 조건(No slip condition)을 사용하였고, 자동차 내부가 대칭형이므로 계산시간을 줄이기 위해 대칭조건(Symmetric condition)을 사용하였다.

#### 3.1.1.3 해석결과

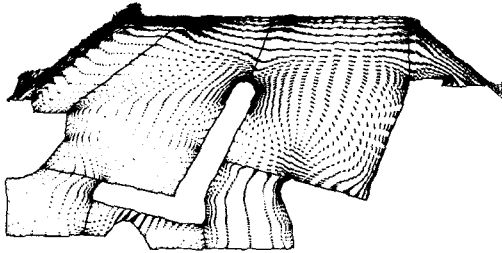
Fig.2는 실내폭의 1/4에 해당되는 평면(운전석의 중앙면)에서의 속도벡터를 선행 수치연구 결과와 본 연구결과를 함께 나타내었다. 노즐에서 분사된 유동이 전방유리면에 잘부착되고 있으며 이러한 흐름은 실내천정을 지나서 후방의 공기유출구로 잘 빠져나가고 있다. 이러한 주유동에 의해 뒷좌석부분에서 큰 와(Vortex)가 생성됨을 볼 수 있고, 앞좌석과 실내 하단부분은 유동이 거의 미미함을 알 수가 있다. 정량적인 비교는 자료의 부족으로 이루어지지 못했지만



정성적으로는 선행연구의 실험 및 수치결과와 잘 일치하는 결과를 얻을수 있었고 본연구에서 사용되는 실내 유동해석 프로그램의 타당하다고 결론 지었다.



(a) Published result



(a) Present result

Fig. 2 Velocity Profile

### 3.1.2 온도장코드 검증

본 연구에 사용된 온도장 해석 프로그램을 검증하기 위해서 3차원 cavity 형상에 대해 계산을 수행하여 선행결과인 Leonard[3]의 결과와 비교하였다.

#### 3.1.1.1 격자계구성

격자는  $41 \times 41 \times 41$ 을 사용하였으며, Fig. 3 은 격자의 중앙단면을 보여준다.

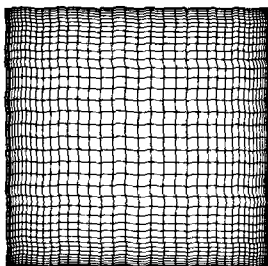
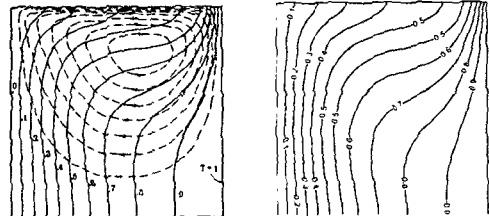


Fig. 3 Grid system

#### 3.1.1.2 해석결과

Peclet 수는 Reynolds 수와 Prantl 수의 곱으로 정의되며, Fig.4은 무차원 Reynolds수 200 Prantl수

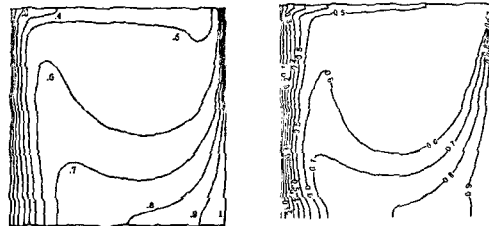
0.25이다. Fig.5는 Reynolds수는 1000 이고 Prantl 수는 1.이다. 비교적 등온선이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.



(a) Leonard' result

(b) Present result

Fig. 4 Temperature contours of Pe=50



(a) Leonard' result

(b) Present result

Fig. 5 Temperature contours of Pe=1000

## 3.2 자동차 실내 유동장 및 온도장 해석

### 3.2.1 실내 유동장 해석

#### 3.2.1.1 격자계구성

복잡한 형상을 유지하고, 정확한 유동해석을 위해 총 20개의 독립된 다중블럭으로 구성하였고, 총격자수는 484,400개로 만들어졌다.(Fig.6) 주어진 Catia데이터를 이용하여 Gridgen으로 격자를 생성하여, 최대한 실제형상에 가깝게 격자를 구성하였으며, 실내바닥면은 프로그램 검증 과정에서 Defrsot 토출유동에 의한 영향이 거의 미미하여 단순평면으로 구성하였다.

