

CFX를 이용한 내부순환모드에서의 자동차 내부 유동특성 연구

김윤기* · 양장식** · 김정천*** · 지호성†

A study on Flow Characteristic inside Passenger's Compartment under Recirculation Cool vent mode using CFX

Yoon Kee Kim, Jang Sik Yang, Kyung Chun Kim and Ho Seong Ji

Abstract. The flow characteristics under recirculation cool vent mode is numerically studied using commercial fluid dynamic code(CFX). For the reliable analysis, real vehicle and human FE model is employed in grid generation process. The geometrical location and shape of panel vent, and exhaust vent is set as that of real vehicle model. The flowrate of the working fluid is determined as 330CMH which is equivalent to 70 percent of maximum capacity of HVAC system. The high velocity regions are formed around 4 each panel vent. Because of the non-symmetrically located exhaust, non-uniform flow and partial back-flow near the door trim is observed. Streaklines start from each panel vent show the flow pattern of the airflow in the passenger's compartment very well.

Key Words: Thermal comfort(열적 쾌적성), Cooling Cycle(냉동사이클), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Heating, Ventilating, Air Conditioning System(공기조화 시스템)

1. 서 론

최근 자동차 개발은 주행성능의 향상 뿐만 아니라, 승객이 느끼는 쾌적성이 중요한 설계변수가 되고 있다. 이를 위해 설계단계에서 적절한 HVAC 시스템의 선정, 차량 내부 좌석 배치, 냉기 토출구의 위치 및 크기가 결정된다. 또한 차량 개발시 공조성능 개발의 일환으로 써멀 마네킨을 이용한 쾌적성 평가나 PIV 실험등이 이루어지는데, 특히 열적 쾌적성 평가는 Fanger⁽¹⁾에 의해 제안된 PMV (Predicted mean vote) 지수를 많이 이용한다. PMV지수는 인체의 열손실 및 열환경 변수들의 관계를 상세하게 해석함으로써 인체 각부의 쾌적성을 평가할 수 있다는 장점이 있으므로, 자동차와 공조시스템의 설계단계에서 열환경 특성을 모사하고 예측하는 기술을 제공할 수 있다⁽²⁾. 이러한 쾌적성 평가는 승

객실 내부의 속도 및 온도분포에 지배적인 영향을 받으므로 차량 내부 유동장에 대한 정량적인 평가가 매우 중요하다. 이를 위해 현재까지 많은 실험적, 수치해석적 연구가 진행되어져 왔다. Hara 등⁽³⁾은 슈퍼컴퓨터를 이용하여 자동차 내부의 비정상 유동특성을 수치해석적 기법을 적용하여 해석하였다. Currie⁽⁴⁾은 상용 해석 프로그램인 Star CD를 이용하여 자동차 내부유동을 해석하였고, 유동해석 결과를 이용하여 운전자의 쾌적성을 평가하였다. Aroussi 등⁽⁵⁾은 1/5로 축소된 자동차 모델에 대한 PIV 실험을 수행하였고, 이를 CFD 결과와 비교하였다. Alexandrov 등⁽⁶⁾은 HVAC 시스템과 내부온도, 에어컨 출구속도, 에어컨 출구위치 4곳의 기하학적 좌표에 의한 설계변수와 유동의 상관관계에 대하여 CFD 기법을 활용하여 평가하였다. Lin 등⁽⁷⁾은 공기유량, 냉기 토출구의 위치, HVAC 시스템으로 재순환되는 덕트의 입구, 유리의 특성 등 네 가지 설계 변수를 통해 자동차 내부의 열적 쾌적성을 평가하였다. Zhang 등⁽⁸⁾은 실험과 수치해석기법을 조합하여 차량내부의 유동특성을 연구하였다.

