Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.11, No.1, 2003

자동차 Defrost 노즐 유동의 설계인자에 대한 수치적 연구

박 원 규* · 배 인 호

부산대학교 기계공학과

Numerical Study of the Design Factors for Flow Analysis of the Automotive Defrost Nozzle

Warn-Gyu Park* · In-Ho Bae

*School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 27 March 2002 / Accepted 27 November 2002)

Abstract : The frost and mist in the windshield disturb the sight of driver and passengers especially in winter. This possibly leads to safety problems. In order to export automobiles to the countries of North America, the safety regulation requires the frost of selected area should be completely melted in 30 minutes. The defrost pattern and time for melting of frost are fully dependent on the flow and temperature field near the windshield. Furthermore, the flow and temperature field near the windshield are dependent on the air discharged from defrost nozzle. The present work has been done for understanding the flow features of the discharged air and internal flow within the nozzle duct. The three dimensional Navier-Stokes code was used for performing the generic A/C duct flow analysis. The present results were nearly coincided with experimental data. To perform the parametric study of the effectiveness of the number of guide vanes, the discharge angle and the location of nozzle were changed. The ratio of volume flow rate through defrost nozzle and side exit were compared to investigate the influence of parameters on the effectiveness of defrost nozzle. The velocity profiles and flow patterns of the defrost nozzle duct were also analyzed.

Key words : Defrost(성에제거), Nozzle(노즐), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Parametric study(설계변수연구)

1. 서 론

최근 자동차 설계에 있어서 쾌적성과 안정성은 아주 높은 비중을 차지하고 있음으로 해서 HVAC (Heating Ventilation and Air Condition) system의 중요성이 날로 부각되고 있다. 특히 북미 수출용 차량의 경우 차량 외기 온도가 -30, 40℃에서 30분 이내에 Fig. 1에 표시된 전방유리면 A영역의 80 % 이상, B영역의 95 % 이상, C영역의 100%에 해당하는 성에(frost)나 응축수증기(mist)가 녹아야 하는 차량안전규정을 만족시키기 위해서는 자동차 전면 유리창 주위 해석이 필수적이고, 또한 반드시 defrost 노즐 토출구에 대한 유동해석이 선행되어야 한다. 그러나 현재 국내에서는 defrost 노즐에 대한 실험적, 수치적 해석이 드문 실정이어서, 주로 고전적인 방법인 실험과 시제품 제작을 통해 defrost 성능을 분석하고 재설계, 재실험을 통하여 defrost 성능을 개량하고 있다. 이러한 방법은 엄청난 비용과 시간이 소요되므로 세계시장에서 경쟁사보다 한발 앞서기 위해서는 첨단 시험 개발 방법의 시도가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실험에 의한 단점들을 보완하

*To whom correspondence should be addressed.
wgpark@pusan.ac.kr

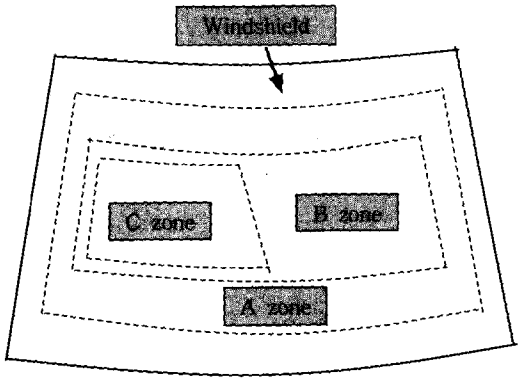


Fig. 1 Indication of the defrosting zones

고 저비용으로 빠르게 그 결과를 예측하기 위하여 CFD기법을 이용하여 3차원 덕트 내부와 그 이음부에 연결되어 있는 defrost 노즐 내부 유동 해석용 프로그램을 개발하였다. 또한 개발된 프로그램은 각각의 노즐 설계인자별 유동 해석에도 적용되어 노즐 형상의 변화에 상관없이 모두 적용 가능하다. 본 연구에서 개발된 코드의 적용 타당성 및 이의 정확도를 검증하기 위해 Lin[1]등이 수행한 3차원 덕트 내부 유동의 수치적 결과 및 실험결과와 비교하여 그 정확도를 확인하였고, 이와 함께 개발된 코드를 사용하여 defrost 노즐 내부의 유동특성을 연구하였다.

