

ORIGINAL ARTICLE

대기권밖일사량을 활용한 체감온도 산출 보정기법 개발 및 적용성 평가

김건후* · 김규랑

국립기상과학원 기상응용연구부

Development and Applicability Assessment of a Bias Correction Method for Systematic Errors in Feel Temperature Using Extraterrestrial Radiation

Geon-Hu Kim*, Kyu Rang Kim

Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Korea

Abstract

Heatwaves have emerged as severe meteorological disasters that pose significant public health threats worldwide; their frequency and intensity are increasing with climate change. The Korea Meteorological Administration operates a heatwave warning system that estimates the daily maximum feel temperature based on an empirical relationship with the Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT). However, wet-bulb and globe temperatures are classified as nonstandard meteorological variables, limiting their real-time application. Consequently, the current system relies on empirical equations that use only air temperature and relative humidity, introducing a systematic bias. This study aimed to characterize these biases and propose a novel correction approach based on extraterrestrial radiation. From May to September 2024, globe temperature observations were collected at three sites—Incheon Airport, Seoul Songwol-dong, and Seogwipo in Jeju—to obtain the reference feel temperatures. The analysis revealed that the current estimation method systematically underestimates feel temperature during daytime because it insufficiently represent solar radiation effects, particularly by 2-3°C under high solar radiation conditions, and overestimates it at night by neglecting radiative cooling. Solar radiation-related variables were identified as major contributors to systematic errors. Extraterrestrial radiation alone accounted for 16.0-32.6% of the bias variance without requiring additional weather measurements. A bias-corrected feel temperature model incorporating extraterrestrial radiation was developed, reducing the average root mean square error from 0.97-0.63°C and mean absolute error from 0.84-0.48°C during the validation period. The model achieved a stable performance around noon, when solar irradiance peaked, effectively suppressing extreme errors. This study demonstrates that extraterrestrial radiation can serve as a practical and effective variable for correcting systematic bias in feel temperature estimates within Korea's heatwave warning system.

Key words : Feel temperature, Extraterrestrial radiation, Bias correction, Heat warning system

Received 27 October, 2025; Revised 12 December, 2025;

Accepted 15 December, 2025

*Corresponding author : Geon-Hu Kim, Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Korea

Phone : +82-64-780-6688

E-mail : ghkim3284@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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. 서 론

폭염(Heatwaves)은 전 세계적으로 심각한 공중보건 위험을 초래하는 기상재해로 기후변화의 진행과 함께 그 발생빈도와 강도가 현저히 증가하고 있다(Barriopedro et al., 2023; Wang et al., 2024). 세계보건기구(WHO)에 따르면 2000~2019년 기간 동안 연간 약 489,000명이 폭염 관련으로 사망했으며, 65세 이상 고령자의 열 관련 사망률은 2000~2004년 대비 2017~2021년에 약 85% 증가하였다(WHO, 2024). 기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC) 제6차 평가보고서(AR6)에서는 1950년대 이후 인위적 기후변화가 폭염의 빈도와 강도를 증가시켰으며, 추가적인 온난화로 인해 이러한 경향이 더욱 심화될 것이라고 명시하고 있다(IPCC, 2023).

한국 기상청은 일최고체감온도(DMFT, Daily Maximum Feel Temperature)를 핵심 지표로 하는 폭염정보시스템을 운영하고 있으며, 이는 습구흑구온도(WBGT, Wet-Bulb Globe Temperature)를 추정하는 관계식에 기반한다. WBGT는 Yaglou and Minard(1957)에 의해 개발된 종합적 열적 스트레스 지수로서 국제표준화기구(ISO)에서 산업보건 분야의 공식 표준으로 채택되어 있다(ISO, 1989). 그러나 습구온도와 흑구온도는 비정규 기상관측 요소로 분류되어 관측망 구축과 실시간 관측값 활용에 제약이 있다. 이로 인해 체감온도 산출 시 기온과 상대습도 등 정규 기상관측 요소만을 사용하는 경험적 추정식을 적용하고 있으며, 이는 추정체감온도와 실측 WBGT 간의 시·공간적 계통오차(Systematic bias)를 야기한다. Vicedo-Cabrera et al.(2021)의 다국가 분석 연구에 따르면, 1991~2018년 기간 동안 43개국 732개 지역에서 발생한 온난기 폭염 관련 사망의 37.0%가 인위적 기후변화에 기인하는 것으로 나타났다. 기후변화에 따른 폭염 강도 증가로 인해 인명피해가 급증하고 있는 상황에서 부정확한 체감온도의 추정은 폭염 정보의 신뢰성과 유용성을 저하시켜 효과적인 기상재해 대응을 저해한다. 따라서 경험적 기반 체감온도 추정 방법의 한계를 극복하여 보다 정확한 폭염정보시스템을 구축하는 것은 보건 기상 분야의 중요한 과제로 볼 수 있다.

이러한 맥락에서 본 연구의 목적은 체감온도 추정에서 발생하는 계통오차의 지역별 특성을 진단하고, 대기권밖일사량(Extraterrestrial radiation)을 활용한 새

로운 계통오차 보정 방법론을 제안하여 폭염정보시스템의 정확성을 향상시키는데 기여하는 것이다.

2. 문헌고찰

2.1. WBGT 지수와 추정 방법론

WBGT는 1950년대 Yaglou and Minard(1957)에 의해 미군 훈련 중 열사병 예방을 목적으로 개발된 종합적 열적 스트레스 지수이다. 이 지수는 단순한 기온 측정의 한계를 극복하기 위해 인체 열평형에 영향을 미치는 주요 환경인자들인 습구온도(Wet-bulb temperature), 흑구온도(Globe temperature), 건구온도(Dry-bulb temperature)를 통합적으로 고려하여 산출된다.

2000년대 들어 일본 환경성은 열사병 예방을 위해 기온, 상대습도, 풍속, 일사량을 반영한 경험식 기반 WBGT 추정식을 개발하여 운영하기 시작하였다(MOE, 2006; Ono and Tonouchi, 2014). 2010년대에는 Stull(2011)이 기온과 상대습도로부터 습구온도를 직접 추정하는 방법을 개발하여 WBGT 추정의 정확도를 개선하였다. 한국 기상청에서는 2023년부터 운영 중인 체감온도 산출을 위해 추정 습구온도와 기온을 활용한 경험식 기반의 WBGT 추정 모델을 개발하여 기본모델로 사용하고 있다(KMA, 2016).

최근에는 기존 추정식의 정확도를 개선하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. Clark et al.(2024)은 SERCC/CISA WBGT 예보시스템에서 지표면 거칠기를 고려한 풍속 보정을 통해 관측값 대비 0.6℃ 이내의 정확성과 WBGT 31℃를 초과하는 위험 구간에서 예보의 정확성을 더욱 개선하였지만, 복잡한 지형에서는 예보 정확도가 떨어지는 경향을 지적하였다. Buzan(2024)은 지면모델(CLM5)에 WBGT를 직접 구현하여 복사 처리 문제를 해결하였으며, WBGT 0.5℃의 미세한 차이도 노동능력에 10% 이상의 변화를 야기할 수 있음을 규명하여 정확한 기후변화 영향 평가의 중요성을 강조하였다.