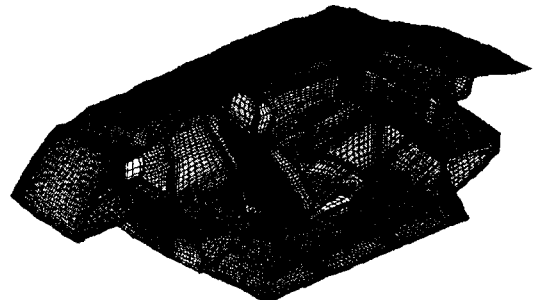


Fig. 6 Automobile cabin grid system

3.2.1.2 초기조건 및 경계조건

내부유동을 계산하기 위한 초기조건은 검증단계와 동일한 노즐출구 속도의 10%로 주었고, 자동차실내의 초기압력은 대기압 조건을 주었다. 노즐에서 계산된 노즐 출구속도를 Bilinear Interpolation을 이용하여 실내유입 속도조건으로 사용하였으며, 실내유입 압력조건은 Neumann 조건을 사용하였다. 그리고 실내유출 속도조건은 유량 일정조건을 사용하여 출구속도를 결정하였다. 출구압력조건은 역시 Neumann조건을 부여하였다. 블록간 경계에서는 격자체를 일치시켜 블록간 선형보간을 수행하였으며, 자동차내부 표면에서의 속도는 점착 조건(No slip condition)을 사용하였고, 자동차 내부가 대칭형이므로 계산 시간을 줄이기 위해 대칭조건을 사용하였다.

3.2.1.3 해석결과

Fig.7은 운전석 중앙단면(모델자동차에서와 동일)의 속도벡터를 나타낸다. (a)는 전체적인 속도 크기를 보여주고 있고, defrost 노즐출구에서 토출된 주유동이 다른 유동들에 비교하여 크게 보이고 있으며 전방유리면과 앞좌석 부분까지는 벽면에 밀착되어 진행되나 뒷좌석 부분에서 이탈하는 모습이 보여진다. 이러한 경향은 앞좌석부분의 형상때문인 것으로 판단되고, Okada [4] 등이 연구한 것과 동일한 양상이다. 앞좌석 밑의 유동은 전방으로 향해 다시 노즐토출주유동으로 진행되어가는 모습이다. 내부전체적으로 주유동에 의해 큰 와류형태를 보여주고 있다.

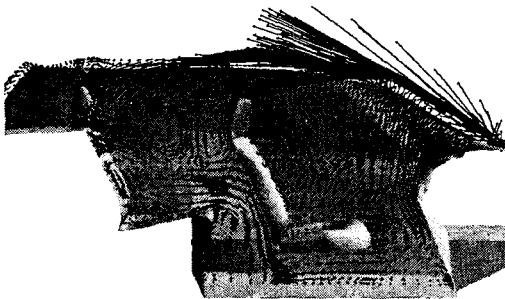


(c) Velocity vector of rear seat

Fig. 7 Velocity pattern in the symmetry plane

(b)는 전방유리면의 속도벡터를 확대하여 본 경우로 전방유리면에 잘부착된 속도벡터를 볼 수가 있다.

(c)는 뒷자석의 속도벡터를 확대하여 본경우로 유동이 벽면에서 분리되고 있으며, 뒷좌석에서 이탈된 유동은 작은 와류를 형성하고 있다. 모델링 차량을 수치해석 했던 경우와 같은 큰 와류는 보이지 않고 있다. 이는 defrost 노즐출구에서 토출된 유동이 균일하지 않고 실제 수치해석된 결과를 부여하였고, 이때 노즐토출유동중 측면방향으로도 비교적 큰 유동이 토출됨으로 인해 뒷좌석의 유동이 다소 복잡해졌다. Fig.8, Fig.9에서 측면을 따라가는 큰유동을 자세히 관찰할 수가 있다.



