한국조경학회지 54(5): 175~189, 2026. 10.
J. KILA Vol. 54, No. 5, pp. 175~189, October, 2026
pISSN 1225-1755 eISSN 2288-9566
https://doi.org/10.9715/KILA.2026.54.5.175

제주도 고도 변화에 따른 인간 열환경 분석†

- 제주특별자치도 한라산국립공원 -

Analysis of the Human Thermal Environment to the Altitude Changes in Jeju Island†
- A Case Study in Hallasan National Park, Jeju Special Self-Governing Province -

신지환*, 양주은*, 박수국**
*제주대학교 원예학과 박사과정, **제주대학교 원예과학전공 교수

Sin, Jihwan*, Yang, Jueun*, Park, Sookuk**
*Ph.D. Student, Dept. of Horticulture, Jeju National University
**Professor, Dept. of Horticultural Science, Jeju National University

Received: August 25, 2026
Revised: September 17, 2026
Accepted: September 17, 2026
3인익명 심사필

Corresponding author :
Sookuk Park
Professor, Dept. of Horticultural Science, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Tel.: +82-64-754-3326
E-mail: sooland@jejunu.ac.kr

국문초록

본 연구는 한라산 국립공원 내 고도별 미기후 실측 자료와 기상청 AWS 데이터를 연계하여 산악 지형이 인간 열환경에 미치는 영향을 분석하였다. 산악 지역의 종합적인 열환경은 단순한 기온 강하뿐만 아니라 지형적 위치와 국지적 기상 요소에 크게 좌우되었다. 더 낮은 고도의 북사면에 위치한 삼각봉 지점이 고지대 남사면 지점보다 기온이 낮게 관측된 기온 역전 현상은 산악 지형에서 사면 방위와 차광이 열환경에 결정적인 역할을 함을 시사한다. 또한, 고산 지대의 저온 환경에 강풍이 결합할 경우 인체의 대류에 의한 열손실이 급격히 증가하여, 고고도 지점보다 오히려 풍속이 강한 저고도 지점에서 기온 강하 효과를 능가하는 한랭 스트레스가 유발됨이 입증되었다. 절대습도의 고도별 감소 경향은 풍향의 영향을 받아 주풍향이 같은 지점에서 명확히 나타났다. 결론적으로 복잡한 산악 지형의 정밀한 열환경 평가를 위해서는 고도에 따른 기온 변화 외에도 사면 방위에 따른 복사량, 국지적 풍속, 주풍향에 따른 습도 변화를 필수 변수로 고려해야 할 것이다. 이 연구결과는 향후 등산, 산악 트래킹 등 산악지역에서의 쾌적한 인간활동을 위한 등산기후지수 개발에 기초자료로 이용가능할 것이다.

주제어: 인간 열환경지수, 열쾌적성, 생리등가온도, 범용열기후지수, 산악

ABSTRACT

This study analyzed the impact of mountainous terrain on the human thermal environment by integrating measured microclimatic data and automatic weather station data from the Korea Meteorological Administration at various altitudes within Hallasan National Park. The comprehensive thermal environment in mountainous regions was largely governed not only by simple air temperature (T_a) decreases but also by specific topographical locations and local meteorological elements. A topographical T_a inversion, where the Samgakbong site located on a lower-altitude north-facing slope recorded lower T_a than higher-altitude south-facing slope sites, suggests that slope aspect and topographical shading play a decisive role impacting the thermal environment of mountainous terrains. Furthermore, it was demonstrated that when strong winds are coupled with the low T_a environment of alpine regions, human convective heat loss increases sharply, inducing severe cold stress—which outweighs the physical cooling effect of elevation—at lower-altitude sites with stronger winds rather than at the higher-altitude. The decreasing trend of absolute humidity with the increase of altitude was influenced by wind direction, clearly manifesting at sites sharing the same prevailing wind direction. In conclusion, for a precise assessment of thermal environments in complex mountainous terrains, the radiation amount dependent on slope aspect, local wind speeds, and humidity changes according to the prevailing wind direction must be considered as essential variables alongside elevation-induced T_a changes. These results offer foundational insights for developing a climatic index to support comfortable human activities, including hiking and mountain trekking.

