

논문

Defrost nozzle의 토출 공기에 의한 승용차 실내 유동장 및 온도장 해석

강규태^{*1}, 박금성^{*1}, 박원규^{*2}, 장기룡^{*3}

3-D Numerical analysis of flow and temperature field of automobile cabin by discharged air from defrost nozzle

K. T. Kang, K. S. Park, W. G. Park, K. R. Jang

The velocity and temperature profiles in the cabin of the automobile affect greatly the comfortableness of passengers. In this paper, the three dimensional flow and temperature analysis in the cabin of real automobile have been performed. The three dimensional Navier-Stokes equation solver was validated by comparing with the other numerical data of a 1/5 scale model. The temperature field of cavity was also analyzed for the validation of energy equation solver. After the code validation, the numerical analysis of real field of flow and temperature of an automobile was performed and the present result provides the insight of flow and temperature field of the inside of cabin.

Key Words : 자동차 실내(Automobile Cabin), 유동 해석(Flow Field Analysis), 온도장 해석(Temperature Field Analysis), 내비어-스톡스 방정식(Navier-Stokes Equation)

1. 서 론

자동차가 점점 고급화 될수록 안락한 실내와 쾌적한 공조 시스템을 요구하고 있는데, 이러한 요구를 충족시키기 위해서는 자동차 실내에 대한 정확한 유동해석이 선행되어야 하며 공조 시스템에서 토출되는 열원에 의해 실내의 온도 변화에 대해서도 해석이 수행되어야 할 것이다. 그러한 관점에서 자동차 전면 유리창에 발생하는 성애의 제상성능 및 공조시스템 성능평가를

위한 연구들이 많이 수행되어져 왔으나 주로 단순화된 모델에 대한 실험과 계산이 이루어졌으며, 실제 자동차 내부의 CAD표면 데이터를 사용하여 정확한 형상에 대한 연구는 아직 국내에서 미흡한 실정이었다. 특히 근래에는 수출법규가 강화됨에 따라 전면 유리창에 발생하는 성애의 제상성능 중요성이 더욱 증대되고 있는데, 제상성능은 defrost nozzle과 더불어 자동차 내부, 특히 전방 유리면과 c/pad 형상에 따라 크게 영향을 받게 되므로 내부의 정확한 형상에 대한 유동 및 온도해석이 요구된다고 하겠다. 이와 관련하여 Komoriya등[1]과 허남건등[2]이 1/5 scale 모델차량에 대하여 실험 및 수치해석을 한 바 있으며, Okada등[4]이 실제차량에 대하여 수치 해석한 바 있다.

* 2002년 3월 20일 접수

^{*1} 부산대학교 기계공학과 대학원

^{*2} 부산대학교 기계기술 연구소

^{*3} 현대자동차 기능시험 1팀

본 연구에서는 실제 차량 내부 형상 데이터 (CATIA 데이터)를 이용하여 20개의 블록으로 다중 격자를 구성하였고, 본 연구에서 사용된 프로그램의 검증을 위해 단순 자동차 모형에 대한 선행 연구결과와 비교하여 타당성 검토를 하였다. 프로그램의 타당성 검토 후에 실제 defrost nozzle에서 분사되는 유동정보를 사용하여 내부유동 및 온도장을 계산하였다.

2. 지배방정식

2.1 유동장 지배방정식

유동해석을 위한 지배방정식으로 3차원 비정상 상태의 비압축성 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 반복 시간진행 (Iterative time marching) 방법[4,5]을 사용하였다. 우선, 운동량 방정식만을 생각해 보면 이 방정식은 포물선형 편미분 방정식이므로 아래와 같이 시간진행 (Time marching) 방법을 이용하고, Newton 반복법을 적용한 후 국부적 선형화를 시키면 다음과 같은 식을 얻는다.

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

여기서 ω 는 완화계수(relaxation factor)이고, $\Delta \tau$ 는 time step이다. 그리고 \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} 는 Jacobian 행렬로 다음과 같다.

$$\bar{A} = \frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{E} - \bar{E}_v); \quad \bar{B} = \frac{\partial}{\partial \eta} (\bar{F} - \bar{F}_v);$$

$$\bar{C} = \frac{\partial}{\partial \zeta} (\bar{G} - \bar{G}_v)$$

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) 방법[6]의 개념을 이용하면,

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

여기서 β 는 완화계수를 의미한다. 난류 유동장 해석을 위해 Baldwin-Lomax 난류모델이 사용되어졌다.

