

철도 차량 온열 쾌적성에 관한 2차원 모델 개발

연 봉 준, 김 문 언, 김 만 회*

한국과학기술원 기계공학과

Development of 2-dimensional model for thermal comfort in train

Bong-Joon Yeon, Moon-Uhn Kim, Man-Hoe Kim*

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Taejon 305-701, Korea

ABSTRACT: This study aims to suggest an evaluation method of thermal environment using CFD, not an experiment, which is usual in the field. Model train is the newly introduced Mugunghwa train. Since its compartment occupies a large space and chairs and other accessories make it a complicated structure, 3-D calculation might take too much time and effort to make evaluation itself possible. Therefore, we suggest a 2-D model to replace the original 3-D model for averaged temperature and temperature distribution in the cabin.

Key words: Air-side heat transfer(공기측 열전달), Plate & wave fin-tube heat exchanger(평판과 웨이브 환-관 열교환기)

기호설명

Q_{window}	창문을 통한 Heat flux
Q_{wall}	벽면을 통한 Heat flux
Q_{light}	조명부하
K_s	차폐계수, 보통 복층, 0.6
K_g	유리의 열관류율($Kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$), 2중 유리 6mm 공기층 : 3.0
A_g	창문면적. 2.227m ²
I	일사량, 7월 23일 오후 3시 기준, 354Kcal/m ² ·h
T_o	내벽의 온도, 35°C
T_i	실내 온도, 23°C
$h_{c,i}$	내벽의 대류열전달 계수, 0.123 W/m ²

1. 서 론

오늘날 장거리 이동 수단 뿐 아니라 출퇴근 수단으로 철도차량이 많이 이용되고 있다. 따라서 승객이 철도 차량에 머무르는 시간이 늘어나고 있으며 객실 내 온열 쾌적성 평가에 대한 중요성이 증대되고 있다. 그러나 차내의 적절한 온열환경에 대한 평가가 국내에서의 연구는 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 CFD를 이용하여 온열 쾌적성을 평가하는 방법을 제안하고자 한다. 해석 대상의 철도 차량은 신형 무궁화호를 선택하였다. 객실 내부는 대공간이고 의자와 부속물로 인해 복잡한 구조이므로 3차원으로 해석하면 많은 계산시간이 소요되며 자칫 계산 자체가 불가능해질 수도 있다. 따라서 3차원 모델을 대체할 수 있는 2차원 모델을 제안하고 객실내 평균온도와 온도분포에 대한 상호 관계를 구하고자 한다.

*Corresponding author

Tel.:+82-42-869-3089;fax: +82-42-869-3210

E-mail address: manhoe.kim@kaist.ac.kr

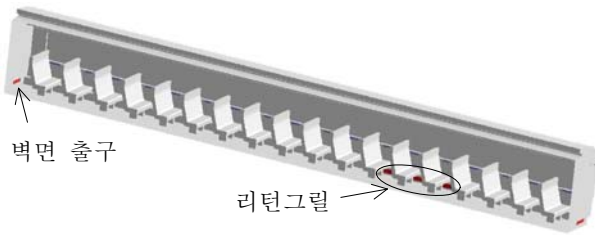


Fig. 1 3-Dimensional model

2. 해석 방법

2.1 수치해석 방법

신형 무궁화호의 온열 쾌적성은 여름철을 대상으로 공조기가 작동하고 있는 상태를 평가하였다. 난류모델로는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고, 압력-속도 coupling은 SIMPLE 알고리즘을, 운동량과 에너지 방정식은 Second Order Unwind scheme을 이용하였다. 상용코드인 FLUENT를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 객실은 복도를 중심으로 좌우 대칭이기 때문에 2, 3차원 모델 모두 객실의 반만 모델링하였고, 그 대칭면에 Symmetry 조건을 부여하였다.

2.2 신형 무궁화호의 3차원 모델

신형 무궁화호는 Fig.1에서 보는 바와 같으며 약 650,000개의 Hexahedral 격자로 모델링 하였다. 길이 방향으로 총 18m 정도이며 창문과 벽면을 통해 태양 에너지가 객실 안으로 유입되며, 천정의 조명기에서도 Heat flux가 유입된다. 냉기는 승객의 앉은 높이의 무릎과 어깨 높이에서 좌석당 하나씩 위치해 있는 입구를 통해 들어오며, 객실에서 순환된 공기는 출입문 벽면에 있는 출구와 객실 하단에 위치해 있는 리턴그릴을 통해 배출된다.