Keywords: Human Thermal Sensation, Thermal Comfort, PET, UTCI, Mountain

†이 논문은 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1I1A3075129, RS-2025-25431186).

1. 서론

최근 전 지구적인 기후변화로 인해 기온 변동성이 확대되고, 폭염 등의 극단적 기상 현상이 빈발함에 따라, 야외 공간에서의 쾌적하고 안전한 활동을 위한 인간 열환경 평가의 중요성이 대두되고 있다(Liu et al., 2023). 인간 열환경을 결정하는 주요 기상 요소 중 태양 복사에너지는 열쾌적성을 좌우하는 핵심 인자이며, 특히 강한 태양복사에너지와 자외선 노출 등은 인간의 피부 질환 및 전반적인 건강에 직접적인 영향을 미치는 주요 환경 요인이다(Tang et al., 2024). 지표면에 도달하는 자외선 및 태양 복사에너지는 대기 상층의 오존량뿐만 아니라 지형적 고도와 구름, 표면 반사율 등에 의해 복합적으로 제어된다(Dahlback, 2008).

산악지역은 해발고도가 상승함에 따라 대기 질량이 감소하고 대기 투과율이 증가하므로, 지표에 도달하는 태양 복사에너지와 자외선 복사량은 뚜렷하게 증가하는 경향을 보인다(Blumthaler et al., 1997; Aldobhani, 2014). 고지대 산악 환경과 저지대 평원 간의 태양 복사에너지양 예측 모델을 비교한 연구(Iziomon and Mayer, 2001)와 하와이의 해발고도에 따른 맑은 하늘의 태양복사에너지양 변화를 분석한 연구(Longman et al., 2012)에서도 고도 상승에 따른 태양 복사에너지 증가와 대기 투과율의 공간적 차이가 명확히 확인된 바 있다. 특히, 티베트 고원과 같은 극한의 고지대에서는 대기 질량 및 에어로졸 농도가 낮아 주변 저지대보다 하향 태양 복사에너지가 현저히 높게 나타나는 것으로 보고되었다(Yang et al., 2010).

산악 및 고지대와 같이 지형이 복잡한 지역에서는 태양 고도각의 변화와 더불어 지형의 경사, 사면 방위, 주변 지형에 의한 차광 등에 의해 태양 복사에너지의 지표 도달량이 극적으로 변화한다(Chen et al., 2007; Batlles et al., 2008; Lai et al., 2010; Herrería-Alonso et al., 2020). 알프스 산맥 지역의 장기 태양 복사에너지 변동성을 분석한 연구(Correa et al., 2024)에 따르면, 고지대에서는 지표면 알베도(albedo, 태양 복사에너지 반사율)와 구름의 광학적 두께 변화가 지표 도달 태양 복사에너지양의 장기 추세를 결정하는 주 요인으로 작용함이 밝혀졌다. 이처럼 고도와 지형 조건에 따른 복사 환경 및 미기후의 공간적 변동성은 야외 활동 시 인간이 체감하는 열환경에 복합적이고 직접적인 영향을 미치게 된다.

이러한 배경 속에서 고지대 및 산악 환경을 대상으로 한 인간 열환경 연구들이 점차 진행되고 있다. 고산 지대의 기압 저하와 저산소 환경이 인체의 생리적 반응과 열쾌적성에 미치는 영향을 규명한 연구(Duan et al., 2023)를 비롯하여, 고지대의 저압 환경을 반영하여 대류 및 증발 열전달 계수를 수정함으로써 인체 체온 조절 모델의 정확도를 개선하려는 시도(Wu et al., 2024)가 이루어졌다. 또한, 도시 산악공원에서 수목과 하천 등 물리적 환경 인자가 열쾌적성 조절에 미치는 영향을 탐색한 연구(Liu et al., 2023)와 고원지대 원주민의 고유한 발한 반응 및 심리적 특성을 바탕으로 고해상도 열환경 예측 모델을 제시한 연구(Song et al., 2025)도 수행되었다. 아울러 고원 주거지역에서 지표면 특성과 차양 조건이 야외 인간 열환경지수인 PET(physiological equivalent temperature)에 미치는 영향을 분석한 연구(Chen et al., 2021)가 진행되었다.