2. 지배 방정식

유동해석을 위한 지배방정식으로 3차원 비정상 상태의 비압축성 점성유동의 Navier-Stokes방정식을 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 반복시간진행(Iterative Time Marching) 방법[2,3]을 사용하였다. 우선, 운동량 방정식만을 생각해 보면 이 방정식은 포물선형 편미분 방정식이므로 아래와 같이 시간진행(Time Marching)방법을 이용하고, Newton 반복법을 적용하여 선형화 시키면 다음과 같다.

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

여기서 ω는 완화계수(relaxation factor)이고 $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{C}$ 는 Jacobian 행렬로 다음과 같다.

$$\bar{A}=\frac{\partial}{\partial \bar{q}}(\bar{E}-\bar{E}_v)$$

$$\bar{B}=\frac{\partial}{\partial \bar{q}}(\bar{F}-\bar{F}_v)$$

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

그리고, 여기서 $\bar{R}^{n+1,k}$는 잔류벡터라 불리는 항으로 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{R}^{n+1,k}=-\frac{1}{\Delta \tau}(\bar{q}^{n+1,k}-\bar{q}^{n}) -(\delta_\xi \bar{E}^{n+1,k}+\delta_\eta \bar{F}^{n+1,k}+\delta_\zeta \bar{G}^{n+1,k}) +(\delta_\xi \bar{E_v}^{n+1,k}+\delta_\eta \bar{F_v}^{n+1,k}+\delta_\zeta \bar{G_v}^{n+1,k}) \quad (3)$$

연속 방정식은 비압축성 유동해석을 효율적으로 수행하기위해 MAC (Marker-and-Cell) 방법[4]의 개념을 이용하면,

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

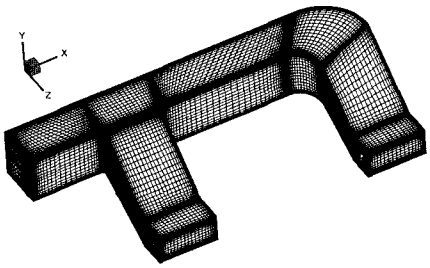
여기서 β는 완화계수(relaxation factor)를 의미하며, 난류 유동장 해석을 위해 Baldwin -Lomax 난류모델[5]을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

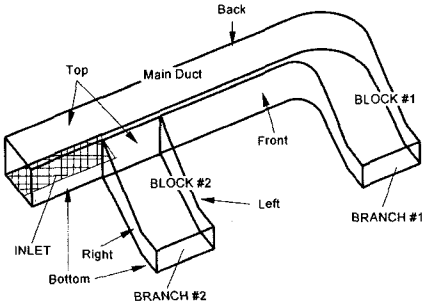
3.1 코드 검증

코드검증을 위해 Fig. 2와 같은 분지 덕트관의 내부유동을 해석하였으며, 해석결과로 Lin등[1]의 수치해석 결과 및 실험결과와 비교하였다. 분지 덕트관은 2개의 독립된 멀티 블록 격자계로 구성하였으며, 주 유동방향의 덕트는 block#1, 제2 분지관이 있는 덕트는 block#2로 구성하였다.(Fig. 2) Block#1의 격자수는 162×23×27인 100,602개이고, block#2의 경우, 29×23×51인 34,017개이다.

