



## 폭염 시 건물 외부공간의 온열환경 평가를 위한 지표의 수정회귀식에 대한 연구

*For the Evaluation of Thermal Environmental Indices in Outdoor Spaces during Heatwaves - A Modified Regression Equation Study -*

정주희\* · 오병철\*\*

Ju Hee Jeong\* · Byoung Chull Oh\*\*

\* Research Fellow, R&D Bureau, Gwangju Climate and Energy Agency, Gwangju, South Korea (aru@gcea.or.kr)

\*\* Corresponding author, Chief, R&D Bureau, Gwangju Climate and Energy Agency, Gwangju, South Korea (obc9999@gmail.com)

### ABSTRACT

**Purpose:** PMV and UTCI are key indices encompassing all major factors for assessing human thermal comfort. However, due to the complexity of calculations and significant errors arising from the inclusion of all these factors, there is a need for research on simpler indices that can be more easily applied. Therefore, in this study, we propose a modified formula for analyzing and evaluating thermal comfort in outdoor spaces during heatwaves, based on data collected in actual outdoor environments. **Method:** Employing the Stepwise method in multiple regression analysis, we analyzed existing PMV and UTCI to derive a modified regression model. Temperature (Ta), radiant temperature (Tr), relative humidity (RH), metabolic rate (Met), and clothing insulation (Clo) were used as variables. **Result:** The PMV equation demonstrated 99.3% explanatory power, while the UTCI equation showed 99.7%. The significance of deriving these formulas lies in the fact that they are based on data collected from outdoor environments rather than theoretical values. Especially considering the high accuracy but challenging usability of PMV and UTCI as evaluation metrics, once the reliability of the modified regression equations is confirmed, they are expected to be widely utilized in future research.

### KEYWORD

예상평균온열감  
범용열기후지수  
온열환경평가지수  
중회귀분석

Universal Thermal Climate Index  
Predicted Mean Vote  
Thermal Environmental Evaluation Index  
Multiple Regression

### ACCEPTANCE INFO

Received Dec. 25, 2023  
Final revision received Jan. 9, 2024  
Accepted Jan. 15, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

기후변화로 인해 전 세계적으로 폭염 현상이 가속화되고 있다. 폭염은 인간의 건강, 생활, 그리고 경제에 심각한 영향을 미치고 있으며, 그 결과 사람들의 삶의 질이 저하되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 도시의 외부공간에는 그린인프라 기술을 포함하는 다양한 자연기반해법(NBS: Nature Based Solutions)이 도입되고 있으나[1], 그 효과에 대한 객관적인 평가 및 검증은 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이와 함께 폭염대응을 위한 자연기반해법이 사람들에게 미치는 영향을 평가하고 그 효과를 측정할 수 있는 기준도 명확하지 않은 상황이다.

온열환경에 대하여 인체가 느끼는 평가에 대해서는 인종, 성별, 문화 등 여러 요소가 영향을 미친다. 여기에 개개인의 대사량, 환경 조건 등의 차이와 특성을 각각 고려하여 평가하는 것도 한계가 있다. 이러한 특성 때문에 온열환경에 대한 평가는 사람들에게 보편적으로 적용할 수 있는 지표를 이용하여 수행되는 것이 일반적이다.

온열환경을 조성하는 공간은 큰틀에서 건물내부인 실내 공간과 건물 외부인 실외 공간으로 구분할 수 있다. 온열환경을 평가하는 지표는 단순하게 기온이나 상대습도만을 고려하는 것부터 기온, 상대습도, 복사온도, 기류, 착의량, 대사량 등을 모두 고려한 복합요소로 구성된 지표도 확인할 수 있다. 후자의 대표적인 지표가 예상평균온

열감(Predicted Mean Vote; 이하 PMV)이다. 그 밖에도 유효온도(Effective Temperature; ET), 신유효온도(New Effective Temperature; ET\*), 표준유효온도(Standard Effective Temperature; SET), 신표준유효온도(New Standard Effective Temperature; SET\*) 등도 확인할 수 있다.

그러나 이러한 지표는 대부분 실내 공간에서의 온열환경을 평가하는 데 사용하는 지표로 개발되었다. 실내 온열환경 평가지표가 대부분인 까닭은 하루 중 사람이 건물 실내에서 활동하는 시간이 건물 외부에서 활동하는 시간보다 훨씬 많기 때문으로 추정된다. 그렇기에 사람이 실내에 쾌적한 상태로 재실할 수 있는 환경을 만들기 위한 다양한 평가 방법들이 개발되고 발전해 온 것으로 판단된다. 반면 외부공간을 대상으로 한 온열환경 평가지표가 많지 않은 이유는 실외 공간의 경우 온열환경 구성과 관련된 요소가 다양하고 해당 요소들 간의 상관관계를 규명하기 어려운 점이 있다고 생각된다. 즉, 인간의 다양한 활동에 대하여 외부공간에서의 물리적인 특성을 계산하고 예측하기는 매우 어려운 문제로 다루어지고 있다[2].