이러한 국외 선행 연구들은 고도 상승과 복잡한 지형 및 지표 조건이 복사에너지를 조절하고, 나아가 인간 열환경지수를 크게 변화시킨다는 점을 공통적으로 시사한다. 그러나, 국내의 경우 해발고도의 급격한 변화가 수반되는 산악 지형을 대상으로 다수의 기상 관측망을 활용하여 지형 방위와 미기후 요소를 종합적으로 평가한 연구는 여전히 미흡한 실정이다. 현재 기상청에서 제공하는 체감온도지수 역시 기온과 습도 등에 주로 의존하고 있어, 산악 지역의 풍속이나 복사에너지 환경에 의한 인체의 실제 열수지 반응을 온전히 반영하지 못하는 한계가 있다.

제주도는 섬 중앙의 한라산을 중심으로 사면이 해안으로 이어지는 특수한 지형적 구조를 지니고 있어, 해발고도와 지형적 방위에 따라 국지적 미기후의 변동 폭이 매우 크다. 특히, 한라산과 같은 대규모 산악 지형에서는 고도에 따른 전형적인 기온 저감률뿐만 아니라, 사면 방위에 따른 태양 복사에너지양의 차이와 지형적 풍속 차이가 탐방객의 인간 열환경을 결정짓는 핵심 변수가 될 것이다.

이에 본 연구에서는 고지대에 위치한 한라산 국립공원 내 고도별 관측 지점과 중산간 지역에 위치한 제주대학교 지점을 대상으로 미기후 특성을 비교·분석하고자 한다. 이를 통해 해발고도 및 지형 변화가 인간 열환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 제주도의 복잡한 산악 환경에 부합하는 체계적인 인간 열환경 평가의 기초를 마련하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 미기후 자료조사

미기후 자료의 측정은 여름철 2025년 6월 6일 9:00-15:00, 가을철 9월 21일, 10월 24일 9:00-14:00, 총 3일

동안 한라산 진달래밭 대피소와 제주대학교에서 이뤄졌다(Figure 1 참조). 측정시간은 등산객들이 진달래밭 대피소에 주로 도착하는 9:00부터 하산하여야 하는 14:00(가을철)-15:00(여름철) 동안으로 하였다. 미기후 자료는 인체의 가슴높이인 지표면 1.2m 높이에서 기온(air temperature), 상대습도(relative humidity), 풍속(wind speed), 풍향, 태양 및 지구 복사에너지(short- and long-wave radiation)를 측정하였다(Table 1 참조).

한라산 국립공원 내부의 비교를 위하여 기상청 기상자료개방포털(https://data.kma.go.kr)에서 제공하는 AWS가 설치된 성판악, 어리목, 영실, 사제비, 삼각봉, 진달래밭, 한라산 남벽, 윗세오름, 백록담의 9개 지점의 기온, 상대습도, 풍속 자료를 이용하였다. 다만, 9월 중 백록담 지점의 AWS 장애로 인하여 자료 측정이 되지 않아 백록담 지점의 분석은 6월과 10월의 측정일만 진행하였다.

2.2 미기후 자료 분석 방법

미기후 자료 분석에 앞서, 상대습도는 기온에 따라 유동적으로 변화하므로 지점 간의 차이를 비교하기에는 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 각 지점별 차이를 정확하게 보여주기 위하여 절대습도(absolute humidity, AH)를 추가적으로 분석하였다. 절대습도는 Eq. 1의 수식을 이용하여 산출하였다(Buck, 1981).

비교 분석에 사용한 AWS 풍속은 지상 10m 높이에서 측정된 값이다. 따라서, 실측한 미기후 자료와 고도를 일치시키기 위해 Eq. 2를 적용하여 1.2m 높이의 풍속을 산출하였다.

