

기차 승객의 온열 쾌적성에 관한 수치해석

김 만 회*

경북대학교 기계공학부

Numerical Study on Human Thermal Comfort in a Passenger Train

Man-Hoe Kim*

School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea
(Received 4 September 2015 / Revised 15 November 2015 / Accepted 16 November 2015)

Abstract : This paper presents computational fluid dynamics (CFD) analysis on passenger thermal comfort in a train. Human thermal comfort in vehicles depends mainly on air temperature, mean radiant temperature, air velocity, humidity, and direct solar flux, as well as the level of activity and thermal properties of clothing and seat. The velocity and temperature distribution in a train with and without passengers are reported. The thermal comfort in a passenger train are also presented based on PMV and PPD indices with 16 segments of the human body.

Key words : CFD(전산유체역학), Passenger train(기차), PMV(예상온열감), PPD(예상불만족도), Thermal comfort(온열쾌적감)

Nomenclature

- f_d : ratio of clothed surface area to naked surface area
- h_c : convection heat transfer coefficient, W/m^2K
- I_d : thermal resistance of the clothing, clo
- M : metabolic rate per unit body surface area, W/m^2
- p_a : partial pressure of water vapor in indoor air, kPa
- t_a : air temperature, $^{\circ}C$
- t_{sk} : mean skin temperature, $^{\circ}C$
- \bar{t}_r : mean radiant temperature, $^{\circ}C$
- t_{cl} : surface temperature of clothed body, $^{\circ}C$
- V_{ar} : air velocity, m/s
- W : external work, W/m^2

1. 서론

현대는 산업의 고도화와 생활수준의 향상으로 걷
물론 물론 교통수단의 실내 환경의 질(IEQ, Indoor

Environmental Quality)에 대한 중요성이 점차 증대
하고 있다. IEQ는 열적쾌적성, 공기질, 조명/비전 및
진동/소음으로 구분되며 이들 4대요소의 복합적 작
용에 의해 결정된다. 기차와 항공기의 경우는 다른
교통수단과는 달리 장시간 고속으로 이동하므로 승
객의 안전을 위하여 객실의 창문이 대부분 고정되
어 있는 밀폐된 공간으로 구성되어 있다. 따라서 승
객이 실내 환경을 직접 조정할 수 없는 구조로 공기
질을 포함하는 실내 환경의 질이 상대적으로 중요
하다. 기차 객실내의 쾌적성은 소음 및 진동과 같은
물리적인 특성 뿐 아니라 공기조화, 의자의 크기와
간격, 안락함, 실내 디자인과 분위기, 승무원의 친절
도 등과 같은 시각적, 공간적 및 상대적인 여러 요소
가 복합적으로 작용하기 때문에 한마디로 정의하고
이를 정량적으로 평가하기가 어려워 객실내의 종합
적인 쾌적성 평가에 대한 지표는 아직 뚜렷하게 확
립되어 있지 않다. 공기조화 공간에서 사람이 느끼
는 쾌적감은 온·습도 및 기류를 포함한 실내 온도

*Corresponding author, E-mail: manhoe.kim@knu.ac.kr

분포, 계절이나 재실자의 활동량과 착의량 및 실내 공기의 질 등에 크게 영향을 받는다. 그러나 이를 위한 체계적인 국내외 연구, 표준 제정 및 기술 정보의 구축은 미흡한 상태이다.

철도 객차나 운전실의 온열 쾌적성에 대한 연구는 건물이나 자동차에 비해 상대적으로 발표된 연구사례가 적다. Ampofo 등¹⁾과 Maidment와 Mis-senden²⁾은 영국의 지하철 객실의 온열 쾌적성을 향상시키기 위하여 경제적이고 친환경적인 지하수를 이용하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 그들은 정확한 온열 쾌적성 평가를 위해 객차의 냉방부하를 계산하였다. 인체의 온도에 따른 현열과 잠열, 조명부하와 객실 벽과 지하공간의 열전달, 제동장치의 열 생성 및 전달 등을 수학적 모델링을 통해 계산하였다. 그리고 승용차, 버스, 바이모달 트램 및 경전철 등에 대한 차내의 열유동 특성에 대한 수치해석과 열 쾌적성에 대한 수치적 연구와 열 쾌적성 향상을 위한 실험 연구 결과가 최근에 발표된 사례가 있다.³⁻⁷⁾