실외(외부) 공간을 대상으로 사용되는 온열환경 평가지표로는 습구흑구온도(Wet-Bulb Globe Temperature; 이하 WBGT), 범용열기후지수(Universal Thermal Climate Index; 이하 UTCI) 등을 들 수 있다. 그 밖에도 외부공간을 대상으로 한 몇몇 평가지표가 존재하지만, 지표의 개발환경이 매우 춥거나, 더운 극한적인 외부 열환경에서 일하는 작업자를 대상으로 만들어진 것이 대부분으로 나타났다[3].

이에 본 연구에서는 외부 온열환경을 위한 수정회귀식을 만들기

위하여 WBGT, UTCI를 우선 검토하였다. WBGT는 인체가 체감하는 온도를 수치로 표현하는데 흑구온도, 건구온도, 습구온도만을 이용하여 온열 쾌적성을 평가하는 지표이다. 다만 착의량이나 대사량, 풍속 등에 대한 검토는 없다는 한계를 지니고 있다[4]. 그래서 보다 다양한 요소를 담고 있는 UTCI를 활용하였다. UTCI는 외부공간의 특정 기상 조건 하에서 인간 신체의 생리적 편안함을 묘사하기 위한 생물기후학적 지수[5]로 실외 환경 조건을 진단하기에는 용이하지만 계산이 어렵다는 지적이 있다. 여기에 본 연구에서는 PMV를 추가하여 검토하였다. PMV는 실내를 기준으로 고안된 지표이지만, 다양한 요소를 포함하고 있는 지표이며, 임은나 외 4인(2013)[6], 윤용한 외 3인(2014)[6], 김정호 외 2인(2015)[7], 김수영(2019)[8], 송도윤 외 3인(2022)[9], 지은주 외 3인(2023)[10] 등 다수의 연구에서 외부공간의 온열환경을 평가하는 지표로서 활용한 사례가 있어 의미가 있다고 판단하였다.

PMV와 UTCI는 인체가 느끼는 온열감을 평가하기 위한 주요 환경인자, 개인적 요소 등을 모두 포함하여 복합적인 관계를 설명하는 평가지표이다. 그러나 다양한 인자, 요소들이 포함된 만큼 수치계산이 어렵고 산식이 복잡하며, 오차도 발생하기에 더욱 쉽게 적용할 수 있는 지표 연구가 필요하다[12].

이에 본 연구에서는 우리나라 지역 내 외부공간에서 측정 및 조사한 데이터를 바탕으로 폭염 시 외부공간에서의 온열쾌적감을 간단하게 분석 및 평가할 수 있도록 PMV와 UTCI를 활용한 수정식을 제안하고자 한다. 이를 위하여 기존 PMV와 UTCI를 대상으로 다중회귀분석을 활용해 수정회귀모델을 도출하였다. 연구 결과를 통해 폭염 시 외부공간에 대한 온열환경 평가 방법의 다양성을 제시하는 한편, 관련 데이터를 구축하여 추가적인 연구를 위한 기초데이터를 마련하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. PMV의 개요

PMV는 7점으로 평가되는 온열민감도평가(Thermal Sensation Vote: 이하 TSV)를 통해 사람들의 평균 온열감을 예측하는 예측치이다. PMV의 중립상태는 3가지 조건으로 정의된다. 첫 번째는 열평형이 유지되는 상태, 두 번째는 평균피부온도가 적절한 범위 내에 있어야 하며, 세 번째는 피부로부터의 증발열손실이 적절한 범위 내에 있는 것을 조건으로 한다[13]. 두 번째와 세 번째의 조건에 대해서 (Eq. 1)과 같이 계산된다.

$$t_s = 35.7 - 0.028(M - W)$$

$$E_s = 0.42(M - W - 58.15)$$

$$t_s : \text{Average Skin Temperature } [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Eq. 1})$$

$M$  : Metabolic Rate [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$W$  : Mechanical Workload [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$E_s$  : Evaporative Heat Loss from Skin Surface [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

해당식을 통한 인체의 열평형식은 (Eq. 2)와 같다.

$$(M - W) - E_d - E_s - E_{re} - C_{re} = K = R + C$$

$E_d$  : Unperceived Heat Dissipation Through Skin or Airways, Excluding Sweat [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$E_s$  : Evaporative Heat Loss from the Skin [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$E_{re}$  : Sensible Heat Loss Through Respiration [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] (Eq. 2)

$C_{re}$  : Sensible heat Loss Through Exhalation [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$K$  : Sensible Heat Loss Through Clothing [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$R$  : Radiative Heat Loss [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$C$  : Convective Heat Loss [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

PMV는 열적 중립상태로부터의 편차를 인체의 열부하로 정의했으며, (Eq. 3)과 같이 열부하를 계산할 수 있다.

$$L = (M - W) - E_d - E_s - E_{re} - C_{re} - R - C$$

$L$  : Thermal Load on the Human Body (Eq. 3)

PMV를 제안한 Fanger는 인체의 열부하  $L$ 이 변화하면, TSV가 변화한다는 전제하에, 피험자 실험을 통해 산출된 미분방정식을 적분하여 열부하  $L = 0$ 일 때의 TSV를 중립으로 하여 구해진 TSV의 값을 PMV로 하여 (Eq. 4)와 같은 식을 도출했다.