많은 연구자들에 의해 자동차 실내의 쾌적성에 영향

†부산대학교 기계공학부
E-mail : hsji@pusan.ac.kr

*부산대학교 기계공학과

**부산대학교 기계기술연구원

***부산대학교 기계공학부

을 미치는 유동특성 평가에 대한 대부분의 격자생성의 어려움으로 인해 단순화된 해석모델을 적용하거나 조밀하지 않은 격자(coarse mesh)를 사용함으로써 해석 결과에 대한 신뢰성에 문제가 있는 것으로 분석되었다(6,7,8). 자동차의 내부유동은 좌석의 배치 및 크기, 벤트의 모양 및 위치등에 따라 크게 좌우되므로 단순화된 모델을 통한 해석은 실제와 전혀 다른 해석결과를 도출할 수도 있다.

이러한 문제점에 착안하여 본 연구에서는 기존연구의 한계를 극복하고 보다 실제에 가까운 신뢰성 있는 유동해석 결과를 얻기 위하여 인체 FE 모델을 포함한 실차 모델을 연구대상으로 하였고, 내부순환모드일 때의 실내유동특성을 수치해석적 방법으로 분석하고자 한다.

2. 해석방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 k-ε 난류모델을 사용하여 자동차 내부 유동해석을 수행하였고 상용해석 프로그램은 CFX 12.0을 사용하였다. CFX는 Navier-Stokes방정식을 일정 시간에 따라 평균함으로써 얻어지는 URANS(Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식에 대한 해를 구한다.

연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (2)$$

여기서, B는 체적력의 합, μ_{eff} 유효점성계수를 나타내며 수정된 압력 p' 는 다음과 같이 나타낸다.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (3)$$

유효점성계수 μ_{eff} 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4)$$

여기서 μ_t 는 난류점성계수이며, 아래와 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

여기서 k와 ε은 각각 난류운동에너지(turbulence kinetic energy), 난류소산율(turbulence dissipation rate)로 정의되며 수송방정식에 의해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k = \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

여기서, k 방정식과 ε 방정식에 포함되는 여러 상수들은 실험값과의 비교를 통해 다음과 같이 결정되었다.

$$C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.45, C_{\varepsilon 2} = 1.92 \\ \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (8)$$

한편, P_k 는 점성력과 부력에 의해 야기되는 난류생성항(turbulence production)으로 다음과 같이 모델링되었다.

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) \quad (9)$$

2.2 해석조건 및 경계조건

Table 1은 내부순환모드에서의 각 위치별 유량을 나타낸다. 본 연구에 사용된 HVAC 시스템의 최대 풍량은 505 CMH이며, 이 풍량은 HVAC 모듈의 덕트 시스템에 따른 풍량배분에 따라 패널 벤트쪽 477 CMH와 Floor 쪽 28 CMH로 나누어진다. 이때, Floor로 빠져나오는 공기의 유량은 패널벤트로 나오는 풍량의 5~6%로 매우 작은 값을 가지므로, 본 연구에서는 패널 벤트로 나오는 유량만 고려하였다. 일반적인 Cool down test를 모사하기 위하여 내부 온도가 60°C가 될 때 까지 soaking한 직후의 상황을 초기 경계조건으로 정하였고, 최대 풍량의 70%에 해당하는 330 CMH로 에어컨을 가동시켰을 때 1600초가 경과한 자동차 내부 유동특성을 살펴보았다. 이에 앞서, 차량내부 전방 계기판넬 부위에 HVAC 시스템으로부터 승객실 내부로 들어오는 4개의 덕트가 위치하도록 하였고, 조수석 무릎

Table 1. Volumetric flowrate at each vent

Mode	AIR vent	Volumetric flowrate		
		flowrate (CMH)	Sub-Total (CMH)	Total (CMH)
Rec. Cool Vent	Vent	Left	128.0	477
		L/C	112.4	
		R/C	116.5	
		Right	120.0	
	Floor	Left	7.2	28
		L/C	8.6	
		R/C	6.5	
		Right	5.5	