본 연구는 신형 무궁화 객차를 대상으로 승객의 수와 승객의 자리 배치에 따른 객실 내 열유동 특성을 수치적으로 해석한다. 그리고 객실 내 온열환경에 대한 평가는 객실내의 열유동 해석 결과를 토대로 인체를 16개 부분으로 나누어 각 부위별 열적 쾌적성을 PMV(Predicted Mean Vote)와 PPD(Predicted Percent Dissatisfied) 지수를 이용하여 평가한다.⁸⁾

2. 수치해석

객실 내부의 열유동 해석을 위한 경계조건을 구하기 위해 우선 공조덕트에 대한 수치해석을 진행하였으며, 그 결과를 객실의 온열환경 평가를 위한 열유동 특성을 해석하는데 사용한다.

2.1 지배 방정식

신형 무궁화 객실 내부의 열유동 해석은 여름철 냉방조건에 대하여 3차원 정상상태 비압축성으로 가정하여 계산하였다. 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며 열차의 가속효과는 고려하지 않았다. 본 연구에서 수치해석에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.⁹⁾

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \\ & - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\delta_{ij}] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}[u_i(\rho E + p)] \\ = \frac{\partial}{\partial x_i}(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j(\tau_{ij})_{eff}) + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 경계조건

본 논문에서 다루는 신형 무궁화의 객차에는 1개의 공조기가 객실 바닥 아래에 위치해 있으며 표준 냉방용량은 34,000 kcal/h이다. 공조기에서 덕트로 공급되는 냉기의 유량은 1.5 m³/s이며, 다수의 입구 그릴을 통하여 객실 내로 공급된다. 이중 리턴그릴을 통하여 공조기로 재순환되는 공기량은 전체 공급유량의 80%인 1.2 m³/s이며 객실 앞, 뒤의 문 출구로 외부로 배출되는 공기량은 나머지 20%인 0.3 m³/s이다. 객실의 대칭성을 고려하여 객실의 1/2만 계산 영역으로 하고 대칭면은 대칭조건을 주었다. Fig. 1에 객실의 형상과 계산영역을 나타내었다.

2.2.1 입구 경계조건

공조기에서 나온 냉기는 객실의 중간을 기준으로 양쪽으로 나누어 공급되기 때문에 계산 영역에서의 냉기공급량은 전체 유량의 50%인 0.75 m³/s이다.

냉기 유량과 입구 단면적(0.0827 m²)으로부터 평균유속을 구할 수 있으며, 공급온도는 아래와 같다.

$$U_{in} = V_{in} = 0, W_{in} = 9.06 \text{ m/s} \quad (4)$$

$$T_{in} = 10 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5)$$

난류 운동에너지 k 와 난류 소산에너지 ϵ 는 다음 식으로 표현된다.

$$k = 1.5(W_{in} \times l)^2 \quad (6)$$

$$\epsilon = C_\mu^{0.75} \times (k^{1.5}/l), l = 0.07L \quad (7)$$

여기에서,

I: 난류강도 (10%), L: 수력직경

l: 난류길이 스케일, C_μ: 난류상수 (0.09)

이다.