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times (M - W - E_d - E_s - E_{re} - C_{re} - R - C) \quad (\text{Eq. 4})$$

PMV는 온열환경의 6요소를 대입하여 그 조건에서 추위, 더위를 얼마나 느끼는지에 대한 감각량을 수치로써 확인할 수 있다. 그러나 PMV는 재실자 다수의 평균적인 온열감을 나타내는 지표이기 때문에 PMV가 0이 되는 환경조건에서도 온열 만족감이 낮은 사람도 존재할 수 있다[14].

이러한 특징에 대해서는 PMV의 개발과정에서 실제 실험조건을 한정했기 때문으로 사료된다. 상세하자면 피실험자의 대사량을 1/1.6/2.1/2.7 met 등 4단계로만 한계 설정하였으며, 실험결과는 설정과 달리 안정 시(1 met)의 결과가 대부분이었다는 점, 그리고 착의량과 상대습도도 각각 0.6 clo, 50%의 표준화 된 조건에 대하여 테스트 되었다는 점 등이 원인이 될 수 있다. 따라서 기온 이외의 온열환경 요소가 폭넓게 변화되며, 복잡하게 작용되는 외부공간에서는 PMV의 수식을 그대로 활용하는 것에 대해서는 많은 한계에 있어 이에 대한 개선이 필요하다.

### 2.2. UTCI의 개요

UTCI는 PMV와 유사하게 기온, 복사온도, 풍속, 습도의 영향을 모두 통합하여 평가하는 지표이다. UTCI는 사람이 4 km/h의 속도로 걷는 것을 상정하고 대사량 2.3 met, 풍속 0.5 m/s, 상대습도 50%

로 가정하고 있다. 여기에 기온과 평균복사온도가 동일한 환경조건을 표준(기준)상태로 정의하고 있다[11]. UTCI는 등가온도로 표현되는 지표이며, 모델을 통해 실제 환경조건에서의 생리학적 반응을 유도하는 기온을 모델링하여 도출한다. UTCI를 도출하는 모델은 (Eq. 5)와 같이 도출할 수 있다. 식에서의 *Offset*은 UTCI로 나타나는 등가온도와 실제 공기온도 간의 차이를 의미한다.

$$UTCI(T_a, T_r, va, pa) = T_a + Offset(T_a, T_r, va, pa)$$

$T_a$  : Temperature  
 $T_r$  : Mean Radiant Temperature  
 $va$  : Airflow and Atmospheric Pressure  
 $pa$  : Water Vapor Pressure

(Eq. 5)

UTCI는 926개의 참고 데이터를 바탕으로 기온과 평균복사온도를 변수로 두고 기류, 습도 그리고 기압을 범주화하여 시뮬레이션을 통해 도출한 값이다. 그렇기에 전술한 바와 같이 일반적인 지표와 달리 계산이 어렵고 활용하기가 까다롭다는 지적이 있다. PMV와 UTCI는 지표의 정확성을 인정받고 있음에도 불구하고 이들이 가진 한계로 인하여 국내 많은 연구에서는 두 가지 지표 외에도 다양한 온열환경 지표를 활용하고 있다(Table 1.).

PMV와 UTCI가 정확도를 인정받은 유효한 지표임에도 불구하고 다른 온열환경 평가지표가 다수의 연구에 활용된다는 점은 PMV와 UTCI의 활용이 용이하지 않다는 점을 반증하고 있다고 생각된다. 다른 지표들의 특징을 보면 지표가 의외로 간단하게 구성되어 있다는 점을 들 수 있다. 만약 PMV와 UTCI의 산정이 간단해 질 수 있고 더불어 우리나라의 기후특성을 반영하여 수정될 수 있다면 활용성이 높아질 수 있다고 기대된다. 이에 본 연구에서는 여름철 폭염 조건에서 인체가 느끼는 체감을 간단히 평가할 수 있도록 실제 우리나라의 외부공간에서 측정된 데이터를 기반으로 두어 PMV와 UTCI에 대한 수정회귀식을 제안하고자 한다.

### 3. 연구방법

#### 3.1. 조사 방법 및 데이터 구성

PMV와 UTCI의 수정회귀식을 만들기 위하여 폭염 시 외부공간에서 측정과 시민 설문문을 통하여 데이터를 확보하였다. 확보한 전체 데이터는 기온, 기류, 평균복사온도, 상대습도, 착의량, 대사량 등 2,646개이며, 설문과 측정은 2021년~2023년, 6월~9월의 여름철 폭염이 발생하는 청천일 주간의 외부환경에서 진행하였다. 설문 및 측정 장소는 광주광역시와 김해시내 위치한 공원(상무시민공원, 거북공원)등에서 직달일사가 닿는 외부공간을 대상으로 하였으며, 바닥은 콘크리트 보도블록으로 포장된 곳에서 진행하였다. 설문은 구조화된 설문지를 활용하여 온열환경에 대한 개인 지표인 착의량과 대사량에 대하여 진행하였다. 측정은 기온, 상대습도, 복사온도, 기류를 대상으로 측정하였으며, 측정기기는 TESTO400<sup>1)</sup>을 이용하였다.