2.2 온도장 지배방정식

자동차 실내 온도장 해석을 위해서 다음의 3차원 비정상상태 에너지 방정식을 사용하였다.

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

여기서 k 는 열전달율, T 는 온도(K)를 나타내며, \vec{u} 는 속도벡터를 나타낸다. 온도장 해석은 유동장이 비압축성이라고 가정하여 식(2)와(4)에서 속도 u, v, w 를 구한후 이것을 식(5)에 대입하면 식(5)는 유동 방정식인 식(1)에 독립적이 되며 미지수는 오직 온도 T 만 가지게 되는 scalar 편미분 방정식이 되며 포물선형 편미분 방정식이므로 시간행진법을 사용하면 쉽게 풀 수 있다. 식(5)를 무차원하여, 일반 곡선좌표계로 나타내면

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \tau} + \frac{\partial (U \hat{T})}{\partial \xi} + \frac{\partial (V \hat{T})}{\partial \eta} + \frac{\partial (W \hat{T})}{\partial \zeta} \\ = \text{RHS} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 \hat{T} 는 $\hat{T} = \frac{T}{T_0}$ 이며 U, V, W 는 contravariant 속도로써 다음과 같이 정의된다.

$$U = \xi_t + u \xi_x + v \xi_y + w \xi_z$$

$$V = \eta_t + u \eta_x + v \eta_y + w \eta_z$$

$$W = \zeta_t + u \zeta_x + v \zeta_y + w \zeta_z$$

$$\begin{aligned} \text{RHS} = & \frac{\gamma}{J \text{RePr}} [(\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2) \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \xi^2} \\ & + (\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2) \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \eta^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + (\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2) \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \zeta^2} \\
 & + 2(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y + \xi_z \eta_z) \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \xi \partial \eta} \\
 & + 2(\eta_x \zeta_x + \eta_y \zeta_y + \eta_z \zeta_z) \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \eta \partial \zeta} \\
 & + 2(\xi_x \zeta_x + \xi_y \zeta_y + \xi_z \zeta_z) \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \xi \partial \zeta}]
 \end{aligned}$$

를 의미하며 AF+ADI방법을 이용하여 다음과 같이 해를 구한다.

Step 1:

$$[I + \Delta \tau \delta_\epsilon U] \Delta \hat{T}^* = [-\delta_\epsilon (U \hat{T}^n)$$

$$- \delta_\eta (V \hat{T}^n) - \delta_\zeta (W \hat{T}^n) + \text{RHS}^n] \Delta \tau$$

Step2: $[I + \Delta \tau \delta_\eta V] \Delta \hat{T}^{**} = \Delta \hat{T}^* \quad (7)$

Step3: $[I + \Delta \tau \delta_\zeta W] \Delta \hat{T} = \Delta \hat{T}^{**}$

Step4: $\hat{T}^{n+1} = \hat{T}^n + \Delta \hat{T}$

$\delta_\epsilon, \delta_\eta, \delta_\zeta$ 은 수치적 차분화는 중앙차분을 이용하였으며, 중앙차분으로 인한 수치적 불안정성을 막기 위해 4차 정확도의 외재적 인공점성항과 2차 정확도를 갖는 내재적 인공점성항을 추가하였다.

