

국부 근접 난방 모듈을 이용한 전기차 탑승자의 열쾌적성에 대한 실험적 연구

Experimental study on Thermal Comfort of Electric Vehicle Occupants Using Local Proximity Heating Module

이채열^{1*}, 임종한¹, 이재욱², 박상희³

Chae-Yeol Lee^{1*}, Jong-Han Im¹, Jae-Wook Lee², Sang-Hee Park³

〈Abstract〉

In order to meet the technological demand for indoor heating systems that ensure winter thermal comfort during the transition from internal combustion engines to electrification, a localized proximity heating module using surface heating elements was developed. The operational performance of heating module was tested in the low temperature chamber. The experiment conditions were varied by changing the chamber temperature (-10, 0°C), the air flow rate (6.2, 6.0, 4.2m³/h), the heater power (100, 80, 60, 40W). Thermal comfort model was confirmed using the CBE Thermal Comfort Tool applying ASHRAE standard 55. Under -10°C condition, thermal comfort was satisfied at 23.4, 23.2°C at power of 100W and air flow rate 6.0, 4.6 m³/h. Under 0°C condition, at power of 80W, air flow rate 6.2, 6.0m³/h, and at power of 60W, air flow rate 4.6m³/h showed results of 25.7, 26.1, 23.0°C, respectively, satisfying thermal comfort. This study analyzed the operating performance of the local proximity heating module in the low temperature chamber and applied thermal comfort model to prove applicability of local proximity heating module using surface heating elements and how to utilize the thermal comfort model.

Keywords : *Local Proximity Heating system, Thermal Comfort, Surface Heating Elements, Electric Vehicle*

1* 금오공과대학교 기계공학과 대학원

2 ㈜할크

3 정희원, 교신저자, 금오공과대학교 기계공학과, 교수
E-mail: parksh@kumoh.ac.kr

1* Dept. of mechanical engineering, Kumoh National Institute of Technology

2 Halk Co .Ltd

3 Dept. of mechanical engineering, Kumoh National Institute of Technology, Professor
E-mail: parksh@kumoh.ac.kr

1. 서론

최근 지구온난화 등에 대처하기 위해 내연기관에서 전기차로의 전환이 급속도로 진행되고 있다. 내연기관은 엔진의 폐열을 이용하여 차량 내부를 난방 하지만, 전기차에서는 PTC 히터 또는 히트 펌프를 이용하고 있다[1,2]. PTC 히터를 전기차의 난방용으로 적용할 경우, 배터리가 히터의 동력원이 되므로 히터 사용에 따른 주행거리가 8~24% 급감하는 문제점이 대두되고 있다[3]. 최근에는 이를 극복하기 위해 국부 근접 난방 모듈을 이용한 공조 기술에 대한 연구가 진행되고 있다[4,5].

국부 근접 공조기술을 위해서는 차량의 주행상태 및 다양한 외부환경에 따른 동적 제어를 통해 탑승자의 열쾌적성을 향상시킬 필요가 있다[6]. 실제로 미국인 10명 중 8~9명은 차량 실내 열쾌적성 향상이 가능한 별도의 기술을 요구하는 설문조사 결과도 존재한다[7].

전기차의 배터리 소비량을 줄이기 위해 적용되는 국부 근접 공조기술에 대해서는 탑승자의 열쾌적성을 분석하는 기술이 필요하다. 대표적인 열쾌적성 분석기술로는 Fanger 모델, Stolwijk 모델, ASHRAE standard 55 그리고 Berkeley 모델이 있다[8~11].

Fanger 모델은 최초의 열쾌적성 모델이며 쉽게 폭넓게 적용되고 있다. 이 모델은 1300명 이상의 사람을 대상으로 얻은 실험값을 바탕으로 PMV (Predicted Mean Value)와 PPD(Predicted Percentage Dissatisfied)를 적용시켰다[12]. PMV는 의복 및 증기압, 의복계수 등의 함수로 표현되고 기본적으로 정상상태 열전달을 고려한 모델이다. PPD는 PMV의 함수로 표현된다.

Berkeley 모델은 Stolwijk 모델을 기반으로 개발되었으며, Zhang 등[12]이 제안한 한서감(thermal sensation)과 열쾌적성 (thermal comfort)이라는

새로운 지표를 제안하였다. 이 모델은 Stolwijk 모델에 clothing factor, 대류 및 복사열전달항 등을 포함하고 있다. 기본적으로 6개의 segment(머리, 몸통, 팔, 손, 다리, 발)로 구성되며, 각 segment는 core, muscle, fat, skin 등 4개의 layer로 분류된다.