연도별 데이터는 2021년도에 786개, 2022년도에 1092개, 2023년도에 768개의 데이터를 활용하였다. Table 2.는 연도별 데이터 수

Table 1. Basic information of survey data

Researcher (year)	Index	Utilization Method
Kim S.C. (2008) [15]	WBGT	Development of an estimation equation for black globe temperature in urban areas and its application as a heatwave countermeasure in summer urban areas by proposing the use of WBGT
Kim G.J. (2011) [16]	HI, DI, WBGT	Utilization of HI, DI, WBGT for analyzing changes in urban heat environment due to rooftop, wall, and ground heat absorption in comparison with the conventional urban heat environment
Park S.A. (2016) [17]	DI, WBGT, HI	Utilizing indicators to compare the heat reduction effects of urban parks based on attire.
Lee D.H. et al. (2018) [18]	WBGT, HI	Utilization of WBGT to assess the exposure environment of elderly farmers vulnerable to high temperatures
Kim J.G. (2021) [19]	THI, SAT	For the analysis of temperature reduction and environmental impact of the Fine Mist Spraying Device (Cooling Fog), a comparison through indicators.
Kang J.Y. (2021) [20]	HI	Assessment of the feasibility of utilizing heat index (HI) in heatwave warnings, confirming consistency and predictive accuracy in relation to human casualties

Table 2. Basic information of survey data

Year	Quantity	Average Temperature	Average Relative Humidity	Average Radiant Temperature
2021	786	38.86	44.34	43.61
2022	1,092	36.16	53.07	43.58
2023	768	33.32	53.15	43.54
Total	2,646	36.11	50.19	43.58

Table 3. Descriptive statistical analysis results of the dataset

Category	Max	Min	Mean	Std.
PMV	7.6	1.9	4.0	1.2
UTCI	60.0	30.1	39.5	5.3
Temperature(°C)	43.7	28.4	36.1	4.7
Radiant Temperature(°C)	54.3	30.2	43.6	5.8
Relative Humidity(%)	79.9	29.1	50.2	11.8
Airflow(m/s)	0.26	0	0.0	0.03
Metabolic(met)	1.38	1.34	1.35	0.0
Clothes(clo)	1.0	0.6	0.8	0.1

와 평균 기온, 평균습도, 평균 복사온도에 대해 나타냈다. Table 3.는 분석에 활용한 데이터의 기술통계량(최대, 최소, 평균, 표준편차) 값을 나타내었다.

일반적으로 온열환경 평가 시, 기류(풍속)가 온열감에 미치는 영향은 크다. 그러나 본 연구에서의 측정된 데이터상의 기류는 매우 낮게 나타나 온열감에 미치는 영향을 무시할 수 있는 수준으로 판단할 수 있었다. 또한 대사를 역시 표준편차가 거의 없는 것으로 확인되어 변수로서 유의미성을 갖지 못할 것으로 판단되어 제외하였다. 이러한 내용에 기반을 두어 PMV와 UTCI에 대한 산출식에서 기류 변수를 제외하여 기온(Ta)과 복사온도(Tr), 상대습도(RH), 착의량(Clo)만을 변수로 선정하였다.

### 3.2. 수정회귀식 도출

IBM Documentation Help[21]를 보면, 두 개 이상의 독립변수가 사용되는 다중회귀분석에서는 Method 기능을 이용하여 독립변수의 회귀모형 진입방식에 대한 선택이 가능하며, 설명력이 가장 높은 모형을 결정할 수 있다. 일반적으로 회귀분석의 경우 독립변수가 증가할수록 모형의 설명력이 높아지지만, 다중공선성 등의 문제가 발생하여 신뢰성을 확보하기 어려워진다. 따라서 유효한 독립변수와 불필요한 독립변수를 선별하여 설명력이 가장 높은 회귀식을 도출하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 SPSS 26을 분석에 활용하였으며, 5가지 독립변수 진입방식(진입, 단계선택, 제거, 후진제거, 전진선택) 중 단계선택 방법을 통해 PMV와 UTCI의 수식을 간소화하여 폭염 조건에서의 열쾌적감을 정확하고 쉽게 예측할 수 있는 수식을 도출하고자 하였다.

