



전기자동차의 탑승자 국부 복사 난방을 고려한 인체 열쾌적성 시뮬레이션

이 예 인¹⁾ · 이 현 진²⁾ · 김 중 경^{*2)}

국민대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 국민대학교 기계공학부²⁾

Simulation of Human Thermal Comfort Considering Local Radiant Heating for Passengers in Electric Vehicles

Yein Lee¹⁾ · Hyunjin Lee²⁾ · Jung Kyung Kim^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

(Received 22 July 2019 / Revised 29 September 2019 / Accepted 1 October 2019)

Abstract : There is a demand for new heating and cooling technology that can provide low energy consumption while maintaining an appropriate level of thermal comfort for passengers in electric vehicles(EVs). We aim to develop a human thermal comfort model while taking into account local radiant heating with infrared(IR) warmers in EV and verify its effectiveness. The simulation program based on MATLAB/SIMULINK was developed and validated with a real car experiment conducted at a cold condition in an environmental chamber. The simulated overall thermal sensation corresponded fairly well with the overall trend of the passenger's subjective thermal sensation vote despite the discrepancy in absolute scale that might be caused by an individual difference in thermal perception. The simulation confirmed that the IR warmers positioned around the human passenger model were effective in enhancing the local thermal sensation in the lower body part. Local and overall thermal sensations have varied considerably depending on the combination of the On/Off state of the IR warmers, which implies that an energy-efficient control strategy of local radiant heating can be established by using the simulation program. A virtual EV model can potentially be built by integrating the proposed thermal comfort model with an EV thermal management model.

Key words : Electric vehicle(전기자동차), Thermal sensation(환서감), Thermal comfort(열쾌적성), Skin temperature(피부 온도), Thermophysiology(열생리), Thermopsychology(열심리)

Nomenclature

| | | | |
|--------------------------|--|------------------------|---|
| T_{skin} | : skin temperature, °C | $\frac{dT_{core}}{dt}$ | : rate of change in core temperature, °C |
| $T_{skin,i}$ | : skin temperature of each body part, °C | LS_i | : local thermal sensation of each body part |
| \bar{T}_{skin} | : mean skin temperature, °C | OS | : overall thermal sensation |
| T_{core} | : core temperature, °C | $C1, C2, C3$ | : regression coefficient |
| $T_{skin,i,set}$ | : set point skin temperature of each body part, °C | $K1$ | : coefficient indicating the influence of body temperature on local thermal sensation |
| $\bar{T}_{skin,set}$ | : mean set point skin temperature, °C | | |
| t | : time, s | | |
| $\frac{dT_{skin,i}}{dt}$ | : rate of change in skin temperature at each body part, °C | | |

Subscripts

i : number assigned to each body part

*A part of this paper was presented at the KSAE 2019 Spring Conference

*Corresponding author, E-mail: jkkin@kookmin.ac.kr

*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

1. 서론

내연 기관으로 구동되는 자동차는 엔진의 폐열을 이용해 실내 난방을 한다.¹⁾ 그러나 지구온난화에 대처하기 위한 이산화탄소 규제 등이 강조되면서 많은 자동차 제조 회사는 전기자동차 생산으로 눈을 돌리기 시작했다. 내연 기관 자동차와는 다르게 전기자동차에서의 난방은 PTC(Positive temperature coefficient heater) 및 연료 히터 등의 독립적인 난방 기구가 필요하다.²⁾

Fully electric vehicles(FEVs)에서 배터리를 이용한 전비는 차량의 공조 난방(HVAC) 시스템이 작동하면 방법에 따라 8%~24% 급감한다.³⁾ 차량 주행에 사용될 에너지가 독립된 난방 기구에서 소모되기 때문이다. 그러므로 전기자동차의 전비 감소량을 줄이고자 상대적으로 적은 에너지를 소모하면서도 탑승자의 열쾌적성은 기존 공조 시스템과 유사한 수준으로 제공할 수 있는 새로운 방식의 난방 기술과 그 때 탑승자의 열쾌적성을 분석하는 기술이 전기자동차의 최적 난방 제어를 위해 필요한 실정이다.

이를 위한 난방 기술로 국부 복사 난방 방식이 검토되고 있다. 차량 내부 벽면에 설치되는 특수 코팅 기반의 난방 기구를 이용하는 국부 복사 난방이 기존의 대류 공조 난방 방식보다 효율적이라고 밝혀졌으며, 모의 실험에서 적외선 복사열의 높은 효율로 인해 차량 난방 시스템의 에너지 소비가 50% 감소된 것으로 나타났다.⁴⁾ 자동차 캐빈 내에서 열쾌적성에 영향을 미치는 여섯 가지 요인은 물리적 변수인 기온, 기류, 평균 복사온도, 상대습도와 개인적 변수인 의복 단열성, 활동량으로 이루어진다.^{5,6)} 그 중에서 국부 복사 난방은 평균 복사온도를 조절하는 방법으로 기온 및 기류를 조절하는 기존 공조 난방과는 차이가 있다.

