

# 무궁화 객차 HVAC 열유동 특성 해석

## Numerical Analysis on HVAC Characteristics of Mugunghwa Passenger Car

남성원(1)

Nam Seong-Won

### ABSTRACT

Numerical simulation is conducted to clarify the heat transfer and fluid flow characteristics of HVAC(Heating, Ventilating and Air-Conditioning) for Mugunghwa passenger car. The HVAC system is installed under the floor of carbody. This new HVAC system has a lot of merits in respect of the center of gravity of carbody, flow induced noise and reduction of condensation water etc.

The standard k-epsilon turbulent model and SIMPLEC algorithm based on finite volume method are used to solve the physical HVAC model. To assure convergence, QUICK scheme for momentum equation and the first order upwind scheme for turbulent equations are used. From the results of simulation, the temperature and velocity magnitude are also distributed uniformly in the interior of car.

### 1. 서론

과거, 철도는 단순히 수송 기능만을 충족하면 되는 것으로 여겨져 왔으나 국민 생활 수준의 향상과 함께 철도 분야에서도 쾌적성을 추구하는 승객의 요구가 높아지고 있다. 이는 철도를 빠르고 안전하며 쾌적한 수송 수단으로 정착시키고, 타 교통수단에 대하여 경쟁력 우위를 확보하는데 있어서 해결하여야 될 요소 중의 하나이다.

공조 분야의 대승객 서비스 향상은 다른 많은 쾌적성 요소 중에서도 그 비중이 매우 크다고 할 수 있으며 승객의 건강 문제와도 관련이 있다.

한편, 기존선에서 운용중인 객차의 공조장치는 대부분이 천장 취부식 구조로 되어 있다. 이러한 구조는 차량무게 중심이 높아진다는 점과 천장에서의 용결수의 낙하 및 공조 소음과 같은 문제를 야기할 수 있다. 이에 대한 대안으로 공조 기기를 차량 하부에 배치하는 하부식 공조장치가 개발되어 선진국에서는 철도 차량에 장착되고 있다.

하부식 공조장치는 차량의 무게중심을 낮출 뿐만아니라 용결수의 객실로의 낙하문제를 없애주며, 방음측면에서도 천장식보다 손쉽게 대처할 수 있는 구조이다. 그러나 차량하부에 다른 기기의 간섭문제와 객실로의 송배기 덕트 설계등의 문제가 새로이 발생한다. 이와 같은 것은 공조 기기 자체의 문제라기보다는 설계시의 시스템 인터페이스 문제로 남게되며 차량의 초기 설계단계 및 제작시 차체 구조와 연계하여 해결하여야 한다[1].

(1) 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

따라서 본 연구에서는 우리나라 객차에 처음 도입되는 하부식 공조장치에 대한 열유동 해석을 통하여 객실내 온도분포 및 유속분포의 정량적 및 정성적인 특징을 파악하였다.

## 2. 지배방정식

무궁화 객차 객실내 HVAC 장치의 열유동 특성과 관련된 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식 및 에너지 방정식으로 구성되며 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다[2,3].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \right] + S \quad (3)$$

HVAC시스템에서 창문 및 차체 지붕을 통한 외부 열량의 수수도 함께 고려하여야 하므로 고체 벽면의 열전달과 합성하여서 해석하여야 한다. 열생성이 있는 경우, 고체벽면의 열전도 방정식은 아래 식으로 주어진다.

$$\rho_w c_w \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_w \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{Q} \quad (4)$$

객실내의 유동 문제와 같이 해석 대상물의 형상이 복잡한 구조에서는 유동 형태가 일반적으로 난류이므로 레이놀즈 응력에 대한 적절한 모델링이 필요하다.

난류모델로 많이 이용되고 있는 k-ε 난류 모델은 레이놀즈 응력이 평균속도 구배에 비례한다는 Boussinesq가설과 이 응력이 모든 방향에 대하여 등방향 길이를 갖는다는 가정에 기초한 모델로 다음과 같이 표시할 수 있다[4].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho (P - \epsilon) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j \epsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \rho \frac{\epsilon}{k} (c_1 P - c_2 \epsilon) \quad (6)$$

$$P = \mu_t \left[ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

난류 지배방정식에 나오는 각 계수는  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ ,  $c_1 = 1.44$ ,  $c_2 = 1.92$ ,  $c_\mu = 0.09$ 로 주어진다.