평균복사온도(mean radiant temperature)는 실측한 태양 및 지구 복사에너지를 Park and Tuller(2011)와 Lee et al.(2022)의 방법을 이용하여 산출하였다(Table 2 참조). 평균복사온도의 분석은 한라산 국립공원 내부 지점 간의 차이가 크지 않을 것이라 가정하여, 진달래밭 지점에서 측정한 값을 이용하여 한라산 내부의 모든 지점에 동일하게

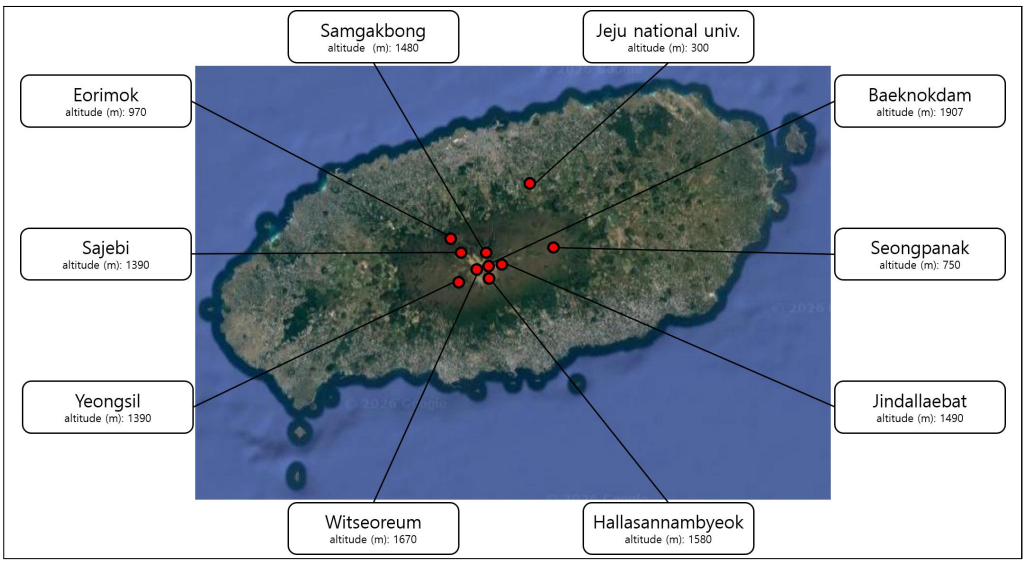


Figure 1. Study sites

Table 1. Instruments for collecting micrometeorological data

Instruments				
Data	Name	Accuracy	Resolution	Manufacture
Radiation	CNR4 Net Radiometer	≤ 1% (-40 to 80℃)	0.1 Wm^{-2}	Kipp & Zonen Inc.
	SOLYS2 Sun Tracker	〈 0.1° passive tracking / 〈 0.02° active tracking (with optional sun sensor)	0.01 Wm^{-2}	
Air temperature and relative humidity	HMP155A	Air temp. (℃): ±0.3 (-80 to 60); Relative humidity (%): 2 (0-90), 3 (90-100)	0.01℃; 0.01%	Campbell Scientific Inc.
Wind speed and direction	Met one 034B-L Windset	Wind speed: ±0.1 ms^{-1} (≤ 10.1 ms^{-1}), ±1.1% (≥ 10.1 ms^{-1}); Wind direction: ±4°	0.001 ms^{-1}	
Data logger	CR1000	±0.06% (0-40℃)	-	