ASHRAE 모델은 Berkeley 모델을 기반으로 해석이 가능하며, 인터넷 기반 공개 소스로서 CBE 열쾌적성 도구를 제공하고 있다.

따라서 본 논문에서는 국부 근접 난방 모듈을 인체모형의 목 뒤쪽에 장착한 후 실험을 수행하였다. 실험 결과에 대한 열쾌적성은 CBE 열쾌적성 도구에 적용하여 확인하였다. 또한 본 연구의 목적은 국부 근접 난방 모듈에 대한 실험 결과를 열쾌적성 모델에 적용해봄으로써 국부 근접 난방 모듈의 설계 및 제작을 위한 기초 자료를 제공하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 히터의 설계도(a)와 히터의 시제품(b)를 나타낸다. 히터는 Hybrid IC

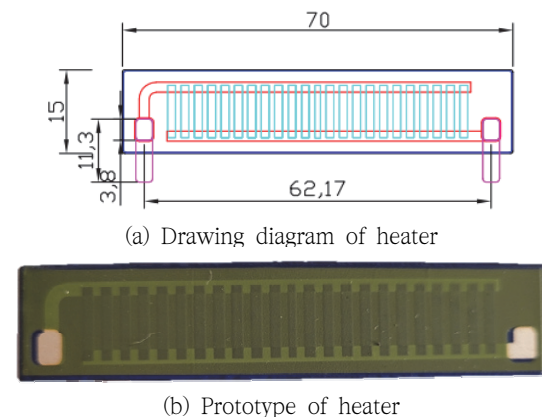


Fig. 1 Drawing diagram and prototype of heater

기법으로 제조된 면상발열체이며, 15×70×1mm의 크기를 가진다. 히터의 재질은 STS 430을 히터의 기저체로 하였고 히터 하단의 양 끝단에 전극을 설치하였다.

면상발열체는 제작된 히터의 저항에 따른 인입 전압과 전류량이 결정되고, 발생된 전력량이 발열 온도로 나타나게 된다. 실험에 사용된 히터는 14V의 전압을 가지는 자동차의 보조배터리를 전원으로 할 목적으로 100W급으로 설계한 것으로 총 저항을 1Ω대로 하였다. 이를 위해 3Ω급의 히터를 제작하여 3개를 병렬로 연결하였다. Table 1은 제작된 히터의 사양을 나타낸다. 히터의 저항은 초정밀 저항측정기(GW Instek, GOM 804)로 측정하였다. 본 실험에서는 히터로의 공급전력은 40W, 60W, 80W, 100W로 하였다.

제작된 히터는 자체 제작한 히터박스에 PCB 제어부와 함께 좌석 head rest 내부에 삽입하였다.

Table 1. Specifications of manufactured heater

Heater No.	Resistance (Ω/each)	Material	remark
1	2.99 (at 8.9°C)	STS 430 (SUS)	3개 병렬 연결 (총저항 1.02Ω)
2	2.97 (at 8.9°C)		
3	3.26 (at 8.9°C)		
Avg.	3.07		
STD. Dev.	0.132		

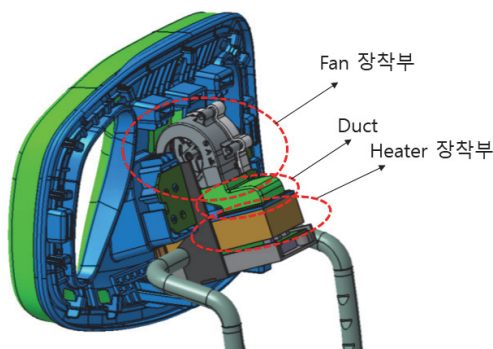


Fig. 2 Schematic diagram of the local proximity heating module installed in the head rest

Fig. 2는 head rest에 장착되는 히터박스와 송풍기 등으로 구성된 국부 근접 난방 모듈에 대한 개략도이다. Head rest에 장착된 난방 모듈은 직류전원공급기(Keysight, E36233A)를 이용하여 전력을 공급하였다.