2.2. WBGT 오차 보정 방법론

WBGT 추정에는 여러 오차 요인이 존재한다. 실내·외 환경의 복잡한 열 환경 조건, 기초 변수의 오차, 근사계산법, 측정기기의 불확실성에 따른 계통오차 등이

대표적이다. 이러한 오차는 열 위험 평가의 신뢰성에 중대한 영향을 미친다 (Lemke and Kjellstrom, 2012). 오차의 규모에 관한 연구들을 살펴보면, Ahn et al. (2022)는 미국 48개 주의 2018년에서 2019년의 4월에서 10월 동안의 주간 시간대를 대상으로 한 수치 예측 기반 WBGT 분석에서 코펜-가이거 기후 지역에 따라 -0.64°C 에서 1.46°C 수준의 오차를 보이는 것으로 보고하였다. Kong and Huber(2022)에 따르면, 고온 다습한 환경에서는 WBGT의 간소화된 추정식이 물리 모델보다 평균적으로 1°C 내외의 과대 추정 경향을 보일 수 있으며, 강한 복사열 조건에서는 복사열 반영이 부족한 추정식의 경향으로 과소 추정이 발생할 수 있다는 점을 지적했다. 이는 한국의 여름철 기후와 유사한 환경에서의 추정 모델의 적용은 신중한 보정이 요구됨을 시사한다.

이러한 문제점들을 해결하기 위한 오차 보정 방법론은 초기에는 주로 통계적 접근법이 활용되었다. WBGT 오차 보정을 위한 통계 기반 방법론으로는 WBGT 추정치와 실제 측정값 간의 회귀분석을 통해 보정식을 도출하는 방식이 대표적이며, 이는 MOS (Model Output Statistics)의 개념을 적용한 접근법이다(Glahn and Lowry, 1972). MOS는 과거 관측값과 수치예보 모델 출력 간의 계통오차를 통계적으로 보정하는 방법으로 실시간 운영 가능성과 해석 용이성 측면에서 유리해 기상예보 분야에서 오랫동안 활용되어 온 검증된 기법이다.

통계적 편향 보정(Statistical bias correction) 방법은 열적 스트레스 지수의 후처리에 널리 활용되고 있다. Cho et al.(2020)은 도시 지역의 극한 기온 예보에서 다양한 머신러닝 기반 편향 보정 방법을 비교하였으며, MOS와 같은 필터 기법이 기온 예보 분야에서 가장 일반적으로 사용되는 편향 보정 방법이라 보고하였다. 최근에는 기계학습 기반 기법이 WBGT의 비선형적 특성과 다양한 입력 변수를 효과적으로 반영할 수 있는 잠재력으로 주목받고 있다. Random Forest, Gradient Boosting, 딥러닝 기반 인공지능망 등을 활용하여 예측값의 오차를 줄이기 위한 후처리 기법들이 제안되고 있다. 딥러닝 기반 후처리 기법은 WBGT의 시·공간적 변동성과 극한상황에서의 예측 성능 개선 측면에서 주목받고 있으나, 여전히 해석의 어려움과 높은 연산 비용 등의 한계가 있다(Rasp and Lerch, 2018). 따라서 보정기법의 선택은 정확성뿐 아니라 운영의 효율성과 해석 가능성 등을 고려하여 상황에 맞게 결정되어야 한다.

2.3. 일사량과 열적 환경의 관계

일사량은 인체의 열적 쾌적성에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이다. Blazejczyk et al.(2012)은 UTCI (Universal Thermal Climate Index) 개발 과정에서 일사량을 포함한 복사환경이 열적 스트레스 평가에 필수적임을 제시하였다. Höppe(1993)은 인체 열평형 모델을 통해 일사에 의한 복사에너지가 체온조절과 열적 쾌적성에 큰 영향을 미치며, 복사에너지의 영향이 인체의 대사 과정에서 발생하는 열과 유사한 수준으로 인체 열 수치에 기여할 수 있음을 보고하였다.

대기 구성요소에 영향을 받는 지표면 일사량과 달리 대기권밖일사량은 천체역학적 요인에 의해서만 결정되므로 시·공간적으로 계산이 가능하며 관측장비에 의존하지 않고 이론적으로 결정된다는 점에서 활용성이 높다(Iqbal, 1983). 대기권밖일사량은 태양에너지 분야와 함께 기후학과 농업기상학 분야에서 이미 활용되고 있다. Prescott(1940)은 일조시간과 일사량의 관계식에서 대기권밖일사량을 활용하였으며, Allen et al.(1998)은 FAO에서 발간한 작물 증발산량 계산 가이드라인에서 대기권밖일사량을 기준 증발산량 계산에 활용하였다. 그러나 대기권밖일사량을 열적 쾌적성 연구에 직접 활용한 사례는 매우 제한적이다. 대부분의 연구들은 주로 추가적인 관측장비나 복잡한 수치모델을 요구하는 방법들을 제안하였다. 반면 본 연구는 이론적으로 계산 가능한 대기권밖일사량을 활용하여 기존 관측 인프라를 기반으로 추정체감온도의 정확도를 향상시킬 수 있는 방법론을 제시하였다. 또한 서로 다른 지리적 특성을 가진 다중 지점에서 검증하여 일반화 가능성을 제고하였다.

3. 연구방법

3.1. 연구지역 및 자료수집

연구 대상지는 중부지역 내륙성 기후 특성을 가지는 서울 송월동(Songwol) 중관기상관측지점(ASOS, Automated Synoptic Observing System)과 남부지역의 연안 아열대 환경의 대표지점인 서귀포 과학원(NIMS) 방재기상관측지점(AWS, Automatic Weather System), 그리고 주변 장애물이 적은 개활지 특성으로 인해 표준 조건에서 체감온도의 특성을 파악하기에 적합하다 판단되는 항공기상관측지점(AMOS, Aerodrome Meteorological Observation



(a) Seoul ASOS



(b) NIMS AWS



(c) IC-APO AMOS

Fig. 1. Black globe thermometer installation sites: (a) Songwol ASOS station, (b) NIMS AWS station, and (c) Incheon airport AMOS station.

System) 중 인천공항(IC-APO) 활주로 북단의 위치를 선정하였다. 세 지점은 서로 다른 지리적 및 기후학적 특성을 대표하는 지점으로 기상청 정규 기상관측자료를 확보하는데 용이하며, 정규기상관측자료 외의 흑구온도와 일사량을 측정할 수 있는 장비가 설치되었다. 흑구온도계는 ISO 7243 규격에 따라 설치되었고 일사량은 일사계(송월동, 과학원)와 하향단파복사계를(인천공항)로 관측하였다. 분석 기간은 인천공항 북단에 설치한 흑구온도계의 관측 시작 시점(2023년 11월 이후)과 기상청 여름철 체감온도 운영 기간(5~9월)을 고려하여 2024년 5월 1일부터 9월 30일까지 총 153일로 선정하였다. 분 단위로 연속 관측된 자료는 60분 이동평균(Moving average)을 적용하여 정시(Hourly) 자료로

변환한 후 분석에 활용하였다. 그 외의 기상관측 요소 또한 동일한 방법으로 시간해상도를 일치하였다.