2.2.1 경계조건

- 창문을 통해 들어오는 Heat flux, Q_{window}

$$H_g = K_s \cdot A_g \cdot I + K_g \cdot A_g \cdot (T_o - T_i) \quad (1)$$

$$Q_{window} = H_g / A_g = 293.48 \text{ W/m}^2$$

- 객실 내벽을 통해 들어오는 Heat flux, Q_{wall}

$$Q_{wall} = h_{c,i} \cdot (T_o - T_i) = 1.476 \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

- 조명부하, Q_{light}

$$Q_{light} = 172.43 \text{ W/m}^2 \text{ 이다.}$$

- 유입되는 냉기의 유량(Q)과 온도(T)

냉기는 공조기에서 덕트를 통해 객실 내로 유입되므로 수치해석을 통한 모델에서도 이와 같은 방법이어야 하나 계산 용량의 한계로 인하여 덕트 구조만 따로 계산을 수행하여 각 입구에서 나오는 냉기의 유량과 온도를 먼저 계산하여 그 결과를 본 연구에서의 입구조건으로 부여하였다.

2.3 신형 무궁화호의 2차원 모델

신형 무궁화호의 2차원 모델은 Fig.2에서 보는 바와 같다. 열차의 진행 방향으로 바닥면에 수직하게 자른 단면을 2차원 모델로 제안하였다. 그 격자는 대부분이 Hexahedral 격자이지만 격자 생성이 곤란한 부분에서 Tetrahedral 격자를 이용하였다. 2차원으로 차원을 줄였기 때문에 생기는 왜곡현상이 있는데 특히 객실 내 공기가 배출되는 출구의 위치가 2차원 모델로는 실제와 똑같이 모델링 할 수 없다는 점이다. 2차원 모델에서는 출구인 리턴그릴이 냉기 입구와 중첩이 될 뿐 아니라 출입문 벽에 있는 출구 역시 2차원에서 선이 아닌 면으로 되어 있기 때문에 그 경계조건을 부여할 수 없다. 따라서 가상의 출구를 Fig.2와 같이 Symmetry 상에 부여하였다. 2차원 모델의 경계조건은 3차원 모델에서 부여한 경계조건과 동일하게 부여하였다.

3. 3차원과 2차원 모델의 관계식

3.1 관계식 유도에 관한 개요

온열 쾌적성에 영향을 주는 요인은 크게 공기의 속도와 온도, 습도 등의 물리적인 요인과 성별, 의복의 형태 및 활동량 등의 개인적인 요인이 있다. 그 중 객실 내에서 승객의 활동량은 서

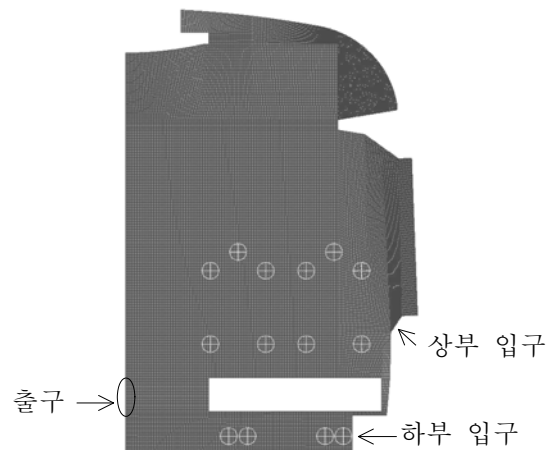


Fig. 2 2D Model

로 동일하고, 계절에 따른 의복의 형태가 유사하다고 가정한다면 온열 쾌적성에 영향을 주는 가장 큰 요인은 온도일 것이다. 본 연구에서는 온도에 관해 2차원 모델을 통해 얻은 결과를 이용하여 3차원 결과를 유추할 수 있는 관계식을 얻는 것을 목표로 하며, 특히 온도의 냉각곡선과 온도 분포에 관한 관계식을 제안한다.

3.2 냉각곡선에 관한 관계식

냉각곡선이란 초기 일정 온도에서 공조기가 작동한 후 시간에 따라 객실 내 온도가 어떻게 감소하는가를 보여주는 그래프이다. 객실 내 온도에 영향을 끼치는 요소는 여러 가지가 있을 것이다. 그중 가장 많은 영향을 끼치는 요소로 생각되는 것이 ① 객실로 유입되는 Heat flux, ② 냉기의 온도(T), ③ 냉기의 유량(Q)일 것이다. 하지만 첫 번째 요인인 Heat flux는 3차원과 2차원 모두 동일하다고 가정하면 객실 내 온도에 영향을 끼치는 요인은 냉기의 유량과 온도라고 가정한다. 즉 냉각곡선 $\theta \sim f(Q, T)$ 는 유량과 온도만의 함수이다. 냉각곡선을 맞추는 작업은 3차원 2차원 모두 동일한 냉기 온도와 유량을 가지고 계산된 냉각곡선 사이의 상관관계를 구하는 방법이 있을 것이다. 이는 3차원의 냉각곡선과 2차원의 냉각곡선의 차이 관계식을 구하는 방법이고, 다른 방법은 3차원과 2차원의 오차 범위 내에서 동일한 냉각곡선을 얻도록 하는 냉기의 온도와 유량의 관계식을 구하는 것이다. 즉 전자는 시뮬레이션의 경계조건인 온도와 유량은 동일하고 그 결과에 대한 관계식이며, 후자는 시뮬레이션 결과인 냉각곡선을 동일하게 하는 경계조건의 관계식을 구하는 것이다. 본 연구에서는 후자를 이용하여 관계식을 얻도록 할 것이다. 그 이유는 2차원으로 한 차원이 없어지기 때문에 2차원에서의 유량과 온도를 3차원과 동일하게 하는 것이 불합리하기 때문이다. 그래서 차원이 줄어드는 대신 유량과 온도로 보정하고자 하는 것이다.