유량과 인입 전류량은 head rest에 난방 모듈을 설치한 후 유량측정기(TESTO 400)와 전류측정기(HIOKI, CM 7290)를 이용하여 측정하였다. 유량은 head rest 표면에서 측정하였으며, 인입 전압은 12V 고정값으로 하였다. 평균 유량은 4.6, 6.0, 6.2m³/h이다.

유량과 인입 전류량은 head rest에 난방 모듈을 설치한 후 유량측정기(TESTO 400)와 전류측정기(HIOKI, CM 7290)를 이용하여 측정하였다. 유량은 head rest 표면에서 측정하였으며, 인입 전압은 12V 고정값으로 하였다. 평균 유량은 4.6, 6.0, 6.2m³/h이다.

Fig. 3은 저온 챔버에 설치한 중형 SUV 크기의 차량 실내 모형에 장착된 실험용 인체모형의 사진이고 Fig. 4는 인체 모형 주위에 설치된 온도 센서의 위치를 나타낸다.

인체 모형은 차량 모형의 앞좌석에 위치시킨 후 6개소의 열전대를 Fig. 4와 같이 부위별로 부착시켰다. 즉 열전대 T1(T 21)은 head rest 앞 3mm에 위치하고, T 22는 인체 모형의 목 뒷부분에서 5mm(head rest 표면에서 30mm), T 23은



Fig. 3 Human body dummy installed in the chamber

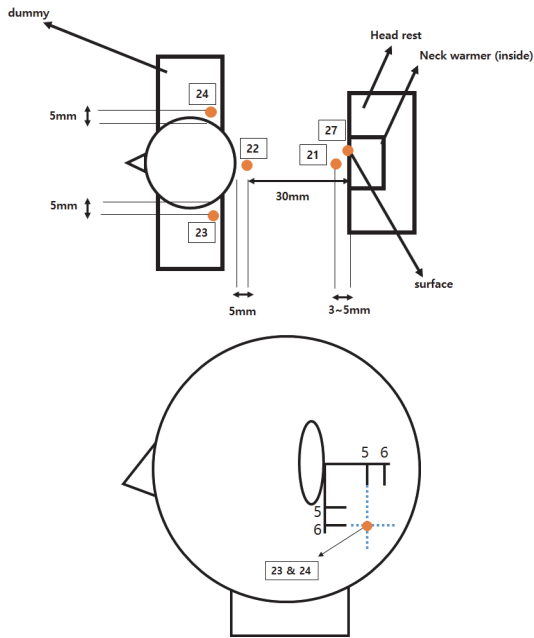


Fig. 4 Location of thermocouples installed on the vehicle model and the human body model

인체 모형의 왼쪽 귀(가로축 5번과 세로축 6번 위치 교차점)에서 5mm 이격되어 있다. T 24는 인체 모형의 오른쪽 귀(가로축 5번과 세로축 6번 위치 교차점)에서 5mm 이격되어 있다. T 27은 head rest 표면(토출구)에 위치한다.

온도 측정은 온도기록계(HIOKI, LR 8450)를 이용하여 측정하였고 온도 측정용 센서는 k-type의 열전대를 사용하였다. 유량 및 전력량에 따른 송풍온도 측정 실험은 저온 챔버 내의 공기온도를 -10°C와 0°C의 운전조건에서 진행하였다. 온도 측정 시간은 300초를 기준으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

ASHRAE standard 55 모델은 CBE Thermal Comfort Tool을 사용하였다. 이 Tool은 UC Berkeley

에서 제공하는 공개 프로그램을 이용하였다[13]. 이 Tool의 적용조건에서의 고정값은 상대습도를 50%로, 신진대사율(metabolic rate)은 차량 운전 조건과 전형적인 겨울철 실내의복 수준값으로 하였다. 입력값은 측정온도와 송풍유량이다.

Table 2는 챔버의 공기온도가 -10°C일 때 유량(4.0, 6.0, 6.2m³/h)과 전력(40, 60, 80, 100W)에 따라 측정된 송풍온도를 나타낸다.

동일한 유량에서 전력이 높아짐에 따라 상승되는 정도도 비례적으로 증가됨을 보였다.

Fig. 5는 챔버 내의 공기온도가 -10°C이고 유량이 6.2m³/h일 때 히터의 공급전력에 따른 토출구 앞(T 21)에서의 공기의 상승정도(ΔT)를 나타낸 것이다.