## 4. 분석결과

### 4.1. 다중회귀분석

단계선택방법(Stepwise)은 전진선택(Feedforward Selection)과 후진제거(Backward Elimination)가 결합된 방식으로 변수의 유의도에 따라 진입과 제거가 결정되며, 확률 F가 충분히 커지게 되면 분석이 종료된다. 종속변수는 PMV와 UTCI이며, 진입/제거에 활용한 변수는 기온(Ta)과 복사온도(Tr), 상대습도(RH), 착의량(Clo)이다. 우선 PMV에 대한 수정회귀식을 도출하기 위한 분석을 수행하였다. 분석 결과, Table 4.에 나타난 것과 Met를 제외한 4개의 변수가 선택되었다. 이때, AP(AU)는 Ta가 PMV(UTCI)에 미치는 영향력을 확인한 모델이며, BP(BU)는 Ta, Tr, CP(CU)는 Ta, Tr, RH 그리고 DP(DU)는 Ta, Tr, RH, Clo를 독립변수로 한 회귀분석 모델이다.

회귀분석에서의 R<sup>2</sup>값은 모형의 설명력으로 이해할 수 있으며 Table 5.에 다중회귀분석 결과를 정리하여 나타내었다. 모형 AP~DP 중 가장 설명력이 높은 모형은 DP로 볼 수 있다. DP의 회귀식의 설명력은 99.3%이며, 해당 수식을 통해 PMV를 간소화하여 계산할 경우 본 수식의 99.3% 수준의 예측이 가능한 것으로 판단된다. DP를 정리하면 (Eq. 6)과 같다. 두 번째로 높은 설명력을 지닌 모형은 CP로 볼 수 있으며, (Eq. 7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{DP} = -5.74 + 0.09Ta + 0.01RH + 0.16Tr - 0.66Clo \quad (\text{Eq. 6})$$

$$Y_{CP} = -6.27 + 0.08Ta + 0.01RH + 0.16Tr \quad (\text{Eq. 7})$$

다음으로 UTCI에 대한 수정회귀식을 도출하기 위한 분석을 수행하였다. 분석 결과, Table 6.에 나타난 것과 같이 4개의 변수가 선택되었다.

Table 7.은 UTCI에 대한 다중회귀분석 결과를 정리하여 나타내었다. 모형 AU~EU 중 가장 설명력이 높은 모형은 CU, DU로 볼 수 있다. CU와 DU의 회귀식의 설명력은 99.7%이며, 해당 수식은 Eq. 8과 Eq. 9에 나타내었다. 두 수식을 통해 UTCI를 간소화하여 계산할

Table 4. Entered / removed variables(regression analysis for PMV)

Model	Entered	Removed	Method
AP	Ta	-	Input
BP	RH	-	Input
CP	Tr	-	Input
DP	Clo	-	Stepwise selection (criteria: enter F probability ≤ 0.05, remove F probability ≥ 0.10)

Table 5. Results of multiple regression analysis on PMV

Model	B	S.E	β	t	p	VIF	
AP	(Const.)	-4.37	0.17		-25.99	.000	
	Ta	0.23	0.00	0.92	50.20	.000	1.00
F = 2,520(p<.000), R <sup>2</sup> = 0.852, Adjusted R <sup>2</sup> = 0.851							
BP	(Const.)	-3.99	0.38		-10.61	.000	
	Ta	0.23	0.01	0.90	31.88	.000	2.35
	RH	0.00	0.00	-0.03	-1.12	.264	2.35
F = 1,261(p<.000), R <sup>2</sup> = 0.852, Adjusted R <sup>2</sup> = 0.851							
CP	(Const.)	-6.27	0.10		-66.00	.000	
	Ta	0.08	0.00	0.34	35.28	.000	4.62
	RH	0.01	0.00	0.13	18.48	.000	2.54
	Tr	0.16	0.00	0.79	83.89	.000	4.45
F = 16,698(p<.000), R <sup>2</sup> = 0.991, Adjusted R <sup>2</sup> = 0.991							
DP	(Const.)	-5.74	0.10		-58.26	.000	
	Ta	0.09	0.00	0.34	40.05	.000	4.63
	RH	0.01	0.00	0.12	19.49	.000	2.57
	Tr	0.16	0.00	0.78	93.11	.000	4.47
	Clo	-0.66	0.06	-0.04	-10.61	.000	1.03
F = 15,752(p<.000), R <sup>2</sup> = 0.993, Adjusted R <sup>2</sup> = 0.993							

Table 6. Entered / removed variables(regression analysis for UTCI)

Model	Entered	Removed	Method
AU	Ta	-	Input
BU	RH	-	Input
CU	Tr	-	Input
DU	Clo	-	Stepwise selection (criteria: enter F probability ≤ 0.05, remove F probability ≥ 0.10)