근처에는 승객실로 들어온 공기가 다시 HVAC시스템으로 재순환되는 출구 덕트를 위치시켰다. 실제 차량에서는 승객실 내부로 들어오는 공기는 유리창 틈새 또는 트렁크 쪽으로 미소한 양의 누설이 발생하지만 그 양이 무시할 수 있을 만큼 적은 양이므로 본 연구에서는 고려하지 않았고, 승객실 내부로 들어온 공기는 출구 덕트를 통하여 전량 HVAC 시스템으로 재순환된다는 가정하에 해석을 수행하였다. 승객실로 들어오는 덕트 입구를 입구 경계조건으로, HVAC 시스템으로 다시 들어가는 덕트의 입구를 출구 경계조건으로 정하였다. 4개의 입구 경계조건에서 유동이 나오는 방향은 실제차량에서 그릴을 통해 나오는 분사각도와 유사하게 설정하였으며, 그 방향은 중앙 좌우 덕트의 경우 지면과 평행을 이루면서 뒷좌석으로 직진하는 방향으로, 양 측면 덕트의 경우 판넬에 수직인 방향으로 분사되도록 하였다. 출구경계는 CFX 내에서 기본 출구 조건으로 설정되어 있는 대기압으로 가정하였다. 입구와 출구 외의 모든 면은 벽으로 처리하였으며, 모든 벽에는 No-slip condition을 적용하였다. 자동차 승객실 및 차체에 대한 격자는 ICEM CFD 12.0환경 하에서 구성하였고, 각각의 도메인에 대해 120만개, 100만개의 격자를 생성하였다. 본 연구에 사용된 컴퓨팅 자원은 인텔코어 i7 블룸필드 920(2.67 GHz)이며, 한 케이스당 계산시간은 약 24시간 정도 소요되었다.

3. 내부순환모드에서의 환기유동 결과

Figure 1은 내부순환모드 조건에서 4개 벤트 중앙단면에서의 속도분포를 나타낸다. Figure 1(a)는 승객실 내부의 isometric view를 나타내며, Fig. 1(b)~(e)의 속도장의 위치는 Fig. 1(a)에서의 plane 1~ plane 4의 위

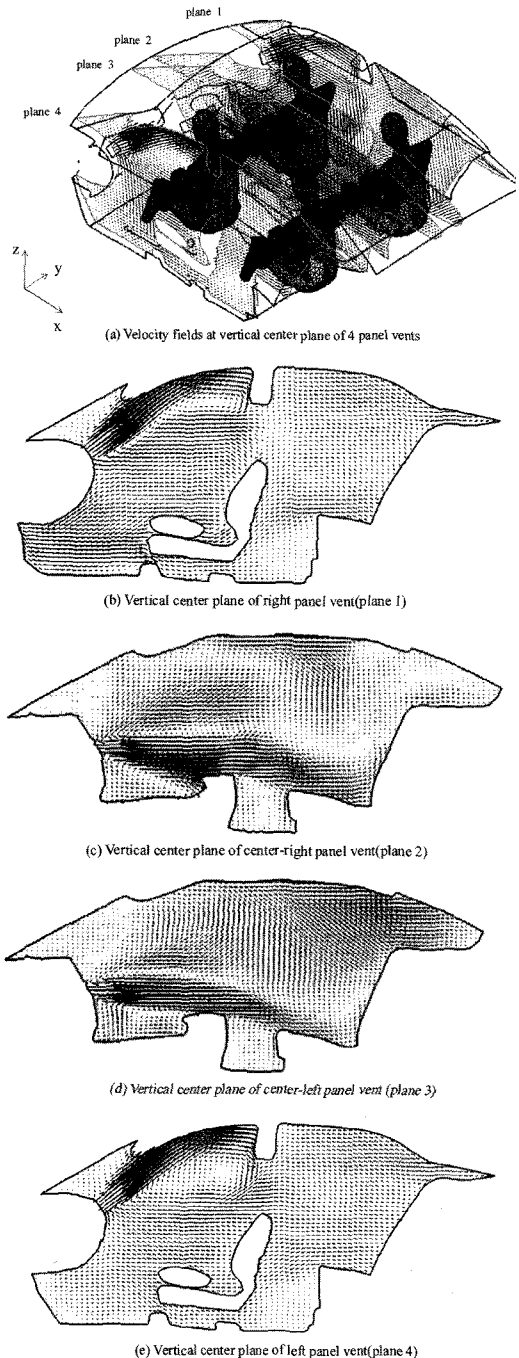


Fig. 1. Velocity distribution at the vertical center plane of 4 panel ducts(x-z plane, side view).