본 연구에 사용된 경계조건은 Lin등[1]과 같은 모델에 대해서 실험적으로 구한 유량으로 0.043m^3/s을 사용하였고, 출구압력은 대기압 조건을 부여하였다. 또한 형상의 대칭성을 고려하여 symmetric 조건



(a) Multi-block grid



(b) Wire frame

Fig. 2 Bifurcation duct

을 사용하였다. 입구의 비균일(non-uniform) 속도성분은 실험데이터를 사용하였으며, 이러한 입구 속도분포를 본 격자계에 적용하기 위해 다음의 bilinear inter-polation을 실시하였다.

$$f_p=(1-\xi)(1-\eta)f_{i,j}+\xi(1-\eta)f_{i+1,j} +(1-\xi)\eta f_{i,j+1}+\xi\eta f_{i+1,j+1} \quad (5)$$

입구격자는 21×11로 Lin등[1]과 일치시켰고, 본 연구에 사용된 입구 격자계는 43×19로 하였다.

본 유동해석은 Re수가 1.95×10^4에 대해 이루어졌으며, 각각의 Cp값들은 각 면의 중심선(center line)에서 계산되었다. 여기서,

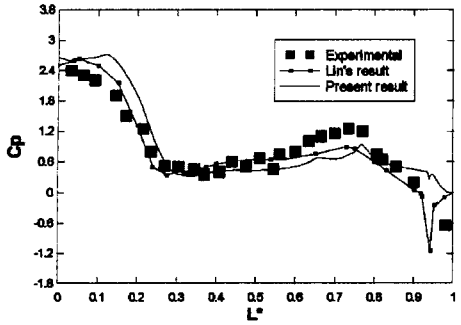
$$c_p=\frac{P-P_{atm}}{\rho V_{in}^2},\quad L_i^*=\frac{\sum_{i=2}^{i}|r_i-r_{i-1}|}{\sum_{i=2}^{N}|r_i-r_{i-1}|} \quad (6)$$

으로 정의하였으며, i=1에서 $L_i^*=0$로 하였다. P_{atm}은 대기압, V_{in}은 입구속도, r_i는 위치벡터, N은 전체 데이터 수, L_i^*는 각면에 대한 중심선의 무차원화된 전체길이를 나타낸다. Fig. 3과 Fig. 4는 block#1과 block#2 각면의 Cp분포를 비교하였다. 실험에 의한 결과와 그 경향이 상당히 비슷하고, k-ε 모델을 사용하고 있는 Lin등[1]의 수행한 계산결과에 비해 정확도가 떨어지지 않음을 알 수 있다. 그리고 실험 결과와 비교해보면 수직 상방향으로 올라오는 토출유량이 급격히 90°로 유로가 바뀌는 영역에서는 본 연구결과가 과도한 압력예측을 하고 있으며 하류로 갈수록 적게 예측하고 있음을 알 수 있다.

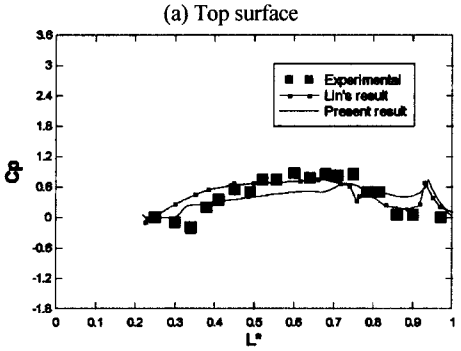
Fig. 4(a)와 4(b)에서, 본 연구결과와 실험결과의 차이는 본 계산에서 사용하고 있는 난류모델의 한계로 여겨지는데, 본 연구에서 사용하고 있는 Baldwin-Lomax 난류모델이 광범위한 유동박리를 동반하면서 급격한 원심력을 발생시키는 270°-turning 덕트 내부유동을 정확히 계산할 수 없기 때문으로 여겨지며 이러한 유동의 경우에 대해서는 Lin등[1]의 k-ε 모델에서도 같은 정도의 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 원칙적으로는 k-ε 모델이 유동박리를 동반하는 유동에서 Baldwin-Lomax 모델보다 난류유동 모사에 월등한 것으로 되어 있으나 본 유동처럼 강한 원심력의 작용으로 인한 유동박리를 동반하는 유동에서는 k-ε 모델 역시 한계를 가지고 있는 것으로 알려져 있다.