새로운 난방 방식이 적용됨에 따라 탑승자의 열쾌적성을 분석하는 기술로는 온열환경에 대한 인체 반응을 고려하여 개발된 열생리(Thermophysiology) 및 열심리(Thermopsychology) 모델을 이용했다. 열생리 모델은 신체 각 부위가 외부 냉온 자극에 반응하여 체온을 조절하는 메커니즘을 반영한 것이다. 그동안 제안된 Stolwijk,⁷⁾ Gagge 등,⁸⁾ Fiala 등⁹⁾ 등의 모델에서는 공통적으로 신체의 여러 부위를 원통 또는 구 등의 단순화한 형태로, 각 신체 부위는 피부, 지방, 근육, 뼈로 이루어진 다층 구조로 모델링한 후에 각 신체 부위의 치수, 각 층의 물성치, 인체 열조절 메커니즘을 고려한 생체 열전달을 계산하여 온도 분포를 추정한다. 열심리 모델은 사람이 주변의 온열환경을 감지하여 주관적으로 인식하게 되는 추위 또는 더위의 정도를 여러 신체 부위의 피부 온도 및 인체 피부

온도의 함수로 나타내어 수치화할 수 있는 모델이다. 초기 열심리 모델에서 도출된 대표적인 지표는 1970년대에 Fanger의 이론에 근거하여 1300명 이상의 사람을 대상으로 얻은 시험값을 토대로 제안된 PMV(predicted mean vote)와 PPD(predicted percent dissatisfied)이다.¹⁰⁾ PMV는 평균 예상 온열감 지수이며, PPD는 예상 불만족도로서 동일한 온열환경에서 불만족을 표시하는 사람의 비율을 백분율로 나타낸 것이다. 국제표준화기구(ISO)에서 국제 기준으로 인정된 PMV와 PPD는 여전히 사용되고 있으나,^{11,12)} 그동안 이 모델을 보완하고자 피부 젖음에 따른 쾌적성, 동적 한서감 등을 고려한 ASHRAE,¹³⁾ Fiala,¹⁴⁾ UC Berkely(UCB)¹⁵⁾ 모델과 한서감(Thermal sensation) 및 열쾌적성(Thermal comfort)이라는 새로운 심리적 지표도 제안됐다.

감성의 다원성으로 정의되는 주관적인 용어인 열쾌적성은 한서감과 열쾌적성이라는 두가지로 구성되며, 인체가 경험하는 열적환경에 영향을 미치는 모든 요소에 의해 결정된다.¹⁶⁾ 한서감은 인체와 주변 환경 사이의 열교환에 따른 요인에 의해 정해지고¹⁷⁾ 열쾌적성은 주변 열환경에 대한 인간의 만족도를 나타낸다.¹⁸⁾ 이러한 모델로 열쾌적성을 평가하는 데에는 생체 지표 중에서 가장 기본적인 측정 정보인 피부 온도가 모델의 초기 입력값으로 사용된다.¹⁹⁾ 따라서 생체 열전달을 고려한 열생리 모델에서 계산되는 인체 각 부위의 온도를 열심리 모델의 초기값으로 사용할 수 있다.

본 논문에서는 국부 복사 난방 방식이 적용된 전기자동차에서 탑승자의 생체 열전달을 고려한 신체 온도 분포와 열쾌적성을 시뮬레이션할 수 있는 모델을 개발하고 그 유효성을 검증했으며, 구축된 열쾌적성 모델이 전기자동차의 에너지 효율적 난방 전략 수립에 효과적으로 활용될 수 있음을 제시했다. 시뮬레이션 프로그램은 차량 상태 예측 모델과 연동하여 실행될 수 있도록 MATLAB/SIMULINK를 기반으로 개발됐다.

2. 시뮬레이션 프로그램

2.1 생체 열전달 모델

피부 온도를 얻기 위한 생체 열전달 모델로는 UCB 모델을 사용했으며 그 원형인 Tanabe 모델²⁰⁾을 기준으로 삼았다. 또한 Tanabe 모델은 Stolwijk 모델을 확장한 것이므로 Stolwijk 논문⁷⁾을 참조했다. 이 모델은 2개의 시스템으로 구성된다. Controlled system은 외부 온열환경 변화에 의해 수동적으로 영향을 받는 신체이며 이 때 체온은 교감 신경에 의해 조절된다. Controlling system은 외부 온열환경 변화에 적응하고자 신체가 반응하는 메커니즘이다.

체온 조절 메커니즘의 예로는 추울 때 시상하부의 열발생증추가 유발하는 오한 및 혈관수축, 더울 때 나타나는 발한 및 혈관확장 등을 들 수 있다.

본 연구진의 선행 연구²¹⁾에서는 21개의 신체 부위를 사용했으나, 본 논문에서는 신체 왼쪽과 오른쪽을 구분하여 Head, Chest, Back, Pelvis, Shoulders, Arms, Hands, Thighs, Legs, Feet의 16개 신체 부위로 분할했고 구 형태인 Head를 제외한 나머지 부위는 원기둥 모양으로 모델링했다. 각 신체 부위는 Core, Muscle, Fat, Skin으로 이루어진 4층 구조로 가정했다. 추가로 포함되는 Central blood pool까지 고려하면 생체 열전달 모델에는 전체 65개의 노드(Node)가 존재한다. 각 노드에서 온도값은 생체 열전달 방정식을 풀어서 얻을 수 있다. 생체 열전달 모델에 관한 보다 상세한 설명과 수식은 Prasad 등²²⁾에 기술되었다.

