



RESEARCH ARTICLE

## 차량 공조 시 신체 부위별 대류 열전달계수 측정

박준석<sup>1\*</sup> · 유지현<sup>2</sup> · 최승우<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 공과대학 건축공학부 교수, <sup>2</sup>한양대학교 대학원 건축공학과 박사과정,

<sup>3</sup>한양대학교 대학원 건축공학과 석사과정

# Measuring Convective Heat Transfer Coefficients for Individual Human Body Segments in the HVAC System of a Vehicle

Park, Jun-Seok<sup>1\*</sup> · Yoo, Ji-Hyun<sup>2</sup> · Choi, Seung-Woo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul, Korea

<sup>2</sup>PH.D. Candidate, Division of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

<sup>3</sup>Master's Course, Division of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

\*Corresponding author: Park, Jun-Seok, Tel: +82-02-2220-1743, E-mail: junpark@hanyang.ac.kr

### ABSTRACT

As well as in buildings, HVAC is an important system that significantly influences energy performance and thermal comfort in vehicles. The thermal comfort indices developed for homogeneous indoors could not be applied to the inhomogeneous thermal environment of vehicles. Several human thermal physiological models have been developed to simulate transient and local inhomogeneities in the thermal environment. In this study, specific convective heat transfer coefficients of human body segments were measured through experiments in a chamber to develop a human thermal physiological model that can be used for vehicles. It is confirmed from the experiments that the convective heat transfers are significantly varied with human body segments under HVAC fan operation because of air velocity. The convective heat transfer on the subject segments ranged from 41.0 to 145.6 W/m<sup>2</sup> and from 51.7 to 118.7 W/m<sup>2</sup> for the second and seventh fan speeds, respectively. The model for convective heat transfer coefficients of each segment was proposed to predict the convective heat transfer in the human body. The model and results of this study could help evaluate the inhomogeneous thermal environment, and also design HVAC systems for vehicles.

**주요어** : 온열환경, 대류열전달, 신체부위, 냉난방장치, 차량

**Keywords**: Thermal environment, Convective heat transfer, body segments, HVAC system, Vehicle

### OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2023 October, 17(5): 217-228  
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20230018>

pISSN : 1976-6483  
eISSN : 2586-0666

**Received:** August 24, 2023

**Revised:** October 12, 2023

**Accepted:** October 23, 2023

© 2023 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 서론

냉방과 난방에 소비되는 에너지를 절약하고 화석연료의 사용을 줄이기 위하여 건물의 기밀 및 단열 성능 강화 그리고 공기조화설비(이하 HVAC, Heating, ventilation and Air-conditioning)의 효율향상에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다. HVAC시스템의 기본적 목표는 온도, 습도, 기류와 복사 등 실내 환경인자들의 제어를 통하여 재실자들의 온열환경에

대한 만족도(Thermal comfort) (Fanger, 1967; Yoon et al., 2003; Hoof, 2008; Croitoru et al., 2015)를 높이고, 냉방과 난방에 소비되는 에너지를 줄이는 것이라 할 수 있다(Balaras et al., 2005; Lopes et al., 2005; Park et al., 2016). 재실자들의 온열환경 만족도를 높이기 위해서는 실내환경과 인체의 열전달 과정 그리고 열적중립(Thermal neutral) 상태를 유지하기 위한 인체의 체온조절기구(Physiology of thermoregulation)를 알아야 한다(Stolwijk and Hardy, 1966). 인체의 열전달 과정 및 체온조절기구 등에 관한 기존의 연구성과를 바탕으로 ASHRAE(2020)에서는 실내의 용도와 재실자의 대사량 조건에 따른 온열 쾌적범위(Thermal comfort zone)를 제시하고 있다.

대부분의 HVAC시스템은 완전혼합(Complete mixing)을 원칙으로 설계하는 경우가 많으며 이 때에는 온도, 습도, 기류와 복사 등 환경인자의 값이 실내 전체에서 균일하게 유지되는 준 정상상태(Semi steady state)를 가정하여 인체와 실내환경과의 열전달 과정을 계산한다. 그러나 제어시스템과 열원의 발전으로 공간 전체를 냉난방하기 보다는 국소 또는 개별공조(Personal conditioning)를 적용하여 냉난방의 효율을 올리기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국소 또는 개별공조를 적용하는 경우 신체 부위별로 실내 환경인자들의 값이 국소적으로 크게 차이가 날수 있으며 그 값 또한 시시각각 변할 수 있어 정상상태를 가정한 ASHRAE 온열 쾌적범위와 Fanger의 PMV와 같은 기존의 온열환경 지표(Thermal indexes)를 적용하기 어렵다(Hensen, 1990).