3.2 Defrost 노즐 내부 유동해석

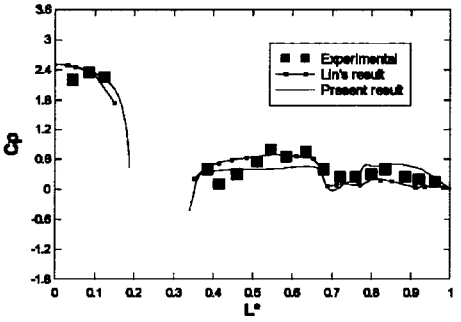
실제 차량에 부착되어 있는 defrost 노즐의 내부 유동해석을 위해 Fig. 5(a)와 같이 유동영역을 9개의 계산영역으로 나눈 다중 블록 형태의 격자계를 사용하였다. 측면부에 출구가 있는 block#1의 격자계는 112×15×15, 내부 블럭인 block#2와 block#3의 경우, 각각 74×8×15, 58×13×33이고, guide vane인 block#4～block#9까지는 각각 15×13×14, 15×13×14, 14×13×14, 13×13×14, 19×13×14, 19×13×14의 격자로 구성되어 있다. Fig. 5(b)는 노즐 내부의 유입구와 가이드 베인 형상이다. 본 전산해석을 위한 경계조건으로 유입구의 속도는 균일 분포하였고, 압력은 Neumann조건을 사용하였다. 출구에서 속도는 Neumann조건을, 압력은 대기압 조건을 사용하였으며, 벽면에서는 벽면조건을 부여하였다. 블록간 경계는 덕트유동과 마찬가지로 bilinear interpo-lation을 이용하여 유동간 보간을 실시하였으며, 형상의 대칭으로 인해 대칭조건을 사용하여 형상 좌측부분만 계산을 수행하였다.



