

<응용 논문>

차량 내 PMV 분포의 빈도 기반 분석을 통한 공조 모드 기준 생성 연구

이찬희¹⁾ · 이성진²⁾ · 박성근^{*3)}

순천향대학교 모빌리티융합보안학과¹⁾ · 순천향대학교 스마트자동차학과²⁾ · 한국공학대학교 기계설계공학부³⁾

Frequency-Based HVAC Mode Classification Using PMV Distribution in Vehicle Cabin Environments

Chanhee Lee¹⁾ · Sungjin Lee²⁾ · Seongkeun Park^{*3)}

¹⁾Convergence Security for Automobile, Soonchunhyang University, Chungnam 31538, Korea

²⁾Department of Smart Automobile, Soonchunhyang University, Chungnam 31538, Korea

³⁾Department of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea, Gyeonggi 15073, Korea

(Received 6 January 2026 / Revised 14 March 2026 / Accepted 17 March 2026)

Abstract : This study proposes a PMV (Predicted Mean Vote)-based HVAC mode reference framework for maintaining thermal comfort in electric vehicle cabins. Real-world driving data, including air temperature, mean radiant temperature, humidity, air velocity, metabolic rate, and clothing insulation, were analyzed to assess in-vehicle thermal comfort. K-means clustering was applied to classify driver operation patterns under various environmental conditions. The PMV model, implemented using the pythermalcomfort library based on the ISO 7730 standard, was used to quantitatively evaluate comfort levels. The most frequently occurring PMV values within the range of -0.5 to $+0.5$ were used to define three reference HVAC modes: Cool, Normal, and Warm. Results indicate that the proposed PMV-based mode classification reflects seasonal comfort tendencies and suggests a potential linkage to energy-efficient HVAC operation, although direct power consumption validation was beyond the scope of this study. These findings provide a reference framework for future real-time intelligent HVAC control systems in xEVs.

Key words : PMV(예측 평균 투표), HVAC(공조 시스템), Thermal comfort(열적 쾌적성), K-means clustering(K-평균 군집화), Vehicle cabin environment(차량 내 환경), Intelligent control(지능형 제어)

Nomenclature

PMV : predicted mean vote
 HVAC : heating, ventilation, and air conditioning
 T_a : air temperature ($^{\circ}\text{C}$)
 T_r : mean radiant temperature ($^{\circ}\text{C}$)
 RH : relative humidity (%)
 V_{ar} : relative air velocity (m/s)
 M : metabolic rate (W/m^2)
 I_{cl} : clothing insulation ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)

r : radiation
 cl : clothing surface
 res : respiration

Subscripts

a : air

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

차량 내 열적 쾌적성은 운전자의 집중력과 피로도, 더 나아가 주행 안전성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요인이다. 온도, 습도, 공기 흐름, 일사량 등 환경 인자는 운전자의 인지 능력과 반응 속도에 영향을 미치며, 열적 쾌적성이 저하될 경우 인지 부하가 증가하고 반응 속도가 저하되어 사고 위험이 높아질 수 있다는 연구 결과가

*Corresponding author, E-mail: skpark@tukorea.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.

보고되었다.¹⁾ 즉, 차량 내 열환경은 단순한 편안함의 문제가 아니라 운전자의 주의력 유지와 안전 확보에 직결되는 주요 인자로 볼 수 있으며, 특히 장시간 운전이나 극단적인 온도 환경에서는 피로 누적과 주의력 저하로 사고 위험이 높아질 수 있어, 차량 내 쾌적성을 유지하기 위한 정량적 평가 및 제어 기술의 필요성이 커지고 있다.

따라서 쾌적성 유지 기술은 단순한 편의성을 넘어 안전성 확보를 위한 핵심 연구 주제이다.

한편, 전기차(xEV, Electric Vehicles)의 보급 확산과 함께 에너지 효율 중심의 공조 시스템(Heating, Ventilation, and Air Conditioning, HVAC) 연구가 중요하게 대두되고 있다.

내연기관 차량과 달리 전기차는 엔진 폐열을 활용할 수 없기 때문에 공조 시스템의 에너지 효율이 차량 주행 거리와 직결된다. 연구에 따르면 공조 시스템은 배터리의 약 30 ~ 50 %를 소비하며, 이로 인해 주행거리가 최대 45 %까지 단축될 수 있다.²⁾ 특히 난방 구동 시 에너지 소모가 냉방보다 높아 주행 효율 저하의 주요 원인으로 지적된다. 따라서 에너지를 절약하면서도 쾌적성을 유지할 수 있는 공조 시스템의 최적화가 요구된다.

기존 차량 공조 시스템은 설정 온도 유지에 초점을 맞춘 단순 제어 방식으로, 운전자별 생리적 특성이나 외부 환경 변화를 반영하지 못한다는 한계를 지닌다. 동일한 온도에서도 개인의 체감 온도는 다르며, 개인의 대사율, 착의 상태, 태양 복사열, 습도 등의 변화에 따라 쾌적성이 달라진다. 그럼에도 불구하고 현재 상용화된 시스템은 고정된 온도 중심의 제어에 국한되어 있어, 실제 운전자의 쾌적 요구와 환경 변화를 충분히 반영하지 못하고 있다. 따라서 실시간으로 운전자 및 차량 환경 데이터를 분석하여 개별 운전자의 쾌적성을 반영하고 자동으로 공조를 조정할 수 있는 지능형 공조 제어 방식이 필요하다.