히터에 전력을 공급하고 300초가 경과한 후에 히터의 파워가 20W씩 증가함에 따라 공기온도는 6~9°C 정도 상승됨을 보였다.

Fig. 6은 챔버의 공기온도가 -10°C이고 유량

Table 2. Temperature measurement result of heating module according to air flow rate and power at -10°C condition

Flow rate (m ³ /h)	Power (W)	Temperature according to Sensor No.					
		T①	T②	T③	T④	T⑤	T⑦
6.2	102.9	25.3	22.9	13.3	14.1	27.4	25.4
	83.4	17.9	14.9	10.3	9.35	19.5	18.1
	64.5	11.0	9.01	5.09	3.82	12.1	11.1
	44.9	4.65	2.99	-0.31	-1.96	5.35	4.79
6.0	102.5	25.9	23.4	15.2	13.5	27.9	25.8
	83.6	18.2	15.5	10.5	9.79	19.7	18.3
	65.1	11.3	9.29	5.41	3.51	12.5	11.4
	44.8	4.57	3.01	-0.69	-2.02	5.33	4.71
4.6	101.1	34.1	32.5	18.2	14.0	36.6	31.9
	82.3	24.4	23.2	12.5	8.84	26.4	23.2
	64.3	15.5	14.1	7.48	6.34	17.0	15.2
	43.66	7.06	5.70	2.21	1.67	8.27	7.30

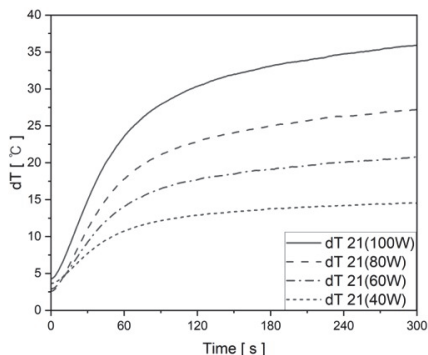


Fig. 5 Temperature difference in front of the outlet (T 21) according power at average air flow rate of 6.2m³/h

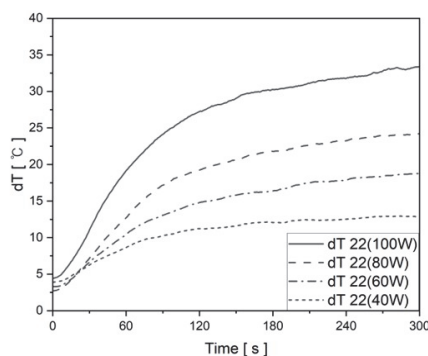


Fig. 6 Temperature difference behind the neck(T 22) according power at average air flow rate of 6.2m³/h

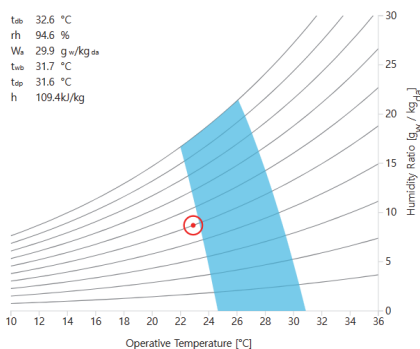


Fig. 7 Temperature comfort according to ASHRAE standard 55 model at air flow rate of 6.2m³/h and power of 100W

6.2m³/h에서 공급 전력에 따른 인체 모형의 목 뒷부분(T 22)의 승온 정도를 나타낸다.

히터에 전력을 공급한 후 경과시간 300초일 때 히터의 파워가 20W씩 증가함에 따라 공기온도는 5~9°C 정도 상승됨을 보였다.

Fig. 7은 챔버의 공기온도 -10°C, 유량 6.2m³/h, 공급전력 100W일 때, ASHRAE standard 55 model을 적용한 열쾌적성을 나타낸다.

작동 온도는 22.9°C로 승온 정도(ΔT)가 33.5°C로 높게 나타나지만, Fig. 7의 열쾌적성은 승온 정도가 아닌 측정값으로 결정되므로 열쾌적성 범위(하늘색 영역)를 약간 벗어남을 보였다. 그러나 상대습도가 67%일 때는 열쾌적성 범위 내에 들어감을 확인하였다.