국소적으로 실내 환경인자의 값이 불균일한 상태에서의 인체와 실내환경과의 열전달 계산을 위하여 Stolwijk(1971)은 사람의 신체 부위를 구와 원통으로 가정하여 인체모형을 개발하였다. 인체모형은 머리, 몸통, 팔, 다리, 손과 발 등 6부위(Segment)로 구분하고 각 부위는 코어(Core), 근육(Muscle), 지방(Fat)과 피부(skin)의 4개층(Layer)로 구성하여 24개 노드(Node)를 만들었고 여기에 혈류(Central blood flow)를 합하여 총 25개 노드를 이용하여 주변 환경과의 열전달과 함께 체온조절기구를 수학적 모델로 재현하였다. 이후 Fiala(1998)는 Stolwijk의 모델을 발판으로 신체를 15부위와 5개층으로 세분화하였으며 Tanabe et al.(2002)는 상체를 등(Back)과 가슴(Chest)로 구분한 65노드로 구성된 인체모형을 개발하였다.

인체모형은 각 신체 부위별로 피부 또는 의복(Clothing)과 국소 환경사이의 대류, 복사 및 증발에 의한 열전달량을 계산한다. 피부 또는 의복을 통한 열전달 계산을 위해서는 각 신체 부위별로 대류 또는 복사 열전달계수를 구할 필요가 있으며 de Dear et al.(1997)는 누드의 발열 마네킹(Thermal Manikin)을 풍동에 설치하여 기립 및 착석 상태에서의 신체 16부위별로 대류 및 복사 열전달계수를 측정하였다. Oguro et al.(2002)는 발열 마네킹에 의복을 입힌 상태에서 풍상(Upwind)과 풍하(Downstream) 방향에서의 대류 열전달계수를 제시하였고, Wang(1990)은 실제 사람의 피부온과 유사한 발열 조건하에서 자연 및 강제대류 적용에 따른 대류 열전달계수 예측모형을 개발하였다. 이렇게 개발된 신체 부위별 열전달 모델은 인체모형과 함께 실내환경이 국소적으로 불균일하거나 비정상 상태(Unsteady state) 일 때의 온열환경을 예측하고 평가하는 것을 가능하게 하였다(Hu et al., 2023).

HVAC 시스템은 건물뿐만 아니라 차량에 있어서도 탑승자의 만족감과 함께 주행성능을

좌우하는 중요한 요소이며 적은 에너지를 이용하여 탑승자에게 쾌적한 환경을 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 차량의 경우 건물의 실내보다 상하온도차가 크고 좌우 또한 비대칭적 온열환경이 조성되어 기존의 온열환경 지표를 이용한 평가 보다는 CFD 또는 인체모델을 이용한 온열환경 평가가 주로 이루어지고 있다(Alahmer et al., 2011; Croitoru et al. 2015; Yun et al., 2021). 차량에서의 대류 냉난방의 경우 취출구가 탑승자에 매우 가깝게 위치하며 풍속과 방향에 있어서도 실내의 경우와 많은 차이가 있다. 또한 통풍 또는 열선과 같이 국소 부위에 따라서는 적용되는 공조방식도 달라질 수 있어 실내에서의 공조를 가정한 기존의 열전달 모델을 차량에 바로 적용하기 어렵다.

따라서 연구에서는 차량에서의 온열환경 평가 및 열전달모델 개발을 위하여 실험을 통하여 대류공조 조건에서의 신체 부위별 열전달량을 측정하였다. 실험에서는 온습도 조절이 가능한 챔버 내에 차량의 HVAC시스템을 모사하고 풍속과 대류 열전달계수의 관계를 분석하여 차량에서의 대류 열전달계수 모델을 제안하였다.

## 실험개요

### 실험시설 및 조건

Figure 1은 챔버의 개요를 나타낸다. 챔버는 A실과 B실로 구분되어 있으며 각실에는 온습도 및 환기량의 조절이 가능한 공조기(AHU, Air Handling Unit)가 개별로 설치되어 있다. 차량에서의 대류공조를 모사하기 위하여 열원이 제거된 대시보드(Dashboard)를 지그를 이용하여 Figure 2와 같이 B실에 설치하였다. 대시보드는 차량의 앞좌석 전면에 위치한 장치로서 공조를 위한 팬과 취출구가 설치되어 있다.

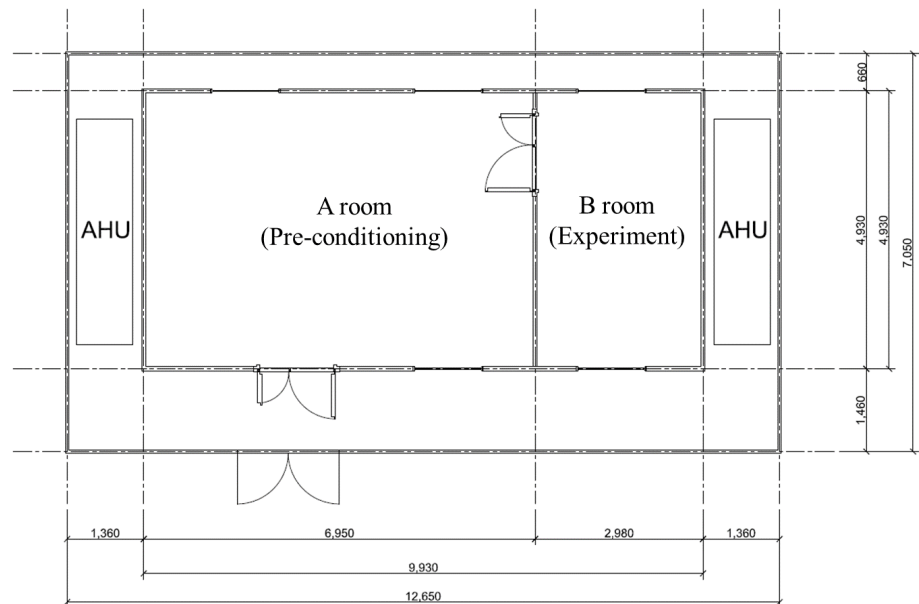
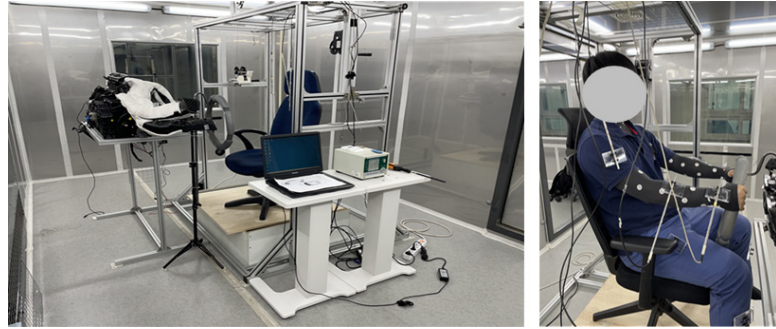