본 연구는 차량 내 환경 데이터를 실시간으로 분석하여 운전자의 열적 쾌적성을 평가하고, 이를 기반으로 최적의 공조 모드를 제공하는 시스템을 개발하는 것을 목표로 한다. 기존 PMV(Predicted Mean Vote) 모델은 정상 상태 환경을 가정하기 때문에 차량처럼 환경 변화가 빠른 공간에는 직접 적용하기 어렵다.³⁾ 이에 본 연구에서는 실시간으로 수집한 센서 데이터를 활용해 PMV 모델을 보완적으로 적용하고, 이를 기반으로 공조 모드 설정 기준을 도출하였다. 또한, 직접 측정이 어려운 의복 단열과 대사율은 ISO 7730 부록의 표준 값을 참고하고, 복사 온도 및 상대 기류 속도는 각각 차량 내 8개 지점의 평균값과 토출구 유속 데이터를 사용하여 실제 환경을 반영하였다.⁴⁾ 이를 통해 PMV 모델을 기반으로 한 실시간 열쾌적성 평가 및 공조 모드 기준 도출의 실현 가능성을 검증

하고자 하였다.

1.2 관련 연구

열적 쾌적성을 평가하기 위한 연구는 실내 환경 제어 및 차량 공조 분야에서 활발히 진행되어 왔다.

대표적인 평가 모델로는 불쾌지수(Discomfort Index, DI), 체감온도(Perceived Temperature), UCB(UC Berkeley Comfort Model), TANABE, PMV 모델 등이 있다.⁵⁻⁷⁾

불쾌지수와 체감온도 모델은 온도와 습도 같은 단순한 환경 변수만을 고려하여 계산이 용이하다는 장점이 있으나, 개인의 대사량, 착의 상태, 복사열 등의 인체적 요인을 반영하지 못한다.

UCB 모델은 비균질(Non-uniform) 및 비정상(Transient) 열 환경에서도 신체 각 부위별 온열 감각을 예측할 수 있도록 설계되어, 기존 모델의 정적 한계를 개선하였다. 그러나 입력 변수가 많고 계산 구조가 복잡하여, 실시간 차량 환경에 적용하기 어렵다는 한계를 가진다.

TANABE 모델은 인체 열조절(Thermoregulation) 메커니즘을 기반으로 생리적 반응(발한, 혈류 변화 등)을 반영하는 정교한 평가가 가능하지만, 복잡한 열역학 해석이 필요해 실시간 데이터 처리에는 부적합하다.

한편, PMV 모델은 ISO 7730 국제 표준으로 채택된 대표적 쾌적성 지표로, 온도·습도·복사열·기류 속도와 인체 인자(대사율, 의복 단열)를 통합적으로 고려한다. 기존 연구에서는 PMV를 사무공간, 주거 환경 등 정적 조건에서 활용하였으나, 환경 변화가 빠른 차량 내에서는 직접 적용하기 어렵다.^{8,9)} 따라서 실시간 데이터를 기반으로 PMV를 보완하거나, 차량 환경에 적합한 동적 보정 모델을 도입하는 연구가 필요하다. 본 연구는 이러한 관점에서 PMV 모델을 기반으로 실시간 쾌적성 평가와 공조 모드 설정 기준을 제시한다.

1.3 연구 목표 및 차별점

본 연구의 목표는 차량 내 다양한 주행·기상 조건에서 수집한 데이터를 기반으로 운전자의 공조 조작 패턴을 분석하고, PMV 모델을 이용해 실시간 쾌적성을 평가하며, 이를 통해 계절별 공조 모드 설정 기준을 도출하는 것이다.

제안하는 시스템은 운전자 DB를 기반으로 실시간 PMV 값을 계산하여, Cool-Normal-Warm 세 가지 공조 모드를 자동 추천한다. PMV 스케일은 -3(Cold)부터 +3(Hot)까지이며, -0.5 ~ +0.5 구간을 쾌적 범위로 정의한다.

공조 시스템은 해당 범위를 유지하도록 실시간으로 난방 및 냉방을 조절함으로써, 기존의 고정 온도 기반 방식과 비교하여 쾌적성 개선과 에너지 효율 향상과의 연

계 가능성을 제시한다.

향후에는 본 연구에서 도출한 PMV 기반 모드 설정 기준을 바탕으로 실시간 제어 알고리즘을 개발하여, 차량용 지능형 공조 시스템으로 확장할 계획이다.

본 연구는 이전에 수행된 “차량 내 PMV 모델 적용을 통한 열쾌적성 평가 연구”의 연장선상에 있다.¹⁰⁾ 선행연구에서는 차량 내 환경 데이터를 기반으로 PMV 모델을 적용하여 실내 열쾌적성 평가의 가능성을 검증하였다. 이번 연구에서는 선행 결과를 확장하여, 계절별 주행 데이터를 통합적으로 분석하고, PMV 값을 활용해 실시간으로 적용 가능한 공조 모드 설정 기준을 제시한다. 이를 통해 차량 내 열쾌적성 평가에서 한 단계 나아가, 실제 공조 제어 시스템 구현에 적용할 수 있는 실질적 근거를 마련하였다.

특히 본 연구는 선행연구에서 수행된 PMV 기반 열쾌적성 평가 단계를 넘어, 실차 주행 데이터 기반 PMV 분포의 빈도 분석을 통해 공조 모드 기준을 정량화하고, 이를 실시간 공조 제어 시스템에 적용 가능한 Reference framework로 확장하였다는 점에서 기술적 차별성을 가진다.

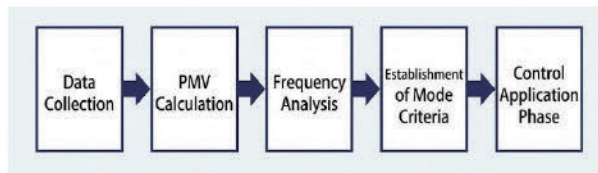


Fig. 1 Overall framework of PMV-based HVAC mode derivation and control reference generation

전체 시스템 흐름은 데이터 수집 → PMV 산출 → 빈도 분석 → 모드 기준 생성 → 제어 적용 단계로 구성되며, 이는 기존 평가 중심 연구를 제어 적용 단계까지 확장한 프레임워크라 할 수 있다.