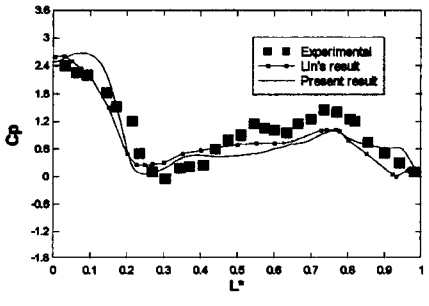
(a) Top surface



(b) Bottom surface

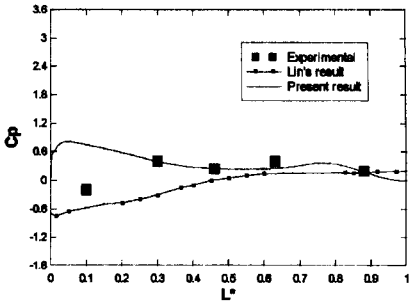


(c) Front surface

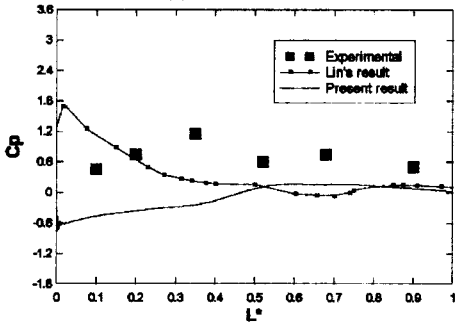


(d) Back surface

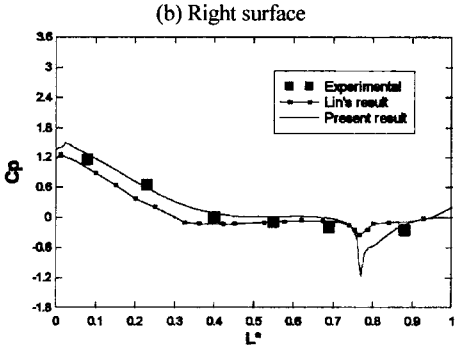
Fig. 3. Cp value of Block 1



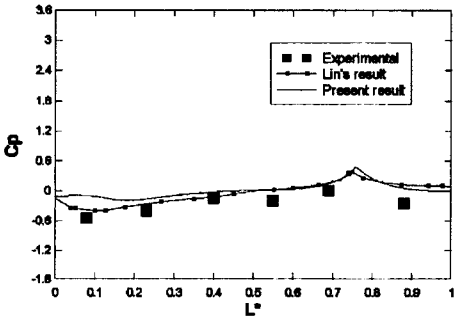
(a) Left surface



(b) Right surface



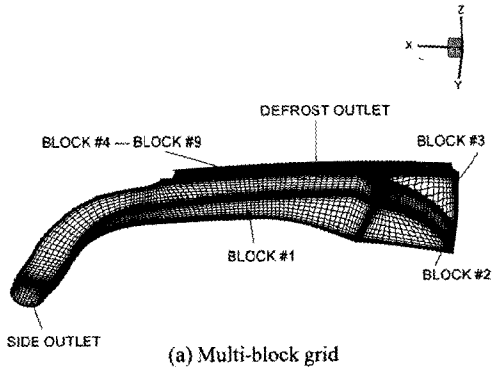
(c) Top surface



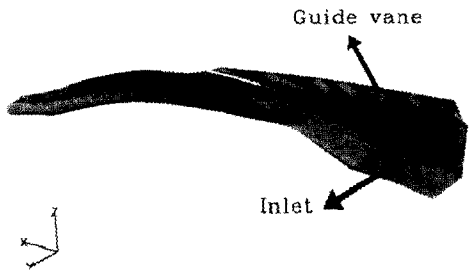
(d) Bottom surface

Fig. 4. Cp value of Block 1

계산의 유동조건은 Re수가 2.57×10^4인 경우로, 이때 레이놀즈 수는 노즐 입구의 길이방향(x)의 길이를 기준으로 하였으며, 양쪽 출구로 빠져나가는 전체 체적유량은 112m^3/h 이다. 이때 체적유량은 실



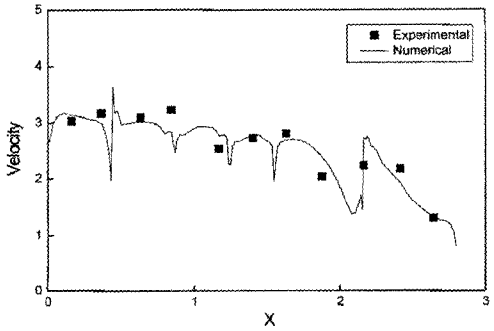
(a) Multi-block grid



(b) Geometry

Fig. 5 Defrost nozzle

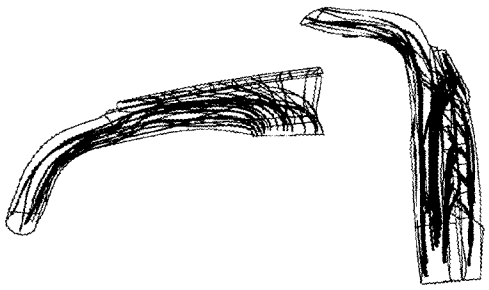
재 차량 엔진의 최대성능일 때의 유량이다. 먼저 Table 1을 보면, 전방유리면 출구의 유량과 측면 출구의 유량이 전체 유량에 비해 차지하는 비율을 나타내는 것으로, 본 계산에 의한 유량비율과 실험결과를 비교한 것인데, 각각이 오차가 ±2%정도로써 매우 정확하게 예측되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 전방유리면 토출구에서의 유속 분포를 실험데이터와 비교한 것으로, 비교적 만족할 만한 속도분포 경향을 얻을 수 있었다. 여기서 x축은 defrost 출구 중심선(center line)의 전체 경로를 무차원한 길이이며,