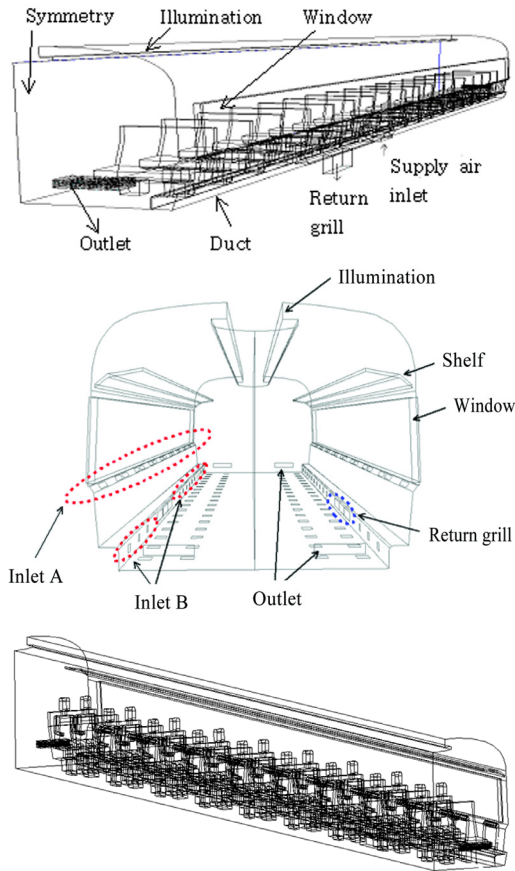


Fig. 1 Schematic and computation model of a train

2.2.2 출구 및 벽면 경계조건

출구조건은 완전 발달된 유동으로 가정하였으며 공조기 설계 사양에 따라 그릴로 공급유량의 80 % 인 0.6 m³/s, 앞·뒤 출입문 벽면 출구로 나머지 20 % 인 0.25 m³/s 의 50 %가 각각 배출되는 것으로 하였다. 덕트와 객실 내부의 경계조건으로 벽면에서의 속도경계조건은 점착조건(no-slip condition)을 사용하였다. 객실과 접해 있는 덕트, 출입문과 바닥면은 단열 조건을 부여하였다. 그리고 외부에 노출된 덕트의 바깥쪽 벽면과 객실 벽면은 등온조건(35 °C)을 주었다. 천정의 형광등(32 W, 12개)과 창문은 균일 열유속 조건으로 각각 172.43 W/m²와 288.81 W/m²을 주었다. 여기서 창문(이중강화유리)으로 통과하는 태양 에너지(7월 23일 15시 기준), 즉 일사량을 기준으로 균일 열유속을 계산하였다. Table 1에 경계 조건을 요약하여 나타내었다.

Table 1 Summary of boundary conditions

냉기 입구	<ul style="list-style-type: none"> • 덕트 해석 결과 이용, • 덕트 외벽 : 등온조건 (35 °C)
Return grill 벽면 출구	<ul style="list-style-type: none"> • 완전 발달된 유동 조건 • Return grill : 입구유량의 80 % 배출 • 출입문 출구 : 입구유량의 10 % 배출
창문	<ul style="list-style-type: none"> • 창문의 태양복사량 (7월 23일 15시 기준) - Heat flux로 묘사 - $q_w = H_g / A_g = K_s \cdot I + K_g \cdot (T_w - T_i)$ - Heat flux = 288.8 W/m²
형광등	<ul style="list-style-type: none"> - 32 W, 12개 - Heat flux = 172.43 W/m²
내벽	<ul style="list-style-type: none"> • 벽면을 통과하는 태양에너지 - 등온(35 °C), Heat flux = 1.476 W/m²
출입문, 벽, 바닥	- 단열조건

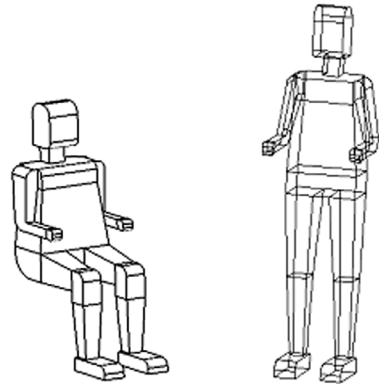


Fig. 2 Human model

2.3 인체 모델

본 연구에 사용된 인체 모델을 Fig. 2에 도시하였다. 인체는 16개 부분으로 분할하여 각 부위에서의 유속, 온도, PMV 및 PPD를 계산하였다. 16개 부위는 상반신(머리, 가슴, 등, 어깨, 팔, 손) 9개 부위와 하반신(골반, 허벅지, 장딴지, 발)의 7개 부위로 구분된다. ASHRAE⁽¹⁰⁾에서 정한 인체의 표준 체형은 키 1.73 m, 몸무게 70 kg, 표면적 1.8 m²이나, 여기서는 산업부의 국가기술표준원⁽¹¹⁾의 30대 남성의 표준 체형의 자료를 사용하기로 한다. 즉 인체모델의 앞은 키 927 mm, 어깨높이 599 mm, 어깨너비 400.8 mm, 머리길이 236.4 mm, 발너비 99.1 mm 이다. 인체의 표면적과 발열량⁽¹²⁾을 각각 1.732 m²와 104.67 W로 하면, 인체표면의 균일 열유속은 60.4 W/m²이다.