치와 일치한다. 그림을 보면 네 개의 냉기토출구에서 냉풍이 각각 다른 방향으로 분사되고 있음을 볼 수 있

다. 양 측면 벤트에서 분사된 냉기는 지면에 대해 약 45° 각도로 위쪽을 향해 분사되어 벽면 근처에 국부적인 와 구조(vortex)를 형성하는데 좌측 벽면 근처에서 생긴 와가 우측에서 보다 범위가 넓게 퍼져 있음을 확인할 수 있다. 중앙 좌우벤트에서 분사된 유동은 토출구에서 멀어질수록 폭이 넓어지는 제트형태의 유동특성을 보였으나 우측에서 그 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다. 벤트를 나온 공기는 뒷좌석으로 이동하면서 아래쪽으로 편향되는 것을 볼 수 있는데 이는 벤트에서 나온 차가운 공기가 주위공기와 밀도 차에 의해 생기는 현상인 것으로 분석된다. 전면 유리창에서는 Fig. 1(b)~(e)에서 공통적으로 가장 낮은 속도분포를 보이고 있으며, 이 영역에서 온도가 높을 것으로 예상된다.

Figure 2는 Fig. 1과 같은 조건에서의 운전석과 조수석의 중앙단면에 대한 속도장의 분포를 나타낸다. 운전석과 조수석 중앙 단면에서의 속도분포를 보면 Fig. 1에서와 같은 벤트 근처 강한 기류는 보이지 않지만, 전체적으로 천정 부위에서 뒷좌석으로 이동한 유동이 앞좌석 아래쪽으로 다시 되돌아오는 큰 시계방향의 와 유동이 관측된다. 이러한 현상은 뒷좌석으로 이동한 유동이 상대적으로 압력이 낮은 앞좌석 아래쪽에 위치한 배기 vent 쪽으로 유입되려는 경향에 기인한 것으로 실제 차량 내에서의 내부 순환조건에 따른 내부유동 현상과 잘 일치한다 (Fig. 2(b)). 각 위치별 속도분포를 개략적으로 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 운전석

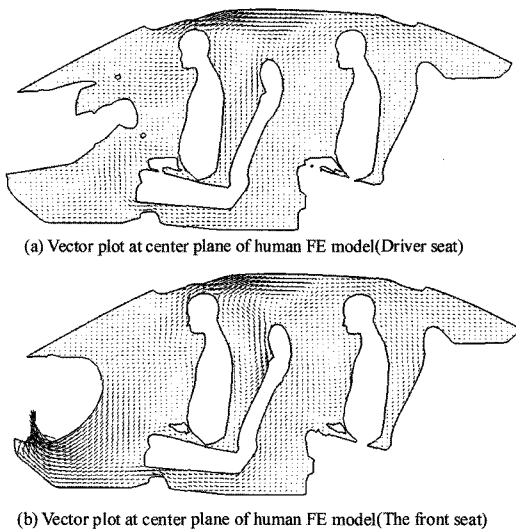


Fig. 2. Velocity distribution at vertical center plane of human FE model(x-z plane, side view).

중앙단면에서는 좌측면 덕트에서 나오는 공기의 영향으로 운전자의 머리위쪽으로 약 1.3 m/s의 기류가 형성되었고, 좌석의 아래 쪽 공간을 통해 앞 좌석으로 유입되는 0.25 m/s의 기류, 그리고 운전자 기슴 쪽을 지나는 0.35 m/s의 기류가 관측되었다. 최고속도는 운전자의 머리와 천정 벽면 사이에서 이루어졌고, 그 값은 1.4 m/s로 계산되었다. 반면, 최저속도는 앞 유리창과 대시보드(dashboard)가 접하는 근방에서 이루어졌고, 그 값은 약 0.02 m/s였다.