2. 데이터 및 연구 방법

2.1 사용 데이터 개요

차량 내 열적 쾌적성은 온도, 습도, 일사량 등 환경 요인뿐만 아니라 공조 시스템의 작동 방식과 주행 조건에 따라 달라진다. 특히 운전자의 체감 온도는 단순한 실내 온도만으로 평가하기 어려우므로, 다양한 조건에서 데이터를 수집하고 이를 바탕으로 실내 환경 변화를 정량적으로 분석하는 것이 필요하다.

이를 위해 다양한 주행 환경(고속도로, 도심, 국도 등)과 기상 조건(맑음, 흐림, 비 등)에서 실내·외 데이터를 수집하였다.

연구의 주요 내용은 다음과 같다.

- 1) 주행 환경 및 외기 조건을 고려한 차량 내 열쾌적성 데이터 수집 및 분석
- 2) 공조 모드(냉방, 난방, 송풍) 조작에 따른 실내 온도 변화 평가
- 3) PMV 모델을 활용한 정량적 쾌적성 평가 및 공조 모드 설정 기준 도출

2.1.1 센서 및 데이터 수집 방식

데이터는 실내외 온도, 습도, 차량 속도, 공조 시스템 상태 등을 포함하며, 차량 내장 CAN 데이터와 실내 RTD(Resistance Temperature Detector) 센서를 병행하여 측정하였다. RTD 센서는 온도 변화에 따라 저항값이 선형적으로 변하는 특성을 이용하여 정밀한 온도 측정이 가능한 센서로, 안정성과 재현성이 우수하다. 본 연구에서는 차량 내 온도 변화를 보다 세밀하게 파악하기 위해 RTD 센서를 선택하였으며, 기존의 NTC(Negative Temperature Coefficient) 센서보다 온도 장시간 측정 시 신뢰도가 높다는 장점을 가진다.¹¹⁾

차량 내 총 8개 지점(루프 앞 뒤 3곳, 운전석, 조수석, 뒷좌석)에 RTD 센서를 설치하여 공간별 온도 분포를 정밀하게 분석하였다.

이를 통해 공조 시스템의 작동 모드 변화(냉방, 난방, 송풍 등)에 따른 온도 편차 및 열 분포를 정량적으로 평가할 수 있도록 구성하였다.

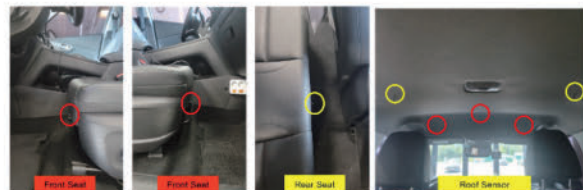


Photo 1. Indoor temperature measurement locations

공조 시스템 작동 모드, 팬 속도, 외기 유입 여부 등은 CAN 데이터를 통해 수집하였으며, 외부 온도·습도·일사량 데이터 또한 동일 네트워크 기반으로 확보하였다. 이를 통해 주행 조건 및 기상 변화가 반영된 차량 내 환경 데이터를 확보하였으며, 이후 PMV 모델을 활용하여 실내 열쾌적성을 평가하였다.

2.1.2 데이터 수집 조건

데이터는 2019년형 현대 코나 EV를 이용해 2023년 7월부터 2024년 9월까지 약 14개월 동안 수집하였다. 총 유효 측정 시간은 약 140시간이며, 다양한 도로 유형과

기상 조건에서 공조 모드를 달리 설정하여 데이터를 기록하였다. 또한 수집된 데이터는 계절별 특성 분석을 위해 한국기상청 분류 기준에 따라 여름철(5-9월)과 겨울철(10-4월) 기준으로 분류하였다.

Table 1 Data collection summary

Vehicle	2019 Hyundai Kona EV
Data collection duration	Approximately 140 hours (total)
Driving environment	Highway, urban road, national road
Weather conditions	Clear, cloudy, rainy
HVAC modes	Cooling, heating, ventilation, airflow control

2.1.3 입력 데이터 개요

약 140시간에 해당하는 행의 데이터를 확보하였으며, PMV 계산에 필요한 주요 인자를 추출하여 분석에 사용하였다. 입력 변수는 운전석 온도, 평균 복사 온도(8개 지점 평균), 상대습도, 외부 온도, 일사량, 차량 속도 등이다. 습도 센서는 차량 내부 유리면 근처에 위치해 상대적 변화 추세 분석에 적합하도록 활용되었다.

PMV 계산 시 의복 단열, 대사율 등은 ISO 7730 표준값을 참고하여 설정하였다. 또한, 주요 환경 인자 간의 상관관계와 분포 특성을 파악하기 위해 K-means 클러스터링 알고리즘을 적용하였다.¹²⁾ 이 분석은 주행 조건과 공조 모드에 따른 실내 열환경의 특성을 군집화하여, PMV 계산 전 데이터의 경향성을 정량적으로 파악하기 위한 목적을 가진다. 군집별 평균 온도, 습도, 풍속 등의 분포는 이후 PMV 결과 해석과 공조 모드 기준 설정 시 참고 자료로 활용되었다.

2.1.4 출력 데이터 개요

총 517,145개의 데이터를 기반으로 PMV 모델을 적용하여 차량 내 열쾌적성을 평가하였다. 출력 데이터는 특정 환경 조건에서 군집화된 주요 인자들의 평균값, PMV 값(-3~+3 범위), PMV 값 분포 중 -0.5~+0.5 구간에서 가장 빈도가 높은 값을 기준으로 설정된 공조 모드 기준 값

으로 구성된다.