## 3. 수치해법

그림1 및 그림2는 계산에 사용한 객차 모델과 계산 격자를 나타낸 것이다. 객실 중앙면을 좌우 대칭 경계로 하였으며 창틀과 측벽 하부에서 객실로 공기가 유입된다. 양측 단부에 통로로의 유출구가 있으며 측벽하부에 리턴구가 설계되어 있다. 공기유입구에는 각각 1.2m/s와 2.7m/s의 유입속도를 경계조건으로 주었으며 양측 단부의 유출구는 pressure-outlet경계로 하였다. 리턴구는 팬에 의하여 강제 배출되므로 팬을 경계로 압력도약이 있게된다. 따라서  $\Delta P = K_f \rho v^2/2$ 과 같은 압력값을 경계로 주었다. 외부온도의 영향을 받기쉬운 창문과 차체지붕에는 외부온도에 따른 열유속을 경계로 주었으며 이를 온도경계로 한 경우와 비교하였다. 계산시, 외기온도는 34℃로 하였으며, 냉방온도는 25℃로 가정하였다.

전산해석에는 Gambit Version1.3을 이용하여 차체모델을 약 68000개의 Tetrahedral격자로 구성하였으며 운동량 방정식은 QUICK스킴을, 난류에너지 방정식은 1차 상류차분 스킴을 사용하였다.

또한 압력방정식은 SIMPLEC 알고리즘 이용하였다. 이산화된 방정식의 해석에는 상용 열유체 해석 프로그램인 Fluent Ver.5.3을 이용하였다. 에너지방정식은  $10^{-6}$ , 기타 방정식은  $10^{-3}$  을 수렴판정 조건으로 하였으며 정상상태의 계산에 SGI Indigo 2 기종을 사용하여 반복계산 약 210회로 수렴까지는 약 3시간이 소요되었다.