몇몇 선행논문에서 운전자와 핸들 사이의 제트유동이나 같은 위치에서의 반시계 방향의 와와 같은 유동 구조들이 관찰되었으나 본 연구에서의 운전조건에서는 그러한 유동구조가 관찰되지 않았다. 선행연구의 경우, 실차와는 다른 단순화 모형과 임의의 벤트 위치

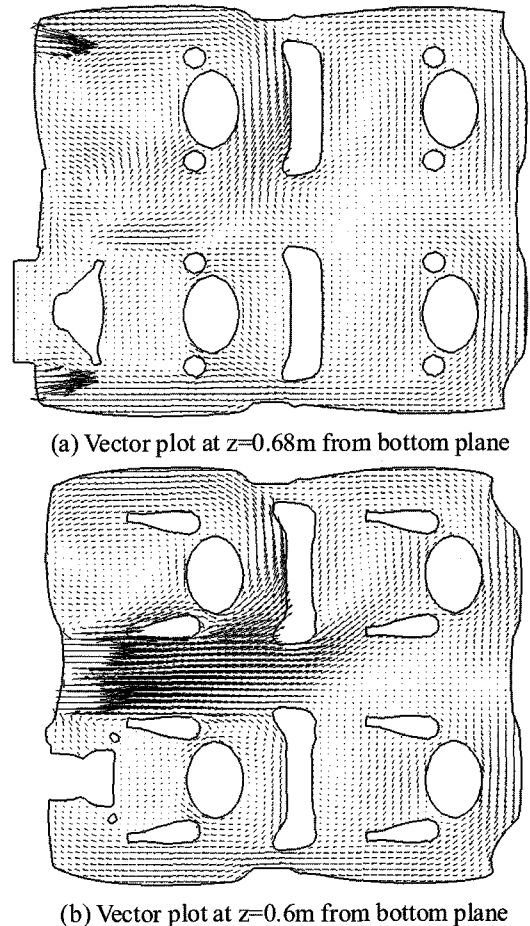


Fig. 3. Velocity distribution at the horizontal center plane of panel duct(x-y plane, top view).

를 설정하여 연구를 수행하였으나, 본 연구는 벤트의 위치등을 차량내부의 기하학적 구조와 실제차량을 적용하였기 때문에 유동구조의 차이가 발생한 것으로 사료된다.

Figure 3은 자동차 내부의 수평 단면에 대한 속도 분포를 나타낸다. Figure 3(a)는 양 측면 패널 덕트의 높이방향에 대한 중심단면($z = 0.68 \text{ m}$)에서의 속도장을 나타낸 것이고, Fig. 3(b)는 중앙 덕트 중심 단면($z = 0.6 \text{ m}$)에서의 속도장을 나타낸다. 중앙 좌우 벤트에서 빠져나온 냉풍은 그대로 뒷좌석까지 진행되는 유동 분포를 보이고 있으며, 이 과정에서 일부는 조수석 방향으로 편향되는 유동을 확인할 수 있다. 뒷좌석으로 유입된 유동은 후면 유리창에 부딪히면서 복잡한 3차원적 유동구조를 가지게 되며, 이 과정에서 유동은 양 측면 도어와 앞좌석 아랫쪽 좁은 공간을 지나 출구 벤트를 통해 재순환하게 된다.

이러한 과정을 보다 시각적으로 살펴보기 위해 각 패널 벤트에서 연결되는 유맥선(streakline)으로 표현하여 Fig. 4에 나타내었다. Figure 4(a), (b)는 양 측면 벤트에서 시작된 유맥선의 흐름을 나타낸다. 좌 우측 벤트에서 빠져나온 냉풍은 거의 좌우 대칭적인 흐름의 구조를 보인다. 지면에 대해 약 45도 위쪽 방향으로 분사된 냉풍은 앞 좌석 승객의 좌우측 어깨를 지나 천정 벽면을 따라 뒷좌석으로 유입되며 이는 다시 후면 창에