Figure 1. Plan of the chamber for measuring convective heat transfer rate



**Figure 2.** Setting of experimental materials and a subject in the chamber

Table 1은 챔버에서의 실험조건을 정리하여 나타낸다. 챔버 내 건구온도는 승합차에서의 HVAC시스템 성능 평가의 기준으로 사용되고 있는  $23^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. 실험에서는 챔버 A실과 B실 공조기를 각각 가동한 다음 실내 건구온도가  $23^{\circ}\text{C}$ , 그리고 상대습도가 50%로 유지되어 정상상태에 도달한 것을 확인한 후에 피험자를 A실에 입실시켰다. 피험자는 A실에서 30분의 열적 순응 및 각종 센서를 부착한 후에 B실에 이동하였으며 대시보드 앞에 차량과 유사한 거리 조건으로 착석하여 실험을 진행하였다.

피험자는 국민체위조사(Size Korea, 2020-21)에서 나타난 우리나라 20-30대 남성의 평균적 신장과 체중을 대표할 수 있는 20대 남성을 선정하였다. 피험자는 실험이 진행될 때 여름을 가정하여 단열성능 값(총 단열성능 값  $0.453\text{clo}$ )을 알고 있는 속옷, 양말, 면바지, 반팔티셔츠를 착용하였다.

대시보드에는 총 4개의 취출구가 있었으며 1단에서 7단까지 팬 스피드의 조절이 가능하였다. Table 2는 팬 스피드에 따른 각 취출구에서의 급기 풍속을 나타낸다. 급기 풍속 측정 시 모든 취출구의 방향은 정면을 향하도록 하였다. 취출구에서의 위치에 따라 동일한 팬 스피드에서도 급기의 풍속에 차이가 있었으며 중앙보다 팬의 위치와 가까운 오른쪽 취출구에서 풍속이 높게 나타났다. 실험은 취출 공기의 풍속이 차이가 현격한 2단과 7단의 두가지 팬 스피드 조건에서 진행하였다.

**Table 1.** Experimental condition of the chamber and the subject

Chamber	Temp., $T_a$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Rel. hum. $\text{RH}_a$ [%]	Rad. Temp., $T_{\text{rad}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
		$23 \pm 0.5$	$50 \pm 10.0$
Subject	Height [m]	Weight [kg]	Clo* [-]
	174.1	73.5	0.453

\* Measured from each segment of sleeve shirt and cotton pants with underwear and socks,  $0.07$  [ $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ]

**Table 2.** Airflow rate at the diffusers according to fan speeds





Location	Airflow [ $\text{m}/\text{s}$ ]						
	1	2	3	4	5	6	7
Left	1.1	1.5	1.8	2.1	2.8	3.0	3.4
Center Left	1.1	1.6	1.9	2.6	2.6	3.2	3.4
Center Right	1.1	1.1	1.9	2.5	2.8	3.3	3.5
Right	1.2	1.2	2.1	2.8	3.1	3.7	3.9

### 측정항목 및 방법

Table 3은 측정항목 및 측정기기의 개요를 나타낸다. 대시보드 팬 가동 후의 피험자 신체 부위별 기류속도는 열선풍속계(Thermal anemometer, FV A645, Ahlborn)를 사용하여 측정하였다. 피험자가 착용하는 의복에는 Figure 2에서 보는 것과 같이 후크를 설치하여 신체 부위별 기류속도의 측정위치를 고정하였다. 피부가 노출되는 양팔 부위에서의 측정위치를 고정하기 위하여 기류속도 측정 시에는 반팔티셔츠 아래에 긴팔 내의를 착용하였다. 기류속도는 대시보드 취출구에서 기류가 안정된 후 5분간 측정값의 평균을 사용하였으며 국소 신체 부위별로 각각 3회씩 측정을 반복하였다. 측정부위는 ISO 14505에서 제시하는 신체 부위 중에서 차량의자와 맞닿는 등(Back)을 제외한 15부위로 하였으며 팔의 경우 기존 인체모델(Fiala, 1998; Tanabe et al., 2002)에 따라 상박(Upper arm)과 하박(Forearm)을 어깨(Shoulder)와 팔(Arm)로 구분하여 표기하였다.