(a) Velocity vector in the symmetry plane

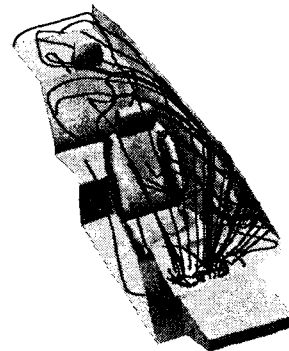
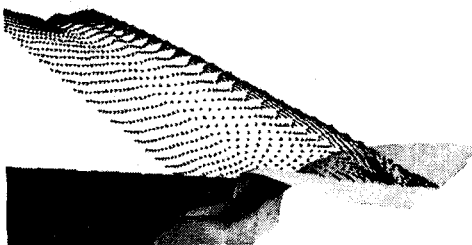
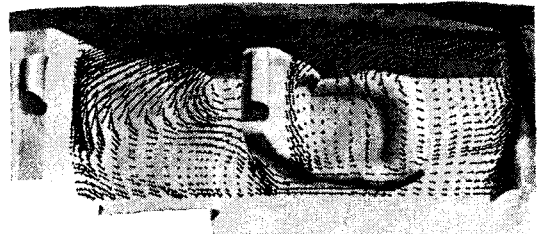


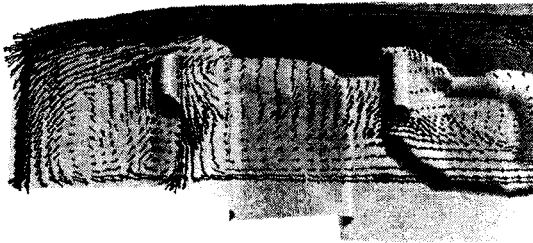
Fig. 8 Stream line



(b) Velocity vector of Winshield



(a)



(b)

Fig. 9 Velocity profile of a transverse section

3.2.2 실내 온도장 해석

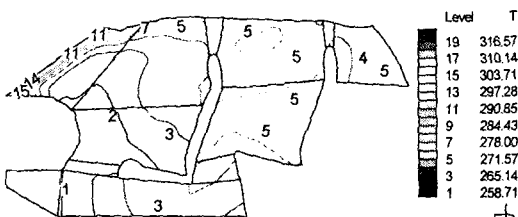
강제대류가 지배적인 유동장의 온도해석에서는 정상상태의 유동장 해를 해석한 후 그 해를 이용하여 온도장을 해석하는 것이 계산시간의 효율을 높일 수 있다.

3.2.2.1 초기조건 및 경계조건

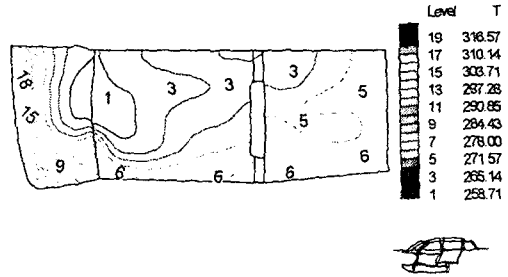
자동차 실내의 정상상태 유동장 해석결과를 이용하여 온도장 해석을 실시하였다. 본 계산에 사용된 무차원 Prantl수는 0.707이다. 초기조건은  $-18^{\circ}\text{C}(253\text{K})$ 로 두었으며, 경계조건은 노즐출구는  $50^{\circ}\text{C}(323\text{K})$ , 모든벽면은 단열조건을 부여하였다.

3.2.2.2 해석결과

Fig.10.(a)에서는 수직단면(운전석 중앙단면)의 실내온도분포를 나타내고 있으며, 노즐에서 공급된 고온의 공기가 실내의 전방유리창을 앞좌석의 상부를 지나면서 급격한 온도전달이 이루어짐을 볼 수 있고, 뒷좌석은 측면의 강한 유동으로 인하여 온도가 약간 상승된 모습을 보이고 있다. 앞좌석 근방은 미약한 유동으로 인하여 낮은 온도를 유지하고 있다. Fig.10.(b)에서는 측면쪽의 강한 유동으로 전파된 온도분포를 확인할 수가 있다.