2.2 한서감 모델 해석 프로그램

피부 온도에 기반한 국부 한서감 추정을 위해서 계산 모델로 UCB 심리 모델을 채택했다. UCB 심리 모델은 다양한 온열환경 조건에서 100여명의 피험자를 대상으로 수행한 인체 실험 자료를 통계적으로 분석하여 개발됐다. 이 모델은 특정 신체 부위에서 국부 한서감이 낮아 추위를 느끼더라도 전신 한서감은 높아 몸 전체적으로는 따뜻함을 느낄 수 있다는 비균일함을 전제로 한다. 따라서 주변 온열환경에 대한 사람의 주관적인 인식을 반영하는 심리적 지표인 한서감과 열쾌적성은 각각 추움/더움과 그에 따른 쾌적함/불쾌함을 나타내며 전신(Overall) 한서감/열쾌적성은 인체 부위별 국부(Local) 한서감/열쾌적성에 의해 결정된다.

열심리 모델에서 시간의 함수로 주어지는 각 신체 부위의 피부 온도, 피부 온도의 변화율, 인체 피부 온도의 변화율을 입력하면, 조건에 따라 달라지는 계수와 수식을 통해 국부 한서감과 국부 열쾌적성, 전신 한서감과 전신 열쾌적성의 네 가지 지표를 순차적으로 계산할 수 있다.

국부 한서감 모델은 피부 온도를 입력값으로 하고 각 부위별로 정해진 계수를 적용하여 계산된 국부 한서감을 출력값으로 하는 모델이다. 스케일은 -4부터 +4까지를 사용하는데 -4는 매우 추움, 0은 중립, +4는 매우 더움을 나타낸다. 다음 식 (1)에서 T_{skin} 과 T_{core} 는 생체 열전달 모델에서 계산된 값을 이용한다.

$$LS_i = 4 \left(\frac{2}{D} - 1 \right) + C2_i \frac{dT_{skin,i}}{dt} + C3_i \frac{dT_{core}}{dt} \quad (1)$$

여기서 $D = 1 + \exp[-C1(T_{skin,i} - T_{skin,i,set}) - K1 \{(T_{skin,i} -$

$\bar{T}_{skin}) - (T_{skin,i,set} - \bar{T}_{skin,set})\}]$ 로 정의된다. 또한 신체 부위와 온도 변화 조건에 의해 결정되는 $C1, C2, C3$ 은 한서감 모델에 사용된 로지스틱(Logistic) 곡선의 기울기를 정하는 회귀 계수이며, $K1$ 은 국부 한서감에 영향을 미치는 전신 온도의 영향을 나타내기 위한 계수이다.

전신 한서감 모델은 기존 UCB 모델을 사용하지 않고 전기자동차의 국부 복사 난방 조건에 적용 가능하도록 실차 실험 데이터를 기반으로 자체 개발했다. 자동차 내에서 탑승자는 캐빈의 고정된 좌석에서 일정한 자세를 유지하기 때문에 UCB 전신 한서감 모델보다 단순화된 모델로 수정이 가능하다. 기본 원리는 UCB 모델과 같은 가중 평균 방식을 이용했다. 다음 식 (2)에서 선택된 6개 신체 부위(Legs, thighs, back, head)는 총 16개 신체 부위 중에서 실차 실험 시 피험자가 일정한 시간 간격으로 응답한 전신 한서감 스케일에 가장 근접한 국부 한서감 계산값이 얻어진 부위이다. 식 (2)에서 6개의 가중치(w)는 각 신체 부위의 국부 한서감(LS)이 전신 한서감(OS)에 미치는 영향의 상대적인 크기를 의미한다.

$$OS = w_1LS_{L-leg} + w_2LS_{R-leg} + w_3LS_{Head} + w_4LS_{Back} + w_5LS_{L-thigh} + w_6LS_{R-thigh} \quad (2)$$

2.3 SIMULINK 기반 프로그래밍

인체 온도를 계산하는 열생리 모델과 탑승자의 열쾌적성을 평가하는 수정된 열심리 모델을 결합한 SIMULINK 기반 프로그램을 개발했다. Fig. 1에 나타낸 계산 순서와 같이 지정한 외부 환경을 입력값으로 하여 얻은 열생리 모델의 출력값인 인체 온도는 다시 수정된 전신 한서감 모델이 포함된 열심리 모델의 입력값이 되어 한서감을 계산하는데 사용된다. 이 과정에서 각 모델에 적용되는 시간 간격은 동일하게 설정했다.