Table 7. Results of multiple regression analysis on UTCI

Model	B	S.E	$\beta$	t	p	VIF	
AU	(Const.)	0.48	0.51		0.94	.35	
	Ta	1.08	0.01	0.96	77.08	.000	1.00
F = 5,940(p<.000), R <sup>2</sup> = 0.965, Adjusted R <sup>2</sup> = 0.931							
BU	(Const.)	-12.05	0.93		-12.97	.000	
	Ta	1.28	0.02	1.14	73.26	.000	2.35
	RH	0.11	0.01	0.24	15.07	.000	2.35
F = 4,614(p<.000), R <sup>2</sup> = 0.955, Adjusted R <sup>2</sup> = 0.954							
CU	(Const.)	-17.64	0.26		-67.51	.000	
	Ta	0.94	0.01	0.83	141.71	.000	4.62
	RH	0.15	0.00	0.32	74.23	.000	2.54
	Tr	0.40	0.01	0.43	74.78	.000	4.45
F = 44,209(p<.000), R <sup>2</sup> = 0.998, Adjusted R <sup>2</sup> = 0.997							
DU	(Const.)	-17.96	0.30		-59.37	.000	
	Ta	0.93	0.01	0.83	141.91	.000	4.63
	RH	0.15	0.00	0.33	74.31	.000	2.57
	Tr	0.40	0.01	0.43	75.03	.000	4.47
	Clo	0.39	0.19	0.01	2.05	.04	1.03
F = 33,402(p<.000), R <sup>2</sup> = 0.998, Adjusted R <sup>2</sup> = 0.997							

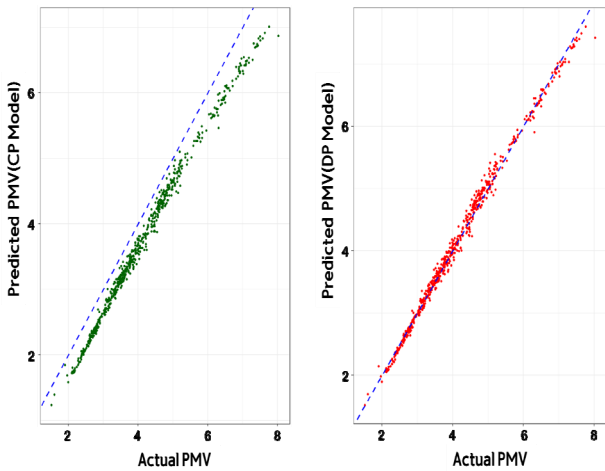


Fig. 1. Review of PMV and the modified regression equation

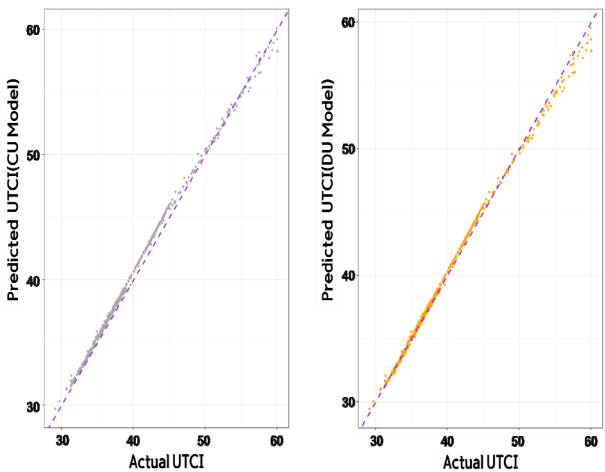


Fig. 2. Review of UTCI and the modified regression equation

경우 본 수식의 99.7% 수준의 예측이 가능한 것으로 이해할 수 있다.

$$Y_{CU} = -17.64 + 0.94Ta + 0.15RH + 0.40Tr \quad (\text{Eq. 8})$$

$$Y_{DU} = -17.96 + 0.93Ta + 0.15RH + 0.40Tr + 0.39Clo \quad (\text{Eq. 9})$$

### 4.2. 회귀분석식 검토

도출된 수정식의 검토를 위해, 분석에 활용한 데이터 외 실제 환경에서 수집한 기온, 상대습도, 복사온도, 기류데이터를 바탕으로 분석을 수행하였다. 착의량의 경우 회귀식을 도출할 때 활용했던 데이터의 평균값을 일정하게 대입하였다. 회귀식의 적정성 검토는 평균제곱근편차(Root Mean Squared Error: 이하 RMSE)분석을 수행하여 검토하였다. RMSE는 예측값과 실제값 간의 차이를 나타내는 지표 중 하나이며, 그 값이 0인 경우 예측이 실제와 완벽하게 일치하는 것을 뜻한다.

PMV의 경우 모형 CP와 DP를 각각 산출하여 확인하였다(Fig. 1.). CP의 RMSE값은 0.4, DP의 RMSE값은 0.1로 확인되었다. PMV의 예측에 있어서는 DP가 더 좋은 예측력을 지닌 수정식이라고 확인되었다. 다음으로 UTCI의 경우 모형 CU와 DU를 각각 산출하여 확인하였다(Fig. 2.). CU의 RMSE값은 0.5, DU의 RMSE값은 0.3으로 확인되었다. UTCI의 예측에 있어서는 DU가 더 좋은 예측력을 지닌 수정식으로 나타났다.