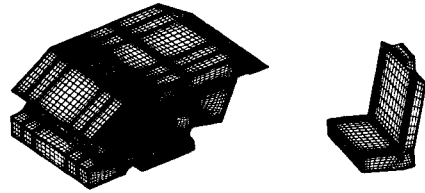
3. 결과 및 고찰

3.1 코드 검증

3.1.1 유동코드 검증

자동차 실내의 유동해석을 위한 프로그램 검증을 위해 선행연구[1,2]에서 제시된 1/5 scale 자동차 모델을 사용하였다. 검증을 위한 유동장의 레이놀즈(Re)수는 7100이며 선행연구에서 제시된 노즐 입구 길이 0.006 m, 노즐 토출 속도 3.5 m/sec를 사용하였다. 대수방법을 이용하여 총 13개의 독립된 다중 블록으로 격자를 구성하였고 총 격자수는 730,800이다. 격자의 질(Quality)를 높이기 위해 각 블록은 Elliptic 편미분 방정식 격

자 생성기법을 적용하여 직교성(Orthogonality)을 높이고 과도한 찌그러짐(Skewness)을 줄여 수치적 오차를 감소시킬 수 있도록 하였다. 또한 자동차 전방유리면(Windshield)과 상부벽면에 격자를 밀집시킴으로서, defrost노즐에서 나오는 주 유동을 정확히 해석할 수 있도록 하였다.



(a) Cabin

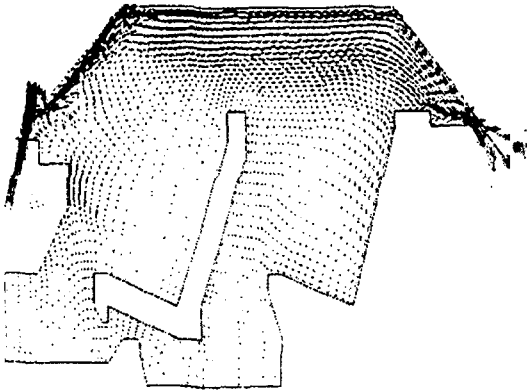
(b) Chair

Fig. 1 Grid system of 1/5 scale model vehicle

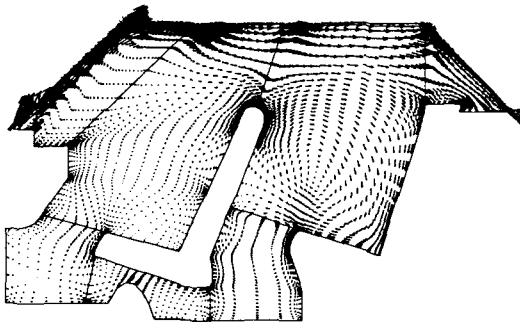
내부 유동을 계산하기 위한 초기조건은 정지 상태의 자동차 실내조건을 주었다. 선행 연구에서 사용한 노즐 토출 속도를 그대로 실내유입 속도 조건으로 사용하였으며 실내 유입 압력조건은 Neumann 조건을 사용하였다. 그리고 실내 유출 속도조건은 유량 일정조건을 사용하여 출구속도를 결정하였다. 출구 압력조건은 역시 Neumann 조건을 부여하였다. 블록간 경계에서는 격자계를 일치시켜 블록간 Bilinear선형보간을 수행하였으며, 자동차 내부 표면에서의 속도는 점착 조건(No slip condition)을 사용하였고, 자동차 내부가 대칭형이므로 계산시간을 줄이기 위해 절반만 풀었다.

Fig.2는 실내폭의 1/4에 해당되는 평면(운전석의 중앙면)에서의 속도벡터를 선행 수치연구결과 [1]와 본 연구결과를 함께 나타내었다. 노즐에서 분사된 유동이 전방 유리면에 잘 부착되고 있으며 이러한 흐름은 실내 천장을 지나서 후방의 공기 유출구로 잘 빠져나가고 있다. 이러한 주유동에 의해 Fig.2(c)에서 보는 바와 같이 뒷좌석 부분에서 큰 와(Vortex)가 생성됨을 볼 수 있고, 앞좌석과 실내 하단부분은 유동이 거의 미미함을 알 수가 있다. 정량적인 비교는 자료의 부족으로

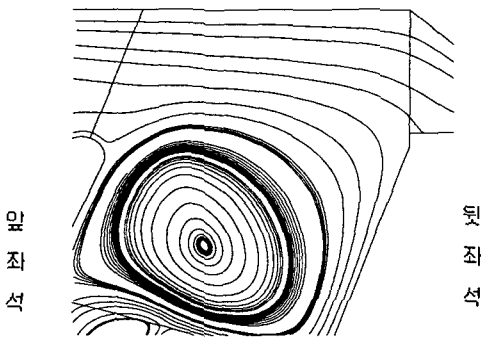
이루어지지 못하였지만, 정성적으로는 선행연구의 결과와 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.



