

2층 객차의 HVAC특성 전산해석

Numerical Analysis on the HVAC Characteristics of Double-deck Train

남성원* 김형진**
Nam, Seong-Won Kim, Hyeong-Jin

ABSTRACT

Numerical simulation is conducted to clarify the heat transfer and fluid flow characteristics of HVAC(Heating, Ventilating and Air-Conditioning) for double-deck train. The HVAC system is installed under the roof of carbody. In the lay-out of HVAC system, air duct must be installed to supply air to 1st and 2nd floor respectively.

The standard k-epsilon turbulent models 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 passenger car.

1. 서론

철도가 개발된 초기에는 교통기관으로서 단순히 수송 기능만을 충족하면 되는 것으로 여겨져 왔으나, 최근에는 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 응결수의 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.

그러나, 2층 열차의 경우는 1, 2층의 객실 높이를 확보하여야 할 필요가 있기 때문에 기존차량과는 달리 공조장치의 설치공간 여유가 작으므로 객차 양측 단부의 1층 객차 부분의 천장 또는 부속실에 설치하여 덕트를 통하여 1, 2층으로 공조 공기를 공급하는 방식이 널리 채택되고 있다. 이와 같은 것은 공조 기기 자체의 문제라기보다는 설계시의 시스템 인터페이스 문제로 남게되며 차량의 초기 설계 단계 및 제작시 차체 구조와 연계하여 해결하여야 한다.

본 연구에서는 2층 객차의 공조장치의 냉방 특성에 대한 전산해석을 하였다. 실제 차량을 제작하기에 앞서, 이와 같은 전산해석을 통하여 객실내 각 부위의 온도분포를 분석하는 것은 차량 제작비

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

절감에 도움이 될 것으로 판단된다. 본 연구에서는 상용 해석 프로그램을 사용하여 2층 차량의 객실 내 온도 및 유속의 정량적 및 정성적인 특징을 파악하였다.

2. 유동 해석 지배방정식

철도차량 객실내 HVAC 장치의 열유동 특성과 관련된 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식 및 에너지 방정식으로 구성되며 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다[1, 2].

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

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

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

HVAC시스템에서 창문 및 차체 지붕을 통한 외부 열량의 수수도 함께 고려하여야 하므로 고체벽면의 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[3].

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

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

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

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. 전산해석 방법

그림1 및 그림2는 계산에 사용한 2층 객차 모델과 계산 격자를 나타낸 것이다. 공기유입구에는 각각 유입속도를 경계조건으로 주었으며 양측 단부의 유출구는 pressure-outlet 경계로 하였다. 리턴구는 팬에 의하여 강제 배출되므로 팬을 경계로 압력도약이 있게된다. 따라서 $\Delta P = K_i \rho v^2 / 2$ 과 같은 압력값을 경계로 주었다. 외부온도의 영향을 받기쉬운 창문과 차체지붕에는 외부온도에 따른 열유속을 경계를 주었다. 계산시, 외기온도는 30℃로 하였으며, 냉방온도는 20℃로 가정하였다.

전산해석에는 Gambit Ver. 2.0을 이용하여 차체모델을 계산 셀(cell)수 약 150,000개로 구성하였다. 본 모델은 계산의 간략화를 위하여 의자, 객실내 기기발열 등은 고려하지 않았으며, 차체 형상 및 경계 조건도 단순화하였다.

운동량 방정식은 QUICK스킴을, 난류에너지 방정식은 1차 상류차분 스킴을 사용하였다. 또한 압력방정식은 SIMPLE 알고리즘 이용하였다. 이산화된 방정식의 해석에는 상용 열유체 해석 프로그램

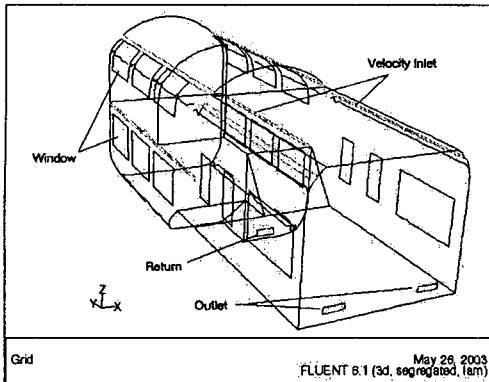


Fig. 1 Calculation model

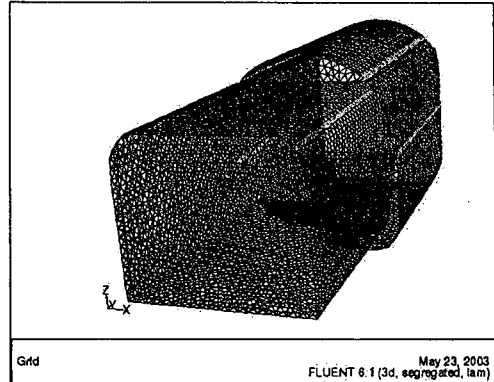


Fig. 2 Tetrahedral mesh

인 Fluent Ver.6.1을 이용하였다. 에너지방정식은 10^{-6} , 기타 방정식은 10^{-3} 을 수렴판정 조건으로 하였으며 정상상태의 계산에 Pentium IV 1.7GHz, 512MB 기종을 사용하여 반복계산 약 130회로 수렴까지는 약 2시간이 소요되었다.