검토결과를 통해 PMV는 외부환경에서 적용하기 어렵다는 점을 수정회귀식을 통해 해소할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 다음으로 UTCI는 거의 유사하게 나타나고 있어 계산이 어렵다는 등의 문제를 해소할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 수정회귀식은 폭염시기에 확보한 데이터에 기반을 두어 고려되었기에 일년 전체를 통해 활용 가능한지에 대한 문제점은 해결해야 할 과제로 남아 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 PMV와 UTCI의 한계를 극복하고 보다 간단히 계산하는 것을 목적으로 여름철 실측 및 설문 데이터를 활용하여 수정회귀식을 도출하였다. 연구를 위해 다중회귀분석에서 제공하는 Method 기능 중 단계선택방법을 이용하여 분석을 수행하였으며, 기온(Ta)과 복사온도(Tr), 상대습도(RH), 대사율(Met), 착의량(Clo)을 변수로 활용하였다.

본 연구를 통해 PMV와 UTCI 모두 기온과 복사온도, 상대습도로 이루어진 수정회귀식만으로도 설명력이 각각 96.1%, 99.7%로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 수정회귀식의 도출은 이론기반의 형태가 아니라 국내에 발생한 폭염시 건물 외부공간에서 설문과 측정을 통해 확보한 데이터를 기반으로 도출했다는 점에서 의미를 지닌다고 생각된다. 또한 수정회귀식에 실제 측정된 다른 데이터를 대입하여 검토한 결과에서도 높은 수준에서 기존 식과 일치하고 있어 PMV와 UTCI식을 간략하게 하여 활용하고자 하는 것에 대한 가능성도 확인할 수 있었다.

다만, 본 연구에서의 수정회귀식은 폭염기간을 한정으로 확보한

데이터를 기반에 두어 작성하고 있어 폭염 이외의 기간에 활용하는 것은 별도의 검토가 필요할 것이다. 하지만 폭염기간에 외부공간을 대상으로 한다면 본 연구에서 제시한 수정회귀식도 활용 가능할 것이다. 또한 본 연구는 특정 폭염시기에 체감조사와 측정을 통해 확보한 데이터만을 가지고 진행하여 수정회귀식을 도출한 것으로 다른 조건에 활용가능한지에 대해서는 다양한 검토가 필요할 것으로 생각된다.

향후 과제로서 건물의 외부공간에서 우리나라 기후특성과 도시의 공간적 특성을 연계하여 다양한 온열환경 조건에서도 활용가능한 온열환경평가지표에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다. 특히, PMV의 경우 실내평가지표로서 최대값과 최소값의 범위가 ±3으로 한정되어 있는데, 본 수정식을 활용하기 위해서는 더위에 대한 온열환경평가범위에 대한 제안이 함께 연구되어야 할 것으로 생각된다. 더불어 폭염 현상이 나타나는 여름 이외의 계절에 대해서도 검토가 필요하여 향후 연구는 이를 다양한 계절에서 사용 가능한지에 대한 추가적인 연구를 계획하고 있다.

### Acknowledgement

이 논문은 행정안전부 도심환경을 고려한 폭염저감기술 최적화 개발연구 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2020-MOIS35-001 / RS-2020-ND629021)

### References

[1] 명수정, 오일찬, 환경위기 대응을 위한 자연기반해법(NbS) 연구, 한국환경연구원, 2021. // (S.J. Myoung, I.C Oh, A study on Nature-based Solutions (NbS) for response to environmental crisis, Ad-hoc Research Report, Korea Environment Institute, 2021.)

[2] 류민경 외 3인, 대류-복사 연성시뮬레이션을 통한 옥외 온열환경 평가 기법, 대한설비공학회 하계학술발표대회논문집, 2009.06, pp.565-572. // (M.K. Ryu et al., Study on assessment of outdoor thermal environment with coupled simulation of convection and radiation, 2009 SAREK Conferences, 2009.06, pp.565-572.)

[3] 기현주, 도시 단위의 외부환경 열 쾌적성 평가 방법에 관한 연구, 성균관대학교 석사학위논문, 2015.02. // (H.J. Ki, A study on evaluation method of the outdoor thermal comfort, Master's Thesis of Sungkyunkwan University, 2015.02.)

[4] 박승환, 학교시설 녹색건축 인증기준의 실외건강지표 개발 및 적용 연구, 건국대학교 석사학위논문, 2014.02. // (S.H. Park, A study on the development and application of the outdoor health indicators of green building certification criteria in school facilities, Master's Thesis of Konkuk University, 2014.02.)

[5] P. Bröde et al., Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI), International Journal of Biometeorology, 56(3), 2012.05, pp.481-494.

[6] 임은나 외 4인, 도시근린공원의 열환경 개선을 위한 열쾌적성 평가, 한국지리정보학회지, 제16권 제4호, 2013.12, pp.153-170. // (E.N. Lim et al., An evaluation of thermal comfort on urban neighborhood park for improving thermal environment, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 16(4), 2013.12, pp.153-170.)

[7] 윤용한 외 3인, 학교 운동장과 녹지공간의 UTCI, PMV, WBGT 비교 분석, 한국환경생태학회지, 제28권 제1호, 2014.02, pp.80-89. // (Y.H. Yoon et al., Analyses on comparison of UTCI, PMV, WBGT between playground and green space in school, Korean Journal of Environment and Ecology, 28(1), 2014.02, pp.80-89.)