2.4 수치계산 방법

수치계산은 상용 코드인 ANSYS FLUENT를 이용하여 수행하였다. 수치계산에서 압력-속도 항은 SIMPLE 알고리즘을, 운동량과 에너지 방정식은 2차 상류차분법을 사용하였다. 수렴판단 조건으로는 에너지 방정식 및 운동 방정식과 난류에너지 방정식에 대해 무차원 잔류량 값을 각각 10^{-6} 과 10^{-3} 을 사용하였다. 수치계산을 위한 격자 생성은 Gambit을 이용하였다. 격자는 효율적인 수치계산을 위하여 수렴성과 격자수가 결과에 미치는 영향을 조사하여 hexahedral 격자를 이용하고 객실과 덕트의 열유동 해석을 위한 격자수는 각각 65만 개와 45만 개로 결정하였다.

3. 열적 쾌적성 평가

인체가 느끼는 온열 쾌적성은 동일 온도에서도 사람에 따라 다르며 개인의 심리적 또는 물리적인 상태 등으로 인해 서로 다르다. 이를 공학적으로 적용하기 위해서는 온열 쾌적성의 정도를 수치로 표시하는 것이 필요하다. 쾌적성에 영향을 미치는 개인적인 요소로는 활동량, 착의량, 나이 및 성별이 있고, 물리적인 요인으로는 공기의 온도와 유속, 습도, 평균 복사온도가 있다.

온열 쾌적성을 평가하는 지수는 현재 여러 가지가 개발되어 있으나, Fanger⁸⁾가 1970년에 제안한 PMV 이론을 토대로 1984년 제정된 ISO 7730¹³⁾이 가장 일반적으로 활용되고 있다. PMV 지수는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times \{(M-W) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M-W) - P_a] - 0.42 \times [(M-W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M \times (5867 - P_a) - 0.0014M (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \times h_c(t_{cl} - t_a)\} \quad (8)$$

여기에서,

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M-W) - 0.155I_{cl} \{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c \times (t_{cl} - t_a)\}$$

$$h_c = 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25}$$

$$\text{for } h_c = 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1 \times \sqrt{V_{ar}}$$

$$h_c = 12.1 \times \sqrt{V_{ar}}$$

$$\text{for } h_c = 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1 \times \sqrt{V_{ar}}$$

$$f_{cl} = 1.05 + 0.1 I_{cl} \text{ for } I_{cl} > 0.5 \text{ clo}$$

$$f_{cl} = 1.00 + 0.2 I_{cl} \text{ for } I_{cl} < 0.5 \text{ clo}$$

이다.

수치계산에서 구한 열유동 변수를 식 (8)에 대입하면 PMV를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 신체 활동량은 60.4 W/m^2 , 외부일은 영(zero), 여름철 의복의 착의량¹⁴⁾은 0.5 clo를 적용하였다. 상대습도는 50%로 가정하였으며, 평균 복사온도는 형광등과 창문(균일열유속 조건)외에는 객실 벽의 온도를 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 가정하였으므로 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 하였다.

1982년 Fanger는 사람들의 열적감각을 보다 쉽게 정량화 할 수 있도록 하기 위해 PMV 지수 외에 예상 불만족도(PPD)를 제안하였다. 이 PPD지표는 어떤 환경에 대한 열적 불만족자들의 전체 인원수에 대한 백분율을 나타낸 것으로 PPD지표를 통하여 특정 지점의 열환경에 대한 사람들의 예상불만족도를 알아볼 수 있으며 식 (9)로 계산된다. ISO 7730에서는 쾌적범위로 PMV와 PPD값이 $-0.5 < PMV < +0.5$, $PPD < 10\%$ 를 권장하고 있다.

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-(0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2)} \quad (9)$$