4. 결과 및 고찰

그림 3 및 그림4에 1층 객차 부분 및 2층 객차 부분에 대한 객실내 유속 분포를 나타내었다. 단층 객실 부분인 단면 2000mm에서의 분포는 창문 위에서 나온 냉방 공기가 객실 하부로 순환되며, 2층 객실 부분인 단면 8500mm에서의 분포는 1-2층 객실이 분리되어 순환됨을 보여주고 있다. 그림 5와 그림6은 각각 객실내 공기 유동의 pathline과 1-2층 단면에서의 공기 온도 분포를 나타낸다. 정상 상태에서의 객실내 온도 분포는 외부 온도 경계 조건을 주는 창문 근처를 제외하고 대부분이 냉방 설정 온도로 유지됨을 알 수 있다. 이는 창문을 제외한 차체의 벽면을 단열 조건으로 가정하여 계산한 것에 기인하는 것으로 사료된다.

그림 7 및 그림8에 객실내 수직 및 수평 온도 분포를 나타내었다. 수직 온도 분포는 2층 객실의 바닥면으로 부터의 300mm지점에서의 좌우 분포와 1층 객실의 천장으로 부터의 300mm지점에서의 좌우 분포를 나타낸 것이며, 수평 온도 분포는 1층 객실의 바닥으로부터 1200mm인 높이에서의 차체 길이 방향으로 각각 1000, 1500, 2000mm위치의 분포를 나타낸 것이다. 위의 그림으로부터 알 수 있듯이 정상상태에서의 객실내 수평 및 수직 온도 분포에는 거의 편차가 없이 균등한 분포를 보여준다.

전반적인 유동 형태는 좌우 창문위의 공기 유출구에서 나온 냉방 공기는 객실 중앙 부위에서 부딪친 후 객실 바닥쪽으로 하강하여 순환되는 형태를 나타낸다. 1층 객실 부분에서는 큰 순환류가 1개, 2층 객실에서는 상하로 각각 2개의 순환류가 있음을 알 수 있다.

그림 9 및 그림10에 객실내의 수직 및 수평 속도 분포를 나타내었다. 온도분포와 마찬가지로 2층 객실 바닥면으로부터 300mm지점 높이와 1층 객실 천장면으로부터 300mm지점에서의 유속분포는 위치에 따라 다소 차이는 있지만 대부분이 0.5m/s이하의 유속을 나타내며, 수평 분포에서도 1000, 1500, 2000mm지점에서 대체로 균등한 유속을 나타내며, 이러한 결과들은 모두 실내 쾌적성 기준값인 기류 속도값 0.5m/s 이하, 수직 온도차 3℃ 및 수평온도차 2℃ 이내를 만족한다.

그러나, 본 연구에서는 차체를 단열조건으로 하였으며, 경계조건에도 일부 계산상 편의를 위하여 단순화하여 해석하였다. 향후에는 보다 더 가혹한 외부 조건에서 다양한 파라미터에 대하여 해석 검토하여 볼 필요성이 있다.

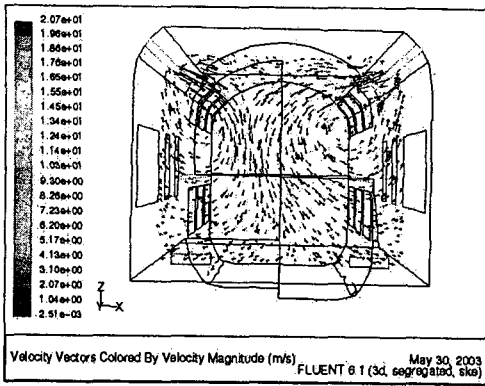


Fig. 3 Velocity vector (section 2000mm)

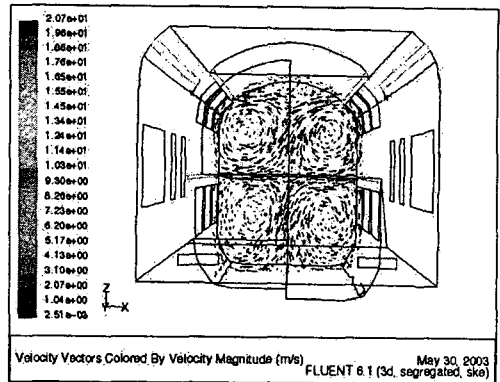


Fig. 4 Velocity vector (section 8500mm)