Fig. 8은 챔버의 공기온도 -10°C, 유량 6.0m³/h일 때 전력에 따른 인체 모형의 목 뒷부분(T 22)에서의 온도 변화를 나타내고, Fig. 9는 동일한 챔버 공기온도와 유량 조건에서 공급 전력 100W일 때 열쾌적성을 나타낸다.

Fig. 8에 적용된 조건은 측정온도 23.4°C로 승온 정도(ΔT)가 33.38°C이였으며, Fig. 9에서 보여진 것처럼 열쾌적성 범위를 약간 벗어남을 보였으나 대체로 만족함을 알 수 있다.

Fig. 10과 11은 챔버의 공기온도 -10°C, 유량 4.6m³/h에서 전력에 따른 인체 모형의 목 뒷 부분(T 22)에서의 온도 상승과 유량 4.6m³/h에서 전력 100W일 때 열쾌적성을 보여주고 있다.

Fig. 10에 적용된 조건은 측정온도 23.2°C로 승온 정도(ΔT)가 33.68°C이며, Fig. 11에서 보여진 바와 같이 열쾌적성 범위를 약간 벗어나나 대체로 만족함을 나타낸다.

챔버 내의 공기온도가 -10°C일 때 유량과 공급 전력에 따른 송풍온도를 측정된 결과, 각 유량 조건에서 100W는 열쾌적성을 어느 정도 만족함을 확인할 수 있으나, Table 1에 보여진 데이터를 보

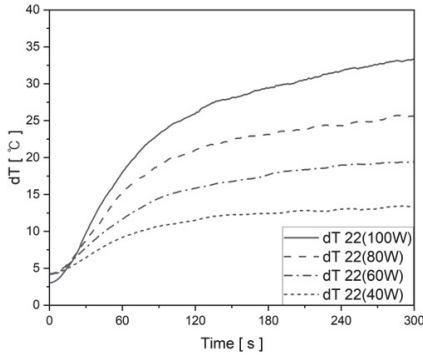


Fig. 8 Temperature difference behind the neck(T 22) according power at average air flow rate of 6.0m³/h

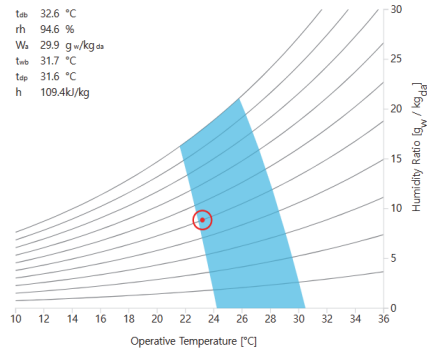


Fig. 11 Temperature comfort according to ASHRAE standard 55 model at average air flow rate of 4.6m³/h and power of 100W

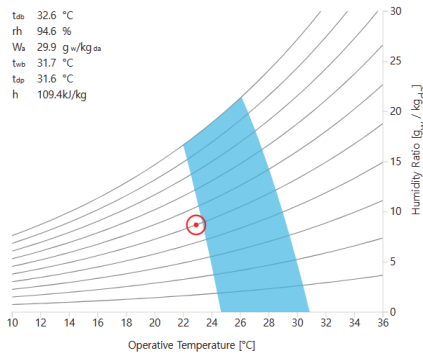


Fig. 9 Temperature comfort according to ASHRAE standard 55 model at average air flow rate of 6.0m³/h and power of 100W

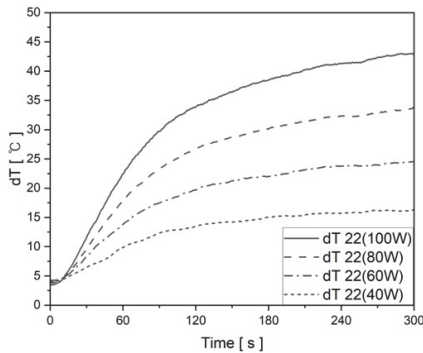


Fig. 10 Temperature difference behind the neck(T 22) according power at average air flow rate of 4.6m³/h

면 80W~ 40W 범위의 낮은 공급 전력에서는 ASHRAE standard 55 model의 도표상에서 좌측 하단에 위치하여 열쾌적성을 만족하지 못하였다.

또한 측정온도가 22.9°C, 23.4°C와 23.2°C와 같이 큰 차이가 나지 않지만, 조건상에서의 측정온도가 열쾌적성 범위에 큰 영향을 줌으로 인해 22.9°C의 측정값은 열쾌적성을 다소 만족시키지 않음을 확인할 수 있었다.