3. 시뮬레이션 조건

3.1 초기 온도 설정

전기자동차의 겨울철 운행 조건을 모사하여 시뮬레이션을 진행하고자 모의 실험의 초기 상황으로는 탑승자가 실내에서 실외로 이동하여 낮은 온도에 충분히 노출된 후의 상황을 가정했다. 실내에 있을 때 피부 온도는 Setpoint 온도로 가정했다. Tanabe 등²⁰⁾에 따르면 Setpoint 온도는 체온 조절 목표 온도의 역할을 한다. 외기 온도는 -10 °C, 상대습도는 20 %로 설정했다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 이러한 환경 조건에서 피부 온도는 시간에 따라 지속적으로 감소하며 일정한 온도에 수렴한다. 총 33분 동안 진행된 기초 모의 실험에서 초기 15분은 탑승자가 실

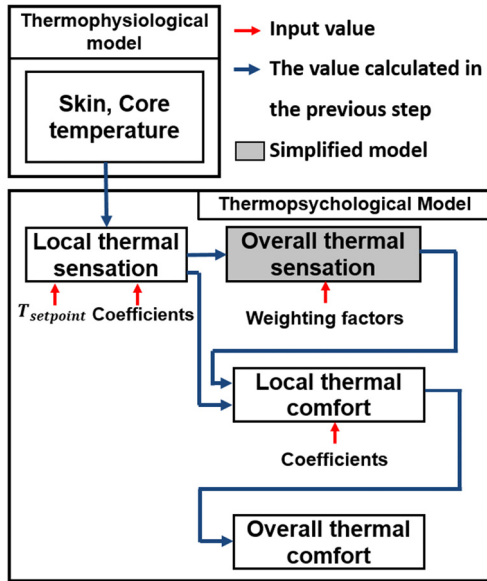


Fig. 1 Flowchart for simulation of human thermal comfort using MATLAB/SIMULINK-based program

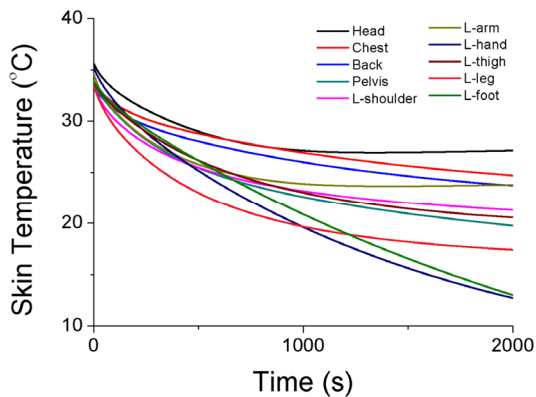


Fig. 2 Variation of skin temperature in each body part exposed to cold environment at -20 °C. Initial temperatures used for the simulation are set at 900 s

내를 벗어나 야외에 주차된 자동차에 도착하는데 소요된 시간으로 가정했고, 이 때 각 신체 부위의 피부 온도를 시뮬레이션 초기 온도로 설정했다.

3.2 적외선 워머 위치

자동차 내장재 표면에 적외선 복사 워머(IR warmer)를 부착한 상황을 가정하고자 앉은 자세의 인체 모델을 둘러싼 6개의 적외선 워머 모델을 시뮬레이션에 적용했다. Fig. 3에 적외선 워머의 분포를 개략적으로 나타냈다. 각 적외선 워머 번호는 자동차 내부 표면의 위치를 나타낸다. 적외선 워머와 인체 모델간의 거리 및 부착 지점은 Table 1에 정리되었다. 시뮬레이션에는 적외선 워머를 모두 켜거나 끄는 것을 포함하여 총 15가지의 적외선 워머

Table 1 Specifications and positions of IR warmers

| IR Warmer No. | Area (cm ²) | Distance (cm) | Position |
|---------------|-------------------------|---------------|-----------------------|
| 1 | 150 | 7 | Door |
| 2 | | 7 | Foot rest |
| 3 | | 9 | Steering column |
| 4 | | 9 | Under steering column |
| 5 | | 8 | Console side cover |
| 6 | | 8 | Console side cover |

Table 2 Simulation cases - Combinations of IR warmers On/Off

| Case | IR Warmer No. | | | | | |
|-------|---------------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| X | | | | | | |
| All | O | O | O | O | O | O |
| H1 | O | | | | | |
| H12 | O | O | | | | |
| H1256 | O | O | | | O | O |
| H16 | O | | | | | O |
| H2 | | O | | | | |
| H2345 | | O | O | O | O | |
| H25 | | O | | | O | |
| H3 | | | O | | | |
| H34 | | | O | O | | |
| H4 | | | | O | | |
| H5 | | | | | O | |
| H56 | | | | | O | O |
| H6 | | | | | | O |

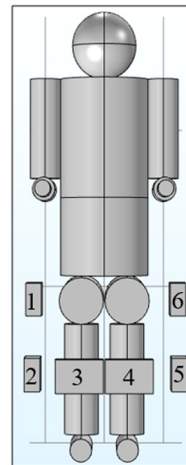
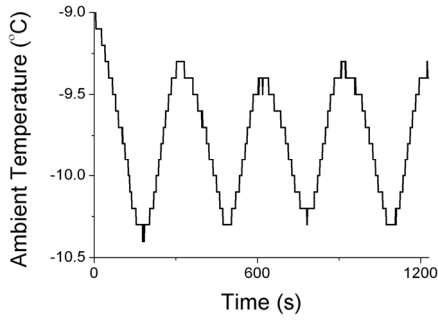


Fig. 3 Positions of infrared radiant warmers around the human model

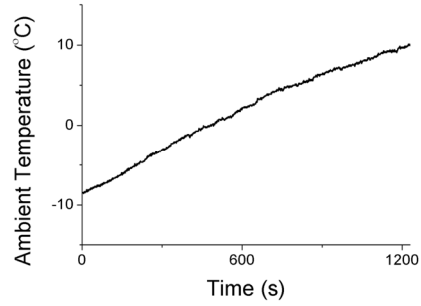
On/Off 조건을 적용했으며 Table 2에 각 조건을 상세하게 나타냈다.