피험자 신체 부위별 대류 열전달량 측정에는 열류속계(Heat flux sensor, FHF02 or HFP01, Hukseflux)를 사용하였다. FHF02센서의 경우 구부림이 가능한 소재로 되어있어 의복에 직접 부착하였으며 손 또는 팔과 같이 피부에 직접 부착하는 경우에는 판형의 HFP01 센서를 테이프를 이용하여 피부에 밀착하였다. 열전달량의 측정위치는 기류속도를 측정한 위치와 동일하게 하였으며 의복 또는 피부와 열류속계 사이에는 온도센서(Thermometer, TSK7+1, Technox)와 함께 써멀그리스(Thermal grease)를 도포하여 센서와 의복 또는 피부를 밀착하였다. 실험에서는 피험자가 대시보드 앞에 착석한 후 10분을 기다려 열류속량이 안정된 후에 2단 과 7단의 팬 스피드로 각각 20분씩 연속 운전하였다. 기류속도 측정과 동일하게 각 신체 부위별로 각각 3회씩 측정을 반복하였다.

**Table 3.** Experimental materials and methods

Parameters		Materials	
Chamber	Air Temp., $T_a$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] Rel. humi., $\text{RH}_a$ [%] Rad. Temp. $T_{\text{rad}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	TESTO 400 (Testo)	
	Air velocity, $V_a$ [m/s]	Thermal anemometer FV A645 (Ahlborn)	
Subject	Surf. Temperature, $T_{\text{suf}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Thermometer TSK7+1 (Technox)	
	Heat Flux, $Q_{\text{suf}}$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	Heat flux sensor FHF02 and HFP01 (Hukseflux)	

열류속계 센서에 의하여 측정된 현열 전달량은 아래의 식 (1)과 같이 대류와 복사에 의한 열전달량(Heat flux)을 포함하고 있다. 식 (1)에 나타난  $h_c$ 와  $h_r$ 은 각각 대류열전달 계수

(convective heat transfer coefficient,  $W/m^2$  per K)와 복사열전달계수(linear radiative heat transfer coefficient,  $W/m^2$  per K)을,  $T_{up}$ 와  $T_{dw}$ 은 열류속계 센서 상하의 온도를,  $T_a$ 와  $T_r$ 는 챔버 내 건구온도와 복사온도를 나타내며,  $A_{sen}$ 은 센서의 표면면적( $m^2$ )을 의미한다.

$$Q_{sen} = Q_{conv} + Q_{Rad} = A_{sen}h_c(T_{up} - T_{dw}) + A_{sen}h_r(T_{up} - T_r) \quad (1)$$

앞서 실험시설 및 조건에서 기술한 것과 같이 챔버 내에 조명기구를 제외하고는 특별한 복사열원이 없고 건구온도와 상대습도가 목표 조건에 도달하고 정상상태를 유지하고 있는 것을 확인한 후에 실험을 진행하였으므로 건구온도,  $T_a$ ,와 챔버 내 벽체의 표면온도가 같다고 가정할 수 있다. 여기에 열류속계 센서의 바깥 표면온도,  $T_{up}$ ,와 건구온도,  $T_a$ ,가 같으므로 센서와 챔버 사이에서 일어나는 복사 열전달량,  $Q_{rad}$ ,을 무시할 수 있어 실험에서는 열류속계에 의하여 측정된 값을 대류 열전달량으로 가정하였다.

## 실험결과 및 토의

### 기류속도

Figure 3은 팬 스피드 운전 조건에 따른 피험자 신체 15부위별 기류속도 분포를 나타낸다. 평균 기류속도는 2단에서 0.6~0.1m/s, 7단에서는 2단보다 약 3배 높은 1.5~0.1m/s의 분포를 나타냈으며 동일한 팬 스피드의 운전 조건에서도 피험자의 신체부위에 따라 기류속도에 큰 차이가 있는 것으로 조사되었다. 대시보드의 취출공기가 직접 맞는 어깨(Shoulder), 팔(Arm), 가슴(Chest)에서는 기류속도가 높게, 취출기류의 영향이 비교적 작은 발(Foot)과 다리(Leg)에서는 기류속도가 낮게 나타났으며 대시보드 중앙 부위보다는 왼쪽 부위에서 기류속도가 높은 것으로 조사되었다.