실제 운행 중인 신형 무궁화호의 에어컨 작동 범위가 유량은 대략 $0.75m^3/s$ 이므로 본 연구에서도 모든 범위에서의 2차원 모델이 아닌 $0.75m^3/s$ 부근에서 두 모델을 비교하고자 한다. 우선 범위에 있는 임의의 냉기 유량과 온도에 해당되는 3차원의 냉각 곡선을 구하고 그와 오차 범위 안에 드는 2차원의 냉각곡선을 구하기 위해 유량과

온도를 여러 번 바꾸어 가며 시행착오를 이용해 그에 해당되는 유량과 온도를 구한다. 그 다음 3차원의 유량과 온도를 바꾸어 가며 그에 해당되는 2차원의 유량과 온도를 구하여 3차원의 유량과 온도, 2차원의 유량과 온도의 관계식을 얻는 것이 최종목표이다.

3.2.1 3차원 모델의 냉각곡선

냉기 유량이 $1.25m^3/s$, 온도가 291K인 경우에 대한 냉각 곡선은 Fig.3의 실선과 같다. 온도의 측정위치는 승객 한명 당 머리, 어깨, 무릎, 발[1]의 총 7개이다. 냉각곡선은 모델 전체 총 252개의 점의 평균 온도를 이용하였다. 냉각곡선을 살펴보면 냉각곡선 $\theta = A(Q, T) + B(Q, T) \times e^{-\frac{t}{C(Q, T)}}$ 의 형태로 표시되는 것을 알 수 있다. 여기서 A와 B는 온도의 차원을 갖는 변수이고 A+B는 초기 온도를 나타낸다. 그리고 변수 C는 시간의 차원을 갖으며 반감기의 성격을 가지고 있다. C가 클수록 빨리 일정한 온도의 값을 갖게 된다. 결과를 먼저 말하면 여러 가지 경우에 대한 해석을 시행한 결과 변수 A와 B는 냉기의 유량과 온도에 영향을 받지만 변수 C는 냉기의 온도에는 크게 영향을 받지 않는다.

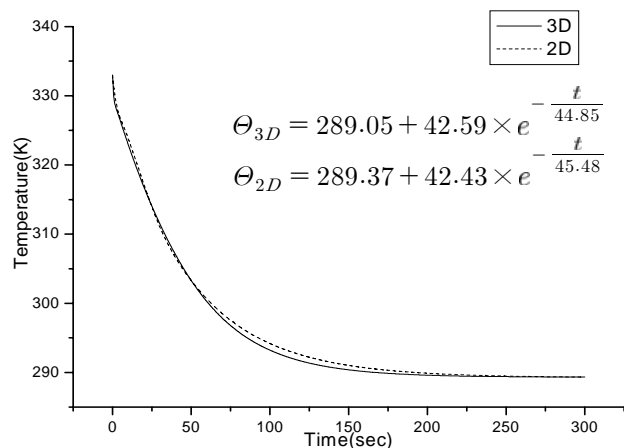


Fig. 3 $Q_3 = 1.25m^3/s, T_3 = 291K$

3.2.2 2차원 모델의 냉각곡선

2차원 모델의 온도 측정위치 역시 3차원 모델과 같은 위치이며 총 14개의 점에서 온도의 평균을 이용하였다. 현재까지 2차원 모델에 관해 알고 있는 것으로는 격자와 경계조건만 알고 있고, 3차원의 냉각곡선과 오차범위($\pm 5\%$) 안으로 유사한 2차원 냉각곡선을 얻을 수 있는 2차원 모델의

냉기 유량과 온도를 구하는 것이 목적이다. 실례로 3.2.1항의 3차원 모델의 냉각곡선과 유사한 냉각곡선을 그리는 2차원의 유량, 온도는 시행착오를 거쳐 구하면 $Q_2 = 0.06m^2/s$ $T_2 = 288.3K$ 인 것을 알 수 있고, 그에 해당하는 냉각곡선을 구해보면 Fig.3의 점선과 같다.