각 군집의 평균값은 주행 조건 및 외기 상태에 따른 차량 내 환경의 특성을 분석하는 데 활용되었다. 또한 PMV 모델을 적용하여 실내 쾌적성을 평가하였으며, PMV 값이 -0.5~+0.5 범위에서 가장 많이 나타난 공조 모드를 기준으로 최적의 공조 모드를 설정하였다

2.2 군집화 방식 적용

본 연구에서는 차량 내 열환경 조건을 정량적으로 분류하기 위해 비지도 학습 기반 군집화 알고리즘인 K-means를 적용하였다. K-means 알고리즘은 데이터 간 거리 기반으로 군집 중심점을 반복적으로 갱신하여 유사한 특성을 갖는 데이터를 K개의 군집으로 분류하는 방법이다.

군집화 입력 변수로는 외부 온도, 내부 온도, 차량 속도, 일사량, 상대습도를 사용하였다. 이는 주행 조건 및 공조 작동 상태에 영향을 미치는 대표 환경 변수로 판단하였기 때문이다.

군집 수(K)는 공조 모드 구성을 고려하여 Cool-Normal-Warm의 3단 구조에 대응하도록 3으로 설정하였다. 이는 PMV 기반 공조 모드 설정의 목적과 운전자 공조 조작 패턴을 반영하기 위한 설계이다.

군집 분석 결과, 외기온/내기온 20 °C 내외와 차량 속도 50-100 km/h 등 특정 환경 조건에서 데이터가 집중적으로 분포하는 경향을 확인하였다. 이는 운전자가 쾌적 범위에 해당하는 조건에서 공조 조작을 빈번하게 수행했음을 시사한다.

이후 보다 정량적인 열쾌적성 평가를 위해 PMV 모델을 적용하였으며, 군집별 열환경 특성 비교 결과는 3장에서 제시한다.

2.3 PMV 모델 적용 개요

PMV 모델은 ISO 7730(2005)에서 제시된 국제 표준으로, 주어진 환경 조건에서 인체의 열적 감각을 예측하여 쾌적 정도를 수치화하는 방식이다. PMV 값은 -3(매우 춥다)에서 +3(매우 덥다)까지의 7단계 척도로 표현되며, 일반적으로 -0.5~+0.5 구간을 쾌적 범위로 정의한다. PMV는 인체의 열 균형 상태를 바탕으로 계산되며, 그 기본 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$PMV = (0.303e - 0.036M + 0.028) \times [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}] \quad (1)$$

where

M : Metabolic rate (W/m^2)

W : Effective mechanical power (W/m^2)

Table 2 Output data derived from the study

Output data	Description
Average value of each cluster	Average of key variables grouped under specific environmental conditions
PMV value	Output value of the PMV model reflecting in-vehicle thermal environment (-3 to +3)
HVAC mode reference value	HVAC mode determined based on the most frequent PMV values within the range of -0.5 to +0.5

H : Heat loss by radiation and convection

E_c : Heat exchange through skin evaporation

C_{res}, E_{res} : Sensible and latent heat exchange by respiration

본 연구에서는 위 식의 세부 항을 직접 계산하기보다, Python의 Pythermalcomfort 라이브러리를 활용하여 ISO 7730 표준식을 기반으로 PMV 값을 산출하였다.¹³⁾ 이를 통해 수집된 데이터를 실시간 입력값으로 변환하여 쾌적성 지표를 자동 계산할 수 있도록 구성하였다.

2.3.1 PMV 모델 계산 및 데이터 매핑

PMV 계산에는 차량 내 환경 데이터와 공조 시스템 정보를 입력값으로 활용하였다. 주요 변수로는 운전석 온도(T_a), 평균 복사 온도(T_r), 상대습도(RH), 상대 기류 속도(V_{ar}), 대사율(M), 의복 단열 값(Icl) 등이 사용되었으며, 모든 변수는 ISO 7730 부록의 기준값을 참고하여 설정하였다.

Table 3 Data mapping for PMV model application

Variable	Source data
Air temperature	Driver seat temperature
Mean radiant temperature	Average of 8 temperature points
Relative humidity	In-vehicle humidity sensor data
Relative air velocity	Airflow velocity at vent outlet
Metabolic rate	ISO standard value (1.5 met)
Clothing insulation	ISO standard value (summer 0.5/winter 1.0 clo)
External work	ISO standard value (0 W)

이와 같은 매핑 과정을 통해, 각 시점의 실내 환경 데이터를 PMV 입력 형식에 맞추어 변환하였다. 데이터는 Pythermalcomfort 라이브러리에 제공되는 PMV 함수에 입력되어, -3에서 +3 사이의 PMV 값으로 변환되었고, 도출된 PMV 값은 이후 공조 모드 기준(Cool, Normal, Warm) 설정을 위한 주요 판단 지표로 활용되었다.

2.3.2 PMV 모델 계산 방식

PMV 모델 계산은 앞서 소개한 ISO 7730에서 제시한 열평형 기반 PMV 계산식을 바탕으로 수행되었으며, 해당 계산은 Python 기반 Pythermalcomfort 라이브러리를 활용하여 구현하였다. 본 라이브러리는 표준 PMV 수식을 기반으로 입력된 열환경 및 인체 인자를 반영하여 쾌적성 지표를 산출하도록 설계되어 있다. 수집된 차량 내 센서 데이터는 DataFrame 형태로 구성된 후, 각 변수(실내 온도, 평균복사온도, 상대습도, 기류속도, 착의량, 활동량 등)가 PMV 계산 함수에 순차적으로 입력되었다.

또한 모델 계산 시 입력 변수의 유효 범위는 ISO 권장 기준에 따라 제한하여 적용하였다.

- 1) 공기 온도 (T_a): 10–30 °C
- 2) 평균 복사 온도 (T_r): 10–40 °C
- 3) 상대 기류 속도 (V_{ar}): 0–1 m/s
- 4) 대사율 (M): 0.8–4 met
- 5) 의복 단열 값 (Icl): 0–2 clo

또한 본 연구에서는 계절별 쾌적 범위 비교를 위해 한국기상청의 기준에 따라 여름철(5–9월)과 겨울철(10–4월) 데이터를 구분하여 각각 PMV를 계산하였다. 이를 통해 실제 차량 내 환경 데이터를 기반으로 PMV 모델을 신뢰성 있게 적용하고, 실내 열적 쾌적성을 정량적으로 평가할 수 있도록 하였다.