(a) Published result [1]



(b) Present result



(c) streamline

Fig. 2 Velocity profiles of the interior a cabin

3.1.2 온도장코드 검증

본 연구에 사용된 온도장 해석 프로그램을 검증하기 위해서 3차원 driven cavity 형상에 대해 계산을 수행하여 선행결과와 비교하였다. 격자수는 $41 \times 41 \times 41$ 이며, Fig.3 은 격자의 중앙단면을 보여준다.

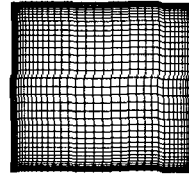
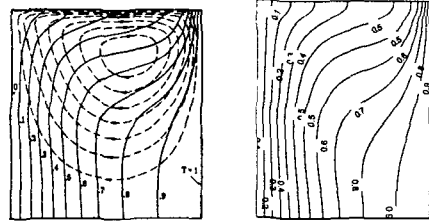


Fig. 3 Grid system of cavity

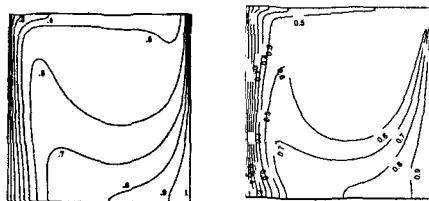
Fig.4와 5는 상하면은 단일조건이고 좌측면은 $T=0$ 이고 우측면은 $T=1$ 일때의 Peclet수가 50과 1000일 때의 등온선 그림을 Leonard⁽⁷⁾의 수치해석 결과와 비교한 그림으로 비교적 등온선이 서로 잘 일치함을 볼 수 있다.



(a) Leonard [7]

(b) Present

Fig. 4 Temperature contours at Pe=50



(a) Leonard [7]

(b) Present

Fig. 5 Temperature contours at Pe=1000

3.2 자동차 실내 유동장 및 온도장 해석

3.2.1 실내 유동장 해석

실제 자동차 실내의 복잡한 형상을 그대로 재현하고, 정확한 유동해석을 위해 실내의 전체 계산 영역을 총 20개의 독립된 다중블럭으로 구성하였고, 총격자수는 484,400개로 이루어졌다(Fig.6).

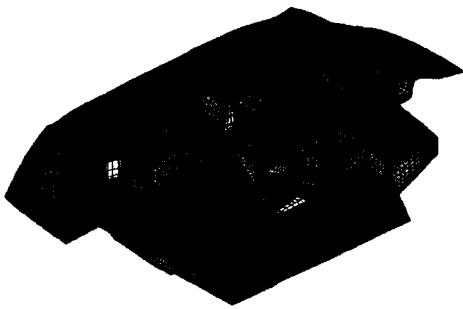
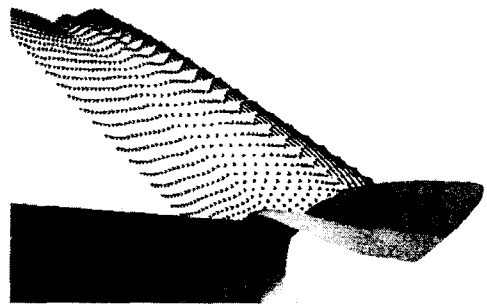