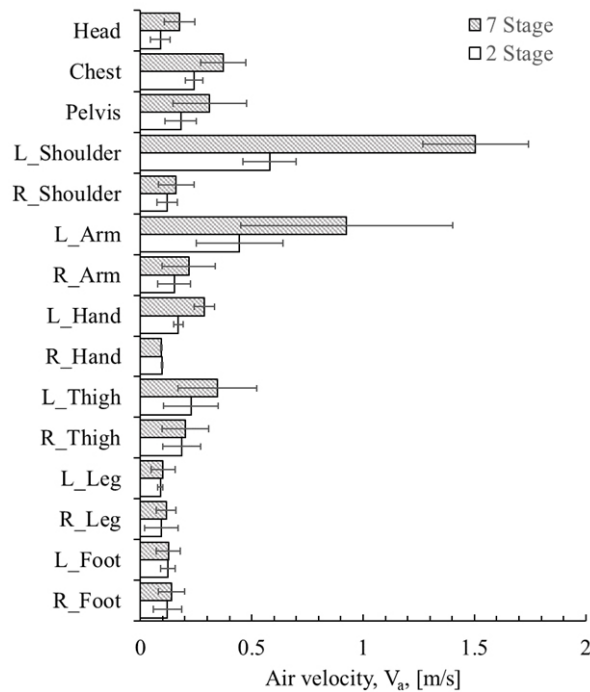
또한 머리(Head)에서 허벅지(Thigh)까지는 2단과 7단의 팬 스피드에 따라 기류속도에 차이를 나타내었으나 다리(Leg)와 발(Foot)에서는 기류속도의 차이가 없는 것으로 조사되었다. 이와 같이 피험자의 다리와 발에서 기류속도가 작은 것은 공조가 된 공기가 대시보드의 취출구만을 통하여 피험자에게 급기되기 때문이며 차량하부와 대시보드에서 동시에 급기하는 난방의 경우에는 Figure 3과는 다른 기류속도 분포를 나타낼 수 있다. 또한 취출공기 온도와 복사 열전달량의 영향을 배제하기 위하여 인공기후 챔버에서 실험을 실시하였기 때문에 챔버 내의 기류속도와 분포는 실제 차량 내의 밀폐조건과는 차이가 있을 수 있으며 이는 국소 신체부위별 대류 열전달량에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

### 대류 열전달량

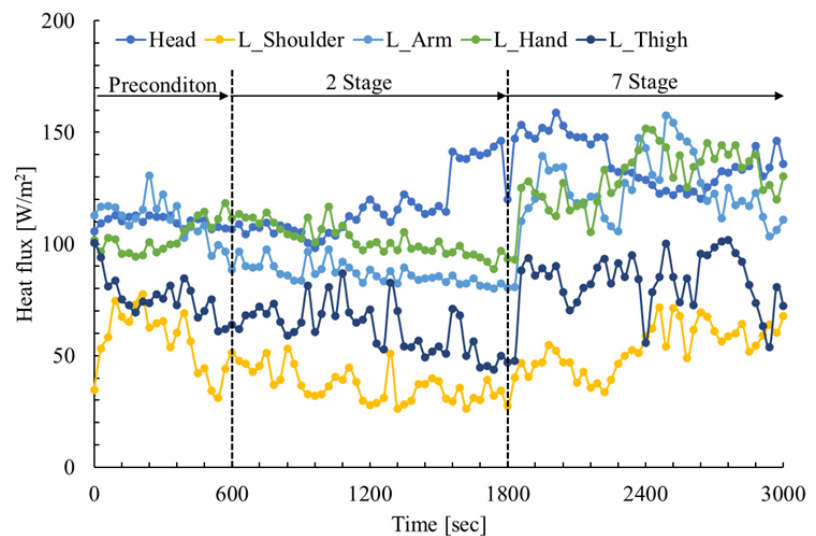
Figure 4는 실험 중 피험자 신체 부위에 설치된 열류속계 센서에서의 열전달량을 나타낸다. 앞서 실험조건에서 언급한 것과 같이 대시보드 팬 가동 전 10분 동안의 안정화 이후 대시보드 팬을 2단으로 운전하자 각 신체부위별로 열전달량에 차이가 나기 시작하였으며 20분의



가동 후 7단으로 팬 스피드를 높이자 모든 부위에서의 열전달량이 크게 증가하였다. 각각의 팬 스피드에서의 열전달량은 운전 10분 이후부터 20분까지의 값을 사용하였다.



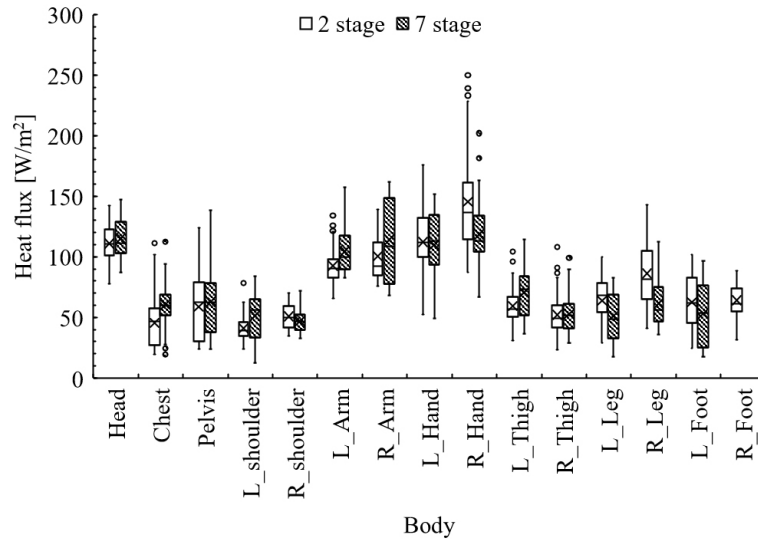
**Figure 3.** Air velocity at the 15 body parts of the subject when the HVAC fan was operated at 2 and 7 stages (Bars and lines mean the averages and the standard deviations of fourth measurements, respectively)