Table 2. Input parameters for calculating the mean radiant temperature

$T_{mrt} = \left\{ \frac{f_P \times K_b^+ \times a_k + 0.5(K_d + K_r)a_k + 0.5 \times \epsilon_p (L_\downarrow + L_\uparrow)}{\epsilon_p \sigma} \right\} - 273.15$ (℃)	
Parameter	Description
T_{mrt}	Mean radiant temperature (℃),
ϵ_p	Earth radiant emissivity
σ	Stefan-Boltzmann constant: $5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$
f_P	Projected area factor, $f_P = 3.34 \times 10^{-7} \times \beta^3 - 6.6 \times 10^{-5} \times \beta^2 + 8.42 \times 10^{-4} \times \beta + 0.297$ (Park and Tuller, 2011): an empirical formula combining standing and walking postures, representing the surface area ratio of the human body exposed to direct beam solar (shortwave) radiation depending on the solar position
K_b^+	Direct beam solar radiation perpendicularly entering the body surface: K_b/sin (solar elevation, β)
K_b	Direct beam solar radiation incident on the horizontal ground surface
β	Solar altitude (elevation) angle (°)
0.5	Area ratio of radiant energy incident on the human body considering radiation directionality (assuming the total human body surface area is 1.0)
K_d	Diffuse beam solar radiation: solar radiation incident on the human body from the sky unobstructed by buildings or vegetation, measured by manually shading the upward-facing pyranometer of the CNR4 net-radiometer sensor with a fist for 1 min at 30 min intervals from the start of the observation to block direct beam solar radiation (Lee et al., 2022; 2023)
K_r	Reflected beam solar radiation
a_k	Solar radiation energy absorption rate on the human body (0.7)
$L\downarrow$	Downward longwave radiation emitted from the sky, buildings, and vegetation incident on the human body
$L\uparrow$	Upward longwave radiation emitted from the ground surface incident on the human body

적용하였다. 평균복사온도는 국지적인 운량 차이로 인해 발생한 그늘이 제주대학교와 진달래밭 두 지점 간의 복사에너지 편차를 왜곡할 우려가 있어, 두 지점 모두 구름의 영향을 받지 않는 맑은 시간대만의 데이터를 기반으로 도출된 추세선 방정식을 통해 제주대학교 지점의 평균복사온도를 산출하였으며, 이후 두 지점 간의 차이값을 반영한 관계식을 적용하여 진달래밭 지점의 값을 역산하여 분석하였다(Figure 2 참조). 해당 차이값 관계식은 여름철 관측 데이터를 기초로 산정되었다. 이 관계식의 타 시기 적용 타당성을 검토하기 위해 각 측정일의 맑은 시간대 평균 평균복사온도 차이값을 비교한 결과, 여름철 9.8℃, 가을철 9월 10.6℃, 가을철 10월 9.8℃로 유사한 값으로 나타나