[8] 김정호, 권기욱, 윤용한, 최고기온시 학교 옥외공간 녹지특성에 따른 열쾌적 지표(UTCI, PMV, WBGT) 비교 분석, 인간식물환경학회지,

제18권 제5호, 2015.10, pp.363-370. // (J.H. Kim, K.U. Kwon, Y.H. Yoon, A comparative analysis thermal comfort index according to the maximum temperature school outdoor space green characteristics, Journal of People, Plants, and Environment, 18(5), 2015.10, pp.363-370.)

[9] 김수영, 도시공원 특성에 따른 이용자의 열쾌적성 분석: 부산시 공원을 대상으로, 부산대학교 석사학위논문, 2019.02. // (S.Y Kim, Analysis of users' thermal comfort according to characteristics of urban park: Based on parks of Busan city, Master's Thesis of Pusan National University, 2019.02.)

[10] 송도윤 외 3인, 열쾌적성과 NVOCs 배출량에 따른 겨울철 서귀포 치유의 숲의 최적 활동 시간 선정에 관한 연구, 한국산림휴양학회지, 제26권 제4호, 2022.12, pp.15-25. // (D.Y. Song et al., Study on the selection of optimal activity time for winter seogwipo healing forest according to thermal comfort and NVOCs emissions, The Journal of Korean Institute of Forest Recreation, 26(4), 2022.12, pp.15-25.)

[11] 지은주 외 3인, 유형별 녹지 시뮬레이션을 통한 아파트 단지 내 도시열섬현상 저감효과 분석, 한국조경학회지, 제51권 제3호, 2023.06, pp.153-165. // (E.J. Ji et al., Simulation analysis of urban heat island mitigation of green area types in apartment complexes, Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture, 51(3), 2023.06, pp.153-165.)

[12] 문용준, 복사를 고려한 열쾌적성 평가지표 EDT 수정모델 개발, 서울시립대학교 석사학위논문, 2007.08. // (Y.J Moon, Modification of thermal comfort index, EDT considering the radiation effect, Master's Thesis of University of Seoul, 2007.08.)

[13] P.O. Fanger, Assessment of man's thermal comfort in practice, British Journal of Industrial Medicine, 30(4), 1973.10, pp.313-324.

[14] 박한성, 실내 냉방시 온도별 MST와 LST의 상관성 분석, 부경대학교 석사학위논문, 2006.02. // (H.S. Park, Correlation analysis between MST and LST in indoor cooling, Master's Thesis of Pukyong National University, 2006.02.)

[15] 김석철, 하계 도심지에서의 폭구온도 특징과 활용방안에 관한 연구, 인제대학교 석사학위논문, 2008.08. // (S.C. Kim, Study for globe temperature characteristic and practical use way in downtown area on summer season, Master's Thesis of Inje University, 2008.08.)

[16] 김금지, 건물 및 지면녹화의 도시열환경 개선효과에 대한 정량적 평가, 부산대학교 석사학위논문, 2011.08. // (K.J. Kim, The quantitative examination on the improvement of the urban thermal environment of the building and land planting, Master's Thesis of Pusan National University, 2011.08.)

[17] 박성애 외 4인, 도시 지역에서 토지 피복에 따른 열 변이 특성, Ecology and Resilient Infrastructure, 제3권 제1호, 2016.03, pp.46-53. // (S.A. Park et al., Characteristics of thermal variations with the different land covers in an urban area, Ecology and Resilient Infrastructure, 3(1), 2016.03, pp.46-53.)

[18] 이동현 외 4인, 일부 농업인의 고온노출에 대한 실태와 인지도 조사, 농촌의학-지역보건학회지, 제43권 제1호, 2018.03, pp.9-17. // (D.H. Lee et al., Status and awareness of excessive heat exposure among agricultural workers, Journal of Agricultural Medicine and Community Health, 43(1), 2018.03, pp.9-17.)

[19] 김재경, 강준석, 김회진, 나노미스트형 폭염저감 시설의 온도저감 효과: 대구광역시 서구 북비산로를 대상으로, 한국환경과학회지, 제30권 제4호, 2021.04, pp.353-367. // (J.G. Kim, J.S. Kang, H.J. Kim, Experimental study on the temperature reduction effect of the nano-mist facility, Journal of Environmental Science International, 30(4), 2021.04, pp.353-367.)

[20] 강지윤 외 3인, 효과적 폭염대응을 위한 열지수 활용가능성 검토, 한국방재학회논문집, 제21권 제4호, 2021.08, pp.23-30. // (J.Y. Kang et al., Applicability of heat index for effective heatwave response, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 21(4), 2021.08, pp.23-30.)

[21] IBM Documentation Help, Linear regression: Variable selection methods, <https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/beta?topic=regression-linear-variable-selection-methods>

1) TESTO400를 활용한 측정 시, IAQ프로브(온도, 습도, CO2측정)와 난류측정 프로브, 폭구온도프로브(열전대K타입, 방사열 측정)를 활용하였음