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 좌석 번호와 리턴그릴의 위치를 나타낸

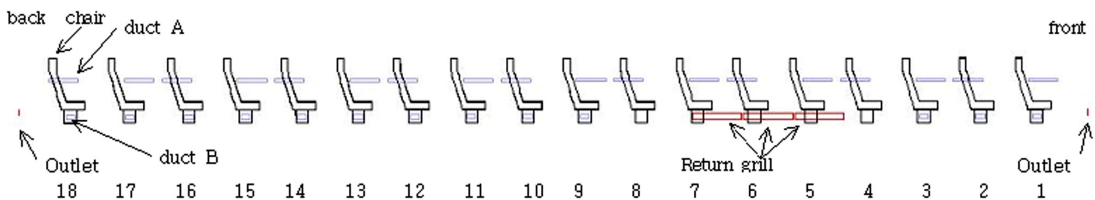


Fig. 3 Seat numbers and location of return grills

그림이다. Fig. 1과 같이 객차 하부 바닥에 있는 공조기에서 덕트를 통하여 객실로 공급된 냉기는 다수의 분기로 나누어져 있는 토출 그릴을 통하여 객실내로 유입된다. Fig. 3의 duct A(18개)와 duct B(13개)가 객실로 들어오는 냉기의 토출구의 위치이다. 4번과 8번 좌석에 duct B가 없는 이유는 리턴그릴로 공기가 역류하는 것을 방지하기 위한 것이다. Fig. 4에 객실 온도분포를 승객이 없는 경우 (a)와 승객이 창문과 복도 측에 총 18명 있는 경우 (b)에 대해 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 승객의 유무에 따라 온도 분포가 다르고 승객이 있는 경우에 객실 온도가 상대적으로 높은 것을 관찰할 수 있다. 이는 승객의 존재 따라 객실 내 유동 분포가 다르고 승객의 발열량 등에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 현재까지 탑승객을 고려하여 기차내 인체의 온열 쾌적성 평가를 수행한 연구는 찾아보기 어렵다. 본 논문에서는 신형 무궁화 객차 내 승객의 유무에 따른 단순한 경우에 대해서 PMV와 PPD 지수를 이용한 객실내 온열 쾌적성을 고찰하기로 한다. 수치계산결과는 편의상 인체의 상반신, 하반신과 몸 전체에 대한 결과에 대해서만 기술하기로 한다.