Table 3은 챔버의 공기온도가 0°C일 때 유량과 공급 전력에 따른 송풍온도를 나타낸다.

Table 2는 Table 1에서의 결과와 다르게 다소 높은 온도를 보인다. 이는 주위 온도에 따른 영향에 기인한 것으로 승온 정도를 비교하면 거의 동일한 ΔT값을 보였다.

Fig. 12는 챔버 내의 공기온도 0°C, 유량 6.2m³/h에서의 전력 공급에 따른 토출구 앞(T 21)에서의 승온 정도(ΔT)를 나타낸다.

히터에 전력을 공급한 후 300초일 경우에 전력을 20W씩 높임에 따라 공기온도는 6~8°C 정도 상승됨을 보였으며, 이 결과는 Fig. 5의 결과와 유사함을 나타내었다.

Fig. 13은 챔버의 공기온도가 0°C이고 유량 6.2m³/h에서 공급 전력에 따른 인체 모형의 목

Table 3. Temperature measurement result of heating module according to air flow rate and power at 0°C condition

Flow rate (m ³ /h)	Power (W)	Temperature according to Sensor No.					
		T①	T②	T③	T④	T⑤	T⑦
6.2	101.26	38.6	33.3	32.6	16.1	39.2	29.4
	82.68	30.4	25.7	25.5	11.7	30.7	24.1
	63.69	22.3	18.2	18.6	8.2	22.8	18.7
	44.87	15.2	11.4	12.1	3.77	15.7	13.0
6.0	101.26	39.2	34.2	32.7	15.3	40.0	29.7
	82.97	30.5	26.1	25.5	11.1	30.9	24.1
	64.03	22.3	17.9	18.4	7.66	22.7	18.7
	44.67	14.7	10.9	11.4	2.83	15.3	12.5
4.6	99.86	47.9	40.8	40.8	17.2	49.8	31.4
	81.43	35.0	29.8	29.1	12.1	36.6	24.4
	63.29	26.6	23.0	22.3	9.72	27.8	19.5
	43.79	17.8	15.0	14.8	6.32	18.5	13.9

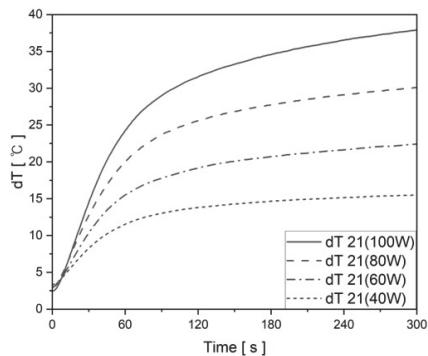


Fig. 12 Temperature difference in front of the outlet (T 1) according power at average air flow rate of 6.2m³/h

뒷부분 (T 22)에서의 승온 정도를 나타내고 있다.

히터에 전력을 공급한 후 300초경과할 때 전력을 20W씩 높임에 따라 공기온도는 약 8°C 정도 상승됨을 보였다.

Fig. 14는 Fig. 13의 공기온도와 유량 조건에서 전력이 100W일 때 ASHRAE standard 55 model

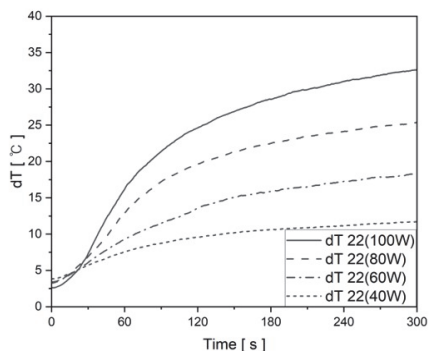


Fig. 13. Temperature difference behind the neck(T 22) according power at average air flow rate of 6.2m³/h

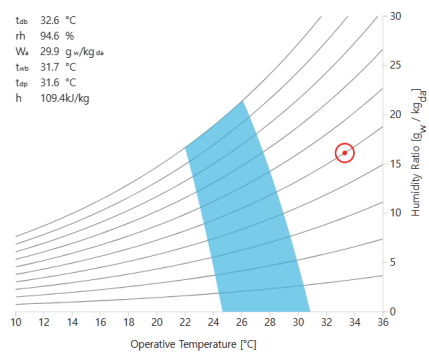


Fig. 14 Temperature comfort according to ASHRAE standard 55 model at average air flow rate of 6.2m³/h and power of 100W

을 적용한 열쾌적성을 나타낸다.