3. 연구 결과

3.1 클러스터링 결과 분석

본 연구에서는 K-means 클러스터링을 적용하여 차량 내 환경 조건에 따른 공조 시스템 조작 패턴을 분석하였다. Table 4는 특정 환경 조건에서 수행된 클러스터링 결과로, 운전자의 공조 사용 패턴이 환경 인자 변화에 따라 어떻게 달라지는지를 보여준다.

Table 4 Clustering results and average values of key variables

Variable	Cluster 0	Cluster 1	Cluster 2
A/C power (W)	177.8	282.9	176.8
Heater power (W)	21.8	0.0	3.6
Outside temperature (°C)	21.0	22.3	21.3
Inside temperature (°C)	21.1	20.1	19.6
Set temperature (°C)	20.2	18.4	19.3
Fan level	2.9	2.9	2.6
Solar radiation (V)	0.2	0.2	0.5
Humidity (%)	48.3	37.3	36.2
Vehicle speed (km/h)	76.2	80.3	79.4

3.1.1 클러스터별 특성 분석

클러스터링 결과, 운전자의 공조 조작 패턴은 온도, 습도, 일사량, 차량 속도 등 외부 환경 요인에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 특정 조건에서는 운전자가 일정한 공조 조작을 유지하는 경향을 보였으나, 외부 온도 변화에 따라 냉방 강도 및 전력 소비 패턴이 달라지는 양상이 확인되었다. 클러스터링 결과는 공조 시스템의 작동 특성에 따라 세 가지 유형으로 구분할 수 있다.

1) 강한 냉방(Cluster 1)

- ① 에어컨 전력 사용량이 가장 높음(282.9 W), 히터 전력 사용은 없음(0 W)
- ② 내부 온도(20.1 °C)가 설정 온도(18.4 °C)보다 높아, 빠른 냉각을 위한 강한 냉방 패턴
- ③ 차량 속도가 높음(80.3 km/h) → 고속 주행 중 냉방 강화 경향

2) 중간 냉방(Cluster 0)

- ① 에어컨 전력 사용량이 중간 수준(177.8 W), 히터 전력 일부 사용(21.8 W)
- ② 내부 온도(21.1 °C)와 설정 온도(20.2 °C)가 근접 → 안정된 냉방 유지
- ③ 차량 속도(76.2 km/h)로, 냉방과 난방을 혼합하여 미세 조절하는 패턴

3) 약한 냉방(Cluster 2)

- ① 에어컨 전력 사용량이 가장 낮음(176.8 W), 히터 전력 일부 사용(3.6 W)
- ② 내부 온도(19.6 °C)와 설정 온도(19.3 °C)가 거의 일치 → 쾌적 상태 유지
- ③ 상대습도(36.2 %) 및 일사량(0.5 V)이 다른 군집보다 높음 → 외부 요인 반영된 조절 패턴

이러한 결과를 통해, 운전자의 공조 조작은 환경 변화에 따라 단계적으로 조절되는 경향을 보였으며, 특히 고속 주행 및 외부 온도 상승 시 냉방 강도가 증가하는 패턴이 확인되었다. 다만, 클러스터링 분석만으로는 운전자의 주관적 체감 온도를 반영하기 어려우며, 공조 조작 데이터만으로 열적 쾌적성을 평가하는 데 한계가 있다.

따라서, 보다 정량적이고 객관적인 열쾌적성 평가를 위해 다음 절에서는 PMV 모델을 적용하여 공조 모드 기준을 도출하였다.

3.2 PMV 분석 결과

PMV 모델을 적용하여 차량 내 실내 환경의 열적 쾌적성을 분석하였다. 본 연구에서는 여름철(5~9월)과 겨울철(10~4월) 데이터를 구분하여 PMV 모델을 적용하고, 각 계절별 PMV 값의 분포 특성을 비교·분석하였다.

분석 결과, 여름철에는 PMV 값이 중립(Neutral)보다 낮은 범위에, 겨울철에는 중립보다 높은 범위에 집중되는 경향이 나타났다. 즉, 여름철의 PMV 값은 대부분 -0.5에서 0.0 구간에 분포하여 시원함(Cool)에 가까운 쾌적 상태를 보였으며, 겨울철의 PMV 값은 0.0에서 +0.5 구간에 집중되어 따뜻함(Warm)을 선호하는 경향이 확인되었다.

이러한 경향은 아래의 히스토그램을 통해 시각적으로 확인할 수 있다.

겨울철 PMV 분포에서는 +0.75 부근에서 국소적인 빈도 피크가 관찰되었다. 해당 구간은 일반적으로 정의되는 쾌적 범위(+0.5 이하)를 초과하는 값으로, 공조 모드 기준 설정에는 반영하지 않았다. 이는 난방 초기 과도 구동 구간, 착의 증가, 일사 유입 증가 등의 복합 요인에 의해 발생한 것으로 해석되며, 안정 상태 쾌적 구간과는 구분되는 특성으로 판단하였다.