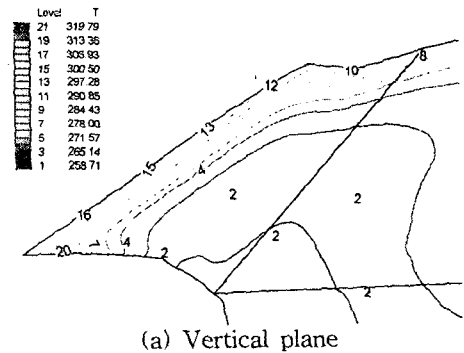
(a) Vertical plane



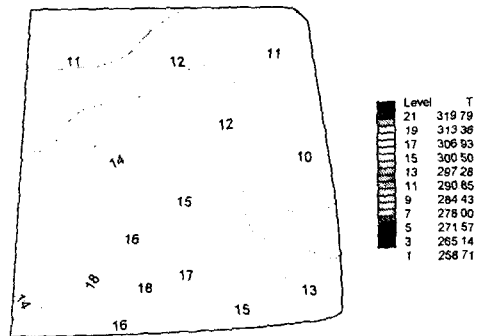
(b) Transverse plane

Fig. 10 Temperature field in the cabin

Fig.11은 전방유리면의 온도분포를 보인다. Fig.11.(a)에서는 전방유리면을 통과하면서 보이는 온도변화를 관찰할 수가 있으며, Fig.11.(b)에서는 노즐에서 토출된 유동이 유리면에 부딪치면서 보이는 유리면 온도분포를 보이고 있다.



(a) Vertical plane



(b) On windshield

Fig. 11 Temperature distribution on the windshield

4. 결론

본 연구에서는 Defrost 노즐에서 토출되어 나온 유



동으로 인한 자동차 실내 내부유동 및 온도 해석을 수행하였다. 모델차량의 경우 Komoriya 등[1,2]과 일치하는 결과를 도출하였고 실제차량 대해서는 Okada[4] 등과 유사한 결과를 도출하였다. 모델차량의 경우는 주어진 조건을 동일하게 부여할 수 있었지만, 실차량의 경우는 차량형상이 틀리고, 특히 노즐에서 토출되어 나오는 유동이 틀림으로 인하여 내부유동의 형태가 다소 차이점을 보이고 있으나, 전체적인 경향은 일치하는 모습이다. 본차량의 경우는 측면쪽으로 토출이 강하게 됨으로 인하여 뒷좌석에 수직상하 방향의 와류가 작아지고, 좌우방향의 큰와류가 형성되고 있다. 차량의 형상뿐 아니라, 노즐토출구에서의 속도분포에 따라서 실내유동 및 온도분포에 큰영향을 미쳤다.

성능 해석“, 한국전산유체 공학회 2001년도 춘계 학술대회, (1996). pp. 176-180

### 참고문헌

[1] Tohru Komoriya, Toshio Kobayashi, Nobuyuki Taniguchi, "Numerical Simulation of the Flow in a Vehicle Passenger Compartment using General Co-Ordinate System with Finite Volume Method" JSAE Review v.12, n.3, (1991)

[2] 허남건, 조원국, "승용차 탑승내부의 난방, 냉방 및 성애제거 모드에 대한 3차원 유동해석" 한국자동차공학회 논문집 제1권 제2호 (1993), pp.60-68

[3] B.P. Leonard, "A stable and accurate con- vective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation", computer methods in applied mechanics and engineering, vol. 19, (1979), pp. 59-98,

[4] Yoshihiro Okada, Takahide Nouzawa, Takaki Nakamura, Takashi Kamioka, Yoshinori Nakamura, "The Prediction of the Air Conditioning Flow by Employing an Accurate Heat-transfer Model", Proceedings of Workshop on CFD in Automobile Engineering (2000), pp. 55-60,

[5] Park, W. G. and Sankar, L. N., "A Technique for the Prediction of Unsteady Incompressible Viscous Flows," AIAA Paper 93-3006, (1993).

[6] Park, W.G., Park, M.S., and Hwang, J.E., "열용량법을 이용한 자동차 전방유리면의 제상