지점별로 서로 다른 일사량 관측장비가 사용된 점을 고려하여, 분석기간 동안 동일 지점(송월동)에서 일사계와 하향단파복사계를 동시에 운영한 자료를 이용해 두 장비 간 차이를 Paired t-test로 비교하였다. 분석 결과, 두 장비의 평균 차이는 2.6 W/m^2 ($t=7.6$, $p < 0.001$, 95% 신뢰구간: 1.92, 3.25)로 나타나 장비 간에 체계적 편향이 존재함을 확인하였다. 그러나 편차의 크기가 전체 일사량 변화 범위($0 \sim 1,000 \text{ W/m}^2$ 이상)에 비해 상대적으로 미미하여 본 연구의 주요 분석 결과 및 해석에 미치는 영향은 제한적인 것으로 판단하였다.

$$FT_{KMA} = -0.2442 + 0.55399 Tw + 0.45535 Ta - 0.0022 Tw^2 + 0.00278 Tw Ta + 3.0 \dots\dots\dots (1)$$

$$Tw = Ta ATAN[0.151977(RH + 8.313659)^{1/2}] + ATAN(Ta + RH) - ATAN(RH - 1.67633) + 0.00391838RH^{3/2} ATAN(0.023101RH) - 4.686035 \dots\dots\dots (2)$$

$$FT_{WBGT} = 0.7 Tw + 0.2 Tg + 0.1 Ta + 3.0 \dots\dots\dots (3)$$

$$Tg_{2006} = 0.926 Ta - 0.028 RH - 0.783 WS + 10.441 \sqrt{Slr} + 2.784 \dots\dots\dots (4)$$

$$Tg_{2016} = 0.97516 Ta + 7.45904 Slr - 1.26611 Slr^2 - 0.42526 \dots\dots\dots (5)$$

$$H_o = \frac{12}{\pi} G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 yd}{365} \right) \left(\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi (\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$Error_{std} \equiv FT_{KMA} - FT_{WBGT} \dots\dots\dots (7)$$

$$FT_{ER} = FT_{KMA} + f(H_o) \dots\dots\dots (8)$$

추정체감온도와와의 비교 모델을 개발하기 위해 관측지점 주변의 장애물이 없어 순수한 기상 조건의 영향을 관측할 수 있는 인천공항을 대상으로 훈련(Training)과 검증(Validation) 기간을 7:3 비율로 무작위 분할(Random shuffle)하여 모델을 개발하고 검증하였다. 훈련 기간의 최적화를 위해 데이터의 무작위 분할을 Seed 기반으로 1,000회 반복 생성하고, 각 분할 사례에 대해 K(5)-fold 교차검증을 수행하여 평균RMSE (mRMSE, Mean Root Mean Square Error)가 최소가 되는 분할(Seed)을 선택하였다(No. 687, mRMSE: 0.63, MAE: 0.47, R^2 : 0.59). 인천공항의 훈련 기간을 대상으로 개발된 결과는 인천공항의 검증 기간을 포함한 송월동 ASOS 지점과 과학원 AWS 지점에 적용해 검증하였다. 훈련 기간 설정 비율에 따른 모델 과적합 여부를 점검하기 위해 데이터 분할 비율을 5:5, 6:4, 7:3, 8:2로 달리하여, 훈련 기간 선정과 동일한 절차를 적용해 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과, mRMSE (0.4877 ± 0.0001), MAE (0.3611 ± 0.0001), R^2 (0.5173)는 분할 비율 간 변화폭이 극히 미미하여, 데이터 분할 방식이 모델 성능에 실질적인 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서 적용한

7:3 분할 비율은 데이터 특성에서 볼 때 타당하고 안정적인 분할 방식으로 판단된다.

3.2. 체감온도 비교 추정식

기상청의 체감온도 산출식(FT_{KMA})은 식(1)과 같이 WBGT를 대체하기 위해 개발한 더위체감지수 추정식과 가산항(+3.0℃)으로 구성된다. 더위체감지수는 기온(Ta , ℃)과 습구온도(Tw , ℃)를 활용한 경험식이고, 습구온도의 추정은 Stull(2011)이 제안한 기온과 상대습도(RH , %)로 추정하는 식(2)를 활용한다. 결과적으로 국내에서 생산되는 체감온도는 정규 기상관측 요소인 기온과 상대습도만을 활용한 경험식으로 추정한다(Lee et al., 2019; KMA, 2023).

추정체감온도를 근사화하기 위한 기준값을 WBGT 모델 원형에 가산항을 추가한 식(3)과 같이 참조체감온도(FT_{WBGT} , Benchmark feel temperature)로 정의하였다.

흑구추정체감온도(FT_{Tg})는 흑구온도 관측 결과를 토대로 기온, 상대습도, 일사량(Slr , MJ/m²/h), 풍속(WS , m/s)의 선형회귀분석으로 개발된 흑구온도 추정

Table 1. Summary statistics of variables at Incheon airport during the training period

Variable	Obs.	Mean	Std. Dev.	Min.	Max.
Air temperature (°C)	2,544	23.6	5	8.4	34.7
Relative humidity (%)	2,544	79.3	13.6	30.5	99.7
Globe temperature (°C)	2,544	26.3	7.9	7.1	51.5
Solar insolation (W/m ²)	2,214	265	312.3	0	1,034.2
Extraterrestrial radiation (W/m ²)	2,544	436	478.9	-133.1	1,280.6

모델을 식(3)에 대입하여 산출하였다. KMA (2006)는 식(4)의 기온, 상대습도를 포함해 일사량, 풍속이 추가적으로 요구되는 흑구온도추정모델(R^2 : 0.95)을 경험식으로 개발하였다. KMA(2016)는 기온, 일사량, 상대습도의 2차식(Quadratic form)을 고려한 독립변수의 구성을 제안하였다. 제안된 독립변수에 대해 본 연구에서는 개발 기간 내에서 후진소거법(Stepwise backward selection)에 의한 통계적 검증 방식으로 일부 독립변수를 제거하였고, 일사량이 추가되는 식(5)의 흑구온도 추정식(R^2 : 0.93)을 적용하였다.

3.3. 대기권밖일사량 추정식

대기권밖일사량은 지구 대기권 상단에서 단위 면적에 도달하는 태양복사 에너지 플럭스 밀도로 정의된다. 이는 태양상수(Solar constant)를 기준으로 지구와 태양 간의 거리 변화 및 태양천정각(θ_z)의 함수로 표현되며, 시간 누적 대기권밖일사량(H_o , W/m²)은 식(6)과 같이 산출된다(Duffie and Beckman, 2013).