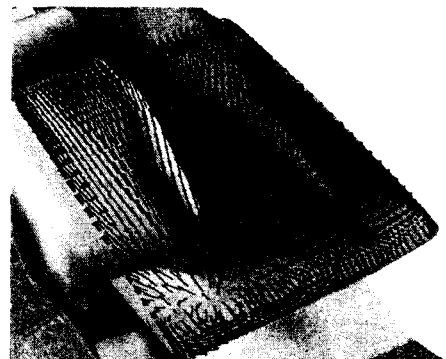
Fig. 6 Grid system of automobile cabin

Fig.7은 공기 유동의 속도벡터를 나타내는데 Fig.7(a)는 운전석 중앙 단면에서의 defrost 노즐을 통해서 토출된 공기가 전면 유리창을 따라서 위로 잘 발달된 제트 경계층 유동양상을 보여주고 있으며, Fig.7(b)는 defrost 노즐에서 토출되어 나온 공기가 전면 유리창 전체면을 어떻게 분포하면서 흘러가는지를 보여주고 있다. Fig.7(b)에 의하면 실내 대칭면 근처와 전면 유리창의 상방향 대각선 방향으로 큰 유속을 가지는 흐름을 볼수 있는데 이것은 defrost 노즐의 가이드 배인의 역할 때문이다. Fig.7(c)는 운전석 중앙 단면에서의 전체적인 속도벡터를 보여주고 있는데, defrost 노즐출구에서 강하게 토출된 유동이 전방 유리면과 앞좌석 부분까지는 비교적 벽면에 잘 밀착되어 진행되나 앞좌석 head-rest 뒷부분에서 큰 와류를 형성하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 경향은 Fig.2에서도 마찬가지로 었는데 이것은 앞좌석의 head-rest가 윗 천장을 따라 흐르는 defrost 토출류에 장애물 역할을 하게되고 윗천장과 head-rest사이의 좁은 영역을 통과한 토출류가 앞좌석 뒷부분 위의 급격한 확장 구간을 강하게 지나가면서 하부에서 유동박리에 의한 와류를 만들기 때문이다(Fig.7(d)참조). 그리고 뒷좌석 공

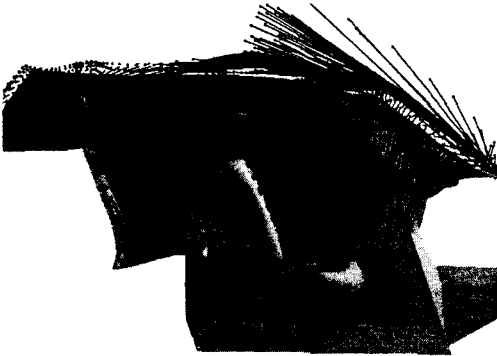
간에서 형성되어 있는 와류에 의해서 앞좌석 뒷면에 부딪힌 유동은 방향이 밑으로 꺾여져서 앞좌석 하부를 통해서 전방으로 향하면서 강한 defrost 토출 유량과 섞임을 볼 수 있다(Fig.7(c)와(e)참조). Fig.8은 좌석의 중간 위치와 바닥 근처의 실내 평면에서의 속도 벡터를 각각 그린 것으로, 특히 Fig.8(a)에서 보면 Fig.7(b)에서 대각선 상방향으로 토출된 유량이 앞좌석 좌측면과 측면 출입문 사이의 공간을 통해 뒷좌석까지 토출류가 흘러 들어가며 앞좌석 뒤쪽 공간에서는 유동 박리에 의한 와류 유동을 볼 수 있다. Fig.8(b)에서는 Fig.7(c)의 좌석 바닥면 근처 평면에 대한 속도 벡터를 그린 것으로 뒷좌석 상부에서 내려온 유동이 바닥면에 부딪히면서 앞좌석 쪽으로 흘러 들어감을 볼 수 있다. Fig.9는 defrost 노즐에서 나오는 토출 공기가 전면 유리창에 부딪혀서 흘러가는 형상과 자동차 실내 유동을 3차원 유선으로 보여주고 있다.



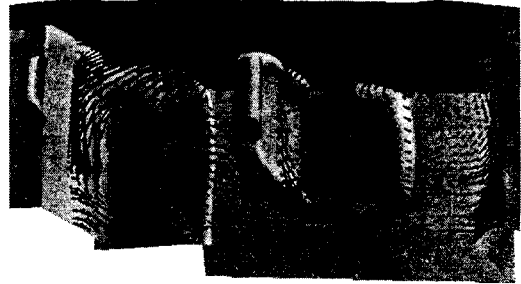
(a) Cross-sectional velocity vectors of windshield