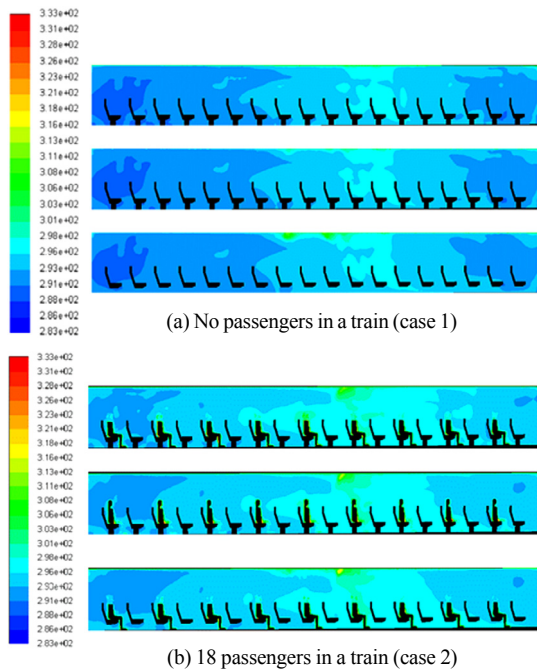


Fig. 4 Temperature distribution in a train

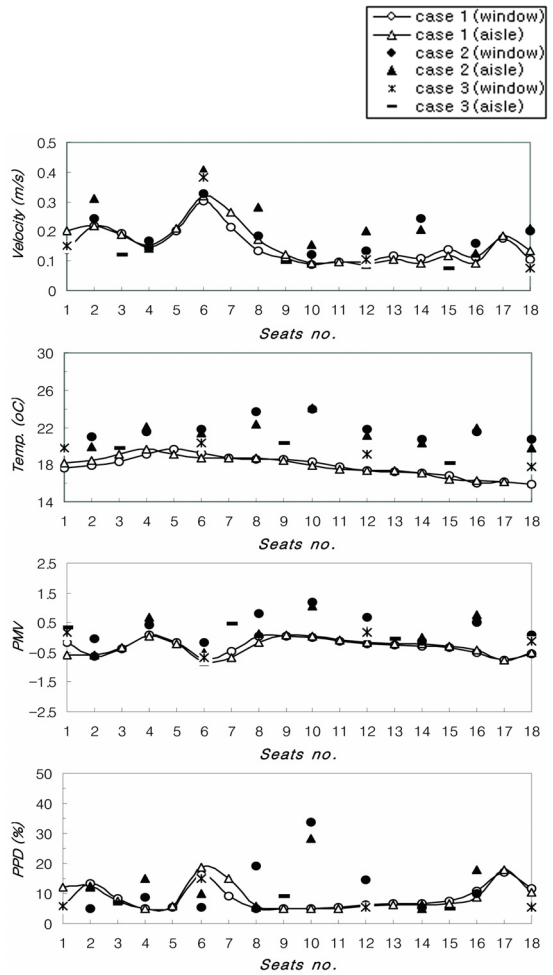


Fig. 5 Simulation results for a upper part of human body

Fig. 5 ~ 7에 승객의 위치 변화에 따른 객실의 속도와 온도 분포, PMV 및 PPD를 각각 나타내었다. 그림에서 case 1은 승객이 없는 경우이고 case 2는 좌석의 짝수 번호에만 승객이 창 측(window)과 복도 측(aisle)에 앉은 경우로 한 좌석당 2명씩 총 18명이 있는 경우이다. 그리고 case 3은 복도 측으로 3번, 9번, 15번, 창 측으로 1번, 6번, 12번 및 18번 좌석에 한명씩 총 7명이 앉아 있는 경우이다. Fig. 3에서 duct A와 duct B의 유속분포와 온도분포가 서로 상이 할 것으로 생각되어 상반신과 하반신 그리고 몸 전체로 나누어 살펴보기로 한다. Fig. 5는 상반신에 대한 것으로 y축은 승객 1인당 머리와 가슴, 등 위 그리고 양 어깨, 양 팔, 양 손의 총 9개 인체 부위에

기차 승객의 온열 쾌적성에 관한 수치해석

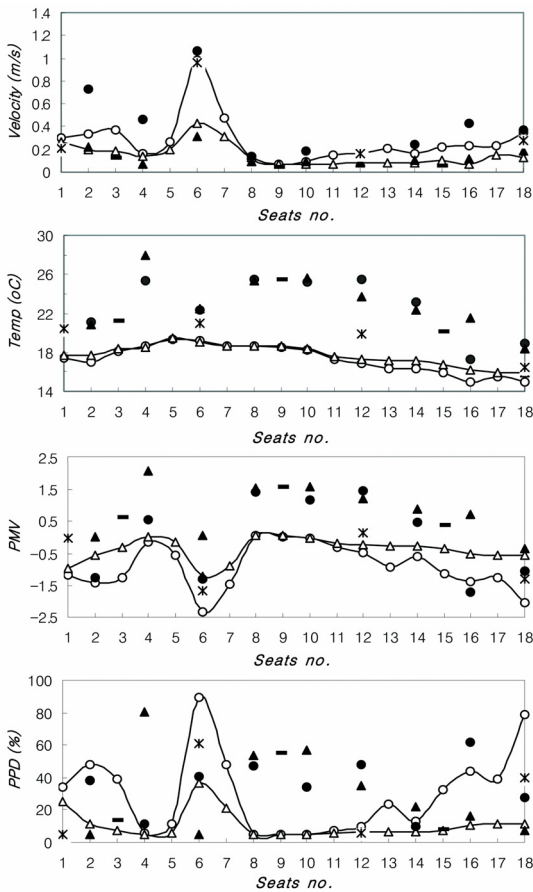


Fig. 6 Simulation results for a lower part of human body

서의 평균값이다. Fig. 6은 하반신 부분에 대한 것으로 y축은 1인당 골반, 양 허벅지, 양 장딴지, 양 발로 총 7개의 인체 부위에서의 계산 값을 평균한 것이다. 그리고 Fig. 7의 y축은 몸 전체에 대하여 평균한 값이다.

먼저 Fig. 5의 상반신에 대한 결과를 살펴보기로 한다. case 1에서는 공조기에서 공급된 냉기가 덕트와 객실의 냉기 토출구를 통하여 객실로 유입되는데, 바로 옆에 리턴그릴과 연결된 취출관에 막히게 되므로 리턴그릴과 같은 위치에 있는 duct A와 duct B에서의 유속이 상대적으로 낮아진다. 그로 인해 냉기가 덕트 안에 머물러있는 시간이 길어지게 되고 덕트 벽면의 영향으로 온도가 상승한다.

