

온도센서가 장착된 안면 마스크를 착용한 지하철 승객의 개인 온열감 예측

윤성은^{1*}, 압둘모히진², 김종경^{2*}
국민대학교 일반대학원 기계공학과^{1*}
국민대학교 기계공학부²

Prediction of Personal Thermal Sensation of Subway Passenger Wearing a Facial Mask with Temperature Sensors

Seong Eun Yoon^{1*}, Abdul Mohizin², Jung Kyung Kim^{2*}
Mechanical Engineering, Graduate School, Kookmin University, Korea^{1*}
School of Mechanical Engineering, Kookmin University Korea²
*jkkim@kookmin.ac.kr

Abstract

In the present study, an individual thermal-sensation prediction model in a subway environment was developed from the data from temperature sensors in a face mask. Existing thermal sensation models are unable to predict the thermal sensation vote well. This was because these studies were population-based models and may not satisfy individual thermal comfort preferences. Development of individual thermal comfort models are the key for the development and control of personalized microclimate environments. The present study utilized a face mask, which is an essential entity in the present time due to the COVID-19 pandemic. The face mask was equipped with sensors to measure the skin temperature, and the exhaled breath temperature profiles, which could be considered as sufficient indicator of personal thermal sensation. Skin temperature is an important indicator of the body temperature control mechanism. The exhaled breath temperature can provide key information such as core body temperature and breath rate, which in turn can be an indicator for energy expenditure rate. Physiological and psychological data from participants were collected during the study. Correlations between the thermal sensation votes and acquired signals were evaluated and presented in this study. From the analysis, it was found that skin temperature fluctuations were more sensitive to the thermal perception than the exhaled breath data. This study presents a noninvasive and convenient method for finding individual thermal perception and can be applied to air-conditioning systems in vehicles and indoor environments. The scope of the study can be expanded by using more sensors to measure, monitor and record other physiological and environmental data.

1. 연구 배경

기존의 공조냉난방(HVAC) 시스템은 각 개인의 주변 조건에 대한 주관적인 해석이 어렵고 중앙 집중식 HVAC 시스템이 일부 지역 수준에서 온도를 제어할 수 없기 때문에 한 공간의 모든 재실자를 만족시키기 어렵다[1]. 따라서 개인화된 온열감 모델이 개발될 경우 개별적인 온열감 만족도를 향상시킬 수 있는 냉난방 제어에 활용할 수 있다.

개인 및 환경 데이터 수집을 위한 전자 센서의 급속한 성장과 함께, 많은 연구자들이 실내 공기 온도, 상대 공기 습도 또는 평균 복사 온도[2]와 같은 다양한 측정 기준에 기초한 열쾌적성 모델을 개발했다. 열쾌적성은 신체 심부 온도와 직접적인 상관관계가 있으며 근적외선 영상 기법을 사용하여 비침습적으로 측정할 수 있다[3].

다양한 신체 부위의 피부온도와 심박수를 기록하기 위한 환경 및 웨어러블 센서는 현재 열쾌적성 모델링 및 열영상으로 구현되고 있다. 본 연구진의 선행연구에서는 COVID-19 대유행으로 인해 필수적으로 착용하는 안면 마스크에 부착한 생체신호 측정 센서들로부터 얻은 데이터를 분석하고 기계학습을 통해 77%의 정확도로 개인 온열감을 예측할 수 있었다[4].

본 연구에서는 피부온도와 날숨온도 측정 센서가 부착된 안면 마스크와 자체 개발한 모바일 애플리케이션을 활용하여 지하철 탑승객의 데이터를 수집하였고 개인 온열감 예측을 위해 분석을 실시하였다.