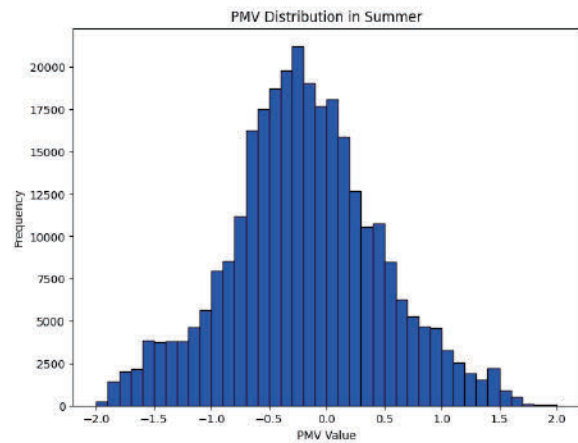


Fig. 2 PMV distribution in summer (histogram)

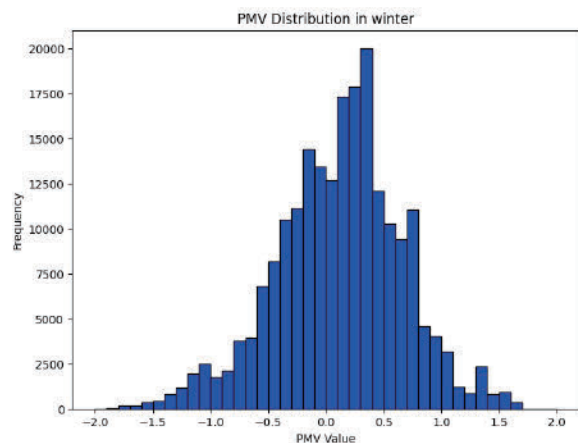


Fig. 3 PMV distribution in winter (histogram)

또한 각 계절마다 PMV 쾌적함의 수치인 -0.5 ~ +0.5 사이의 각 값에 따른 인자별 평균 값을 구하여 분석하였다.

PMV 분석 결과를 바탕으로 공조 모드 설정 시 최적의 온도 및 습도조건을 도출할 수 있으며,

이를 통해 공조 시스템의 자동 조절 기준을 마련하는데 활용할 예정이다.

Table 5 Average values of thermal parameters for each PMV level (summer)

PMV	t_a (°C)	t_r (°C)	V_{ar} (m/s)	RH (%)	M (met)	I_{cl} (clo)
-0.5	21.0	25.2	0.30	34.1	1.5	0.5
-0.4	21.5	25.2	0.30	34.3	1.5	0.5
-0.3	21.9	25.4	0.29	36.2	1.5	0.5
-0.2	22.1	26.1	0.29	35.2	1.5	0.5
-0.1	22.8	25.9	0.30	40.2	1.5	0.5
0.0	23.0	26.8	0.30	34.5	1.5	0.5
0.1	23.4	27.2	0.30	34.2	1.5	0.5
0.2	24.0	27.6	0.33	32.8	1.5	0.5
0.3	24.5	27.7	0.34	32.9	1.5	0.5
0.4	25.2	27.7	0.35	31.8	1.5	0.5
0.5	25.5	27.8	0.34	35.3	1.5	0.5

Table 6 Average values of thermal parameters for each PMV level (winter)

PMV	t_a (°C)	t_r (°C)	V_{ar} (m/s)	RH (%)	M (met)	I_{cl} (clo)
-0.5	17.3	18.5	0.37	53.5	1.5	1.0
-0.4	17.5	18.8	0.30	52.5	1.5	1.0
-0.3	18.0	19.6	0.30	49.1	1.5	1.0
-0.2	19.4	20.3	0.38	42.3	1.5	1.0
-0.1	19.3	20.8	0.32	44.7	1.5	1.0
0.0	20.3	21.5	0.39	44.8	1.5	1.0
0.1	20.7	21.3	0.35	51.3	1.5	1.0
0.2	21.3	22.5	0.38	43.9	1.5	1.0
0.3	21.9	22.3	0.35	46.9	1.5	1.0
0.4	22.3	22.7	0.32	49.1	1.5	1.0
0.5	22.7	22.8	0.29	50.3	1.5	1.0

3.3 공조 모드 설정

PMV 분석 결과를 바탕으로, 차량 내 공조 시스템이 최적의 쾌적성을 유지할 수 있도록 계절별 공조 모드의 기준을 설정하였다. 공조 모드는 PMV 쾌적 범위(-0.5 ~ +0.5) 내에서 가장 빈도가 높은 PMV 값을 기준으로 설정하였으며, 이를 기반으로 Cool, Normal, Warm 세 가지 모드를 정의하였다.

3.3.1 PMV 값 빈도수 분석

여름철에는 PMV -0.3에서 가장 높은 빈도를 보였으며, 이를 기준으로 Cool 모드를 설정하였다. 또, 겨울철에는 PMV 0.3에서 가장 높은 빈도를 보여, 해당 값을 기준으로 Warm 모드를 설정하였다.

Table 7 Frequency distribution of PMV values in summer

PMV	Frequency	PMV	Frequency
-0.5	18,588	0.1	16,445
-0.4	19,352	0.2	12,952
-0.3	21,585	0.3	10,475
-0.2	18,965	0.4	10,962
-0.1	17,962	0.5	8,759
0.0	17,844		

Table 8 Frequency distribution of PMV values in winter

PMV	Frequency	PMV	Frequency
-0.5	7,804	0.1	16,944
-0.4	10,521	0.2	17,535
-0.3	10,943	0.3	20,746
-0.2	13,979	0.4	12,350
-0.1	13,918	0.5	10,517
0.0	12,408		

3.3.2 공조 모드 설정 기준

1) 여름철 공조 모드 설정 방식

- ① Cool 모드: PMV -0.3 (가장 높은 빈도)
- ② Normal 모드: PMV -0.1 (Cool 모드보다 약간 따뜻한 상태)
- ③ Warm 모드: PMV 0.1 (Normal 모드보다 약간 높은 상태)

2) 겨울철 공조 모드 설정 방식

- ① Cool 모드: PMV -0.1 (중립보다 약간 낮은 상태)
- ② Normal 모드: PMV 0.1 (중립 상태)
- ③ Warm 모드: PMV 0.3 (가장 높은 빈도)

3.3.3 공조 모드 설정 기준의 특징

PMV 값을 기반으로 한 공조 모드 설정의 주요 특징은 다음과 같다.