3.3 외기 온도 및 상대 습도

외기 온도는 실차 실험 당시 측정된 환경챔버의 온도

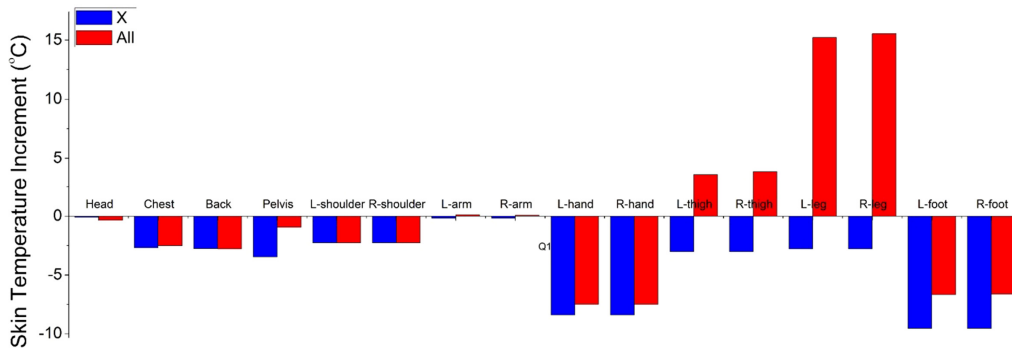


(a) Temperature variation in environmental chamber

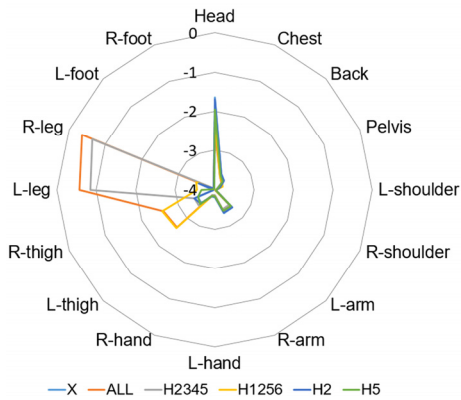


(b) Temperature variation in cabin controlled with HVAC

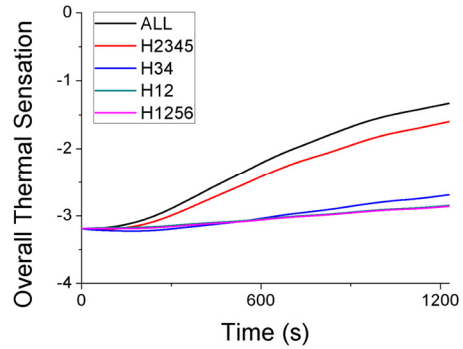
Fig. 4 Ambient temperatures used for simulation



(a) Variation of skin temperature in each body part



(b) Local thermal sensation



(c) Overall thermal sensation

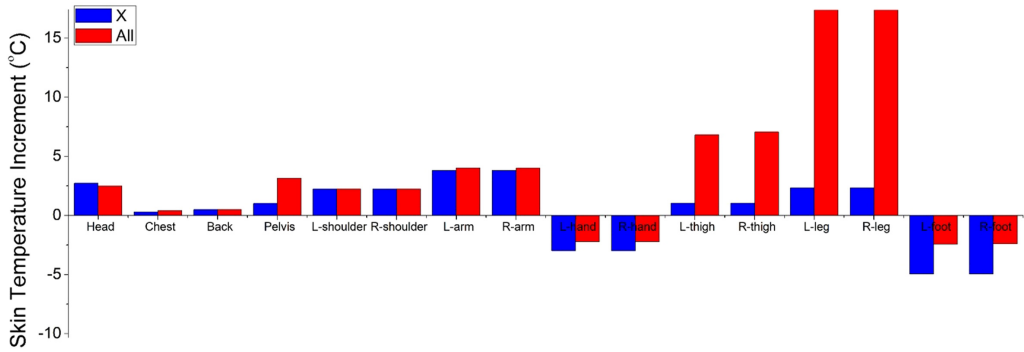
Fig. 5 Effect of IR warmers on skin temperature, local thermal sensation and overall thermal sensation in EV without HVAC heating

와 자동차 내부의 공기 온도를 이용했다. 환경챔버의 온도는 Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 챔버 내 환경 제어를 통해 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도로 유지됐다. 이 온도는 공조 난방의 영향을 배제하고 국부 복사 난방만의 효과를 분석할 때 사용했다. Fig. 4(b)에 나타난 자동차 내부 공기 온도는 공조 난방 시스템을 가동한 조건에서 측정된 것으로 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 서서히 상승한다. 이 온도를 적용함으로써 공조 난방 조건을 시뮬레이션에 반영했다. 상대습도는 두 가지 조건에서 모두 20%로 설정했다.