여기서, G_{SC} 는 태양상수(1,367 W/m²), yd 는 1월 1일부터의 연중일 수, ϕ 는 십진수로 표기된 관측지점의 위도, δ 는 태양적위, $\omega_2 - \omega_1$ 은 추정하고자 하는 시간대의 시간각 차이를 의미한다.

3.4. 계통오차 보정모델

본 연구에서의 계통오차는 추정체감온도와 참조체감온도의 차이를 의미하며, 기상청 추정체감온도와 참조체감온도의 차이를 계통오차($Error_{std}$)로 하였다(식 7). 그 외 흑구추정체감온도의 오차는 비교오차로 고려하였다. 각각의 오차에 대한 방향은 과대 추정인 경우 양(+), 과소 추정인 경우 음(-)의 값으로 표현된다.

계통오차 보정모델 개발을 위해 MOS의 핵심 개념을 차용하였다. 식(8)은 기준오차와 대기권밖일사량의 함수적 관계로부터 유도한 오차보정항을 식(1)에 가산한 오차보정체감온도(FT_{ER}) 모델이다. 이러한 절차는 MOS 방식의 단순성과 통계적 안정성을 유지하면서 본 연구의 핵심 변수인 대기권밖일사량을 반영하여 현장 적용성과 이론적 타당성을 동시에 확보한 점에서 의의가 있다.

Table 1은 흑구추정모델과 계통오차 보정모델 개발을 위해 사용된 변수의 요약 통계량을 나타낸다. 대기권밖일사량의 경우, 일출과 일몰이 동일 시간대에 나타나는 혼합효과를 고려하기 위해 이론적으로 산출되는 시간각의 차이에 의해 반영된 수평선 아래에 해당하는 음의 값을 보정 없이 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 계통오차 경향

본 연구에서 확인된 체감온도 추정식의 계통오차는 일 변화 주기와 밀접하게 연관된 뚜렷한 경향을 보였다(Fig. 2). 연구 대상지 모두에서 낮 시간대에는 추정식이 직달일사(Direct solar radiation)의 직접적인 영향을 충분히 반영하지 못해 FT_{WBGT} 대비 FT_{KMA} 가 일관되게 과소 추정되었다. 이는 태양복사에 의해 흑구온도가 크게 상승하는 반면, 추정식은 기온과 상대습도의 경험적 보정만을 사용하기 때문에 발생하는 구조적 한계로 해석된다. 반대로 야간에는 복사냉각으로 인해 흑구온도가 급격히 낮아지지만, 추정식은 이를 반영하지 못해 체감온도가 실제보다 높게 산출되는 과대 추정을 보였다. 특히 일출과 일몰 시점에서는 태양복사의 급격한 증감과 열 지연(Thermal lag)효과가 동시에 작용하여, 계통오차의 방향이 양에서 음으로 혹은 그 반대로

전환되는 특성이 두드러졌다. 이러한 결과는 경험식 기반 FT_{KMA} 가 시간대별 복사환경 변화를 정량적으로 반영하지 못하는 구조적 한계를 지니고 있음을 보여주며, 대기복사 관련 변수가 오차 개선에 활용될 수 있음을 시사한다.

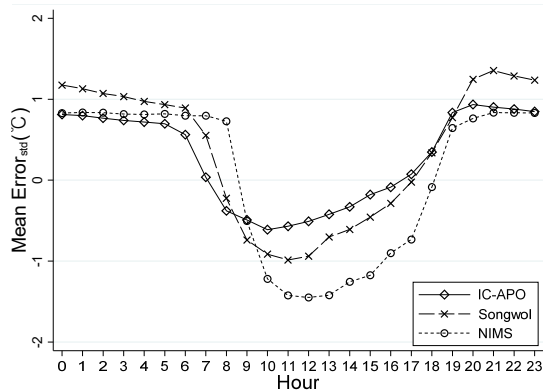


Fig. 2. Patterns of systematic errors over time at globe temperature observation stations.

한편, 이러한 계통오차의 일 변화 패턴은 지점별 환경 특성에 따라 범위를 달리한다. 연안 아열대 기후 특성을 가진 과학원 지점은 정오 전·후에 -1.5°C 정도까지 하강하여 가장 큰 과소 추정 경향을 보인 반면, 해안가의 개방된 지형의 특성을 가진 인천공항 지점은 -0.6°C 수준으로 상대적으로 완만한 오차 분포를 나타냈다. 도시 내륙에 위치한 송월동 지점은 두 지점의 중간 수준을 유지하였다. 이러한 차이는 관측지점의 국지적 특성이 반영된 것으로 이해된다. 상대적으로 기류의 흐름이 원활한 지점은 흑구 표면의 대류 열전달 (Convective heat transfer)이 활발하게 일어나 태양 복사에 의한 가열 효과가 일부 상쇄되고, 상대적으로 도시 환경 특성이나 지역적 대기 정체 빈도 등의 조건에 따라 일사 가열 효과가 흑구온도 상승으로 직결되어 과소 추정 경향이 강화되는 것으로 판단된다.

4.2. 계통오차에 영향을 미치는 기상변수의 영향

주요 기상변수들의 조건을 10분위수로 구분하여 가조시간($\theta_z < 90^{\circ}$)의 체감온도 추정식에 대한 오차의 분포 변화를 시각적으로 탐색하고, 이를 통계적으로 정량화하였다. Fig. 3은 체감온도 추정식의 오차가 단순히

무작위로 발생하는 것이 아니라 기상변수에 따른 체계적인 경향성이 있음을 나타낸다. 특히, 일사 조건과 관련된 변수인 흑구온도, 일사량, 대기권밖일사량은 중앙값의 변화가 저분위수 구간에서는 0°C 보다 약간 위에 위치해 미미한 과대 추정 경향을 보이지만, 일사 조건이 강한 고분위수로 갈수록 0°C 아래로 뚜렷하게 이동하여 과소 추정 경향이 강화된다. 이는 FT_{KMA} 가 가조시간의 일사 조건에 따라 과대 추정에서 과소 추정 체제로 작동하는 체계적 편향을 가지고 있음을 나타낸다. 반면, 기온은 분위수가 증가해도 오차의 과소 추정 경향이 뚜렷하지 않았다. 이는 기온이 이미 추정체감온도 산출식의 주요 요소로 반영되어 기준오차를 유발하는 독립적 요인으로 작용하지 않기 때문으로 해석된다.