2. 연구 방법

본 실험에는 건강한 신체를 가진 20명의 성인 남성들이 참여하였다. 11명의 한국인 참가자와 9명의 외국인 참가자들로 구성되었다. 그리고 2021년 8월 23~27일에 대한민국 서울 지하철 4호선 길음-사당역 노선에서 왕복 구간으로 수행되었다. 실험 당일 평균 실외 온도는 평균 23.74°C였고 평균 3.96mm의 강수량을 기록하였다. 실험은 참가자마다 3일에 걸쳐 1일 1회씩 총 3회 반복되었다. 안면 마스크 장치에는 비침습적 적외선 온도센서(MLX90614)가

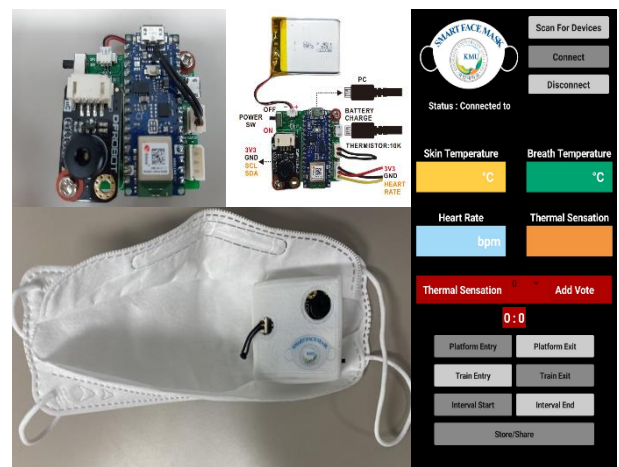


그림 1. 온도센서가 장착된 안면 마스크 사진 및 데이터 수집용 스마트폰 애플리케이션 인터페이스

마스크 내 참가자의 뺨에 위치하여 피부온도(ST)를 측정하고, 서미스터(NXFT15XH103FA2B130)는 마스크 내 참가자의 코쪽에 위치하여 호기온도(EBT)를 측정했다. 센서들은 Arduino Nano BLE에 의해 제어되었다. 그리고 참가자들은 플랫폼이나 열차 내부로 위치를 이동하면 이를 실시간으로 나타내고 5분마다 개인 온열감을 투표하였다. 이때 피부온도와 호기온도를 실시간으로 모니터링하며 위치 이동 및 개인 온열감을 투표(TSV; Thermal Sensation Vote)하고 나타내기 위해 Google에서 제공하고 MIT에서 관리하는 MIT App Inventor를 통해 Google Blockly(Fraser, 2013) 기반의 프로그래밍언어로 어플리케이션을 개발 및 활용하였다. TSV는 ASHREA 규정에 따라 5분마다 7점 단위로 투표하는 방식으로 온열감 선호도를 수집했다. 온도 데이터, TSV, 위치 이동 기록은 CSV 파일로 함께 저장되도록 설정하였으며, 이는 Android의 어플리케이션과 장치의 Arduino Nano 33 BLE 사이의 블루투스 통신으로 연결되었다.

모든 데이터들은 1초마다 기록되었다. ST 데이터의 노이즈를 줄이기 위해 Matlab에서 51개의 데이터를 2차 함수 형태로 변환하는 Curve Fitting 처리를 하였다. EBT 데이터는 전체 그래프 중 peak 값만 추출하여 노이즈를 줄였고, 60초 동안의 EBT 데이터 그래프의 peak 개수를 세어 1분 동안 호흡 횟수(RR: Respiratory Rate)를 추측할 수 있었다. 노이즈를 줄인 ST와 EBT 데이터는 60초 데이터의 평균을 구하여 데이터 수집 간격을 1초에서 1분으로 조정하였고 RR도 이에 맞춰 데이터를 정렬했다. 5분마다 기록된 TSV는 보간법을 통해 다른 데이터들과 같이 1분으로 데이터 수집간격을 맞췄다.

3. 연구 결과

이번 실험에서는 각 참가자마다 플랫폼에 위치하고 있는 시간이 최소 30초 내외에서 길게는 5분 내외로 큰 차이를 보여 플랫폼에 위치했을 때의 데이터는 제외하고 열차 내부에 위치하고 있을 때의 데이터만 가지고 분석했다.