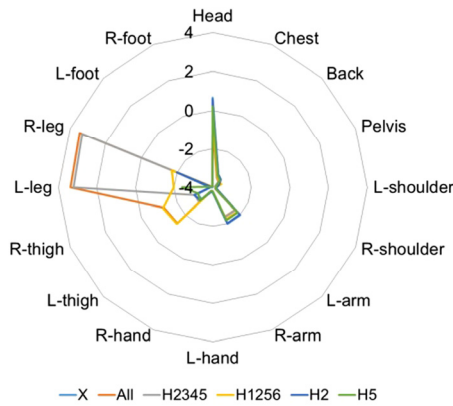
4. 결과 및 토의

4.1 신체 부위 별 국부 복사 난방 효과

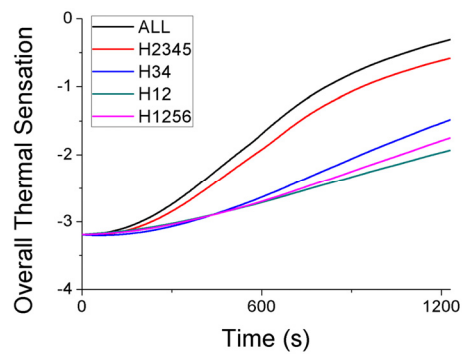
환경챔버 내부의 온도를 적용하여 공조 난방을 하지 않고 국부 복사 난방만 하는 전기자동차 내부 환경을 시뮬레이션 했다. 이 때 적외선 워머가 둘러싼 하체의 피부 온도가 증가하는 것을 Fig. 5(a)에서 확인할 수 있다. 그 중에서도 적외선 워머와 가까운 Legs 부위의 피부 온도가 크게 상승했다.



(a) Variation of skin temperature in each body part



(b) Local thermal sensation



(c) Overall thermal sensation

Fig. 6 Effect of IR warmers on skin temperature, local thermal sensation and overall thermal sensation in EV with HVAC heating

국부 한서감도 상체에 비해 하체에서 더 크게 변화했다. Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 All 조건에서는 Legs와 Thighs, H1256 조건에서는 Thighs, H2345 조건은 Legs 부위에서 난방 효과가 집중됐다. 특히 H2345 조건은 Legs의 국부 한서감 측면에서 All 조건에 상응하는 효과를 나타냈다.

Fig. 5(c)에 나타난 전신 한서감은 초기에는 -3보다 작은 값을 가졌으나 6개 적외선 워머를 모두 가동한 All 조건에서 가장 높은 전신 한서감을 기록했고, 그 값은 시물레이션 종료 시점인 20분에서 -1.3에 도달했다. 전신 한서감이 높게 계산된 상위 5개 조건은 All, H2345, H34, H12, H1256이다.

전기자동차 내부에 공조 난방과 국부 복사 난방을 동시 적용하는 상황을 시물레이션하고자 실차 실험에서 공조 가동 시 측정된 자동차 내부 공기 온도를 시물레이션에 적용했다. 그 결과 Fig. 6(a)와 같이 복사 난방만 할 때와 다르게 전신에서 피부 온도가 하락하는 정도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 국부 난방 조건과 같이 가장 많이 온도가 상승한 부위는 Legs로, 다른 부위의 온도 증가가 Legs에 못 미치는 것으로 보아 하체에서는

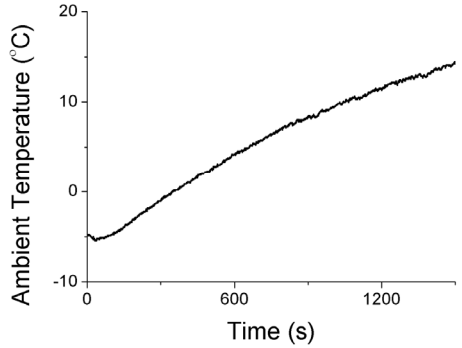
국부 복사 난방의 효과가 공조 난방보다 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(b) 및 Fig. 6(c)를 각각 Fig. 5(b) 및 Fig. 5(c)와 비교해서 확인할 수 있듯이 국부 한서감과 전신 한서감 측면에서는 두 가지 외기 온도 조건 모두 적외선 워머의 On/Off 상태에 따라 유사한 경향을 나타내어 각 적외선 워머 On/Off 상태가 영향을 미치는 부위와 전신 한서감이 높게 나타나는 적외선 워머의 On/Off 상태가 동일했다.