3.2.3 관계식 유도

앞선 방법과 같은 방법으로 3차원 냉기 유량을 0.6, 0.75, 0.9, 1.0, 1.25, 1.5 m^3/s 로, 냉기 온도를 291, 293, 295K로 변경하고 그에 해당하는 2차원 냉기 유량과 온도를 구하면 Table 1과 같다. Table 1에서의 자료를 이용하여 유량별, 온도별 관계식을 유도할 수 있다. Fig.4와 같이 3차원 유량과 그에 해당하는 2차원 유량을 그래프로 그려보면 두 값들은 선형 관계가 있다는 것을 알 수 있고 다음과 같이 선형 유량관계식을 얻을 수 있다.

$$Q_2 = 0.001 + 0.047 \times Q_3 \quad (3)$$

마찬가지로 냉기 온도에 관한 관계식을 유추해

Table 1 Air flow rate & temperature data

$Q_3(m^3/s)$	$T_3(K)$	$Q_2(m^2/s)$	$T_2(K)$
0.6	291	0.03	288.86
	293		290.86
	295		292.86
0.75	291	0.037	288.70
	293		290.70
	295		292.70
0.9	291	0.044	288.57
	293		290.57
	295		292.57
1.0	291	0.049	288.60
	293		290.62
	295		292.64
1.25	291	0.06	288.27
	293		290.28
	295		292.28
1.5	291	0.073	288.07
	293		290.08
	295		292.08

보면 Table 2의 마지막 열에서 보듯 일차식으로 표현되지만 유량은 온도에 영향을 받지 않지만 온도 관계식은 유량에 따라 그 상수 값이 달라지는 것을 확인 할 수 있다. 즉, $T_2 = \alpha \cdot T_3 + \beta$ 와 같은 관계식에서 β 는 유량 관계식처럼 상수가 아닌 유량의 함수, 즉 $\beta \sim f(Q_3)$ 인 것이다. 따라서 β 를 유량에 대한 식으로 표현하기 위해 마찬

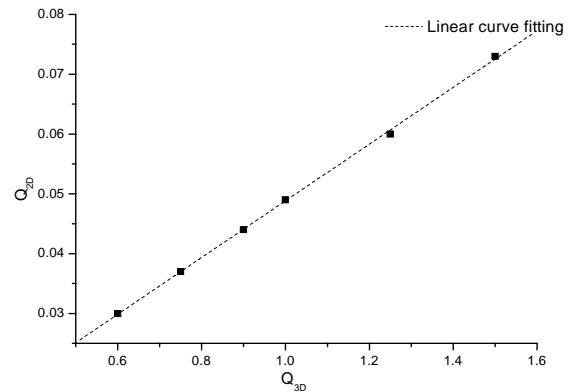


Fig. 4 Relation of air flow rate

가지로 Fig.5와 같이 그래프로 표현하였다.

$$\beta = 1.6 + 0.86 \times Q_3 \quad (4)$$

β 는 식(4)와 같은 관계를 가지고 있고 이를 정리하여 냉기 온도 관계식을 유도하면 식 (5)와 같다.

$$T_2 = T_3 - (1.6 + 0.86 \times Q_3) \quad (5)$$

Table 2 Air temperature & Q_3

$Q_3 \backslash T_3$	291	293	295	Curve fitting
0.6	288.9	290.9	292.9	$T_2 = T_3 - 2.9$
0.75	288.7	290.7	292.7	$T_2 = T_3 - 2.7$
0.9	288.6	290.6	292.6	$T_2 = T_3 - 2.4$
1.0	288.6	290.6	292.6	$T_2 = T_3 - 2.4$
1.25	288.3	290.3	292.3	$T_2 = T_3 - 2.3$
1.5	288.1	290.1	292.1	$T_2 = T_3 - 2.1$

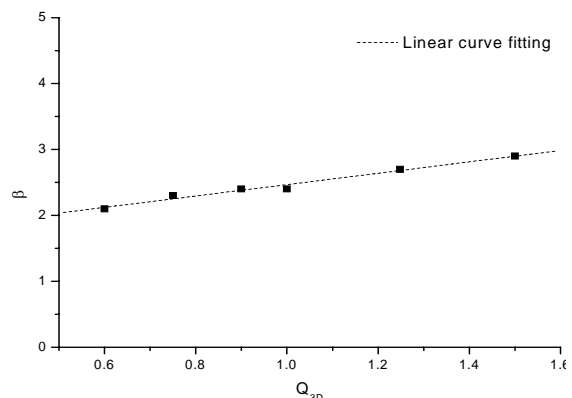


Fig. 5 Relation of Q_3 and β

3.3 온도 분포에 관한 관계식

쾌적 범위를 정하는 방법으로는 승객이 없는 상태이므로 PMV이론[2]을 적용하였고, ISO 7730[3]에서 정하는 쾌적 범위가 (-0.5, +0.5)이므로 그 영역에 해당되는 최대, 최소 온도를 구하여 그 쾌적 범위에 해당되는 영역이 관심 영역