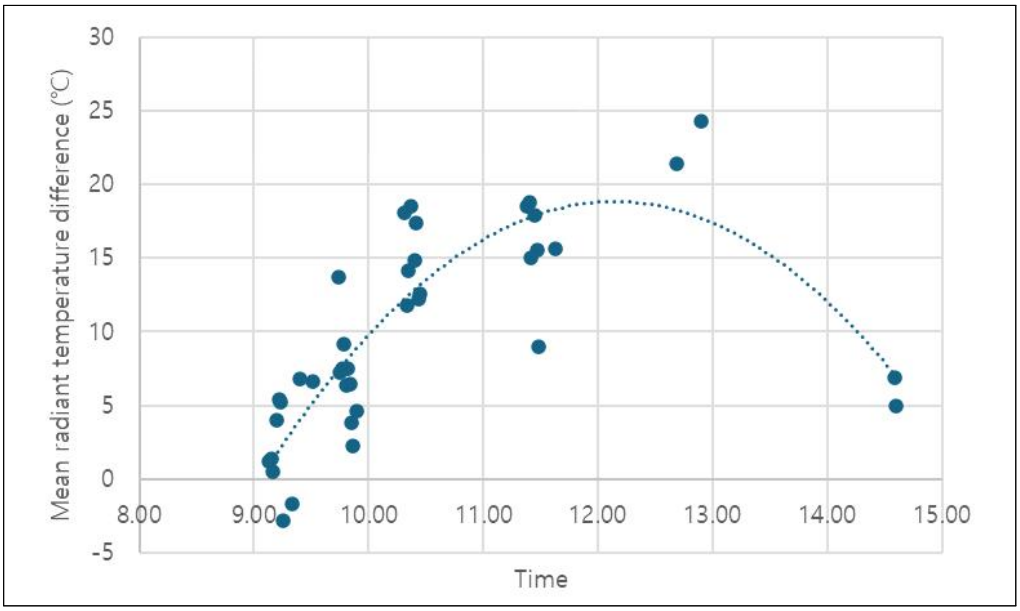


Figure 2. Polynomial regression analysis of mean radiant temperature differences between Jeju national university and Jindallaebat sites on June 6, 2025[1)]

시기별 편차가 크지 않음을 확인하였다. 이에 따라 계절에 따른 유의미한 오차가 발생하지 않을 것으로 판단하여, 도출된 관계식을 전체 분석 대상에 동일하게 적용하였다.

$$AH = \frac{\left\{0.611 \times e^{\left(\frac{T_a \times 17.502}{T_a + 240.97}\right)} \times \frac{RH}{100}\right\} \times 18.02}{8.3143 \times (T_a + 273.15)} \quad \text{(Eq. 1)}$$

T_a는 기온(℃)이며, RH는 상대습도(%)를 뜻한다.

$$WS_m = WS \times \frac{\ln\left(\frac{m}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{M}{z_0}\right)} \quad \text{(Eq. 2)}$$

수식에서 M은 실제 풍속을 측정한 기준 고도, m은 풍속을 산출하고자 하는 목표 고도를 의미한다. z_0는 지면의 공기역학적 거칠기 길이(aerodynamic roughness length)를 나타내며, 그 값은 0.01로 설정하였다.

2.3 인간 열환경지수 분석

측정된 미기후 자료들을 통해 인간 열환경지수를 구하기 위하여, RayMan Pro. Ver. 2.2(Matzarakis et al., 2010; http://www.urbanclimate.net/rayman)를 이용하여 PET(Höppe, 1999)와 UTCI(universal thermal climate index; Bröde et al., 2012)를 산출하였다. 분석은 Kong et al.(2021)와 조상만(2024)의 한국형 인간 열환경지수 등급을 이용하여 분석하였다(Table 3 참조). 10개 지점의 열환경 비교분석을 위해 Microsoft office excel 365를 이용하였다.

3. 결과

3.1 여름철

고도에 따른 열환경 변화를 분석하기 위하여, 한라산 9지점과 제주대학교 지점의 일평균 차이값을 비교하였다. 여름철 6월의 분석 결과, 고도 상승에 따른 열환경 저감효과가 뚜렷하게 나타났다(Table 4, Figure 3 참조). 해발고도 최저 지점인 제주대학교의 평균 기온은 25.8℃로 최고 지점인 백록담 지점의 16.0℃와 9.8℃의 차이를 보였다. 이를 고도에 따른 기온 저감률로 환산하면 약 0.61℃/100m로, 고도 상승의 전형적인 자유대기 수준인 0.65℃/100m의 물리적 냉각 효과를 확인하였다. 상대습도는 성판악 지점에서 13.3% 차이로 낮은 값을 보였고, 삼각봉

Table 3. The indexes of physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI)

Thermal perception	PET (℃)		UTCI (℃)		Grade of physiological stress
	Mid/west Europe[a]	Korea[b]	Mid/west Europe[c]	Korea[d]	
Very cold	〈 4	〈 −6	〈 −40	〈 −9	Extreme cold stress
Cold	4–8	−6 to −1	−40 to −27	−9 to −3	Very strong cold stress
			−27 to −13	−3 to 3	Strong cold stress
Cool	8–13	1–9	−13 to 0	3–9	Moderate cold stress
Slightly cool	13–18	9–16	0–9	9–15	Slight cold stress
Neutral	18–23	16–24	9–26	15–21	No thermal stress
Slightly warm	23–29	24–31	-	21–26	Slight heat stress
Warm	29–35	31–38	26–32	26–32	Moderate heat stress
Hot	35–41	38–45	32–38	32–38	Strong heat stress
			38–46	38–44	Very strong heat stress
Very hot	41 〈	〉 45	46 〈	〉 44	Extreme heat stress