(b) Velocity vectors the front on windshield



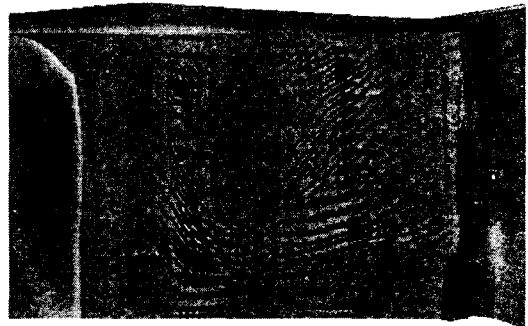
(c) Velocity vector in the symmetry plane



(a) In the center plane

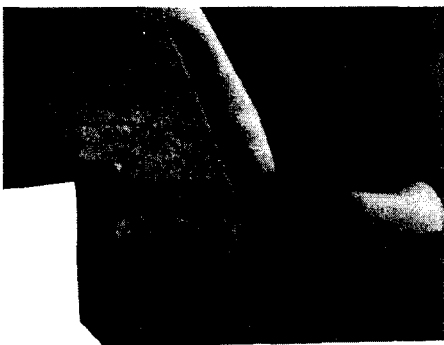


(d) Velocity vector of rear seat



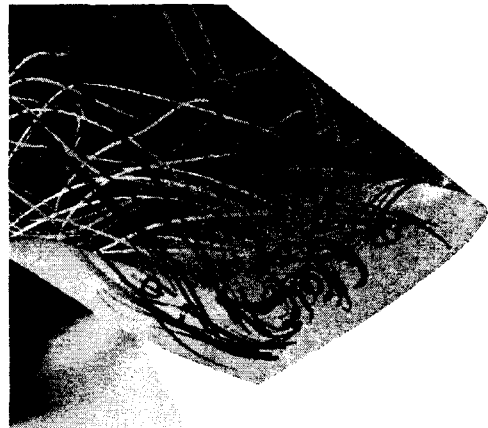
(b) Near the bottom surface

Fig. 8 Velocity profile of a transverse cross-section

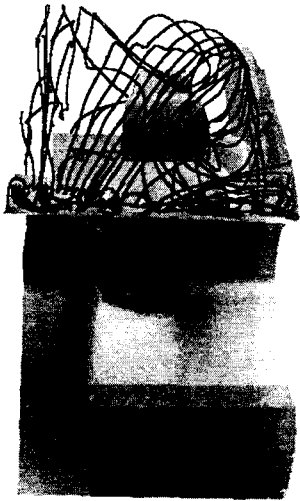


(e) Velocity vectors under the front of seat

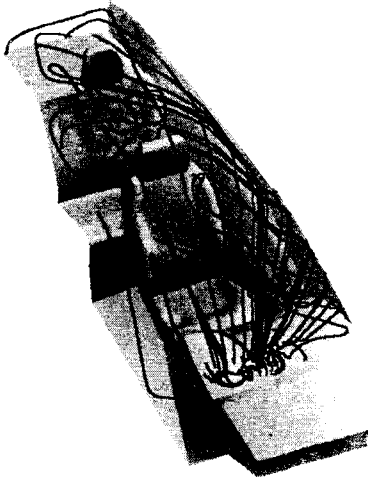
Fig. 7 Velocity pattern in the cabin



(a) Streamline near the defrost nozzle



(b) Streamline (Front view)



(c) Streamline (Top view)

Fig. 9 Pattern of streamline

Fig.10은 $T=-18^{\circ}\text{C}$ 의 실내에 $T=50^{\circ}\text{C}$ 의 공기가 토출을 시작한 후 약 20분 경과한 후의 자동차 전면 유리창의 온도 분포를 절대온도(K)로 나타낸 것으로 높은 온도 분포가 유리창 대각선 방향으로 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있는데 이것은 Fig.7(b)에서 보듯이 defrost 노즐을 통해 나온 더운 공기가 대각선 방향으로 강하게 토출되기 때문이다. Fig.11은 더운 공기 토출후 10분 경과 뒤의 운전석 중앙을 지나는 수직 단면과 자동차 실내 높이의 중간을 지나가는 평면 단면에서의 등온선을 보여 주고 있다. Fig.11(a)에서 보면 Fig.7(c)에서 보는 것과 같이 defrost노즐에서 토출되어진 더운 공기가 전면 유리창을 따라서 강하게 흐르기 때문에 전면 유리창 부근에서 급격한 온도구배를 확인할 수 있고 Fig.11(b)에서는 출입문측 앞쪽에서 비교적 온도가 높은 영역을 확인할 수 있는데 이것은 측면 후사경의 성에 제거를 위해 측면으로도 Defrost 노즐이 있어 이곳에서 더운 공기가 분출되고 있기 때문이다.