부딪힌 후 좌우측 도어 벽면을 따라 회전하면서 다시 앞 좌석으로 돌아오는 8자 형태의 유동을 보이고 있다. 반면, 중앙 좌우벤트를 시작으로 하는 유맥선을 나타내는 Fig. 4(c), (d)의 경우, 대부분의 유동이 뒷좌석으로 유입되어 뒷좌석 벽면에 부딪혀 좌우측 도어벽면을 따라 앞좌석 쪽으로 유입되는 형태를 띄게 되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 승객의 쾌적성 평가를 위한 기초자료로서 내부순환모드 조건에서 유동장 내 각 단면에 대한 속도를 정량적으로 가시화하였다. 계산 결과의 신뢰성을 위하여 실제차량 내부에 대한 유동해석을 실시하여 실차에 바로 적용 가능한 정량적인 데이터 분석을 시도하였고, 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 패널 벤트를 통해 실내로 유입되는 공기는 벤트에서 멀어질수록 폭이 점차 확대되는 제트형태의 유동특성을 가지며, 중앙 덕트에서의 평균 속도는 3.69 m/s , 양 측면 덕트에서의 평균속도는 3.77 m/s 로 계산되었다.
- 2) 내부 순환모드에서의 유동은 중앙단면에 대해 비대칭적으로 위치해 있는 출구 경계면으로 인해 국부적인 압력 차가 존재하였고, 앞 좌석보다는 뒷좌석에서, 운전석 보다는 조수석 쪽에서 상대적으로 더 낮은 압력 분포를 보였고, 이로 인해 도어쪽 부근과 앞 좌석 밑 부근에서 역류(backflow)현상이 발생하였다.
- 3) 본 논문에서 제시된 속도장과 유맥선 분석을 통해 조수석에서의 냉각속도가 가장 빠를 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행한 자동차 핵심기반 기술개발사업의 기술 개발 결과이며, 이에 감사 드립니다. 아울러 이 연구과제 수행에 도움을 준 현대자동차에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Fanger, P. O., 1970, Thermal comfort-analysis and application in environment engineering, McGraw-Hill, Newyork.
- 2) Hong, S. H., Kim, M. E., Kim, M. H., 2006, "Thermal environment analysis in passenger's cabin and

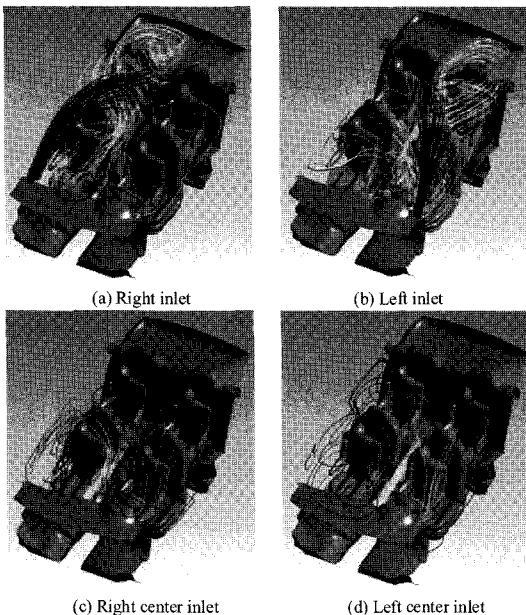


Fig. 4. Streakline from 4 panel ducts

- evaluation of thermal comfort”, SAREK, Journal of equipment, Vol.35(10), pp.34~45.
- 3) Hara, J., Fujitani, K., Kuwahara, K., 1989, “Computer simulation of passenger compartment airflow”, SAE paper, No.881749.
 - 4) Currie, J., 1997, “Numerical simulation of the flow in a passenger compartment and evaluation of the thermal comfort of the occupants”, SAE paper, No.970529.
 - 5) Aroussi, A., Aghil, S., 2000, “Characterisation of the flow field in a passenger car model”, Optical diagnostics in engineering, Vol.4(1), pp.1~15.
 - 6) Alexandrov, A., Kudriavtsev, V., Reggio, M., 2001, “Analysis of flow patterns and heat transfer in generic passenger car mini-environment”, 9th Annual conference of the CFD society of Canada., pp.167~173.
 - 7) Lin, C. H., Han, T., Koromilas, C.A., 1992, “Effect of HVAC design parameters on passenger thermal comfort”, SAE paper, No.920264.
 - 8) Zhang, H., Dai, L., Xu, G., Li, Y., Chen, W., Tao, W. Q., Tao, 2009, “Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. part I: test/numerical model and validation”, Applied thermal engineering, Vol.29, pp.2022-2027.