Velocity distribution of the defrost exit

Table 1 Ratio of volume flow rate of the nozzle discharge outlet

	Exp. (Q)	Num. (Q)	Error
Defrost exit	77.2 %	79.4 %	+2 %
Side exit	22.8 %	20.6 %	-2 %



(a) Front view (b) Top view

Fig. 7 Streamlines inside nozzle

y축은 무차원화된 속도성분을 나타낸다. Fig. 7은 노즐 내부의 유선을 나타내고 있으며 유동의 전체적인 흐름을 보여주고 있다. Fig. 7(a)에서 보면, 입구에서 유입된 공기가 노즐 내부 형상과 가이드 베인을 따라 유출됨이 보이고, Fig. 7(b)는 위에서 바라본 결과로 유동의 일부는 곧장 측면출구로 빠져나가고, 일부는 휘감기며 내부 벽면에 부딪쳐 측면출구로 향한다. 특히 출구 곡관의 길이가 짧은 형상으로 인해 유동이 원심력에 의해 바깥면으로 쏠린 채 빠져나감을 알 수 있다.

3.3 설계인자별 분석

추운 날 전면 유리창에 생기는 성에를 해빙시키는데는 defrost 출구에서의 속도 및 온도분포, 전면 유리창과 토출공기가 만나는 각도등이 매우 중요한 영향을 미치는데, 이들 인자에 대한 영향을 구체적으로 이해하기 위해 노즐 전면유리면 출구의 가이드 베인 개수 와 노즐 분사각도 및 노즐 위치 변경을 통해 이들 변경이 노즐 출구에서의 속도분포, 그리고 defrost 전면 토출구와 측면 토출구에서의 토출유량 비율, 유량과 분사된 유동이 전면유리면에 부딪히는 각도와 전면 유리창 유동 현상 변화를 해석하고자 한다. defrost 노즐 설계인자의 변화는 Table 2와 같이 노즐 토출구의 guide vane수를 변화시켜보고, 토출 각도 변화, 그리고 토출구의 전면 유리창으

로부터의 거리를 변화시키는 등으로 parametric study를 수행하였다. Table 3, 4에서는 각 설계인자별 토출유량 비율을 비교하였는데, Table 3에서 분사각도별 토출유량을 defrost 와 side 출구에 대해 각각 살펴보면, 분사각을 증가시킬수록 전면유리면의 defrost 노즐로 나가는 유량이 더 증가함을 알 수 있다. Table 4는 vane개수를 변화시켰을 때의 토출유량을 비교하였다. 가이드 베인의 개수가 적을수록 defrost출구로 더 많은 공기가 빠져나감을 확인할 수 있었다. 성에제거에 영향을 미치는 요인에는 유속도 크게 영향을 미치는데, Fig. 8에서는 분사각도별 defrost출구에서의 속도 분포를 나타내었다. 형상에 의해 분사각이 낮은 경우의 유속이 더 큼을 알 수 있다. Fig. 9에서는 가이드 베인 개수별로 유속분포를 비교하였다. 베인 개수가 많은 경우, defrost출구의 가장자리에서 유속이 큼을 확인 할 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 각 설계인자별 유동을 비교하여 나타내

Table 2 Description of the design factors

Design factor	Setting values
Number of guide vane	4 , 5 , 6
Nozzle discharge angle	40°, 50°, 60°
Nozzle exit location	L= 5.5 cm, 11 cm, 16.5 cm

Table 3 Ratio of volume flow rate with changes of discharge angle

Discharge angle	θ=40°	θ=50°	θ=60°
Defrost exit	77.4 %	79.4 %	82.9 %
Side exit	22.6 %	20.6 %	17.1 %