**Figure 4.** Transient heat flux by HVAC fan operation at the body parts of the subject

피험자의 신체 15부위에서 측정된 대류 열전달량,  $Q_{conv}$ ,을 Figure 5에 정리하여 나타낸다. 피부가 직접 취출공기에 맞닿는 손과 팔 등에서 열전달량이 높은 것으로 나타났으며 의복을

착의한 부위에서는 노출부위보다 열전달량이 낮은 것으로 조사되었다. 신체 부위별로 살펴 보면 손(Hand), 머리(Head), 팔(Arm), 다리(Leg), 발(Foot), 어깨(shoulder), 허벅지(Thigh), 배(Pelvis), 가슴(Chest) 순으로 열전달량이 작아졌다. 팬 스피드가 높아짐에 따라 각 신체부위에서 열전달량이 증가하였으며 2단 스피드에서는 145.6~ 41.0W/m<sup>2</sup>의 분포를, 7단 스피드에서는 118.7~ 51.7W/m<sup>2</sup>의 분포를 나타냈다.



**Figure 5.** Heat flux changes between two fan operation conditions (No data for Right Foot at 7 stage)

### 대류 열전달계수

Fanger(1970)의 PMV 모델에서는 주변과 사람의 체온에 5°C차가 있는 일반적 실내환경에서의 대류열전달계수를 아래의 식 (2)와 같이 제시하였으며, 강제 대류의 경우에는 기류속도와 대류열전달계수의 지수관계를 이용하여 식 (3)~식 (5)를 이용하여 계산한다. 식에 나타나는  $B$ ,  $n$ , 그리고  $a$ 는 실험을 통하여 추정된 값을 사용한다.

$$h_{conv} = 12.1 \cdot v^{0.5} \quad (2)$$

$$h_{conv} = B \cdot v^n \quad (\text{de Dear et al., 1997; Ichihara et al., 1997; Oguro et al., 2002}) \quad (3)$$

$$h_{conv} = B \cdot v^n + a \quad (\text{Mochida et al., 1999}) \quad (4)$$

$$h_{conv} = \sqrt{a_{frc} \cdot v + a_{mix}} \quad (\text{Fiala, 1998}) \quad (5)$$

Figure 5와 식 (1)을 통하여 계산된 대류열전달계수를 기존의 연구에서 도출된 모델과 비교하여 Figure 6에 나타낸다. 발열 마네킹을 이용한 기존 연구에도 같은 착의 또는 누드 조건이라도 대류열전달계수에 차이가 있는 것으로 조사되었다. 기존 연구와 실험의 결과를 비교하여 보면 신체 부위별로 차이는 있으나 피험자의 경우가 발열 마네킹보다 다소 높은 대류열전달 값을 나타내는 것으로 조사되었다. 또한 신체부위별로 대류열전달계수를 살펴보면 손,



발과 머리 등 같이 취출공기에 노출된 부위에서는 기존의 누드 조건과 유사한 경향을 나타내고 있으나 가슴, 배, 허벅지와 어깨의 경우에는 다소 차이가 있는 것으로 조사되었다. 이러한 차이는 대시보드에서의 취출되는 급기의 방향과 함께 피험자의 착의 상태로 인하여 발생한 것으로 추정된다(Xu et al., 2021). 착의 상태는 착의 면적비(clothing area factor,  $f_{cl}$ )와 함께 옷과 피부 사이의 공기층의 두께를 말하며 이러한 조건은 실제 착의 조건과 마네킨에서는 차이가 있을 수 있을 것으로 판단된다. 또한 대시보드에 위치한 취출구의 방향은 국소 신체 부위별 대류 열전달량과 함께 온열쾌적감을 좌우하는 중요한 요소이며 실제 차량의 경우 개인의 선호에 따라 각 취출구의 방향을 자유롭게 조절할 수 있다. 따라서 실험을 통하여 얻은 대류열전달계수 예측 모델은 취출구의 방향을 정면으로 고정한 경우에 한하며 취출구의 방향이 조절되는 경우와 관련해서는 추가적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 4는 피험자에서 측정한 값과 식 (3)을 이용하여 최소자승법(Least Square Method)으로 추정된 각 신체부위에 있어 대류열전달계수의 예측식을 나타낸다. 최소자승법에서는 Figure 4에 나타낸 것과 같이 2단과 7단의 팬 운전 조건에서 각각 3회씩 반복 측정된 값 중 10분에서 20분사이의 값의 평균을 구하고 예측식의 오차 합을 최소화하도록 파라미터를 결정하였다. 대류열전달계수 예측모델은 차량에서의 대류 공조 시 신체 부위별 대류열전달량을 계산할 때 사용할 수 있을 것으로 판단되며 기존 인체모델 및 생리모델(Yun et al., 2021)에 적용할 경우 차량의 HVAC시스템 설계 및 평가에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