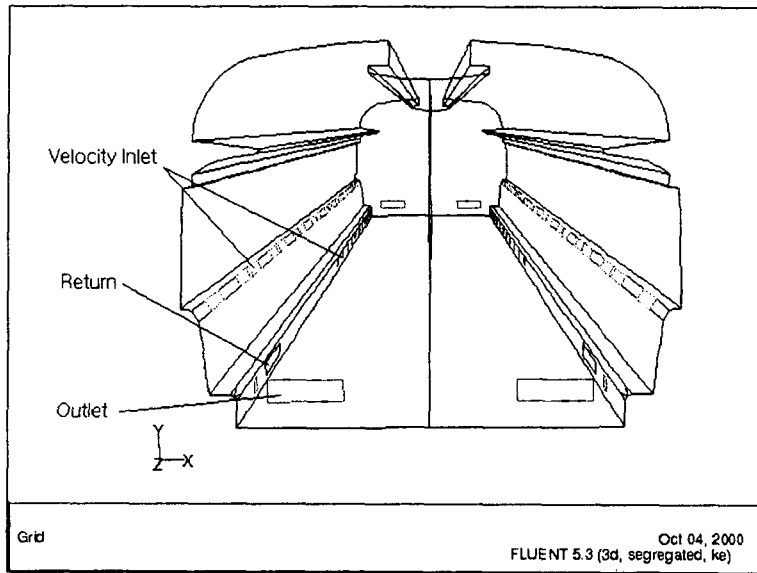


Fig. 1 Calculation Model

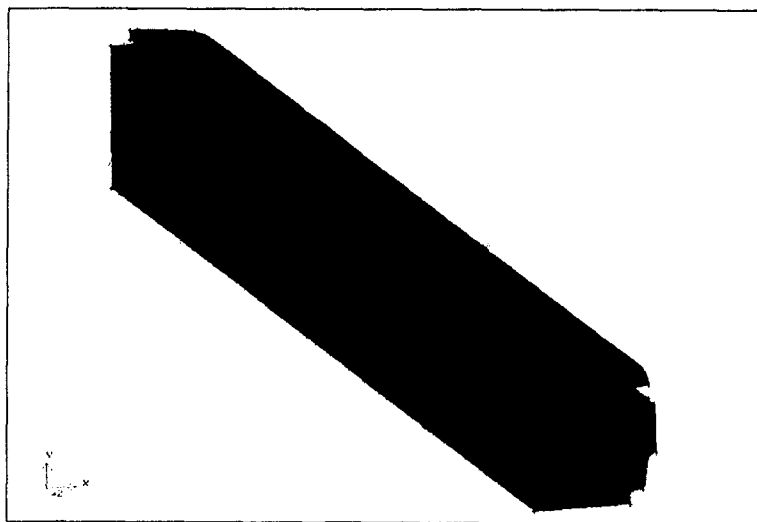


Fig. 2 Grid

#### 4. 결과 및 고찰

그림3~그림5는 공조 공기가 창틀 유입구에서 수직으로 들어올 때의 유속벡터, 온도분포 및 유적선을 나타낸 것이다. 창틀 유입구에서 수직으로 들어온 공기는 창문을 따라 상승하여 객실내 선반에서 방향을 전환하여 객실 중앙부로 순환되는 형태를 나타낸다. 즉, 창문을 따라 wall bounded

flow와 같은 형태가 되어 비교적 큰 유속분포를 나타내지만 선반 상부에서는 이에 비하면 약한 유속 분포를 나타낸다. 따라서, 지붕으로부터의 열흡수로 인한 고온영역을 줄이기 위한 한 방안으로서 선반을 그럴 구조로하여 창틀로 유입된 냉방공기가 창문을 따라 천장까지 유동될 수 있도록 하는 것도 고려해 볼 수 있다.

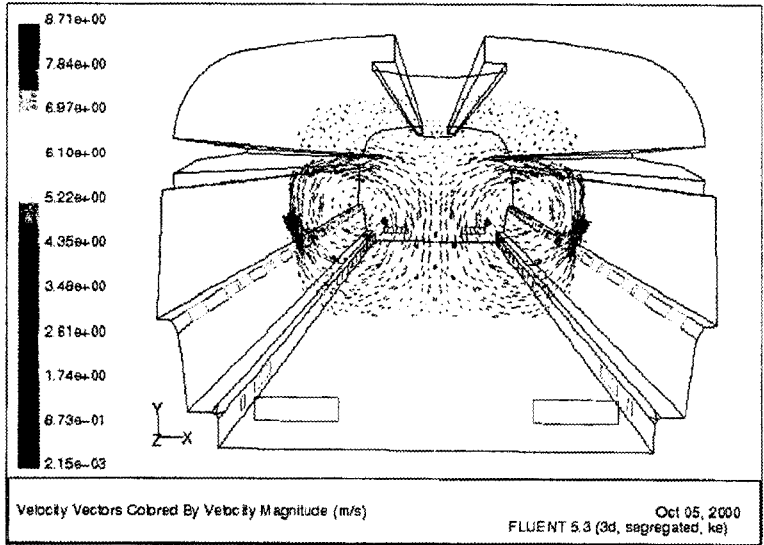


Fig. 3 Velocity Vectors (Vertical Inlet)

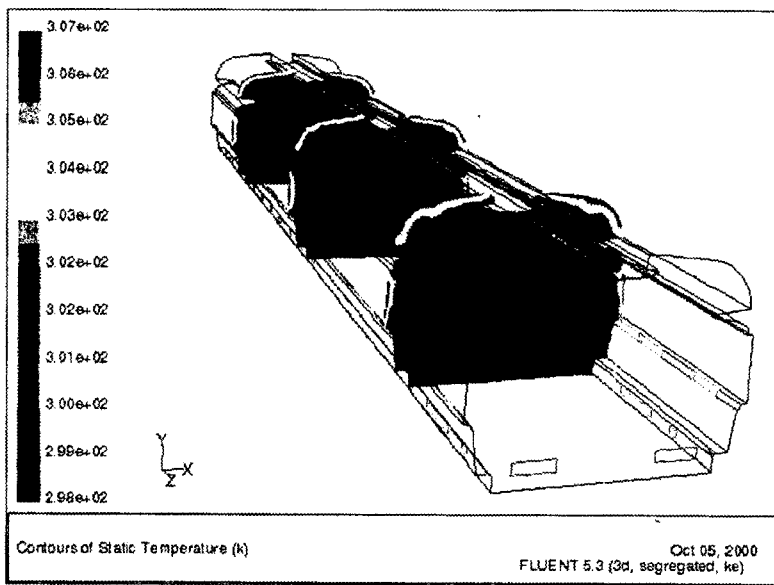


Fig. 4 Temperature Distribution (3m, 9m, 15m section)

객실내 온도분포에서는 외부 열유속이 주어진 천장 및 창문 부근을 제외하고는 대체로 균등한 온도분포를 나타낸다. 그러나 3m단면과 15m단면에서의 온도분포가 서로 다른 형태를 나타내고 있는 것은 객실 내부의 공기 유출입구가 전후 대칭이 아닌 것에 기인하는 것으로 사료된다. 즉 리턴구에 가까이 위치한 15m단면의 온도분포가 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다.