인체 모형의 목 뒷부분(T 22)에서의 측정 온도는 33.3°C로 됨에 따라 열쾌적성 범위를 크게 벗어난 우측 상단쪽으로 위치되어 오히려 더운 불쾌감을 느낄 수 있다.

또한 Table 1에서 보여진 바와 같이 60W와 40W에서는 -10°C의 조건에서와 마찬가지로 ASHRAE standard 55 model의 도표상에서는 좌측하단에 위치하여 열쾌적성을 만족하지 못하였다.

Fig. 15는 챔버의 공기온도가 0°C, 유량이 6.2m³/h

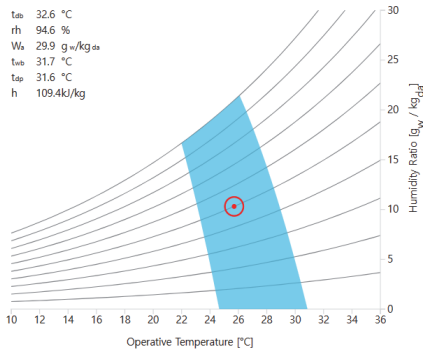


Fig. 15 Temperature comfort according to ASHRAE standard 55 model at average air flow rate of 6.2m³/h and power of 80W

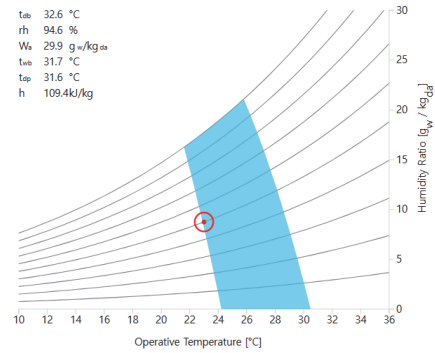


Fig. 18 Temperature comfort according to ASHRAE standard 55 model at average air flow rate of 4.6m³/h and power of 60W

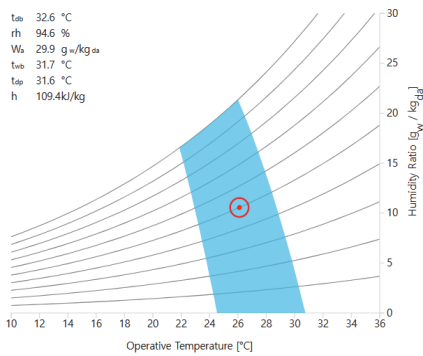


Fig. 16 Temperature comfort according to ASHRAE standard 55 model at average air flow rate of 6.0m³/h and power of 80W

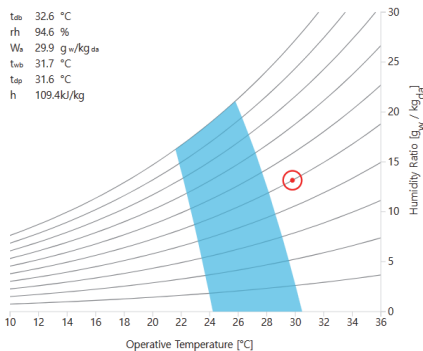


Fig. 17 Temperature comfort according to ASHRAE standard 55 model at average air flow rate of 4.6m³/h and power of 80W

그리고 공급 전력이 80W일 때 열쾌적성을 나타낸다. T 22의 위치에서 측정 온도는 25.7°C이며, 공급 전력이 80W임에도 불구하고 열쾌적성을 만족함을 보인다. 이는 동일한 전력량에서 낮은 유량일 경우, 승온되는 정도가 더 높아지므로 열쾌적성 범위에 들어갈 것임을 예측할 수 있으며, 너무 낮을 경우에는 오히려 더운 불쾌감을 보일 수도 있다.

Fig. 16과 17은 챔버의 공기온도가 0°C, 유량이 6.0m³/h(Fig. 16), 4.6m³/h(Fig. 17) 그리고 공급 전력이 80W인 경우의 열쾌적성을 나타낸다.