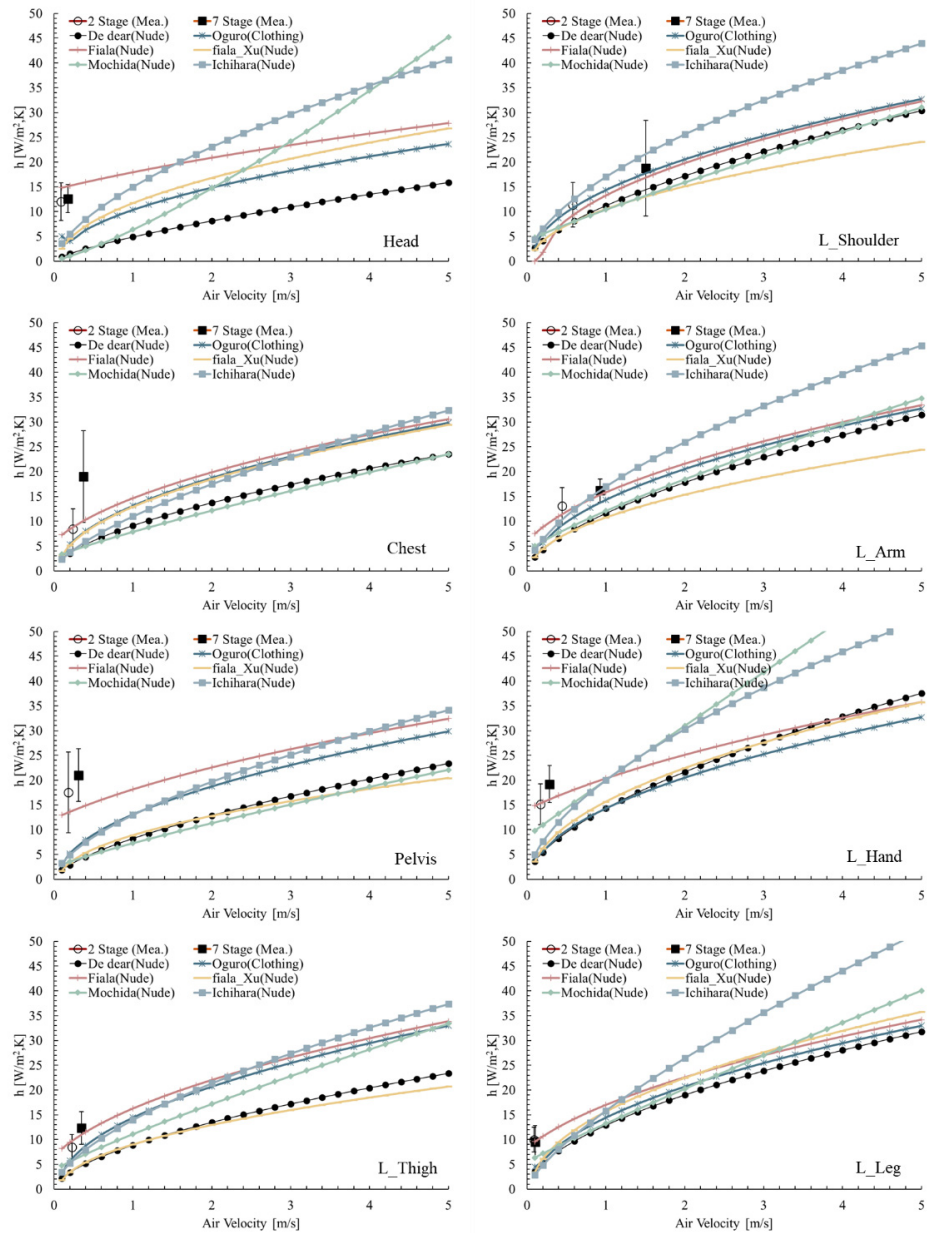
**Table 4.** Models of convective heat transfer for the seating subject with HVAC fans

Body segment	$B$	$n$
Head	17.8	0.20
Chest	35.1	0.75
Pelvis	55.0	0.79
L_Shoulder	14.8	0.49
R_Shoulder	12.5	0.16
L_Arm	16.4	0.21
R_Arm	24.1	0.33
L_Hand	34.2	0.49
R_Hand	25.5	0.17
L_Thigh	16.6	0.38
R_Thigh	10.7	0.18
L_Leg	14.5	0.17
R_Leg	22.1	0.17
L_Foot	18.5	0.35

## 결론

연구에서는 차량에서의 온열환경 평가 및 인체와 실내 환경과의 열전달모델 개발을 위하여 차량 대류공조를 모사한 챔버 내에서 대시보드 팬 운전조건에 따른 피험자 신체 부위별 기

류속도 및 대류 열전달량을 측정하였다. 평균 기류속도는 팬 스피드 2단에서 0.6~0.1m/s 그리고 7단에서는 1.5~0.1m/s의 분포를 나타냈으며 동일한 팬 스피드 조건에서도 신체 부위에 따라 기류속도에 큰 차이가 나타났다. 대류 열전달량에 있어서도 신체 부위별로 큰 차이를 나타냈으며 손, 머리 팔, 다리, 발, 어깨, 허벅지, 배, 가슴순으로 열전달량이 작아졌다. 실험결과를 이용하여 차량 대류공조 시 각 신체부위에 있어 대류열전달계수의 예측식을 제안하였으며 실험에서 도출된 결과는 차량에서의 온열환경 평가 및 HVAC 시스템 개발에 기여할 것으로 기대된다. 다만 논문에서 제시된 예측식은 취출구의 방향과 온도가 고정된 조건의 챔버 내에서 측정된 결과임으로 향후 실제 차량 내에서의 검증이 필요할 것으로 판단된다.