전체의 몇 %에 해당되는지 연구 할 것이다.. 분포의 형태와 평균, 그리고 표준편차만 알고 있다면, 임의의 영역, 즉 여기서는 쾌적 영역이 전체에 대해 어느 정도 해당하는지 예측할 수 있다. 이미 앞 절에서 두 모델이 오차범위 안으로 유사한 평균온도를 보이는 것을 알고 있기 때문에 본 절에서는 두 모델의 표준편차 관계와 온도 분포의 형태에 대해 논하도록 하겠다. 3차원과 2차원 두 모델에 대해 온도 일정해 지는 Steady 상태의 온도 분포를 구하여 도수분포표를 구하고 각각 객실의 평균온도와 분산, 표준편차를 구하였다. 객실 내 임의의 좌표를 정하여 온도를 측정하는 것이 아니라 객실 중 승객이 주로 위치해 있는 좌석 영역의 전 영역에 걸쳐 온도의 평균을 구하였다.

3.3.1 분포의 형태

3차원의 객실 온도 분포 형태를 알아보기 위해 각 냉기 유량별, 온도별 온도 분포 그래프를 Fig.6와 Fig.7과 같이 작성하였다. 각 온도 분포 그래프는 서로 다른 모양을 취하고 있지만 일정한 모양을 하고 있었고 보다 일반적인 모양을 알아보기 위해 평균을 0, 표준편차를 1로 정규화시키면 Fig.6과 같이 일정한 모양을 하고 있는 것을 알 수 있었다.

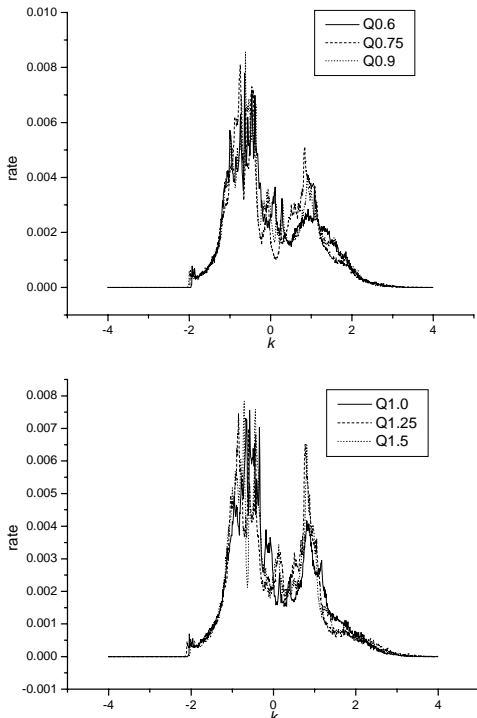


Fig. 6 Temperature distribution

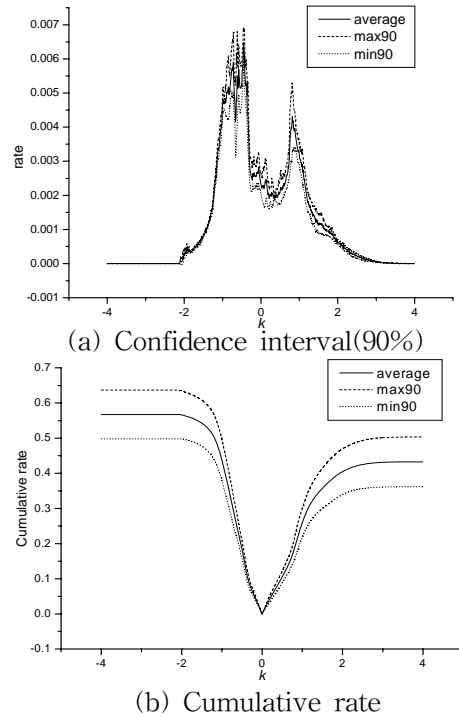


Fig. 7 3D temperature distribution

냉기의 유량별로는 조금씩 다른 분포를 하고 있지만, 냉기 온도별 객실 온도 분포는 정규화시켰기 때문에 모두 일정하였다. 정규화 된 6개의 유량별 온도 분포 표본을 이용하여 표본 평균과 표본 표준편차를 구하면 실제 3차원의 온도 분포가 위치해 있을 확률이 90%인 영역의 최대값과 최소값을 얻을 수 있다. Fig.7(a)에서 실선으로 표시한 온도 분포가 유량별 6개의 표본을 이용하여 얻은 평균 온도 분포이며, dash로 표시한 영역은 신뢰구간 90%의 최대 영역을, dot으로 표시한 영역은 신뢰구간 90%의 최소 영역을 표시하였다. Fig.7(a)와 같은 온도 분포의 최대값과 최소값을 알고 있지만 이를 직접 사용하는 것은 그래프가 복잡하기 때문에 어렵기 때문에 그래프를 한번 적분하여 누적 비율을 사용하도록 하겠다. 이 적분한 그래프를 Fig.7(b)에 표시하였다. 객실 온도 분포가 비대칭이기 때문에 누적 비율 역시 평균 0을 기준으로 비대칭인 형태를 하고 있다. 만약 평균으로부터 $k\sigma$ 만큼 떨어진 곳의 누적 영역 비율을 알고자 한다면 그림 Fig.7(a)에서 X축에서 k를 찾고 그에 해당하는 Y축의 누적 비율을 찾으면 된다. 이때 최대값과 최소값 사이에 그 해당영역이 있을 확률이 90%인 것이다.