따라서 리턴그릴이 위치해 있는 공간의 온도가 다른 주위 온도보다 높다. 그리고 객실 뒤쪽으로 갈

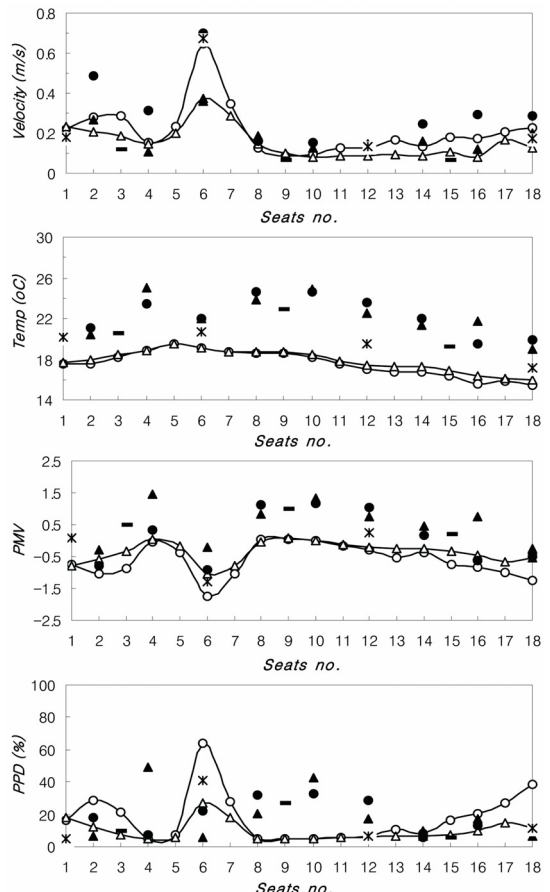


Fig. 7 Simulation results for whole human body

수록 속도는 증가하고 온도는 감소하고 있는데 이는 duct A의 토출 속도 및 온도의 영향 때문이며, 창측과 복도 측이 거의 같은 양상을 보인다. PMV는 ± 0.5 범위에 있으므로 쾌적하다고 볼 수 있으며 PPD는 유속과는 절대 값은 서로 다르나 유사한 경향을 보이고 있다. 그 다음 온도 분포를 살펴보면 case 2는 $20^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$, case 3은 $18^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$, 승객이 없는 case 1은 $16^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 로서 승객이 있는 경우가 없는 경우보다 다소 높은 온도 분포를 보인다. 이는 인체가 하나의 열원이 되기 때문이다. case 2에서는 인체와 인체가 접한 팔 부위에서 온도가 높게 나타났으며 PMV는 $-0.5 \sim 1.0$ 범위에 있으므로 약간 더운 상태라고 할 수 있다. case 2와 case 3의 온도 분포는 PMV와 유사한 양상을 보이고 있다.

Fig. 6의 하반신의 경우를 살펴보면, case 1은 전반

적으로 Fig. 5의 속도, 온도, PMV 및 PPD와 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, 5번, 6번 및 7번 좌석에서 리턴그릴로 배출되는 기류의 급격한 증가로 인해 PMV가 -0.75 ~ -2.5 범위로 창 측이 복도 측보다 더 온도가 낮아 추운 느낌을 받는 상태라는 것을 알 수 있다. Fig. 5의 상반신에 비해 창 측의 속도가 상대적으로 큰 것은 duct B의 토출속도가 duct A보다 빠르기 때문이다. 또한 duct B에서 나오는 냉기의 직접적인 영향으로 객실 내부가 창 측이 복도 측보다 유속은 크고 온도는 낮게 나타나고 있다. 그 예로 창 측 승객의 발과 장딴지 부위의 온도가 18.4 °C ~ 20.9 °C로 낮으며, PPD도 창 측이 복도 측보다 높다. case 2는 온도분포가 18 °C ~ 28 °C, case 3은 18 °C ~ 26 °C, case 1은 15 °C ~ 20 °C로서 상반신보다 하반신의 온도 분포가 높다. 이는 골반 부위가 낮은 속도로 인해 열전달이 잘 이루어 지지 못하여 신체 부위 중 온도가 가장 높기 때문이며, 온도는 24.3 °C ~ 27.3 °C이다. 온도분포와 PMV와의 관계는 Fig. 5와 같이 case 2와 case 3의 경우 온도분포와 PMV가 유사하며 case 1은 온도분포보다는 속도분포와 반대의 경향을 보인다. 그리고 Fig. 5와 6의 4번, 8번, 10번 및 12번 좌석에서 case 2와 case 3의 온도분포가 높은 이유는 duct A에서의 토출 온도가 25 °C 전후로 비교적 높은 온도에 기인한다.