추정 모델이 가지는 오류의 위험성은 최악의 경우 어떤 방향으로 얼마나 크게 오차가 발생하는지로 평가할 수 있다. 일사량의 고분위수(8~10분위) 구간을 보면 오차의 중앙값은 지역별로 약 -0.5°C , 약 -1°C , 약 -2°C 근처에 있지만, 상자 하단의 이상치들은 약 -2°C , 약 -2.5°C , 약 -3°C 주변의 훨씬 낮은 값까지 분포한다. 반면 상단으로의 오차는 거의 확장되지 않는다. 이는 일사량이 강한 가조시간에서 FT_{KMA} 의 성능은 때때로 -2°C 가 넘는 심각한 과소 추정 오류를 일으킬 위험이 있음을 의미한다. 즉, FT_{KMA} 은 강한 일사 조건 아래에서 실제보다 낮은 온도를 추정하는 방향으로 치우치는 비대칭적 경향을 내포하고 있음을 나타낸다.

지점별로 살펴보면, 인천공항은 타 지점과 달리 일사량 고분위수 구간에서 과소 추정 경향이 더 이상 강화되지 않고 정체되는 특성을 보인다. 이는 인천공항이 해안가의 개방된 활주로나는 지리적 특성상 상대적으로 연속적인 바람이 동반되는 특성에 기인한 것으로 판단된다. 바람은 흑구에 가해지는 복사열을 대류를 통해 냉각시키는 효과가 있어, 높은 일사 조건에서도 모델의 과소 추정 폭을 일정 부분 상쇄시킨 것으로 이해할 수 있다 (Teitelbaum et al., 2020).

Table 2는 기준오차와 기상변수 간의 상관계수(r), 회귀계수(Slope), 모형적합도(R^2)를 나타낸다. 가조시간 동안 발생하는 기준오차를 설명하는데 있어 변수별로 차이가 존재함을 나타낸다. 관측 일사량은 모든 지점에서 다른 변수들보다 일관되게 가장 높은 설명력을 보였다. 상관계수는 모든 지점에서 강한 음의 상관을 보여 -0.5 (IC-APO), -0.79 (Songwol), -0.91 (NIMS)로

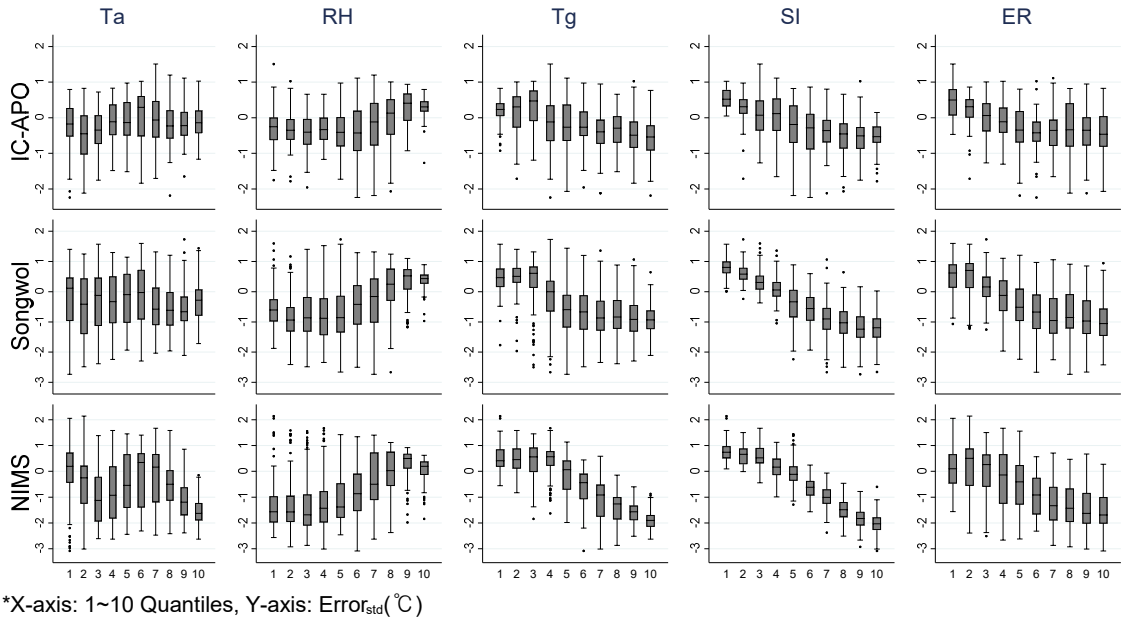


Fig. 3. Comparison of quantile-based error patterns for Ta (Air Temperature), RH (Relative Humidity), Tg (Globe Temperature), SI (Solar Insolation), and ER (Extraterrestrial Radiation) across study sites (IC-APO, Songwol, and NIMS) during daytime hours of the validation period. The x-axis represents quantile segments, and the y-axis indicates error ($^{\circ}\text{C}$).

Table 2. Statistical relationships between variables and model error ($Error_{std}$): Correlation and linear trend analysis by station

Station	Variable	r	Slope	R ²
IC-APO	Air temperature	0.1419	0.0297	0.0174
	Relative humidity	0.2528	0.0638	0.0802
	Globe temperature	-0.4065	-0.0900	0.1601
	Solar insolation	-0.4953	-0.1194	0.2821
	Extraterrestrial radiation	-0.4564	-0.0887	0.1556
Songwol	Air temperature	-0.0495	-0.0137	0.0020
	Relative humidity	0.4318	0.1375	0.2069
	Globe temperature	-0.6015	-0.1806	0.3572
	Solar insolation	-0.7948	-0.2472	0.6724
	Extraterrestrial radiation	-0.5948	-0.1723	0.3262
NIMS	Air temperature	-0.2998	-0.1010	0.0835
	Relative humidity	0.5138	0.2098	0.3004
	Globe temperature	-0.8158	-0.2964	0.6520
	Solar insolation	-0.9053	-0.3441	0.8318
	Extraterrestrial radiation	-0.5579	-0.2095	0.3036

나타났으며, 모형적합도는 0.28~0.83으로 기준오차 변동의 28.2~83.2%를 설명하였다($p < 0.001$). 특히 NIMS에서는 일사량이 기준오차의 83% 이상을 설명해 거의 결정적 요인으로 작용함이 확인되었다. 대기권밖 일사량은 관측 일사량보다는 낮지만, 모든 지점에서 기준오차와 강한 음의 상관관계(-0.46~-0.59)를 보이며 통계적으로 유의미한 설명력(0.16~0.33)을 유지하였다. 이는 대기권밖일사량을 활용해 추가적인 관측 요소가 없어도 기준오차의 변동을 16.0~32.6%를 설명할 수 있음을 의미해, 실용적 관점에서 유의미하다 볼 수 있다.

이에 비해, 기온과 상대습도의 설명력은 상대적으로 낮게 나타났다. 상대습도는 일사 관련 변수와는 반대로 양의 상관관계를 보이며 중간 수준의 설명력을 나타냈고, 기온은 지점별로 상관성의 방향이 일관되지 않고 설명력이 매우 낮아(0.002~0.08), 기준오차를 설명하는 독립적인 영향력이 가장 미미한 것으로 나타났다. 결과적으로 기준오차는 일사 관련 요인에 의해 많은 영향을 받으며 상대습도가 부차적인 역할을 하고 기온의 영향은 거의 없음을 보여준다. 따라서 FT_{KMA} 에 대한 보정모델은 일사 관련 변수를 고려하여야 하며, 추가 관측 요소 없는 대기권밖일사량의 활용은 합리적인 대안으로 적용될 수 있다.