데이터 간의 동일한 비교 분석을 위해 정규화를 실시했다. 이때 실험 참가자들은 편안함을 느끼면 TSV를 0으로 투표했으므로 0으로 투표하였을 때의 ST, EBT, RR 값들 또한 0에 맞추기 위해 아래의 식을 적용하여 정규화를 실시했다.

$$\text{Normalization of ST} = \frac{(T_{skin} - T_{skin|TSV=0})}{(T_{skin|max} - T_{skin|min})} \quad (1)$$

T_{skin} : 원본 데이터,

$T_{skin|TSV=0}$: 보간한 TSV가 -0.5~0.5 사이 값일 때 ST의 평균,

$T_{skin|Max}$: 전체 ST 값들 중 최대값,

$T_{skin|Min}$: 전체 ST 값들 중 최소값

이 실험에서 TSV와 달리 객관적으로 측정 및 수집된 ST와 EBT 사이에 피어슨 상관계수가 높은 실험 case들만 추출하여 ST, EBT, RR과 보간한 TSV의 전체 평균값들을 모아 그래프를 그림 2와 같이 나타내어 특징을 살펴보았다.

막대그래프로 나타난 TSV가 0으로부터 떨어진 정도와 꺾은 선 그래프로 표현된 정규화된 ST, EBT, RR 값이 0으로부터 떨어진 정도를 비교하기 위해, 각 데이터 값들의 절대값을 정리하여 이들 간의 피어슨 상관계수를 통해 상관관계를 살펴보았다. ST와 TSV 사이에서 각각 사당행 열차에서는 0.5667, 길음행 열차에서는 0.7673으로 결과가 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 개인 열감각을 의미하는

TSV가 0으로부터 떨어진 불편감의 정도와 ST의 편안함

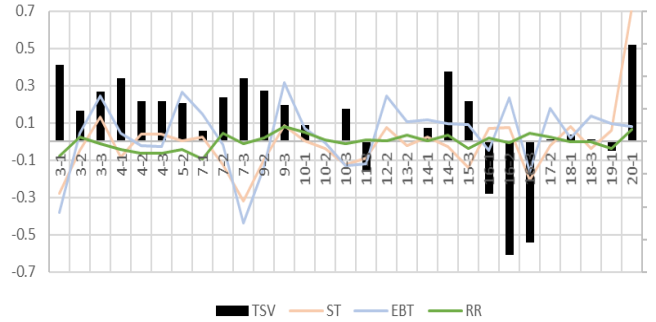


그림 2. ST와 EBT 사이에 피어슨 상관계수가 높은 case를 대상으로 정규화한 데이터 분포

상태로부터 떨어진 불편한 정도 사이에 0.5 이상의 선형적 관계를 가지고 있다는 것을 확인할 수 있다.

이번 실험에서는 객관적 생체 데이터 중 EBT의 peak 값을 가지고 사람의 분당 호흡수를 구하여 데이터 분석에 활용할 수 있었다. 전체 데이터의 RR 평균은 약 14회로, 보통 성인

남성의 1분 숨쉬기 횟수가 14회에서 15회라는 것과 비교하면 적절한 범위로 볼 수 있다. 그리고 주변 환경의 온도 데이터 없이 비침습적 데이터 측정 방식을 통해 생체 데이터와 개인 온열감 사이의 관계를 살펴볼 수 있었고 이는 지하철뿐만 아니라 차량과 같은 다른 온열 환경에서도 적용 가능하다. 향후 주변 온도 및 습도와 같은 환경 데이터와 심박수 등의 다른 생리학적 데이터를 추가적으로 측정하여 개인 온열감 및 열쾌적감 예측의 정확도를 높일 수 있을 것으로 보인다.

4. Acknowledgements

이 논문은 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원(20011377)을 받아 수행된 연구 결과임

5. 참고 문헌

- [1] A. Aryal, and B. Becerik-Gerber. "Energy consequences of Comfort-driven temperature setpoints in office buildings." *Energy Build.*, Vol 177, p. 33–46, 2018
- [2] X. Chen, Q. Wang, and J. Srebric. "A data-driven state-space model of indoor thermal sensation using occupant feedback for low-energy buildings." *Energy Build.*, Vol 91, p. 187–198, 2015
- [3] M. K. Shourav, S. Salsabila, J.-Y. Lee, and J. K. Kim. "Estimation of core body temperature by near-infrared imaging of vein diameter change in the dorsal hand." *Biomed. Opt. Express*, Vol. 12, No. 8, p. 4700–4712, 2021
- [4] M. H. Fakir and J. K. Kim. "Prediction of individual thermal sensation from exhaled breath temperature using a smart face mask." *Build. Environ.*, Vol. 207, No. PB, p. 108507, 2022