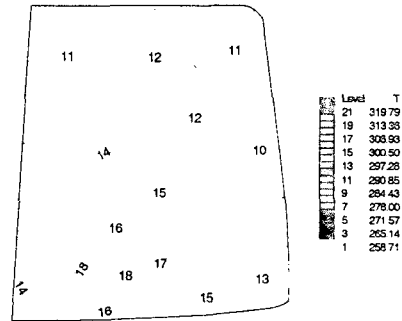
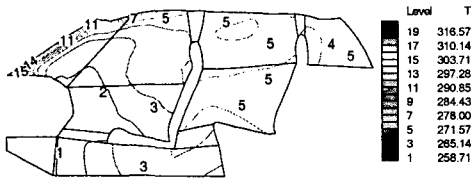


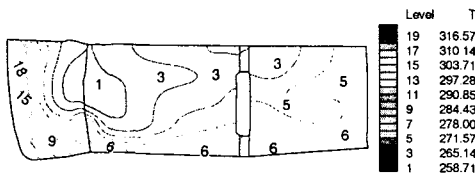
Fig. 10 Temperature distribution on the windshield

3.2.2 실내 온도장 해석

자동차 실내의 초기온도는 $T=-18^{\circ}\text{C}$ 로 두었으며, defrost 노즐을 통해 토출되는 따뜻한 공기의 온도는 $T=50^{\circ}\text{C}$ 로 가정하였는데, 이 조건은 defrost노즐을 통해 전면 유리창의 성에를 제거할 때 주로 행하여지는 실험 조건이다. 그리고 모든 벽면은 단열이라고 가정하였다.



(a) Along the vertical cross-section



(b) On the horizontal cross-section

Fig. 11 Temperature field in the cabin

4. 결 론

본 연구에서는 defrost 노즐에서 토출되어 나온 유동으로 인한 자동차 실내 내부유동 및 온도장 해석을 수행하였으며 이들 해석을 위해 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식을 이용하였다. 그 결과 실제 차량내부의 복잡한 3차원 유동을 파악할 수 있었으며, 전면 유리창 및 자동차 실내의 시간에 따른 온도 변화 양상을 파악할 수 있었다. 이러한 온도 분포를 이용하면 전면 유리창 성에 제거 성능과 실내공조 시스템의 성능을 파악할 수 있게 될 것이다.

참고문헌

- [1] Komoriya, T., Kobayashi, T., and Taniguchi, N., "Numerical Simulation of the Flow in a Vehicle Passenger Compartment using General Coordinate System with Finite Volume Method" JSAE Review, Vol. 12, No. 3, (1991).
- [2] 허남건, 조원국, "승용차 탑승내부의 난방, 냉방 및 성애제거 모드에 대한 3차원 유동해석" 한국자동차공학회 논문집, 제1권, 제2호, (1993), pp.60-68 .
- [3] Okada, Y., Nouzawa, T., Nakamura, T., Kamioka, T., and Nakamura, Y., "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.
- [4] 강동민, 정영래, 박원규, 하성도, "측풍의 편향 각 변화에 따른 자동차 주위의 유동해석", 한국 전산유체공학회지, 제4권, 제3호, (1999), pp.1-11.
- [5] Park, W. G., Jung, Y. R., and Ha, S. D., "Numerical Viscous Flow Analysis Around a High Speed Train with Crosswind Effect," AIAA Journal, Vol. 36, No. 3, (1998), pp.477-479.
- [6] Vieceili, J. A., "A Method for Including Arbitrary External Boundaries in the MAC Incompressible Fluid Computing Technique", Journal of Computational Physics, Vol. 4, (1969), pp.543-551.
- [7] Leonard, B. P., "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 19, (1979), pp. 59-98.