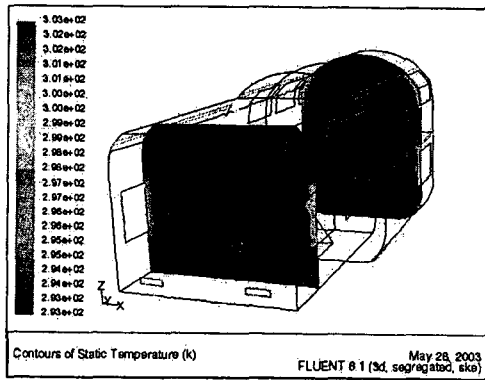


Fig. 5 Temperature distribution

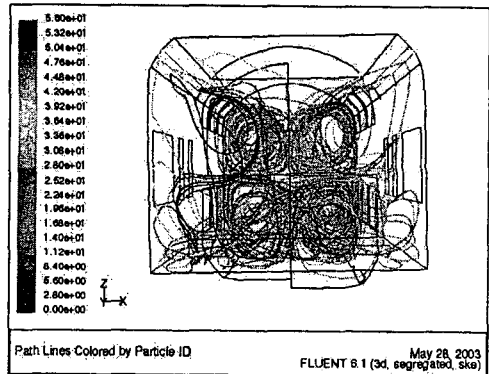


Fig. 6 Path line

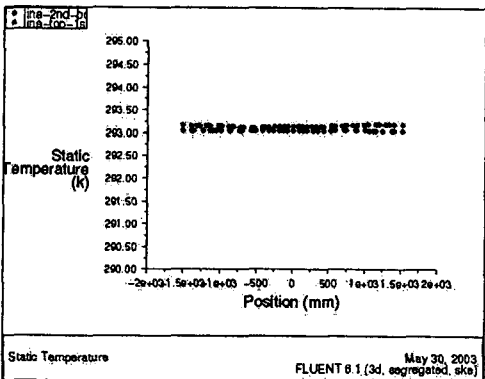


Fig. 7 Vertical temperature distribution

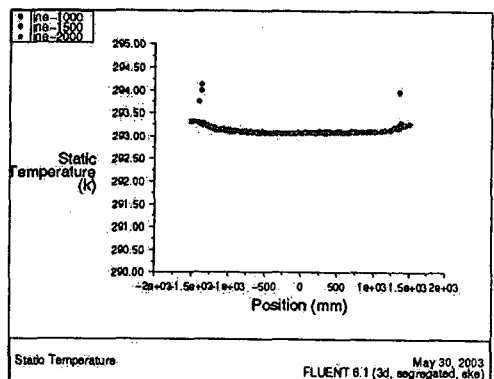


Fig. 8 Horizontal temperature distribution

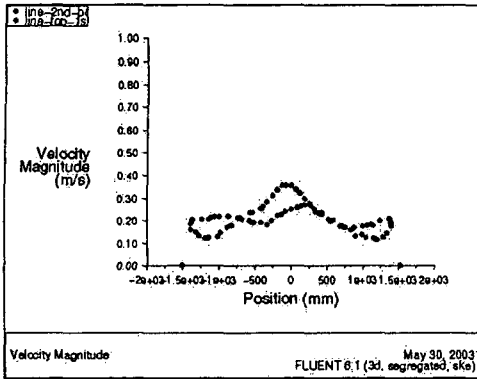


Fig. 9 Vertical velocity distribution

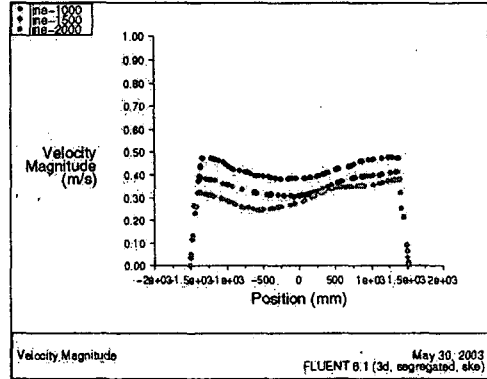


Fig. 10 Horizontal velocity distribution

5. 결론

본 연구에서는 2층 객차의 객실내 공기 유속 및 온도분포 특성을 전산 해석하였다. 계산에 사용한 공조모델은 JR동일본의 215계 열차와 유사하게 구성하여 건설교통기술혁신사업인 2층 급행열차 운영을 위한 기술개발 및 설계 기준에 관한 연구에서 제안한 차체모델에 적용하였다. 유한체적법의 해석에는 Control volume법에 기초한 SIMPLEC 알고리즘과 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용한 상용 해석 프로그램인 Fluent를 이용하였으며, 2층 객차의 3차원 HVAC 모델에 대한 해석을 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 객실내 유속분포 및 단면별 수평 수직 온도분포를 정성적 및 정량적으로 구하였으며, 이들 값들은 객실내 수직온도 편차 3℃, 수평온도 편차 2℃인 기준값 이하로 균등하게 분포한다.

(2) 객실내 기류 속도도 대부분의 영역에서 0.5m/s 이하를 나타내며, 객실 좌우의 유동형태가 대체로 균등하게 서로 대칭을 이룬다.

후기

본 연구는 건설교통기술혁신사업의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] R.L.Street, G.Z.Watters and J.K.Vennard, "Elementary Fluid Mechanics", John wiley & sons, 1996
- [2] "機械工學便覽-流體工學", 일본기계학회편, 1986
- [3] "Fluent & Gambit User's manual" FLUENT Inc.