4.3. 계통오차 보정모델 성능

앞서 확인된 FT_{KMA} 의 구조적 한계의 개선 성능을 확인하기 위해 일사량을 포함한 추정식을 검토하였다. 또한 인천공항의 사례를 대상으로 한 대기권밖일사량을 활용한 오차보정체감온도($FT_{ER_{IC}}$)를 개발해 성능을 비교 분석하였다(식 9). 기준오차에 대한 오차보정모델의 모형적합도는 0.58이며 회귀계수는 통계적으로 유의하다($p < 0.001$). 가조시간에는 대기권밖일사량에 의한 회귀계수로 종속변수가 보정되고, 야간시간대에는 독립변수의 효과가 "0"으로 수렴하여 상수항(Intercept)에 의해 종속변수 값이 결정되는 형태로 해석할 수 있다.

$$FT_{ER_{IC}} = FT_{KMA} + 0.00121H_o - 0.77763 \dots \dots \dots (9)$$

기준오차 대비 비교오차에 대한 효과 검증을 위해

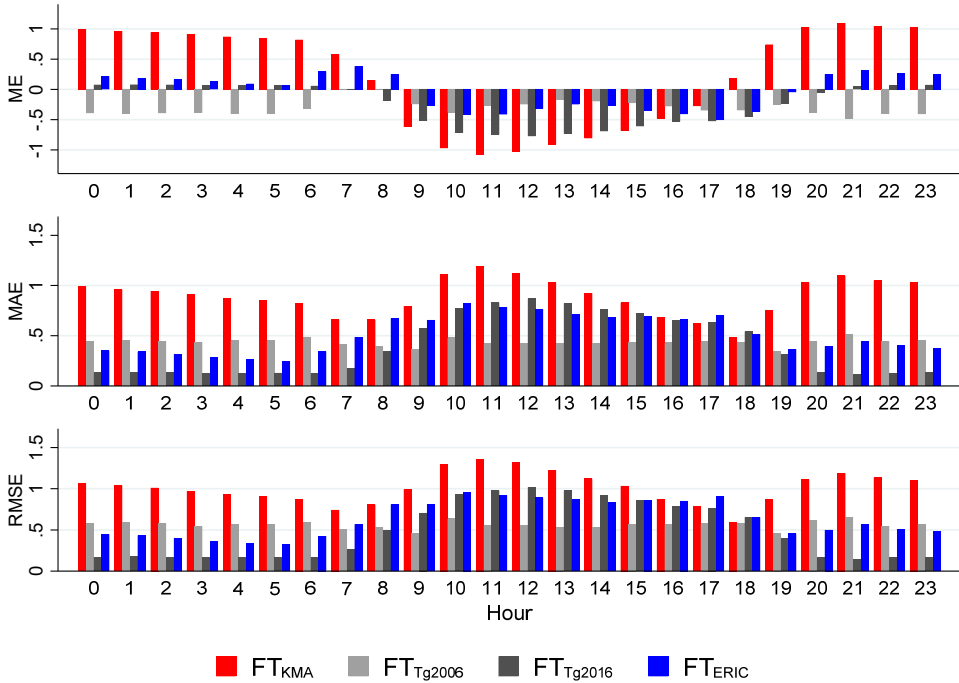
FT_{WBG_T} 와 각 모델 간의 상관계수, 평균오차(ME), 평균절대오차(MAE), 평균제곱근오차(RMSE)를 검증 기간 내에서 전 시간대와 가조시간을 구분하여 검토하였다(Table 3). 모든 모형은 모든 기간 구분에서 관측치와 매우 높은 상관관계($r > 0.98$)를 보였다. 이는 제시된 모형들이 전반적으로 관측값의 변동성을 잘 재현하고 있음을 의미한다. 그러나 ME에서는 모형별 차이가 뚜렷하게 나타났다. FT_{KMA} 는 검증 기간 전체에서 평균 0.23℃의 오차를 보여 관측값을 다소 과대 추정하는 경향을 보였으며, 그 외 모델은 평균 -0.36 ~ -0.03℃로 과소 추정하는 특징을 나타냈다. 특히 가조시간에는 대부분의 모형에서 음의 오차(-0.40 ~ -0.17℃)를 보였는데, 이는 낮 시간 동안에 체계적인 과소 추정이 발생함을 시사한다.

MAE와 RMSE는 검증 기간 전체의 평균을 기준으로 각각 0.37 ~ 0.84℃, 0.54 ~ 0.97℃ 범위에 분포하였다. 가조시간의 MAE는 0.46 ~ 0.79℃, RMSE는 0.58 ~ 0.96℃로 나타나 전체 기간과 유사한 수준을 유지하였다. 모형 간 비교 결과, $FT_{ER_{IC}}$ (MAE: 0.48℃, RMSE: 0.63℃)와 FT_{Tg2006} (MAE: 0.49℃, RMSE: 0.62℃)은 상대적으로 작은 오차를 보여 안정적인 성능을 나타내는 반면, FT_{KMA} (MAE: 0.84℃, RMSE: 0.97℃)는 다소 큰 오차로 인해 정확도가 낮았다. FT_{Tg2016} 는 검증 기간에서 가장 낮은 MAE(0.37℃)와 RMSE(0.54℃)값을 보여 다른 모형에 비해 가장 우수한 성능을 보였다. 이러한 결과는 FT_{KMA} 에서 관찰된 낮 시간대의 과소 추정 문제가 일사 조건을 고려한 모형들에서 상당히 개선될 수 있음을 보여준다.

체감온도 추정 모델들의 성능을 시간대별로 상세히 비교하기 위해 검증 기간 동안 시간대별 평균 ME, MAE, RMSE를 산출하였다(Fig. 4). 이를 통해 각 모델의 성능이 일 주기에 따라 어떻게 변화하는지, 그리고 대기권밖일사량 기반 보정이 어느 시간대에서 가장 효과적인지를 파악하였다. ME는 모델의 계통오차의 경향을 나타내는 지표로 시간대별 변화가 뚜렷하게 관찰되었다. FT_{KMA} (최대: 1.10℃, 최소: -1.08℃)에 비해 FT_{Tg2006} (최대: 0℃, 최소: -0.48℃), FT_{Tg2016} (최대: 0.08℃, 최소: -0.77℃)에서도 시간대별 개선 효과가 보였으나, $FT_{ER_{IC}}$ (최대: 0.38℃, 최소: -0.51℃)의 평균이 가장 작게(-0.03℃) 나타나 대기권밖일사량

Table 3. Model performance metrics(N, r, ME, MAE, RMSE) across the entire validation period and daytime hours ($\theta_z < 90^\circ$)

