

여름철 주행 중인 자동차 탑승객의 생리 신호와 온열쾌적감 간의 관계

The relationship between the physiological signals and thermal comfort of passengers in a car during summer driving

○오 병 국* 엄 소 현* 전 정 윤**
Oh, Byeong-Kuk Eom, So-Hyeon Chun, Chung-Yoon

Abstract

The purpose of this study is to investigate the relationship between physiological signals of passengers in cars during actual driving and their thermal sensation and thermal comfort. Physiological signals including facial skin temperature, wrist skin temperature, and heart rate variability(HRV) were utilized, among which facial skin temperature showed a strong correlation with thermal sensation and thermal comfort. Particularly, the skin temperature of the nose exhibited a significant correlation with passengers' thermal comfort, while HRV showed a very weak association with thermal sensation and thermal comfort.

키워드 : 얼굴피부온, 손목피부온, 심박변이도, 온열감, 쾌적감, 자동차

Keywords : Facial Skin Temperature, Wrist Skin Temperature, HRV(Heart Rate Variability),
TSV(Thermal Sensation Vote), TCV(Thermal Comfort Vote), Car

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

꾸준한 자동차 보급률의 증가와 자율 주행 자동차의 발전으로 인해 현대의 자동차는 운송 수단의 개념을 넘어 이동하는 생활공간으로 변화하고 있다. 이에 따라 탑승객에게 쾌적한 자동차 실내 환경을 제공하는 일은 더욱 중요해지고 있다.

선행된 연구들에 따르면, 자동차 실내 환경은 일반 건물들과 달리 공간이 좁고 공기 토출구가 신체와 매우 가까이 위치하며, 일사의 영향이 건물보다 크다는 특성이 있다. 이러한 특성을 갖는 자동차 실내 공간은 건물 실내 공간과 달리 불균일한 온열 환경을 야기하고, 불균일한 온열 환경은 탑승객의 온열쾌적감에 큰 영향을 미치게 된다(Chien et al., 2008).

기존의 자동차 온열쾌적에 관한 실험은 대부분 인공기후챔버 내에 주차된 자동차를 이용하여 이루어졌다. 하지만 자동차와 같이 폐쇄된 실내 공간에서 일사에 노출되면

탑승객의 온열쾌적감에 영향을 미치기 때문에(Simion et al., 2016) 인공기후챔버에서 수집된 온열쾌적 데이터는 실제 야외에서 주행 중인 자동차의 물리적 환경에서 측정된 데이터와는 차이가 있다는 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 주행 중인 자동차 탑승객의 생리적 신호와 주관적 온열쾌적 응답을 수집하고, 생리적 신호와 주관적 온열쾌적 응답 간의 관계를 분석하였다. 본 연구에서는 얼굴 피부온, 손목 피부온, 그리고 심박 변이도의 생리 신호를 측정하였으며, 온열감과 쾌적감에 대한 응답을 수집하였다.

2. 연구 방법

2.1 실험 개요

본 연구는 여름철 주행 중인 자동차의 탑승객이 겪고 있는 온열 환경과 탑승객의 생리 신호, 그리고 주관적인 온열쾌적감을 파악하기 위해 2023년 7월 27일부터 2023년 9월 12일까지 야외실험을 진행하였다. 본 연구의 피험자는 신체적, 정신적으로 건강한 2~30대 남성으로 한정하였다. 총 30명의 피험자가 3번의 실험에 참여하였으며, 3번의 실험 모두 다른 냉방 운전 조건에 노출되었다.

2.2 실험 조건

본 연구는 냉방 조건에 따라 3가지 조건으로 실험을 구성하였다. 조건 1은 통풍시트를 끄고 약하게 냉방한 조건,

* 연세대 실내건축학과 석사과정

** 연세대 실내건축학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Interior Architecture and Built Environment, Yonsei University, chun@yonsei.ac.kr)

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임. (과제번호: 20011377)

조건 2는 통풍시트를 켜고 약하게 냉방한 조건, 그리고 조건 3은 통풍시트를 켜고 강하게 냉방한 조건으로 설정하였다. 각 조건에 대한 세부 사항은 아래 표1과 같다.