Fig. 16과 같이 유량이 6.0m³/h에서 T 22의 위치에서 측정 온도는 26.1°C로 승온되는 정도가 높아지므로 열쾌적성 범주에 들어감을 보여준다. 그러나 Fig. 17에서 유량이 4.0m³/h으로 너무 낮을 경우에는 측정 온도가 28°C로 오히려 높아져서 우측 상단쪽으로 열쾌적성 범위를 벗어나서 더운 불쾌감을 보일 수도 있음을 나타낸다.

Fig. 18은 유량 4.6m³/h, 공급전력 60W에서의 ASHRAE standard 55 model에 따른 열쾌적성을 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이, 유량 4.6m³/h과 같은 낮은 유량 및 60W의 낮은 전력량에서도 열쾌적성을 만족함을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 챔버의 차량 모형에 인체 모형의 목 뒤쪽에 국부 근접 난방 모듈을 설치하여 챔버 내의 공기온도, 난방 모듈의 공급전력 그리고 송풍 유량을 변화시켜 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 챔버 내의 공기온도가 -10°C 이고 공급 전력이 100W일 때 유량 $6.0\text{m}^3/\text{h}$ 와 $4.6\text{m}^3/\text{h}$ 에서 인체 모형의 목 뒤부분의 측정온도가 각각 23.4°C 와 23.2°C 로 열쾌적성을 만족하였다. 또한 공기온도 0°C , 공급전력 80W에서 유량 $6.2\text{m}^3/\text{h}$ 와 $6.0\text{m}^3/\text{h}$ 일 때와 60W에서 유량 $4.6\text{m}^3/\text{h}$ 에서 측정온도가 각각 25.7°C , 26.1°C 및 23.0°C 의 결과를 나타내며 열쾌적성을 만족하였다.
- (2) 직접 제작한 국부 근접 난방 모듈의 저온챔버에서의 동작 성능을 확인하고 열쾌적성 모델로 ASHRAE standard 55를 적용함으로써 열쾌적성 모델의 활용범위를 넓힘과 동시에 송풍온도와 송풍량에 따른 차량 실내 온도 및 풍량의 조절범위를 조합할 수 있는 방법을 제시한다.

참고문헌

- [1] 유진영, 이길우, “하이브리드 차량용 난방시스템 및 하이브리드 차량용 난방시스템의 제어 방법”, 특허 10-2016-0102672, (2016).
- [2] M.H.Park, S.C.Kim, “Heating Performance Characteristics of High-Voltage PTC Heater for an Electric Vehicle”, *Energy*, 10, (2017).
- [3] G. Mimberg and C. Massonet, “Battery Concepts to Minimize the Climate-related Reduction of Electric Vehicles Driving Range”, 2017 12th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies(EVER), (2017)
- [4] 이동규, 권대복, 이상구, 이성제, 안용남, 박재우, “탑승자 쾌적성 향상을 위한 국부 근접 A/C 시스템 개발”, 한국자동차공학회 춘계학술대회, (2017).
- [5] Y.I. Lee, H.J. Lee, B.H.Kang and J.K.Kim, “Machine Learning-based Personal Thermal Comfort Model for Electric Vehicles with Local Infrared Radiant Warmer”, *J.Mechanical Sci. Tech.*, Vol 35(7), (2021).
- [6] 이대웅, “차량용 공기 순환 장치가 후석 승객의 온열 쾌적성에 미치는 영향에 관한 연구”, *K.J. Air-conditioning and Refrigeration Eng.*, Vol 33(11), (2021).
- [7] Ford motor Corp., “Thermal Comfort Report for North America Consumer report”, (2003).
- [8] P.O.Fanger, “Thermal Comfort”, Danish Technical Press, Copenhagen, (1970).
- [9] J.A. Stolwijk, “A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man”, NASA Report, (1970).
- [10] ASHRAE, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, ASHRAE Standard 55-1992, Atlanta, (1992).
- [11] A. Alahmer, M. Omar, A. R. Mayyas and A. Qattawi, “Analysis of vehicular cabins’ thermal sensation and comfort state, under relative humidity and temperature control, using Berkeley and Fanger models”, *Building & Environ.*, 48, (2012).
- [12] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga and T. Han, “Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments Part I, Part II, Part III : local sensation of individual body parts”, *Building & Environ.*, (2009).
- [13] cbe.berkeley.edu/research/cbe-thermal-comfort-tool/