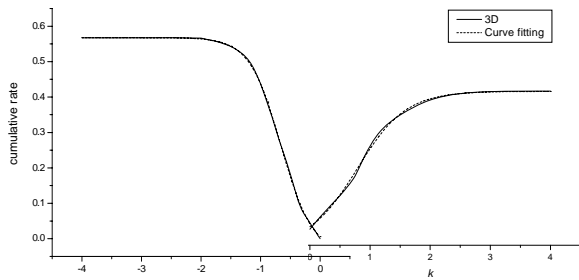


Fig. 8 3D cumulative rate & curve fitting

이 그래프를 직접 사용하기 위해 Fig.8과 같이 Curve fitting을 하여 식 (6)~(8)과 같이 함수로 표현 할 수 있다. Fig.8은 신뢰구간의 평균에 관한 Curve fitting만 표시하였다. 좌우 비대칭이므로 'n'는 평균 0을 기준으로 왼쪽의 음의 구간을, 'p'는 오른쪽 양의 구간을 표시하였다.

$$f_{n-av} = \frac{0.61}{1 + e^{(k+0.66)/0.26}} - 0.04 \quad (6)$$

$$f_{p-av} = \frac{-0.49}{1 + e^{(k-0.78)/0.41}} + 0.43$$

$$f_{n-max90} = \frac{0.69}{1 + e^{(k+0.65)/0.26}} - 0.05 \quad (7)$$

$$f_{p-max90} = \frac{-0.57}{1 + e^{(k-0.78)/0.41}} + 0.50$$

$$f_{n-min90} = \frac{0.53}{1 + e^{(k+0.67)/0.26}} - 0.03 \quad (8)$$

$$f_{p-min90} = \frac{-0.41}{1 + e^{(k-0.78)/0.40}} + 0.36$$

3.3.2 표준편차 관계식

앞 항에서 살펴본 온도 분포에서 냉기 유량별 표준편차를 3차원과 2차원 모두 구해보면 Table 3과 같이 나타낼 수 있고, 이 역시 Fig.9와 같이 선형적인 관계를 가진다는 것을 알 수 있다. 식 (9)와 같은 1차식으로 표현 할 수 있다.

$$\sigma_3 = 1.23 + 0.8 \times \sigma_2 \quad (9)$$

Table 3 Relation of σ_3 , σ_2

Q_3	σ_3	σ_2
0.6	4.11	3.49
0.75	3.57	3.06
0.9	3.23	2.56
1.0	3.07	2.19
1.25	2.72	1.99
1.5	2.56	1.59

3.4 쾌적 PMV 영역

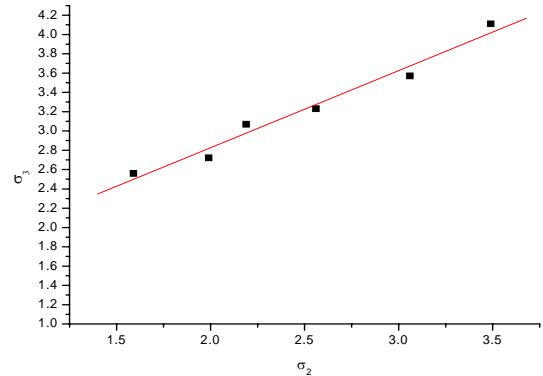


Fig. 9 Relation of σ_3 , σ_2 and Curve fitting

PMV는 여러 가지 요소에 의해 결정된다. 특히 공기의 온도와 속도에 큰 영향을 받게 된다. 쾌적 PMV 영역은 ± 0.5 사이기 때문에 각 3차원 냉기 유량별로 공기의 평균속도가 다르기 때문에 적정 온도 범위도 다르게 된다. 따라서 각 유량별 공기의 평균속도와 적정 쾌적 온도 범위를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Averaged velocity & comfort zone

Q_3 (m^3/s)	평균속도 (m/s)	PMV Min (K)	PMV Neutral (K)	PMV Max (K)
0.6	0.1821	290.66	292.91	295.16
0.75	0.2344	292.01	294.07	296.13
0.9	0.2749	292.79	294.74	296.68
1.0	0.3023	293.23	295.12	297.00
1.25	0.3819	294.22	295.97	297.72
1.5	0.4522	294.90	296.56	298.21