표1. 실험 조건

	인공기후챔버	냉방 조건	
조건 1	26°C, 40%, PMV=-0.2	통풍시트 OFF	23°C Auto
조건 2		통풍시트 ON	23°C Auto
조건 3		통풍시트 ON	18°C Auto

피험자가 착용한 의복량은 0.46 clo였으며, 이때 의복량은 국제표준인 ASHRAE(2013)와 ISO-7730(2005)에 의해 추정하였다.

2.3 실험 절차

피험자가 실험실에 도착하면 실험복으로 환복한 후 인바디 기기를 사용하여 몸무게, 체지방률, 근육량, 내장지방 등 기본적인 신체 계측을 진행한다. 그 후 인공기후챔버에 입실하여 30분간 휴식을 취한다. 이때 손목피부온 및 심박수 측정 장치인 Empatica 4를 착용하고, 얼굴피부온을 측정하기 위한 iButton을 얼굴 5개 부위(이마, 양 볼, 콧등, 턱)에 부착한다. 이후 연구자의 안내에 따라 외부에 주차되어 있는 실험 차량으로 이동하여 조수석에 탑승한다. 탑승 직후를 시작으로 피험자는 운행하는 차량 내에서 60분간 2분 간격으로 주관적 온열쾌적감에 대한 설문에 응답한다. 60분간의 응답이 모두 완료되면 주행이 끝날 때까지 착석한 상태로 대기하다가 차량이 정차하면 하차 후 실험실로 이동한다. 이후 환복과 부착한 장비를 제거하면 실험이 종료된다.

2.4 측정 요소

피험자가 노출된 차량 실내 환경을 분석하기 위해 실내 환경 요소로 차량 내로 입사되는 일사량과 공기 온도, 상대습도를 수집하였다. 일사량은 조수석을 기준으로 대시보드의 좌, 우 각 1개씩 일사 센서(SR05, Hukseflux, Delft, Netherlands)를 통해 측정하였고, 측정된 일사량 데이터는 GL840 Data Logger(GL840, Graphtec Corporation, Yokohama, Japan)에 연결하여 저장하였다. 공기 온도 및 상대습도는 온습도 측정 기기인 TR-72wb(TR-72wb, T&D, New Mexico, United States)를 통해 차량 내 상단, 중단, 하단 3개소에서 측정 및 저장하였다.

피험자의 생리적 지표는 손목 피부온, 심박변이도, 그리고 얼굴 피부온을 측정하였다. 손목 피부온과 심박변이도를 측정하기 위해 Empatica E4 wristband(Empatica Inc., USA)를 사용하였으며, 얼굴 피부온 측정을 위해 iButton(Maxim, USA)을 이용하여 얼굴 5개 부위(이마, 양 볼, 콧등, 턱)에 부착하여 측정하였다.

탑승객이 느끼는 온열쾌적감을 파악하기 위해 피험자로부터 설문조사를 실시하였다. 설문조사의 응답은 온열감(Thermal Sensation Vote, TSV), 쾌적감(Thermal Comfort Vote, TCV), 온열선호도(Thermal Preference), 그리고 온열수용도(Thermal Acceptability)로 구성하였다. 온열감은 -4(매우 춥다)~4(매우 덥다) 9단계의 척도를 사용하였고, 쾌

적감은 -4(매우 불쾌)~-0(불쾌한 쪽에 속함), +0(쾌적한 쪽에 속함)~4(매우 쾌적)으로 이루어진 10단계의 중앙분리형 척도를 사용하였다. 온열선호도는 -1(더 따뜻한 것이 좋다)~1(더 시원한 것이 좋다)의 3단계 척도를 사용하였으며, 온열수용도는 1(수용할 수 있다)과 -1(수용할 수 없다)로 구성된 2단계 척도를 사용하였다. 피험자는 각 항목에 대해 60분간 2분 간격으로 총 31회의 응답을 수행하였다.

3. 연구 결과

3.1 생리 신호 변화

측정된 생리 지표는 얼굴 5개 부위의 피부온과 손목 피부온, 그리고 심박과 심박 변이도로 변환할 수 있는 BVP와 IBI 지표이다.