Table 4 Ratio of volume flow rate with changes of number of guide vane

No. of vane	4	5	6
Defrost exit	80.2 %	79.4 %	78 %
Side exit	19.8 %	20.6 %	22 %

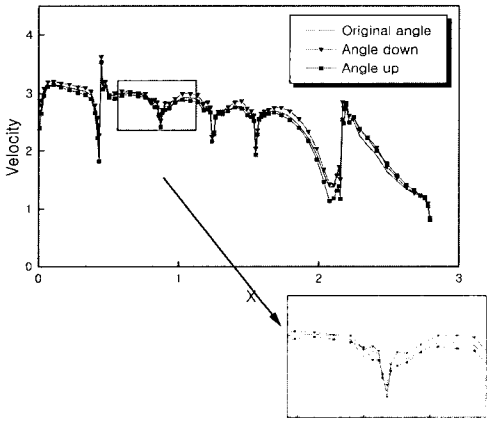


Fig. 8 Velocity distribution with changes of discharge angle

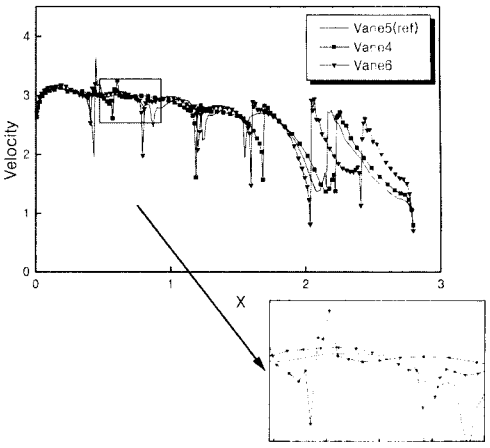


Fig. 9 Velocity distribution with changes of number of guide vane

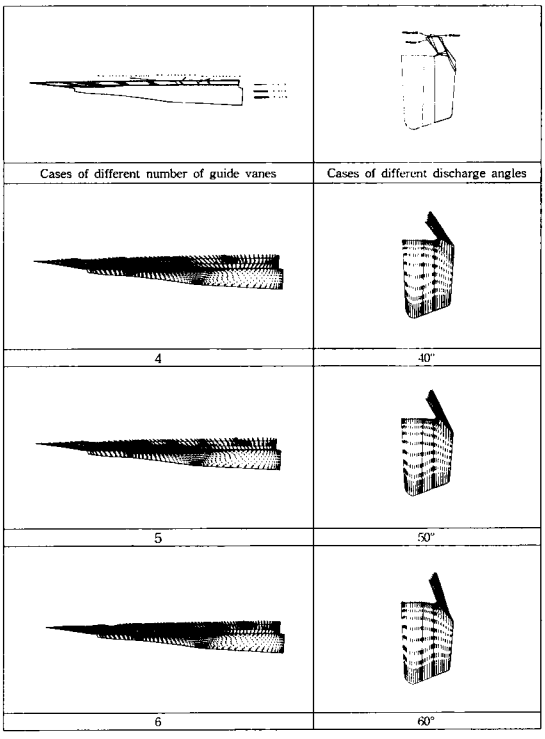


Fig. 10 Comparison of the velocity profiles at each design parameter

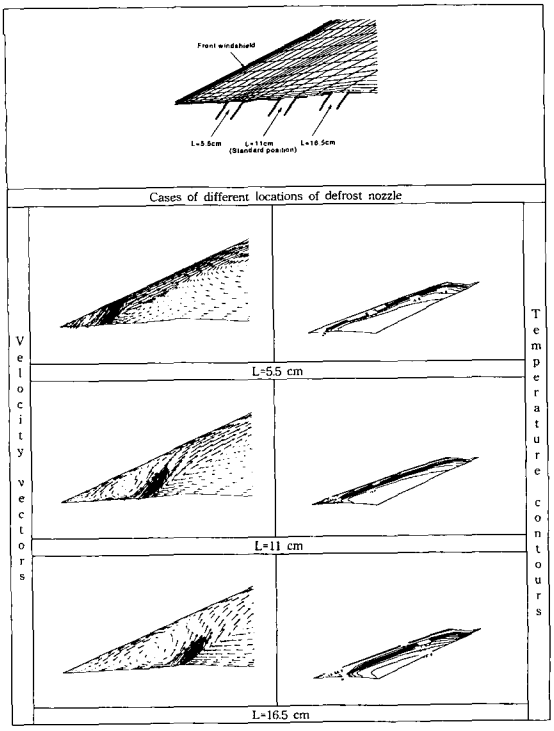


Fig. 11 Comparison of the velocity and temperature field in the symmetric plane of the windshield at each design parameter