유적선의 경우, 창틀로 유입된 공기는 선반을 따라 객실 중앙부로 순환되며, 좌석 하부에서 유입된 공기는 객실바닥 근처로 순환됨을 알 수 있다.

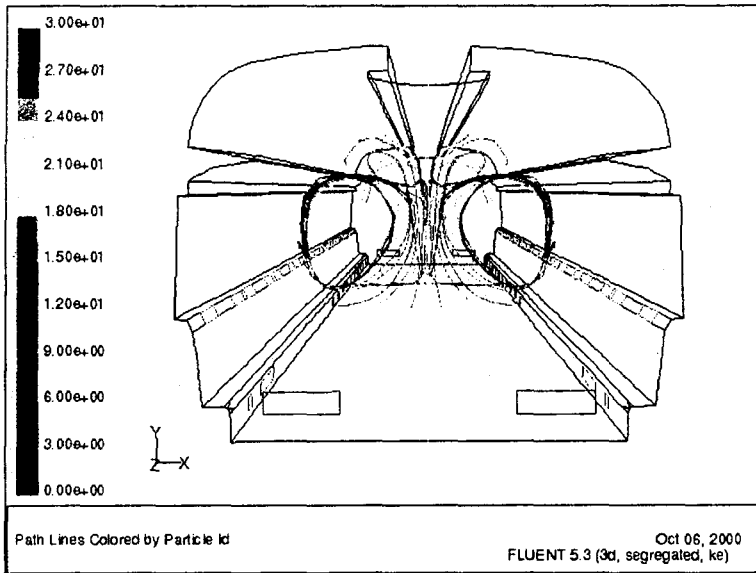


Fig. 5 Pathline (Vertical Inlet)

그림6~그림8에 창틀에서 30° 경사로 유입되는 경우의 속도분포, 온도분포 및 유적선을 나타내었다. 수직으로 유입될 때와는 달리 wall bounded flow와 같은 형태는 볼 수 없으며 유적선의 순환 반경도 줄어들었으며, 그 결과 객실 중앙부에서의 온도분포가 균등하게 형성됨을 알 수 있다. 그러나, 실제 열차의 운용상황을 고려하면, 공기 유입이 경사진 경우는 냉방풍이 승객에게 직접 닿아 불쾌감을 일으킬 수도 있으므로 풍향을 개별적으로 바꿀 수 있는 구조로 하는 것도 유효한 방안으로 사료된다.

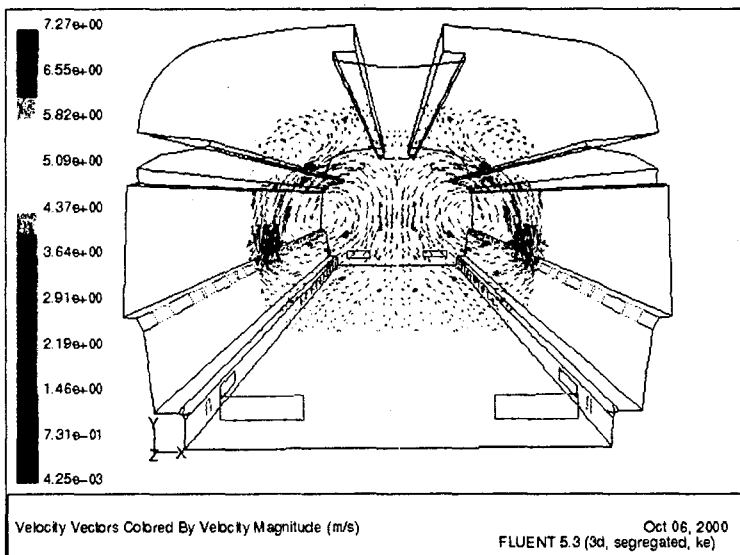


Fig. 6 Velocity Vectors (30° slant Inlet)