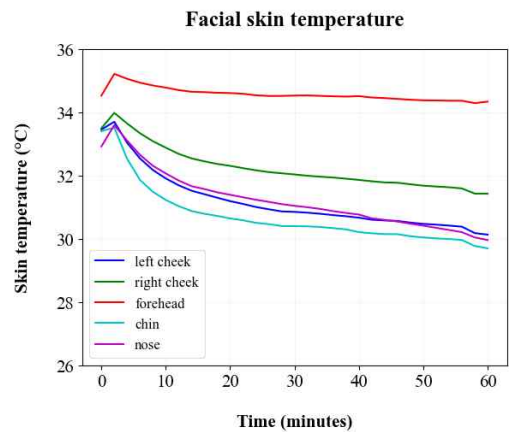


그림1. 얼굴 피부온 변화

얼굴 피부온은 이마, 왼볼, 오른볼, 콧등, 턱에서 측정되었다. 실험 시작 전 일사의 영향으로 차량 내부의 공기 온도가 상승되어 있었기 때문에 차량 탑승 직후 2분간 피험자의 얼굴 피부온이 코에서 최대 0.7°C 상승하였다. 이후 냉방 가동과 함께 피부온이 감소하는 추세를 보였다. 이마의 피부온은 가장 적은 변동을 보였으며, 오른볼을 제외한 왼볼, 콧등, 턱은 각 부위 간 0.3°C 이하의 온도 차이를 보였다. 오른볼은 왼볼과 방향만 다른 국소 부위임에도 전반적으로 왼볼에 비해 약 2°C가량 높은 모습을 보였다. 이는 조수석에 탑승한 피험자의 위치상 오른쪽에 창이 있었기 때문이다.

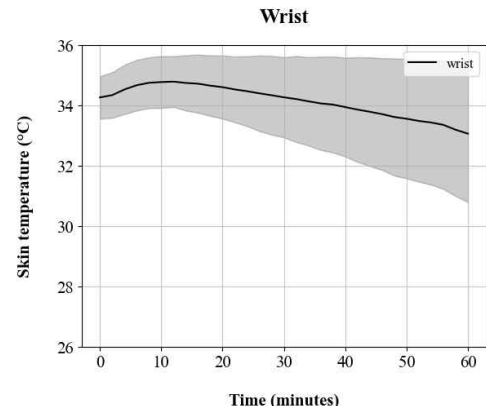


그림2. 손목 피부온 및 표준편차

손목 피부온은 얼굴 피부온과 달리, 냉방 가동 후에도 10분간 서서히 상승세가 지속되다가 하강하였다. 실험 종료 시 손목 피부온은 평균 33.1°C로 나타났다.

심박 변이도 지표는 특정 시간 간격 동안의 심박동의 변화를 정량적 수치로 나타내는 것이며, 본 연구에서는 BVP 데이터를 heartPy 라이브러리를 통해 sdn, sdsd, rmssd, pnn20, pnn50, hr_mad, sd1, sd2, s, sd1/sd2, breathingrate, LF/HF의 지표를 수집하였다. 심박 변이도 지표들은 실험 중 온도 변화와 무관한 변화양상을 보였다.

3.2 생리 신호와 온열쾌적감

3.2.1 국소 피부온과 전신온열감

얼굴 피부온 5개 부위와 손목 피부온까지 총 6개의 변수와 전신 온열감 간의 상관분석과 단일회귀분석을 진행하였다.

표2. 손목 및 얼굴피부온과 전신온열감 간의 상관분석

Local Area	Pearson correlation	p-value
이마	0.465***	<.001
오른볼	0.577***	<.001
왼볼	0.609***	<.001
코등	0.632***	<.001
턱	0.583***	<.001
손목	0.463***	<.001

전신 온열감과 가장 높은 상관관계를 보인 부위는 코등 (corr=0.632, p-value<0.001)이었으며, 손목 피부온은 얼굴 피부온에 비해 낮은 상관관계(corr=0.463, p-value<0.001)를 보였다. 모든 국소 피부온은 전신 온열감과 중간 이상의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

표3. 피부온과 전신온열감 간의 단일회귀분석

Local Area	R-squared	F-value	p-value
이마	0.215	718.517***	<.001
오른볼	0.336	1325.820***	<.001
왼볼	0.369	1533.976***	<.001
코등	0.395	1717.207***	<.001
턱	0.333	1309.550***	<.001
손목	0.207	685.265***	<.001

단일회귀분석 결과는 상관분석 결과와 유사하게 코등 피부온의 결정계수가 0.395로 가장 높았고, 손목 피부온의 결정계수가 0.207로 가장 낮은 것으로 나타났다.