Model	Station	Entire validation period					Daytime hours within the validation period				
		N	r	ME	MAE	RMSE	N	r	ME	MAE	RMSE
FT_{KMA}	IC-APO	1,128	0.9898	0.30	0.67	0.77	582	0.9913	-0.18	0.54	0.67
	Songwol	3,672	0.9812	0.34	0.93	1.06	1918	0.9843	-0.36	0.78	0.94
	NIMS	3,672	0.9798	0.04	0.93	1.09	1909	0.9786	-0.67	1.06	1.27
	Mean	-	0.9836	0.23	0.84	0.97	-	0.9848	-0.40	0.79	0.96
FT_{Tg2006}	IC-APO	1,128	0.9901	-0.48	0.61	0.84	582	0.9920	-0.32	0.50	0.70
	Songwol	3,672	0.9979	-0.09	0.29	0.36	1918	0.9978	0.01	0.28	0.34
	NIMS	3,672	0.9977	-0.51	0.56	0.65	1909	0.9965	-0.50	0.59	0.70
	Mean	-	0.9952	-0.36	0.49	0.62	-	0.9954	-0.27	0.46	0.58
FT_{Tg2016}	IC-APO	1,128	0.9970	0.03	0.27	0.38	582	0.9954	0.01	0.35	0.46
	Songwol	3,672	0.9963	-0.27	0.38	0.55	1918	0.9952	-0.53	0.58	0.72
	NIMS	3,672	0.9947	-0.35	0.46	0.70	1909	0.9925	-0.69	0.77	0.96
	Mean	-	0.9960	-0.20	0.37	0.54	-	0.9944	-0.40	0.57	0.72
FT_{ERIC}	IC-APO	1,128	0.9957	0.05	0.36	0.48	582	0.9928	0.06	0.47	0.60
	Songwol	3,672	0.9927	0.09	0.51	0.63	1918	0.9898	-0.13	0.59	0.72
	NIMS	3,672	0.9907	-0.22	0.57	0.77	1909	0.9846	-0.43	0.85	1.01
	Mean	-	0.9930	-0.03	0.48	0.63	-	0.9891	-0.17	0.64	0.78

**Fig. 4.** Comparison of mean error (ME), mean absolute error (MAE), and root mean square error (RMSE) by time for study sites (IC-APO, Songwol, and NIMS). Bars represent hourly average values of performance metrics during the validation period.

기반 보정이 일 주기 변화에 효과적으로 대응하는 것으로 보인다.

일사량이 최대인 정오 전·후 시간대(11~15시)에서 모델별 성능 차이는 더욱 분명히 나타났다. FT_{KMA} 의 ME는 -0.68°C 에서 -1.08°C 에 달하는 과소 추정 경향을 보이며, MAE와 RMSE의 평균도 각각 1.02°C , 1.21°C 로 하루 중 가장 높은 수준을 기록한다. FT_{Tg2016} 은 ME가 -0.61°C 에서 -0.77°C 로 FT_{KMA} 보다는 개선되었으나, 비교적 상당한 과소 추정 경향이 존재한다. 평균적인 MAE와 RMSE는 각각 0.80°C , 0.95°C 수준으로 다른 비교 모델들에 비해 정확도가 낮다. FT_{Tg2006} 은 평균 ME, MAE, RMSE가 각각 -0.22°C , 0.42°C , 0.55°C 수준으로 네 모델 중 가장 낮아 높은 정확도를 유지하였다. FT_{ERIC} 의 ME는 -0.25°C 에서 -0.41°C 수준으로 FT_{Tg2016} 보다 낮은 오차를 보이며, 평균 MAE, RMSE도 각각 0.73°C , 0.87°C 수준으로 FT_{KMA} 대비 개선된 성능을 나타낸다. 더불어 오차의 변동성을 나타내는 RMSE와 MAE의 차이는 FT_{KMA} 는 0.2°C 내외의 차이를 보이는 반면, 나머지 비교 모델은 $0.13\sim 0.15^{\circ}\text{C}$ 수준으로 작아져 극단적 오차 발생이 효과적으로 억제될 수 있음을 알 수 있다. 결론적으로 일사량이 최대인 정오 전·후 시간대는 FT_{KMA} 의 취약점이 가장 두드러지는 구간이며, 일사 조건을 고려한 추정식은 동일한 조건에서 편향성과 오차 변동성을 효과적으로 제어하여 안정적인 추정 성능을 제공할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구는 국내에서 활용되는 체감온도 추정 방식이 갖는 구조적 한계, 특히 일사 효과 미반영으로 인한 계통오차를 진단하고 개선하기 위한 목적으로 수행되었다. 이를 위해 2024년 5월에서 9월 동안 인천공항, 서울 송월동, 제주 서귀포에 위치한 기상관측지점에서 비정규관측요소인 흑구온도를 관측하여 흑구관측(참조) 체감온도를 수집하였다. 추가 관측장비 없이 산출 가능한 대기권밖일사량을 활용해 계통오차를 보정하는 방법론을 제안하고, 그 성능을 다각도로 검증하였다. 주요 연구 결과 및 시사점은 다음과 같다.

첫째, 현재의 추정체감온도는 시간대별로 뚜렷한 계통오차 경향을 보였다. 낮 시간대에는 태양복사 효과를 반영하지 못해 참조체감온도 대비 과소 추정하고, 야간에는 복사냉각 효과를 반영하지 못해 과대 추정하는 경향이 나타났다. 특히 기상변수를 분위수로 구분하여 분석한 결과, 일사량이 많은 조건에서 과소 추정(-2°C 이상)의 비대칭적 위험이 크게 증가함을 확인하였다. 이는 추정체감온도가 복사환경 변화를 정량적으로 반영하지 못하는 구조적 한계를 지남을 명확히 보여준다. 둘째, 낮 시간 동안의 계통오차를 설명하는데 일사 관련 변수(일사량, 흑구온도, 대기권밖일사량)의 영향력이 크게 나타났다. 관측 일사량이 통계적으로 우수한 설명력(최대 $R^2=0.83$)을 보였고, 대기권밖일사량 또한 모든 지점에서 계통오차와 유의미한 상관관계($r=-0.46\sim -0.59$) 및 설명력($R^2=0.16\sim 0.33$)을 유지하여, 관측 일사량의 핵심 경향성을 대변할 수 있는 실용적인 대안 변수로서의 가능성을 확인하였다. 반면, 기온과 상대습도의 독립적인 설명력은 상대적으로 미미했다. 셋째, 대기권밖일사량을 활용하여 개발된 오차보정체감온도 모델은 추정체감온도 대비 뚜렷한 개선 효과를 보였다. 검증 기간 전체 평균 RMSE는 0.97°C 에서 0.63°C 로 약 35.6% 감소했으며, MAE는 0.84°C 에서 0.48°C 로 약 43.2% 감소하였다. 특히, 평균 ME는 -0.03°C 로 모든 모델 중 가장 우수한 성능을 나타냈다. 일사량이 최대인 정오 전·후 시간대에서 오차 보정체감온도는 추정체감온도 대비 ME의 변동 폭을 0.58°C 정도 줄이고, RMSE와 MAE의 차이를 줄여 극단적 오차 발생 가능성을 낮추는 등 추정 안정성을 확보하였다. 비록 일사량 관측값을 직접 사용하는 추정 모델들이 일부 지표에서 더 나은 성능을 보이기도 하지만, 오차보정체감온도 모델은 추가 관측 요소 없이 이에 준하는 개선 효과를 달성했다는 점에서 중요한 의미를 가진다. 본 연구의 결과는 대기권밖일사량이 국내 추정체감온도 모델의 구조적 계통오차를 효과적으로 보정할 수 있는 실용적이고 강력한 대안 변수임을 보여주며, 향후 폭염 대응체계의 고도화를 위한 기반 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