고 있다. Fig. 10의 분사각도별 비교에서 유동은 안쪽 벽면에서 형상에 의해 와류가 발생하고, 노즐출구에서 분출되는 유동은 실제 기울기보다 실내방향으로 더 기울어짐을 알 수 있었다. 이것은 실험을 통해서도 마찬가지 경향이었다. Fig. 11의 전방유리면에서의 온도분포를 보면 L=5.5 cm일 때 유리면 근방의 온도가 약 15.2°C로 균등하게 분포하고 있어 성에제거에 더욱 효과가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 defrost 노즐 내부 유동해석을 위한 프로그램을 개발하였다. 사용된 코드의 검증을 위해 급격한 단면변화와 곡률을 지닌 복잡한 HVAC 덕트 내부의 유동을 해석하고, 실험결과와 비교하여 타당한 수치적 결과를 얻었다. 검증된 코드를 사용하여 실제 차량의 defrost 노즐 내부 및 토출구에서의 유동의 거동을 파악하였으며, 실험결과와 비교하여 비슷한 결과를 도출하였다. 성에제거를 위한 노즐부의 설계인자로 노즐 출구의 분사각도, 가이드 베인 개수 및 노즐의 위치를 고려하였으며, 이들 변수들이 노즐 토출유량, 유속등에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구결과에 의하면 전방 유리면으로의 토출유량은 토출각도가 클 때, 가이드 베인 수가 작을 때 증가하였으며 전면 유리창 온도 분포 그림에서 토출구 거리가 유리창에서 가까울수록 성에제거에 효과적인 온도분포를 얻을 수 있었다.

References

1) C. H. Lin, T. Y. Han, V. Sumantran, "Experimental and Computational Studies of Flow in a Simplified HVAC Duct," Int J. of Vehicle Design, Vol.15, Nos.1/2, pp.147-165, 1994.

2) W. G. Park, Y. R. Jung, S. D. Ha, "Numerical Viscous Flow Analysis Around a High-Speed Train with Crosswind Effects", AIAA Journal, Vol.36, No.3, pp.477-479, March 1998.

3) J. K. Cho, "The Numerical Analysis of the 3-D Turbulent Internal Flows of Jet Pump," MS Thesis, Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, 1998.

4) J. A. Viecelli, "A Method for Including Arbitrary External Boundaries in the MAC Incompressible Fluid Computing Technique," Journal of Computational Physics, Vol.4, pp.543-551, 1969.

5) B. S. Baldwin, H. Lomax, "Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 78-0257, 1978.

6) B. S. AbdulNour, J. F. Foss, "Computational and Experimental Prediction of Automotive Windshield Flow," FEDSM'97, June 22-26, 1997.

7) W. S. Lee, "Numerical Simulation of the Flow Inside a Vehicle Passenger Compartment for Defrost Mode," KIA NO.19, 1997.

8) D. H. Kim, "Performance Improvement of Automotive Defrost Duct Using CFD," Proc. of Spring Conference of KSAE, pp.177-185, 1995.

9) I. H. Bae, K. T. Kang, J. E. Hwang, W. G. Park,

K. L. Jang, "Numerical Study of Design Factor for Flow Analysis of Automotive Defrost Nozzle," Proc. of Autumn Conference of KSAE, Vol.I, pp.578-583, 2001.

10) K. T. Kang, I. H. Bae, J. E. Hwang, W. G. Park, K. L. Jang, "3-D Numerical Analysis of Flow and Temperature Field in the Cabin of the Automobile with Defrost Nozzle Discharged Air," Proc. of Autumn Conference of KSCFE, pp.31-36, 2001.