Fig. 7을 살펴보면 전반적으로 상반신의 결과보다는 하반신의 결과와 유속, 온도, PMV 및 PPD 분포와 더 유사하며 리턴그릴이 위치한 부근의 좌석이 추운상태라는 것을 살펴 볼 수 있다. 이는 리턴그릴로 냉기가 빠져 나가면서 주위온도를 낮게 유지하게 하는 것으로 볼 수 있다. case 2에서는 인체와 인체가 접한 팔 부위에서 온도가 높게 나타났으며 PMV는 -0.5 ~ 1.0 범위에 있으므로 약간 더운 상태라고 할 수 있다. case 2와 case 3의 온도 분포는 PMV와 유사한 양상을 보이고 있다.

5. 결론

기차의 객실 내 승객의 유무에 따라 속도와 온도 분포, PMV 및 PPD 를 구하고 인체를 상반신, 하반신 및 전체로 구분하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상반신과 하반신의 온도분포를 보면 승객이 있는 case 2와 case 3의 경우가 승객이 없는 case 1보다 상대적으로 높은 온도분포를 보이는데, 이는 인체가 일종의 열원으로 작용하기 때문이다.
- 2) 한 좌석에 2명이 앉는 경우인 case 2에서 상반신은 인체와 인체가 접한 팔 부위에서, 하반신은 골반 부위에서 기류 속도가 낮아 열전달 감소로 신체 부위 중 가장 높은 온도분포를 보인다.
- 3) 좌석번호 5번, 6번, 7번에서는 리턴 그릴로 배출되는 공기량의 급격한 증가로 인해 창 측이 복도 측보다 더 춥다는 것을 PMV 값에서 알 수 있다.
- 4) PMV는 승객이 없는 case 1의 경우 온도 분포보다는 속도분포에 영향을 받으며 승객이 존재하는 경우에는 반대로 온도분포에 더 큰 영향을 받는다.

References

- 1) F. Ampofo, G. Maidment and J. Missenden, "Underground Railway Environment in the UK," Applied Thermal Engineering, Vol.24, Issues 5-6, pp. 611-631, 2004.
- 2) G. Maidment and J. Missenden, "Evaluation of an Underground Railway Carriage Operating with a Sustainable Groundwater Cooling System," Int. J. Refrigeration, Vol.25, No.5, pp.569-574, 2002.
- 3) S. Hong, Thermal Comfort in Automotive, M. S. Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea, 2006.
- 4) W. Park, B. Yeon, H. Jeong and M. Kim, "Study on Evaluation of Thermal Comfort in a Passenger Train," Proceedings of SAREK Winter Annual Conference, 2006.
- 5) Y. Kim, J. Yang, J. Baek, K. Kim and H. Ji, "Numerical Analysis on the Initial Cool-down Performance Inside an Automobile for the Evaluation of Passenger's Thermal Comfort," Transactions of KSAE, Vol.18, No.5, pp.115-123, 2010.
- 6) J. Seo, J. Park and Y. Choi, "Evaluation of Thermal Comfort and Cooldown Performance inside Automotive Cabin according to Air-conditioning Vent Location," Transactions of KSAE,

- Vol.20, No.5, pp.120-129, 2012.
- 7) D. Lee, "Experimental Study of the Effect on Cabin Thermal Comfort for Cold Storage Systems in Vehicles," Transactions of KSAE, Vol.23, No.4 pp.428-435, 2015.
 - 8) P. Fanger, Thermal Comfort, Robert E. Krieger Publishing Company, USA, 1982.
 - 9) ANSYS, Fluent User's Guide V6.3, 2004.
 - 10) ASHRAE, ASHRAE Handbook - Fundamentals, 2013.
 - 11) KATS, Size Korea, <http://sizekorea.kats.go.kr>, 2014.
 - 12) FLUENT, Airpak User's Guide V2.1. Ch.7, pp. 114-115, 2002.
 - 13) ISO, ISO 7730 - Ergonomics of the Thermal Environment, 2005.
 - 14) ASHRAE, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55, 1992.