**Figure 6.** Convective heat transfer coefficient,  $h$ , of the body parts with nude or clothing

## 후기

실험에 많은 도움을 준 한양대학교 건축공학부 박상준, 송유림, 이재훈, 박유현 학부연구생들에게 감사를 표하며 이 논문은 산업통산자원부의 시장자립형 3세대 XEV 산업육성 사업의 일환으로 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(20011377)에 의하여 이루어졌습니다.

## References

1. Alahmer, A., Mayyas, A., Mayyas, A.A., Omar, M.A., Shan, D. (2011). Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review. *Applied Thermal Engineering*, 31(6-7), 995-1002.
2. Balaras, C.B., Drousa, K., Dascalaki, E., Kontoyiannidis, S. (2005). Heating energy consumption and resulting environmental impact of European apartment buildings. *Energy and Buildings*, 37(5), 429-442.
3. Croitoru, C., Nastatase, I., Bode, F., Meslem, A., Dogeanu, A. (2015). Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles—Current capabilities and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 304-318.
4. de Dear, R.J., Arens, E., Hui, Z., Oguro, M. (1997). Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. *Int. J. Biometeorol*, 40, 141-156.
5. Fanger, P.O. (1967). Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation. *ASHRAE Trans.*, 73, 1-20.
6. Hensen, J.L.M. (1990). Literature Review on Thermal Comfort in Transient Conditions. *Building and Environment*, 25(4), 309-316.
7. Hoof, J. Van. (2008). Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all?. *Indoor Air*, 18(3), 182-201.
8. Hu, S., Ma, H., He, M., Wang, F., Zhao, Y., Li, Y. (2023). Overall thermal sensation and comfort prediction with different model combinations: Cold and hot step-change environments in winter. *Journal of Thermal Biology*, 113, 103458.
9. Ichihara, M., Saitou, M., Nishimura, M., Tanabe, S. (1997). Measurement of Convective and Radiative heat transfer coefficients of standing and sitting human body. *J. Archit. Plann. Environ. Eng. AIJ*, 62(501), 45-51.
10. Lopes, L., Hokoi, S., Miura, H., Shuhei, K. (2005). Energy efficiency and energy savings in Japanese residential buildings – research methodology and surveyed results. *Energy and Buildings*, 37(7), 698-706.
11. Mochida, T., Nagano, K., Shimakura, K., Kuwabara, K., Nakatani, T., Matunaga, K. (1999). Characteristics of Convective Heat Transfer of Thermal Manikin Exposed in Airflow from Front. *J. Human and Living Environment*, 6, 98-103.
12. Oguro, M., Arens, E., de Dear, R.J. (2002). Convective and radiative heat transfer coefficients and clothing insulations for parts of the clothed human body under airflow conditions. *J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ*, 67(561), 21-29.

13. Park, J.S., Lee, S.J., Kim, K.H., Kwon, K.W., Jeong, J.W. (2016). Estimating thermal performance and energy saving potential of residential buildings using utility bills. *Energy and Buildings*, 110, 23-30.
14. Stolwijk, J.A.J., Hardy, J.D. (1966). Temperature regulation in man: A theoretical study. *Pflugers Archiv*, 291, 129-162.
15. Tanabe, S., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., Konishi, M. (2002). Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34(6), 637-646.
16. Wang, X.L. (1990). Convective heat losses from segments of the human body. *Climate and Buildings*, 3, 8-14.
17. Xu, J., Psikuta, A., Li, J., Annaheim, S., Rossi, R.M. (2021). Evaluation of the convective heat transfer coefficient of human body and its effect on the human thermoregulation predictions. *Building and Environment*, 196, 107778.
18. Yoon, D.W., Kang, H.-S., Kang, B.-W. (2003). Development and Evaluation of a PMV Sensor for the Control of Indoor Thermal Environment. *KJACR*, 15(10), 870-879.
19. Yun, S.Y., Chun, C.Y., Kwak, J.Y., Park, J.S., Kwon, C.K., Kim, S.H., Seo, S.W. (2021). Prediction of thermal comfort of female passengers in a vehicle based on an outdoor experiment. *Energy and Buildings*, 248, 111161.
20. Stolwijk, J.A.J. (1971). A mathematical model of physiological temperature regulation in man. NASA contractor report, NASA CR-1855, Washington DC.
21. Fanger, P.O. (1970). *Thermal comfort*. Danish Technical Press. Copenhagen.
22. Fiala, D. (1998). *Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort*. Thesis (Ph.D.), De Montfort University, England.
23. ASHRAE (2020). *ANSI/ ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy*.