적정 쾌적 범위는 유량이 증가할수록, 즉 공기 속도가 증가할수록 범위의 폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 최저값과 최대값은 다음에 설명할 표준정규분포에 사용될 값들이다. $Q_3=0.75m^3/s$, $T_3=291K$ 인 경우를 예를 들어 계산과정을 설명하고자 한다. 위 입구조건으로 계산된 객실 평균온도는 2차원 모델을 통해 구하면 290.68K임을 알 수 있다. 표준편차 역시 2차원 모델을 이용하여 구하면 σ_2 는 3.06이고 이를 식 (9)에 대입하면 3차원 모델의 표준편차를 3.68로 추측할 수 있다. $Q_3=0.75m^3/s$ 의 경우 PMV_Max 값이 296.13K으로 평균온도에서 $1.49\sigma_3$ 떨어져 있고, PMV_Min 값은 292.01K으로 약 $0.37\sigma_3$ 떨어져 있음을 알 수 있다. 식 (7), (8)을 사용하면 객실 내 최대 33.19%, 최소 24.23%가 쾌적 범위에 해당할 확률

이 90%이다. 즉 관심영역의 $28.42\pm 5\%$ 의 영역이 쾌적 범위에 속할 확률이 90%이다. 실제 3차원의 해석결과 27.6%이므로 이 영역 안에 속한다.

3.5 관계식 검증

지금까지 논의한 방법이 과연 어느 정도 정확한지에 대한 논의가 있어야 할 것이다. 임의의 냉기 유량과 냉기 온도를 정하고 그에 따른 3차원 모델의 냉각곡선과 온도 분포와 2차원 모델에서의 냉각곡선과 온도 분포를 비교하여 그 정확성과 실용성을 파악하고자 한다.

3.5.1 Case 1 ($Q_3 = 0.8m^3/s, T_3 = 293K$)

Q_3, T_3 를 식 (3), (5)에 대입하여 2차원 모델의 입구조조건인 $Q_2 = 0.039m^2/s, T_2 = 290.71K$ 를 구하여 2차원 모델의 냉각곡선과 객실 내 평균온도를 구한다. Fig.10과 같이 두 냉각곡선이 유사하다는 것을 육안으로도 확인할 수 있다. 또한 Steady 상태에서의 2차원 모델 객실 평균온도가 292.56K이었고, 표준편차는 2.91이며 식 (9)를 통해 σ_3 을 계산하면 3.56이며 실제 3차원 모델에서의 표준편차는 3.46으로 이 역시 오차 허용범위 안에 있다. $Q_3 = 0.8m^3/s$ 인 경우에 대한 적정 PMV의 최저온도는 292.19K, 최대 온도 296.25K이므로 이는 평균으로부터 각각 -0.08σ 와 1.06σ 이므로 식 (7), (8)을 통해 계산하면 객실 내 최대 32.49%, 최소 24.36%가 쾌적 영역에 속할 확률이 90%이다. 즉 객실의 $28.47\pm 5\%$ 가 쾌적 영역에 속할 확률이 90%이다. 실제로 3차원 해석 결과 객실의 27.8%가 쾌적 영역에 속했기 때문에 모델을 통해 계산된 영역 안으로 들어온다는 것을 알 수 있다.

3.5.2 Case 2 ($Q_3 = 1.1m^3/s, T_3 = 288K$)

마찬가지로 식 (3), (5)를 이용하여 2차원 모델에서 입구조조건인 냉기 유량과 냉기 온도를 구하면 $Q_2 = 0.053m^2/s, T_2 = 285.45K$ 가 된다. 이를 이용하여 2차원 모델의 냉각곡선과 객실 평균온도를 구할 수 있다. Fig.11과 같이 3차원과 2차원의 냉각 곡선이 서로 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 여기서 객실 평균온도가 286.36K으로 수렴한다는 것을 알 수 있었다. 다음으로 2차원 모델의 표준편차는 2.07이었다. 식 (9)를 통해 유추

된 3차원 모델의 표준편차는 2.89이며, 실제 3차원 모델의 해석 결과로는 2.97으로 오차범위내로 정확하다는 것을 알 수 있다. $Q_3 = 1.1m^3/s$ 인 경우에 대한 적정 PMV의 최저온도는 293.68K, 최대 온도 297.4K이므로 이는 평균으로부터 각각 2.48σ 와 3.77σ 이므로 식 (7), (8)을 통해 영역을 구해보면 최대 0.87%, 최소 0.55%가 쾌적 영역에 속할 확률이 90%이다. 실제 계산을 통해 알아본 3차원 객실의 쾌적 영역은 0.68%이므로 이 구간에 속한다는 것을 알 수 있다.