추가적으로 연구 결과의 실용적 의미를 부여하기 위해서는 실제 복사환경을 온전히 반영하지 않는 이론적 변수에 대해 대기환경 조건의 구분 등을 통한 개선 효과의 측정과 개발 지역 특성에 따른 지역 의존성에 대한 분석이 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 기상청 국립기상과학원 「생명기상 및 농업기상 기술개발」(KMA2018-00626)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, Y., Uejio, C. K., Rennie, J., Schmit, L., 2022, Verifying experimental wet bulb globe temperature hindcasts across the United States, *GeoHealth*, 6, e2021GH000527.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998, Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome.
- Barriopedro, D., García-Herrera, R., Ordóñez, C., Miralles, D. G., Salcedo-Sanz, S., 2023, Heat waves: Physical understanding and scientific challenges, *Reviews of Geophysics*, 61, e2022RG000780.
- Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., Tinz, B., 2012, Comparison of UTCI to selected thermal indices, *Int. J. Biometeorol.*, 56, 515-535.
- Buzan, J. R., 2024, Implementation and evaluation of wet bulb globe temperature within non-urban environments in the community land model version 5, *J. Adv. Model Earth Syst.*, 16, e2023MS003704.
- Cho, D., Yoo, C., Im, J., Cha, D.-H., 2020, Comparative assessment of various machine learning-based bias correction methods for numerical weather prediction model forecasts of extreme air temperatures in urban areas, *Earth and Space Science*, 7, e2019EA000740.
- Clark, J., Konrad, C. E., Grundstein, A., 2024, The development and accuracy assessment of wet bulb globe temperature forecasts, *Wea. Forecasting*, 39, 403-419.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013, *Solar engineering of thermal process*, John Wiley & Sons, New Jersey, 3-42.
- Glahn, H. R., Lowry, D. A., 1972, The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 11(8), 1203-1211.
- Höppe, P. R., 1993, Heat balance modelling. *Experientia*, 49, 741-746.
- IPCC, 2023, *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, IPCC, Geneva, Switzerland.
- Iqbal, M., 1983, *An Introduction to solar radiation*, Academic Press, Ontario.
- ISO, 1989, ISO 7243: Hot environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature), International Organization for Standardization, Geneva.
- Kong, Q., Huber, M., 2022, Explicit calculations of wet-bulb globe temperature compared with approximations and why it matters for labor productivity, *Earth's Future*, 10, e2021EF002334.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2006, Development of calculation technology for industrial meteorological information in health field - Development of prediction method for Korean activity index, Report, KWEATHER, Seoul.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2016, Development of information for life-weather and improvement of its service in 2016, Report, TheEAST, Seoul.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2023, Feel temperature based heatwave warning protecting public health in Summer, Press release.
- Lee, J.-S., Kim, K. R., Cho, C., Kang, M., Ha, J.-C., Kim, D. S., 2019, Evaluating the accuracies of the WBGT estimation models and their onsite applicability in Korea, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 19(4), 53-63.
- Lemke, B., Kjellstrom, T., 2012, Calculating workplace WBGT from meteorological data: A tool for climate change assessment, *Ind. Health*, 50(4), 267-278.
- MOE (Ministry of Environment), 2006, About the heat index (WBGT), https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt_detail.php
- Ono, M., Tonouchi, M., 2014, Estimation of wet-bulb globe temperature using generally measured meteorological indices, *Jpn. J. Biometeorol.*, 50(4), 147-157.
- Prescott, J. A., 1940, Evaporation from a water surface in relation to solar radiation, *Roy. Soc. S. Aust.*, 64, 114-118.
- Rasp, S., Lerch, S., 2018, Neural networks for postprocessing ensemble weather forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, 146(11), 3885-3900.
- Stull, R., 2011, Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50(11), 2267-2269.
- Teitelbaum, E., Chen, K. W., Meggers, F., Guo, H., Houchois, N., Pantelic, J., Rysanek, A., 2020, Globe thermometer free convection error potentials, *Sci. Rep.*, 10(2652).

- Vicedo-Cabrera, A. M., Scovronick, N., Sera, F., Royé, D., Schneider, R., Tobias, A., Astrom, C., Guo, Y., Honda, Y., Hondula, D. M., Abrutzky, R., Tong, S., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Correa, P. M., Ortega, N. V., Kan, H., Osorio, S., Kyselý, J., Urban, A., Orru, H., Indermitte, E., Jaakkola, J. J. K., Rytí, N., Pascal, M., Schneider, A., Katsouyanni, K., Samoli, E., Mayvaneh, F., Entezari, A., Goodman, P., Zeka, A., Michelozzi, P., de' Donato, F., Hashizume, M., Alahmad, B., Diaz, M. H., De La Cruz Valencia, C., Overcenco, A., Houthuijs, D., Ameling, C., Rao, S., Ruscio, F. D., Carrasco-Escobar, G., Seposo, X., Silva, S., Madureira, J., Holobaca, I. H., Fratianni, S., Acquotta, F., Kim, H., Lee, W., Iniguez, C., Forsberg, B., Ragettli, M. S., Guo, Y. L. L., Chen, B. Y., Li, S., Armstrong, B., Aleman, A., Zanobetti, A., Schwartz, J., Dang, T. N., Dung, D. V., Gillett, N., Haines, A., Mengel, M., Huber, V., Gasparrini, A., 2021, The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nat. Clim. Chang.*, 11(6), 492-500.
- Wang, C., Li, Z., Chen, Y., Li, Y., Ouyang, L., Zhu, J., Sun, F., Song, S., Li, H., 2024, Changes in global heatwave risk and its drivers over one century, *Earth's Future*, 12, e2024EF004430.
- WHO (World Health Organization), 2024, Heat and health, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health>
- Yaglou, C. P., Minard, D., 1957, Control of heat casualties at military training centers, *Arch. Ind. Health*, 16(4), 302-316.
-
- Senior researcher. Geon-Hu Kim
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences
ghkim3284@korea.kr
 - Senior scientist. Kyu Rang Kim
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences
krk9@korea.kr