3.2.2 국소 피부온과 전신쾌적감

쾌적감은 온열감에 의해 유발되는 감정으로, 온열감이 너무 높아도, 너무 낮아도 쾌적감은 감소한다. 온열감과 쾌적감의 관계는 특정 온열감에서 가장 높고, 그 이외의 온열감에서는 점차 감소하는 형태를 보이게 된다. 피부온과 온열감은 선형적 관계를 가지며, 이 관계가 양(+)의 관계이기 때문에 피부온과 쾌적감의 관계도 온열감과 쾌적감의 관계와 마찬가지로 그림3과 같이 뒤집힌 2차 곡선의 관계를 보인다.

결론적으로 쾌적감은 피부온과 비선형의 관계를 보이기 때문에 선형적 관계를 나타내는 pearson 상관분석과 단일회귀분석을 하는 것은 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서

는 피부온과 쾌적감 간의 비선형회귀분석인 다항회귀분석을 진행하였고, 이때 사용된 독립 변수는 얼굴 피부온 5개 부위와 손목 피부온까지 총 6개이다.

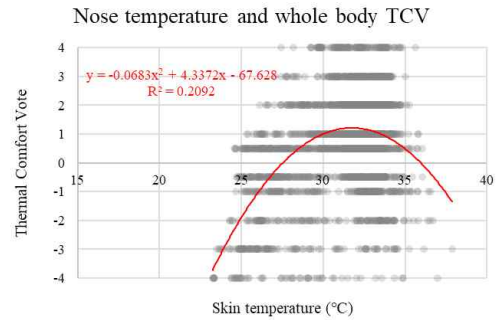


그림3. 피부온과 전신쾌적감 간의 비선형관계

표4. 피부온과 전신온열감 간의 다항회귀분석

부위	R-squared	F-value	p-value
이마	0.109	161.309***	<.001
오른볼	0.141	214.896***	<.001
왼볼	0.186	300.018***	<.001
코등	0.209	347.051***	<.001
턱	0.172	272.232***	<.001
손목	0.092	132.668***	<.001

이차항을 포함하고 있는 다항회귀분석을 실시한 결과, 코등 피부온의 결정계수가 0.209로 온열감에서와 마찬가지로 가장 높았다. 손목 피부온의 결정계수는 0.092로 가장 낮게 나타났다.

3.2.3 심박 변이도와 온열쾌적감

심박 변이도 지표들과 온열감 간의 pearson 상관분석 결과는 아래 표5와 같다.

표5. HRV 지표와 전신온열감 간의 상관분석

HRV indicator	Pearson correlation	p-value
sdnn	-0.257***	<.001
sdsd	-0.145***	<.001
rmssd	-0.240***	<.001
pnn20	-0.298***	<.001
pnn50	-0.292***	<.001
hr_mad	-0.260***	<.001
sd1	-0.223***	<.001
sd2	-0.159***	<.001
s	-0.199***	<.001
breathing rate	-0.025	0.239
LF/HF	0.035	0.097

호흡률과 LF/HF는 전신 온열감과 유의하지 않았으며, 이외의 변수들은 최소 -0.145에서 최대 -0.298로 전신 온열감과 약한 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

전신 온열감과 관계가 유의하지 않았던 호흡률과 LF/HF 지표를 제외한 나머지 9개 변수를 이용하여 단계적 회귀분석을 실시하였으며, 결과는 표6과 같다.

표6. 심박변이도 지표와 전신온열감 간의 단계적회귀분석

변수	B	SE	t	VIF
(constant)	1.104	0.156	7.083	
pnn20	-2.034	0.247	-8.221***	1.859
hr_mad	-0.003	0.001	-3.910***	1.859

$F = 117.642 (p < 0.001), R^2 = 0.095, AdjR^2 = 0.094, D-W = 1.430$

단계적 회귀분석 결과, 연속된 RR 간격의 차이가 20ms 이상인 시간의 비율을 나타내는 지표인 pnn20과 전체 RR 간격 중앙값에 대한 절대 편차를 나타내는 지표인 hr_mad를 선택했을 때 가장 결정계수가 높은 것으로 나타났다. 하지만 이때의 결정계수는 0.094로 10%에 미치지 못하는 것을 확인할 수 있었으며 이는 심박 변이도가 전신 온열감을 예측하는 지표로 적합하지 않다고 이해할 수 있다.