1) 각 모드는 빈도수를 기반으로 설정하였으며, 설정된 PMV 값 간 온도 차이가 명확히 구분되도록 공조 모드 간 PMV 간격은 0.2 단위로 설정하였다. PMV 분포 분석은 0.1 단위로 수행되었으나, 제어 기준을 동일 해상도로 적용할 경우 모드 간 빈번한 전환이 발생할 수 있다. 따라서 열적 체감 변화 인지 범위와 제어 안정성을 동시에 고려하여 0.2 간격의 모드 구성을 적용하였다.

2) Cool 모드는 PMV 값이 -0.3(여름) 또는 -0.1(겨울)일 때를 기준으로 설정하여, 계절에 맞는 쾌적 상태를 유지하도록 하였다.

3) Normal 모드는 PMV 값이 0 또는 중립에 가까운 상태를 기준으로 설정하였다.

4) Warm 모드는 PMV 값이 0.1~0.3 범위에 위치한 값을 기준으로 설정하였다.

이를 통해, PMV 기반 공조 모드 설정은 차량 내 열적 쾌적성을 객관적이고 정량적으로 평가할 수 있으며, 실내 환경 변화에 따라 자동으로 공조 시스템을 최적화하는 데 활용될 수 있음을 확인하였다.

4. 논의 및 결론

4.1 연구 요약 및 주요 결과

본 연구에서는 PMV 모델을 활용하여 차량 내 실내 환경의 열적 쾌적성을 평가하고, 이를 기반으로 공조 모드 설정 기준을 도출하였다. 연구의 주요 목표는 차량 내 환경 데이터를 분석하여 공조 시스템이 실내 열환경을 보다 효율적으로 제어할 수 있도록 계절별 최적 공조 모드를 설계하는 것이다. 이를 위해 다음과 같은 절차로 연구를 수행하였다.

- 1) K-means 클러스터링을 적용하여 차량 내 공조 시스템의 조작 패턴을 분석하였다
- 2) PMV 모델을 적용하여 실내 환경 데이터를 기반으로 열적 쾌적성을 평가하였다.
- 3) PMV 값의 빈도수 분석을 통해 계절별 최적 공조 모드를 설정하였다.

연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) PMV 분석 결과, 여름철과 겨울철 모두 PMV 값이 쾌적 구간(-0.5 ~ +0.5)에 집중되는 경향을 보였다.
- 2) PMV 빈도 분석을 기반으로 Cool, Normal, Warm 세 가지 공조 모드를 정의하고, 각 계절별로 최적의 기준을 설정하였다.

이를 통해, PMV 기반 공조 모드 설정이 실내 열적 쾌적성을 객관적이고 정량적으로 평가할 수 있으며, 차량 내 공조 시스템의 효율적 제어 및 자동화 구현 가능성을 확인하였다.

4.2 PMV 기반 공조 모드 설정의 의의

PMV 모델을 활용한 공조 모드 설정은 기존의 단순 온도 유지 방식과 차별화되는 장점을 가진다. 일반적인 공조 시스템은 설정 온도를 일정하게 유지하는 데 중점을

두지만, PMV 기반 제어 방식은 환경 변화에 따른 실시간 쾌적성 변화를 반영할 수 있는 적응형 제어 구조를 제공할 수 있다.

본 연구에서 제안한 공조 모드 설정 방식의 주요 특징은 다음과 같다.

- 1) 고정된 온도 설정 대신, 계절 및 실내 환경 변화를 반영한 동적 공조 모드를 제안하였다.
- 2) PMV 값을 기반으로 최적의 공조 모드를 도출함으로써, 에너지 효율 향상 가능성을 제시하였다.
- 3) 운전자의 공조 조작 패턴을 반영하여 실제 사용 행태와 부합하는 사용자 중심의 공조 설계 방향성을 제시하였다.

이러한 PMV 기반 공조 모드 설정 방식은 향후 실시간 제어 시스템 개발의 기초가 될 수 있으며, 자동화 및 최적화된 공조 제어 연구에 기여할 수 있는 잠재력을 지닌다.

또한 본 연구의 신뢰성 확보를 위해 실차 주행 기반 CAN 데이터와 차량 내 센서 데이터를 활용하였으며, ISO 7730 국제 표준 PMV 모델을 적용하여 쾌적성 평가의 객관성을 확보하였다. 계절별 PMV 분포는 여름철에는 중립 이하, 겨울철에는 중립 이상으로 이동하는 경향을 보여 실제 공조 사용 패턴과 일관된 경향을 나타냈다. 이는 차량 환경 조건 하에서 PMV 모델을 실측 데이터 기반으로 적용하고 그 경향성을 분석하였다는 점에서 의의를 가진다. PMV 기반 공조 모드 설정은 과도한 냉·난방을 방지함으로써 에너지 효율 개선과의 연계 가능성을 시사하며, 향후 차량 공조 시스템의 지능형 제어 전략 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있다. 다만 본 연구에서는 공조 시스템의 실제 소비 전력에 대한 정량적 분석은 수행하지 않았으며, 이에 대한 실험적 검증은 향후 연구 과제로 남는다.

4.3 연구의 한계 및 향후 연구 방향

본 연구는 PMV 모델을 기반으로 차량 내 공조 모드 설정 방법을 제시하였으나, 다음과 같은 한계가 존재한다.

- 1) 운전자 개별 특성 반영의 한계
PMV 모델은 평균적인 쾌적성을 예측하는 모델로, 개인별 생리적 차이나 온열 선호도를 반영하기 어렵다.
- 2) 실시간 적용을 위한 제어 최적화 필요
본 연구에서는 PMV 계산 결과를 기반으로 공조 모드를 설정하였으나, 실제 차량 환경에서 실시간으로 변화하는 조건에 대응하는 동적 제어 알고리즘은 구현되지

않았다. 향후 연구에서는 실시간 데이터 처리 및 제어 피드백을 통합한 온디바이스 제어 구조로 확장할 계획이다. 또한 본 연구에서는 도출된 공조 모드 기준을 실제 차량 제어 시스템에 적용하여 모델 기반 제어 결과와 기존 제어 방식과의 정량적 비교 분석은 수행하지 않았다. 이에 대한 실차 적용 및 성능 검증은 향후 연구를 통해 진행할 예정이다.