[a]Matzarakis and Mayer(1996); [b]Kong et al.(2021); [c]Bröde et al.(2012); [d]조상만(2024)

Table 4. Mean ± standard deviation of microclimate aspects, PET and UTCI values on June 6, 2025

Site (altitude, m)	Air temperature (℃)	Relative humidity (%)	Absolute humidity (gm^{-3})	Wind speed (ms^{-1})	Mean radiant temperature (℃)		PET (℃)	UTCI (℃)
					Measured	Predicted		
Jeju national univ. (300)	25.8 ± 0.6	35.3 ± 6.8	8.5 ± 1.5	1.3 ± 0.3	58.6 ± 4.9	66.1 ± 4.1	41.0 ± 2.4	35.2 ± 1.1
Seongpanak (750)	22.3 ± 0.5	48.6 ± 3.0	9.6 ± 0.7	1.4 ± 0.5	46.4 ± 4.6 measured at Jindallaebat	53.5 ± 1.7 predicted at Jindallaebat	31.8 ± 2.6	30.1 ± 1.1
Eorimok (970)	21.8 ± 0.5	59.7 ± 4.9	11.5 ± 0.9	0.7 ± 0.2			34.6 ± 1.6	31.1 ± 0.4
Yeongsil (1390)	19.4 ± 0.6	55.8 ± 4.5	9.3 ± 0.7	0.8 ± 0.2			32.5 ± 1.6	29.6 ± 0.6
Sajebi (1390)	19.3 ± 0.5	65.3 ± 5.6	10.8 ± 0.7	0.8 ± 0.3			32.5 ± 2.4	29.8 ± 0.6
Samgakbong (1480)	18.6 ± 0.4	69.3 ± 2.1	11.0 ± 0.3	0.7 ± 0.2			32.4 ± 2.1	29.7 ± 0.5
Jindallaebat (1490)	18.5 ± 0.5	56.6 ± 5.5	8.9 ± 0.7	1.5 ± 0.2			27.6 ± 1.4	28.1 ± 0.6
Hallasannambyeok (1580)	17.5 ± 0.5	55.6 ± 4.0	8.3 ± 0.5	1.3 ± 0.3			27.7 ± 1.4	27.9 ± 0.6
Witseoreum (1670)	17.2 ± 0.5	52.9 ± 4.8	7.7 ± 0.6	1.4 ± 0.3			26.9 ± 1.5	27.4 ± 0.7
Baeknokdam (1907)	16.0 ± 0.5	59.6 ± 4.7	8.1 ± 0.6	1.3 ± 0.3			26.5 ± 1.8	27.2 ± 0.7