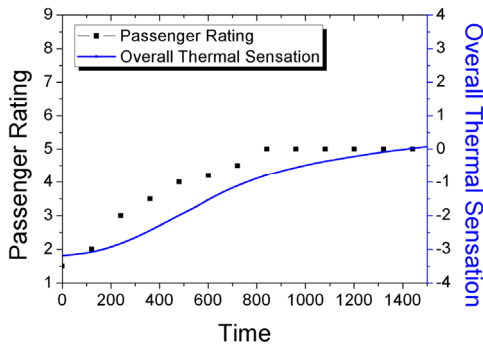
4.2 열쾌적성 모델의 유효성 검증

열쾌적성 모델의 유효성을 검증하고자 실차 실험 데이터 중 공조 난방과 자동차 내부에 설치된 적외선 워머를 모두 가동한 환경에서 얻은 피험자의 전신 한서감 응답값과 그 때의 외기 온도 및 시물레이션에서 적외선 워머 All 조건을 적용한 계산 결과 중 전신 한서감을 비교했다.

적용한 외기 온도는 -5 °C에서 14 °C까지 난방에 의해 증가하며 이전 시물레이션과 같이 상대습도는 20 %로 동일하게 유지했다. 피험자가 기록한 전신 한서감은 1(매우 추움)부터 9(매우 더움)까지의 9단계 스케일을 따르고 있으며, 시물레이션 프로그램에서 사용하는 -4부터 +4가



(a) Variation of ambient temperature



(b) Comparison of overall thermal sensation (subjective rating vs. simulation)

Fig. 7 Validation of thermal comfort model

지의 9단계 스케일과 그 크기가 같아 선형 변환을 통해 비교했다.

Fig. 7에서 시뮬레이션 프로그램을 통해 계산된 전신 한서감을 탑승자 응답값과 같은 스케일에서 비교했을 때 최대 1정도의 차이가 발생했으나 전체적인 변화 경향은 비교적 잘 일치했다. 따라서 이를 통해 시뮬레이션이 피험자의 응답을 유사하게 재현하는 것을 확인할 수 있다.

4.3 효과적인 전기자동차 난방 전략

전기자동차의 효과적인 난방 전략을 제시하고자 공조 난방과 국부 복사 난방을 동시에 가동한 실차 실험 (HVAC+IR)을 -4부터 +4까지의 전신 한서감 스케일을 이용하여 다시 진행했다. 이 실험의 데이터와 국부 복사 난방만 고려한 시뮬레이션(IR Only) 결과를 Table 3에 비교해서 나타냈다. 10분 경과한 시점에서 전신 한서감은 HVAC+IR 조건에서 -1.52에 도달하여 IR Only 조건에서 도달한 -2.22에 비해 상대적으로 높은 난방 효과를 보였지만, 이 때 에너지 소비량은 IR Only 조건보다 4배 이상 증가했다. IR Only 조건에서 전신 한서감이 -1.52에 도달하기까지 17분이 소요됐다. 이 때 동일한 전신 한서감에 도달하는 시간이 HVAC+IR 조건보다 7분 더 소요됐으나 에너지 소비량은 63 % 가까이 감소했다.

Table 3 Comparison of energy consumption and overall thermal sensation (HVAC+IR vs. IR only)

| Heating condition | Time (min) | Heating energy consumption (Wh) | Overall thermal sensation |
|----------------------|------------|---------------------------------|---------------------------|
| HVAC+IR (experiment) | 10 | 309 | -1.52 |
| IR Only (simulation) | 10 | 68 | -2.22 |
| | 17 | 115 | -1.52 |

본 논문에서 시뮬레이션에 적용한 가상의 적외선 워머 면적보다 실제 적외선 워머 면적이 넓어서 실차 실험과 시뮬레이션에서 얻은 결과를 직접 비교하기는 어렵지만, 최근에 수행한 실차 실험을 통해 동일한 전신 한서감 수준에 도달했을 때 IR Only 조건에서 실험적으로 측정된 에너지 소비량이 HVAC+IR 조건에 비해 유의미하게 감소한 사례를 보고한 바 있다.²³⁾ 따라서 빠른 전신 한서감 만족을 위해서는 공조 난방과 국부 복사 난방을 병용하는 전략, 에너지 절약 측면에서는 국부 복사 난방만 사용하는 전략이 효과적인 것으로 확인됐다.

5. 결론

본 논문에서는 생체 열전달 및 열쾌적성 모델 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 국부 복사 난방이 인체 부위 별로 미치는 영향을 분석했다. 가상의 적외선 워머 6개를 인체 모델 주위에 부착하여 수행한 시뮬레이션에서 적외선 워머 위치에 따라 적외선 워머 4개만을 가동해도 6개를 가동했을 때와 유사한 수준의 전신 한서감에 도달할 수 있음을 확인했다. 또한 실차 실험과 시뮬레이션에서 얻은 전신 한서감 결과를 비교하여 열쾌적성 모델의 타당성을 검증한 결과, 개인적 차이에 따라 시뮬레이션 계산값과 주관적으로 인식하는 전신 한서감은 1정도의 스케일 범위에서 차이가 있지만 그 변화 경향은 잘 일치함을 알 수 있었다. 마지막으로 전기자동차의 효과적인 난방 전략으로서 에너지 절약을 목표로 할 때는 국부 복사 난방을, 빠른 전신 한서감 상승을 목표로 할 때는 국부 복사 난방과 공조 난방을 같이 적용하는 것이 효과적임을 제시했다.