3) 추가 환경 변수의 고려 필요

본 연구는 건구 온도, 복사 온도, 습도, 공기 속도 등을 중심으로 PMV를 계산하였다. 의복 단열값과 대사율은 ISO 7730 부록의 표준값을 사용하였으나, 실제 차량 내에서는 좌석 위치, 차량 구조, 일사량 등 복사 열환경이 달라질 수 있다. 또한 송풍구 풍속을 공기 속도의 대푯값으로 사용하였지만, 실제 체감 기류는 좌석 위치나 차량 속도에 따라 달라질 수 있다. 향후 연구에서는 좌석별 복사 온도, 외기 열유입량, 실제 체감 기류 등을 추가 반영하여 보다 정밀한 PMV 계산이 필요하다.

4) 데이터 확장 및 검증 필요

본 연구는 특정 기간 동안의 데이터를 기반으로 분석이 수행되었다. 향후 더욱 다양한 계절, 주행 조건, 차량 모델을 포함한 데이터 확장을 통해 모델의 일반화와 신뢰성 향상이 요구된다.

5) 에너지 소비에 대한 정량적 분석의 부재

본 연구는 PMV 기반 공조 모드 설정 기준 도출에 초점을 두었으며, 공조 시스템의 실제 소비 전력 감소 효과에 대한 정량적 실험은 수행하지 않았다. 향후 연구에서는 HVAC 소비 전력 예측 및 제어 적용 전후 비교 분석을 통해 에너지 절감 효과를 검증할 필요가 있다.

4.4 결론

본 연구에서는 PMV 모델을 활용하여 차량 내 공조 시스템의 최적화 방안을 제시하고, 쾌적성 평가를 기반으로 한 공조 모드 설정 방법을 제안하였다.

연구 결과, PMV 기반 공조 모드 설정은 운전자의 열적 쾌적성을 정량적으로 평가할 수 있으며, 기존의 단순 온도 유지 방식보다 환경 변화에 유연하게 대응하는 제어 구조를 제공한다. 이를 통해 공조 시스템의 에너지 효율 향상과 쾌적성 유지의 달성 가능성을 제시하였다.

또한, 여름철과 겨울철 각각에서 가장 높은 빈도의 PMV 값을 중심으로 공조 모드를 설정함으로써 계절별 최적 온도 제어가 가능함을 입증하였다. 따라서, PMV 기반 공조 시스템은 정밀한 환경 제어가 가능하며, 향후 실

시간 제어 알고리즘과 결합된 자동화 공조 시스템으로 발전할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한 본 연구에서 제안한 PMV 기반 공조 모드 기준은 향후 실시간 차량 공조 제어 알고리즘 개발을 위한 기초 Reference로 활용될 수 있다.

본 연구의 학술적 기여는 다음 세 가지로 정리된다.

- 1) 실차 주행 환경 기반 차량 열쾌적성 PMV 데이터베이스를 구축하였다.
- 2) PMV 분포의 빈도 분석을 통해 공조 모드 기준을 정량화하였다.
- 3) 해당 기준을 실시간 공조 제어에 적용 가능한 Reference 구조로 제안하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부가 지원하는 산업기술혁신 사업(시장자립형 3세대 xEV 산업육성 사업, 과제번호: 20018646)의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원해주신 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

References

- 1) X. Wang, Q. Yang, Y. Zhai, H. Niu and X. Wang, "Effects of Vehicle Air Temperature on Drivers' Cognitive Abilities Based on EEG," Sustainability, Vol.15, No.2, pp.1673-1691, 2023.
- 2) D. H. Jo, Y. P. Lee and Y. S. Lee, "Research Trend of Subjective Assessment Regarding Passenger's Thermal Comfort in Vehicle - A Review," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.972-975, 2020.
- 3) P. O. Fanger, Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering, McGraw-Hill, New York, pp.1-244, 1970.
- 4) ISO, "Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria," ISO 7730, 2005.
- 5) S. S. Jose and R. K. Chidambaram, "Thermal Comfort Optimization in an Electric Vehicle," Int. J. Heat and Technology, Vol.39, No.6, pp.1957-1965, 2021.
- 6) H. Zhang, Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 2003.
- 7) S. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki and M. Konishi, "Evaluation of Thermal Comfort using Combined Multi-Node Thermoregulation (65MN) and Radiation Models and Computational Fluid Dynamics (CFD)," Energy and Buildings, Vol.34, No.6, pp.637-646, 2002.
- 8) M. S. Kim, A study on evaluation and application of

- thermal comfort sensibility considering psychological and physiological response of automobile drivers, Ph.D. Dissertation, Hanyang University, Seoul, 2017.
- 9) S. Y. Yun, J. Y. Kwak, C. Chun, H. W. Yeom, J. S. Park, S. W. Seo, S. H. Kim and C. B. Kwon, "Development of HMC Comfort Model to Validate Comfort Prediction," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1323-1330, 2018.
 - 10) C. H. Lee and S. K. Park, "PMV-based Thermal Comfort Assessment Methodology using Driving Data from xEV Vehicles," Proceedings of the 2025 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), Fukuoka, Japan, pp.1-6, 2025.
 - 11) Y. J. Park and S. H. Lee, "Development of an Automotive RTD-Type Temperature Sensor," Transactions of KSAE, Vol.22, No.3, pp.167-173, 2014.
 - 12) J. MacQueen, "Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations," Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, pp.281-297, 1967.
 - 13) F. Tartarini and R. Schiavon, "Pythermalcomfort: A Python Package for Thermal Comfort Research," SoftwareX, Vol.12, 100578, 2020.