심박 변이도와 전신 쾌적감 간의 관계를 살펴보기 위해 pearson 상관분석을 실시하였다.

표7. HRV 지표와 전신 쾌적감 간의 상관분석

HRV indicator	Pearson correlation	p-value
sdmn	0.028	0.182
sdsd	0.014	0.516
rmssd	0.016	0.447
pnn20	0.023	0.268
pnn50	0.02	0.334
hr_mad	0.001	0.969
sd1	0.017	0.423
sd2	0.039	0.065
s	0.024	0.247
breathing rate	0.048*	0.023
LF/HF	-0.003	0.876

심박 변이도 지표와 쾌적감 간의 상관분석 결과는 0.05 이하의 매우 낮은 상관관계를 보였으며, 호흡률을 제외한 모든 지표는 유의하지 않은 것으로 나타났다($p > 0.05$).

4. 결론 및 논의

본 연구에서는 주행 중인 자동차 탑승객의 생리 신호와 온열쾌적감 간의 관계에 대해 알아보았다.

자동차 탑승객의 얼굴 피부온, 손목 피부온, 그리고 심박 변이도와 온열쾌적감 간의 관계를 분석한 결과, 얼굴 피부온-온열감, 얼굴 피부온-쾌적감, 손목 피부온-온열감, 손목 피부온-쾌적감 간에는 양(+)의 상관관계가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히 콧등의 피부온과 탑승객의 온열쾌적감 간의 큰 상관관계를 확인할 수 있었다. Wu and Cao(2022)의 연구에 따르면, 얼굴 피부온 변화는 공기 온도 변화와 일치하는 추세를 보였다. 특히 코에서 이러한 경향이 두드러지게 나타나며 이러한 경향은 코가 다른 부위에 비해 공기 온도 변화에 민감하게 반응하기 때문일 수 있다고 언급하였다. 또한, Kilic and Akyol(2012)은 차량 내에서 냉방을 가동하는 동안 수직 온도의 차이가 작았음에도 불구하고 일사량과 뜨거운 표면과의 접촉 등의 이유로 신체 국소 부위에서 온열쾌적감에 차이가 나타났다고 보고하였다. 본 연구에서 콧등의 피부온이 탑승객의 온열쾌적감과 가장 큰 상관관계를 보인 것은 차량의 실내 환

경 특성상 일사량이 가장 먼저 닿아 온도 변화에 민감하게 반응했기 때문일 수도 있다.

Zhu et al.(2018)의 연구에서는 춥다고 느끼거나 덥다고 느낄 때 LF/HF가 높게 나타났으며, 온열감이 -1에서 1 사이일 때 LF/HF가 대략 1로 나타났다. 하지만 본 연구에서 심박 변이도의 경우 온열감 및 쾌적감 간의 연관이 매우 작은 것으로 나타났다. 이는 주행하는 차량의 특성상 물리적 실내 환경 요소 이외의 요소들이 심박 변이도에 복합적으로 영향을 미쳤기 때문으로 생각된다. 따라서 실험실에서 얻어지는 결과와 실제 주행 중인 차량 내에서 얻어지는 결과는 다를 수 있으며, 미래의 차량개발에 기술 적용 시 이러한 점들을 고려하여야 할 것이다.

참고문헌

1. Chien, C. H., Jang, J. Y., Chen, Y. H., & Wu, S. C. (2008). 3-D numerical and experimental analysis for airflow within a passenger compartment. *International Journal of Automotive Technology*, 9, 437-445.
2. Kilic, M., & Akyol, S. M. (2012). Experimental investigation of thermal comfort and air quality in an automobile cabin during the cooling period. *Heat and Mass Transfer*, 48, 1375-1384.
3. Simion, M., Socaciu, L., & Unguresan, P. (2016). Factors which influence the thermal comfort inside of vehicles. *Energy Procedia*, 85, 472-480.
4. Wu, Y., & Cao, B. (2022). Recognition and prediction of individual thermal comfort requirement based on local skin temperature. *Journal of Building Engineering*, 49, 104025.
5. Zhu, H., Wang, H., Liu, Z., Li, D., Kou, G., & Li, C. (2018). Experimental study on the human thermal comfort based on the heart rate variability (HRV) analysis under different environments. *Science of the total environment*, 616, 1124-1133.