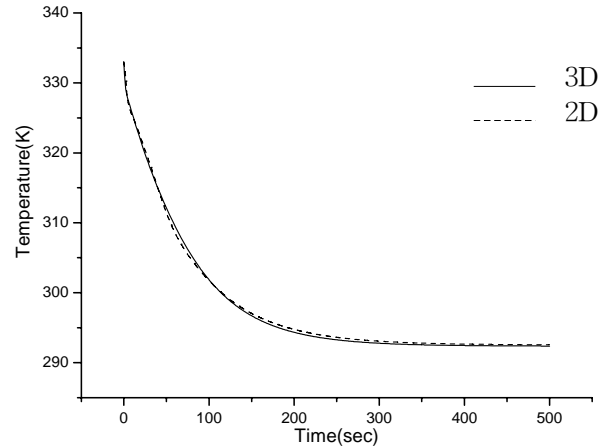


Fig. 10 Case 1

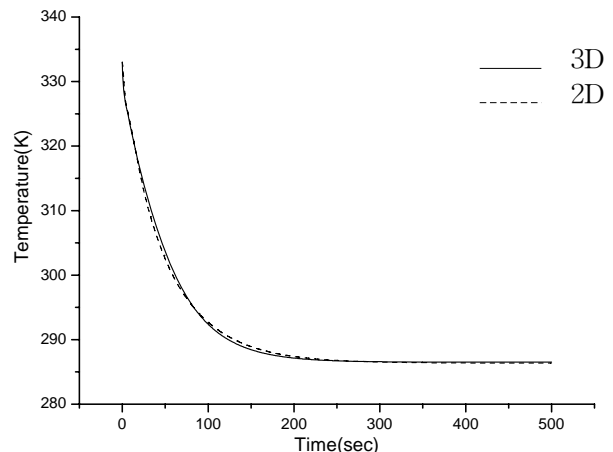


Fig. 11 Case 2

4. 결 론

본 연구에서는 신형 무궁화호 철도차량의 온열 쾌적성에 대해 상용코드인 FLUENT를 이용하여 많은 계산 시간을 필요로 하는 3차원 모델을 대신할 수 있는 2차원 모델을 제안하였다.

기존의 온열 쾌적성 평가는 실험을 기반으로 하여 평가하였지만, 오늘날 컴퓨터의 발전으로 인해 PC에서도 시뮬레이션을 통해 그 쾌적성을 평가 할 수 있다. 하지만 철도 차량의 경우는 길이방향으로 18m정도가 되는 큰 대공간이며, 의자, 선반 등 매우 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 아무리 컴퓨터가 발전했다 하더라도 계산 시간의 한계를 가지고 있다. 더구나 여러 가지 경우에 대한 Unsteady 해석은 물리적 계산시간의 한계로 인하여 계산 자체가 불가능해 질 수 도 있기 때문에, 오랜 계산시간을 필요로 하는 3차원 대신 2차원 모델로 그 해석 결과를 유추할 수 있을 것이란 생각으로 2차원 모델 개발을 수행하였다. 3차원과 2차원의 입구조건, 즉 냉기의 유량과 냉기의 온도 사이의 상관 관계식을 유도하여, 알고자 하는 3차원의 냉각곡선을 그 관계식을 통해 얻어진 2차원 입구조건을 이용하여 2차원 모델로 계산을 수행하여 그 결과를 예측하였다. 냉각곡선을 통해서만 객실의 평균온도를 알 수 있지만, 평균온도 뿐 아니라 온도의 분포까지 예측이 가능하도록 하기 위해, 2차원 모델과 3차원 모델의 표준편차의 관계를 유도하여 객실 내 온도 분포 함수를 구하고 적정 쾌적 범위에 해당하는 영역의 비율을 알 수 있도록 하였다.

본 연구는 철도 차량 중 신형 무궁화호를 대상으로 하였기 때문에 공조시스템이나 객실의 형태가 변화하게 되면 제안된 2차원 모델을 사용할 수 없을 것이다. 새로운 2차원 모델을 만들어야 하겠지만, 본 연구와 같은 방법으로 계산을 수행하면 계산시간의 물리적인 한계로 인해 자칫 계산 자체가 불가능해 질 수 있는 연구를 3차원과 2차원의 상관관계를 유도함으로써 2차원 모델로 그 해석 결과를 유추할 수 있는 성과를 얻었다. 객실 내 평균 온도 뿐 아니라 온도 분포까지 예측이 가능하기 때문에 철도차량을 설계하는데 있어 본 2차원 모델을 적용하여 가장 쾌적한 철도 실내 환경을 설계하는데 기여할 수 있을 것이라 생각한다.

참고문헌

1. International Union of railways, UIC code 553-1, Air-conditioning systems in coaches: Type test.
2. P.O Fanger, Thermal Comfort, 1982.
3. ISO, ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment, 2005.