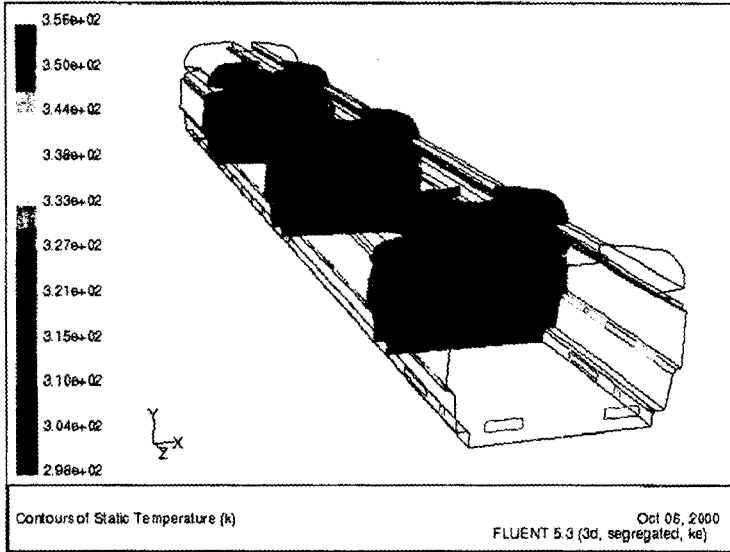


Fig. 7 Temperature Distribution (3m, 9m, 15m section)

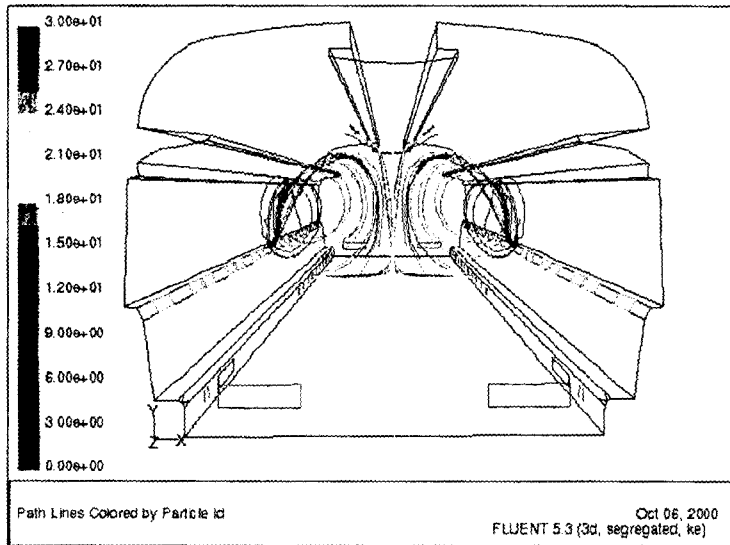


Fig. 8 Pathline (30° slant Inlet)

## 5. 결론

본 연구에서는 무궁화 객차의 하부식 공조 장치에 대한 열유동 특성을 전산 해석하였다. 계산에 사용한 모델은 현재 국내에서 운용중인 철도차량으로서는 최초로 하부식 일체형 공조장치를 채택한 차량을 대상으로 하였다. 따라서, 본 연구에서는 하부식 일체형으로 바뀔에 따라 객실로의 공조 유출입구가 대폭 변경된데 대한 온도 및 유속 분포 특성을 해석하였다. 유한체적법의 해석에

는 Control volume법에 기초한 SIMPLEC알고리즘과  $k-\epsilon$  난류모델을 사용한 상용 해석 프로그램인 Fluent를 이용하였다. 무궁화 객차의 3차원 HVAC 모델에 대한 해석을 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 객실내 유속분포 및 단면별 온도분포를 정성적 및 정량적으로 구하였다.
- (2) 객실내부에서 균등한 온도분포를 얻기 위하여는 창틀 유입구에서 수직조건보다 경사진 유속 조건이 더 양호하다.
- (3) 객실내 균등한 온도분포를 위하여는 공기 순환구를 전후 대칭으로 설치하는 것이 유효하다.

#### 후기

본 연구는 (주)디자인리미트의 기업수탁연구의 일환으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] “냉난방 장치 부품 설명서”, (주)디자인리미트, 2000
- [2] R.L.Street, G.Z.Watters and J.K.Vennard, “Elementary Fluid Mechanics”, John wiley & sons, 1996
- [3] “機械工學便覽-流體工學”, 일본기계학회편, 1986
- [4] “Fluent & Gambit User’s manual” FLUENT Inc.