후 기

본 연구는 현대자동차 산학협력의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2019R1A2C2088973, NRF-2018M1A3A3A02065823)을 받아 수행된 연구임.

References

- 1) Y. Feng, Y. Xiugan and L. Guiping, "Waste Heat

- Recovery Using Heat Pipe Heat Exchanger for Heating Automobile using Exhaust Gas,” *Applied Thermal Engineering*, Vol.23, No.3, pp.367-372, 2003.
- 2) T. Zhang, C. Gao, Q. Gao, G. Wang, M. H. Liu, Y. Guo, C. Xiao and Y. Y. Yan, “Status and Development of Electric Vehicle Integrated Thermal Management from BTM to HVAC,” *Applied Thermal Engineering*, Vol.88, pp.398-409, 2015.
 - 3) B. Torregrosa-Jaime, F. Bjurling, J. M. Corberan, F. D. Sciullo and J. Paya, “Transient Thermal Model of a Vehicle's Cabin Validated under Variable Ambient Conditions,” *Applied Thermal Engineering*, Vol.75, pp.45-53, 2015.
 - 4) T. Bauml, D. Dvorak, A. Frohner and D. Simic, “Simulation and Measurement of an Energy Efficient Infrared Radiation Heating of a Full Electric Vehicle,” *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2014.
 - 5) M. Simiona, L. Socaciua and P. Unguresana, “Factors which Influence the Thermal Comfort inside of Vehicles,” *Energy Procedia*, Vol.85, pp.472-480, 2016.
 - 6) J. W. Seo, J. H. Park and Y. H. 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) J. A. Stolwijk, *A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man*, NASA Report, 1970.
 - 8) A. P. Gagge, A. P. Fobelets and L. G. Berglund, “A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment,” *ASHRAE Transactions*, Vol.92, pp.709-731, 1986.
 - 9) D. Fiala, K. J. Lomas and M. Stohrer, “A Computer Model of Human Thermoregulation for a Wide Range of Environmental Conditions: The Passive System,” *Applied Physiology*, Vol.87, No.5, pp.1957-1972, 1999.
 - 10) P. O. Fanger, *Thermal Comfort*, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
 - 11) ISO, *Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*, ISO Standard 7730: Ergonomics of the Thermal Environment, Geneva, 2005.
 - 12) D. W. Lee, “Impact of a Three-dimensional Air-conditioning System on Thermal Comfort: An Experimental Study,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.16, No.3, pp.411-416, 2015.
 - 13) ASHRAE, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE Standard 55-1992, Atlanta, 1992.
 - 14) D. Fiala, K. J. Lomas and M. Stohrer, “First Principles Modeling of Thermal Sensation Responses in Steady-state and Transient Conditions,” *ASHRAE Transactions*, Vol.109, p.179, 2003.
 - 15) H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga and T. Han, “Thermal Sensation and Comfort Models for Non-uniform and Transient Environments: Part I: Local Sensation of Individual Body Parts,” *Building and Environment*, Vol.45, No.2, pp.380-388, 2010.
 - 16) C. Croitoru, I. Nastase, F. Bode, A. Meslem and A. Dogeanu, “Thermal Comfort Models for Indoor Spaces and Vehicles: Current Capabilities and Future Perspectives,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.44, pp.304-318, 2015.
 - 17) M. Ivanescu, C. Neacsu and S. Tabacu, “The Human Thermal Comfort Evaluation Inside the Passenger Compartment,” *World Automotive Congress*, 2010.
 - 18) A. Alahmer, A. Mayyas, A. A. Mayyas, M. A. Omar and D. Shan, “Vehicular Thermal Comfort Models: A Comprehensive Review,” *Applied Thermal Engineering*, Vol.31, Nos.6-7, pp.995-1002, 2011.
 - 19) S. -H. Park, J. -W. Shin and Y. -H. Han, “Development of Hybrid Temperature Measurement System for Bio-signal Application Device,” *Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol.6, No.6, pp.195-202, 2008.
 - 20) S. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki and M. Konishi, “Evaluation of Thermal Comfort Using Combined Multi-node Thermoregulation (65mm) and Radiation Models and Computational Fluid Dynamics (CFD),” *Energy and Buildings*, Vol.34, No.6, pp.637-646, 2002.
 - 21) B. Prasad, Y. Lee, H. J. Lee, B. H. Kang and J. K. Kim, “Analysis of Thermal Comfort for Passenger in Electric Vehicle Using TAItherm,” *KSAE Spring Conference Proceedings*, pp.1351-1352, 2018.
 - 22) B. Prasad, Y. Lee, B. H. Kang, J. K. Kim and H. Lee, “Development of a Thermal Physiological Model to Analyze the Effect of Local Radiant Heaters in Electric Vehicles,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.33, No.7, pp.3577-3584, 2019.
 - 23) Y. Lee, J. W. Kim, S. L. Chung, S. S. Lee, M. J. Oh, H. J. Lee, B. H. Kang and J. K. Kim, “Real Vehicle Test for Development of Human Thermal Comfort Model in EV Installed with Infrared Warmers,” *KSAE Spring Conference Proceedings*, pp.1369-1370, 2019.