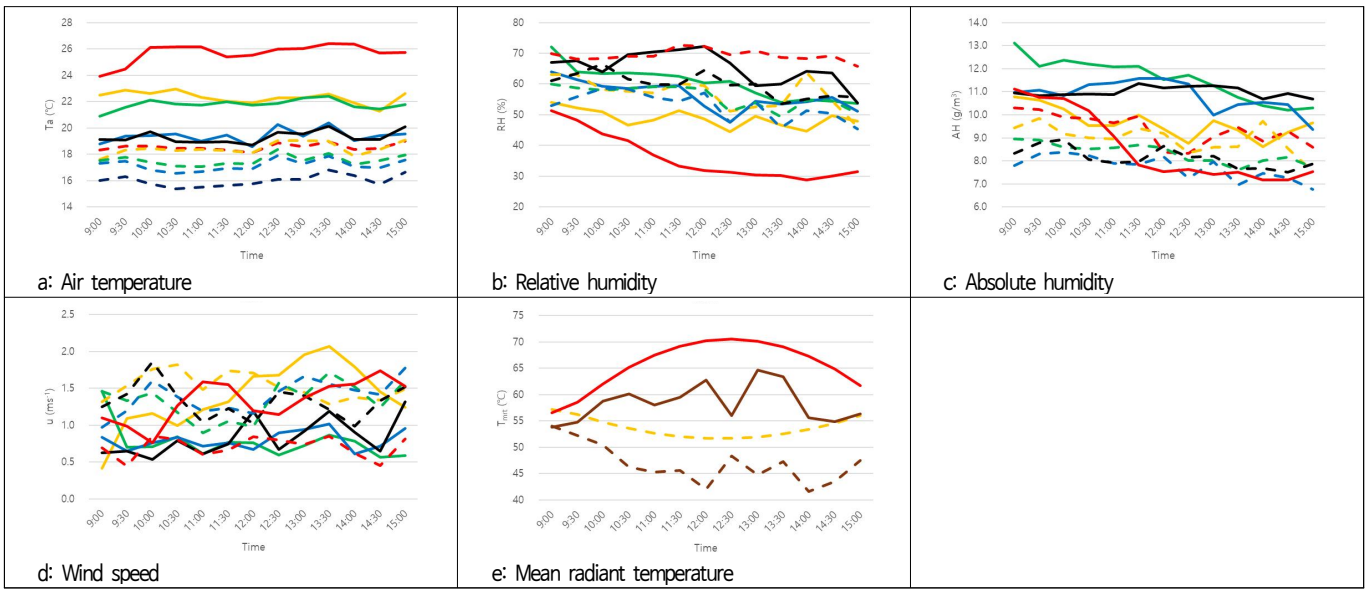


Figure 3. Diurnal variations of microclimate aspects on June 6, 2025

Legend: Jeju national univ. Seongpanak Eorimok Yeingsil Sajebi Measured Jeju national univ.
Samgakbong Jindallaebat Hallasannambyeok Witseoreum Baeknokdam Measured Jindallaebat

지점에서 34.0% 차이로 높은 값을 보였다. 절대습도는 윗세오름 지점에서 $0.8gm^{-3}$ 차이로 가장 낮은 값을 보였고, 어리목 지점에서 $3.0gm^{-3}$의 차이로 가장 높은 값을 보였다. 이러한 지점별 습도 차이에 관한 상세한 분석은 고찰에서 논의하고자 한다. 풍속은 어리목, 영실, 사제비, 삼각봉 지점에서 $0.7-0.8ms^{-1}$로 낮은 값을 보였고, 성판악, 진달래밭, 한라산 남벽, 윗세오름, 백록담 지점에서 $1.3-1.5ms^{-1}$로 높은 값을 보였다. 각 지점별 위치에 따른 풍속 변화를 분석한 결과, 백록담을 기준으로 북쪽과 서쪽에 위치한 지점에서 비교적 낮은 풍속값을 보였다. 한라산 내부 지점의 평균복사온도는 진달래밭 지점의 관측값을 적용하여 분석하였다. 평균복사온도는 제주대학교 지점은 66.1℃로 진달래밭 지점의 53.5℃보다 12.6℃ 높게 나타났다.

인간 열환경지수 PET에서 최대 차이값을 보인 백록담 지점은 14.5℃ 차이로 열지각 약 2.1단계 저감효과를 보였다(Figure 4 참조). 최저 차이값은 한라산 국립공원 내 최저 지점인 성판악 지점이 아닌, 어리목 지점에서 6.4℃의 차이로 열지각 약 0.9단계 저감효과를 보였다. UTCI에서도 어리목 지점에서 4.1℃, 백록담 지점에서 8.0℃ 차이로 약 0.7단계, 약 1.3단계 저감효과를 보였다. 성판악 지점보다 고도가 더 높은 지점인 어리목 지점에서 열환경 저감효과가 더 낮게 나타난 이유는 풍속의 차이 때문으로, 성판악 지점의 풍속은 $1.5ms^{-1}$, 어리목 지점은 $0.7ms^{-1}$로 성판악 지점의 풍속이 더 높았기 때문에 열환경 저감 효과가 높게 나타난 것으로 판단된다.

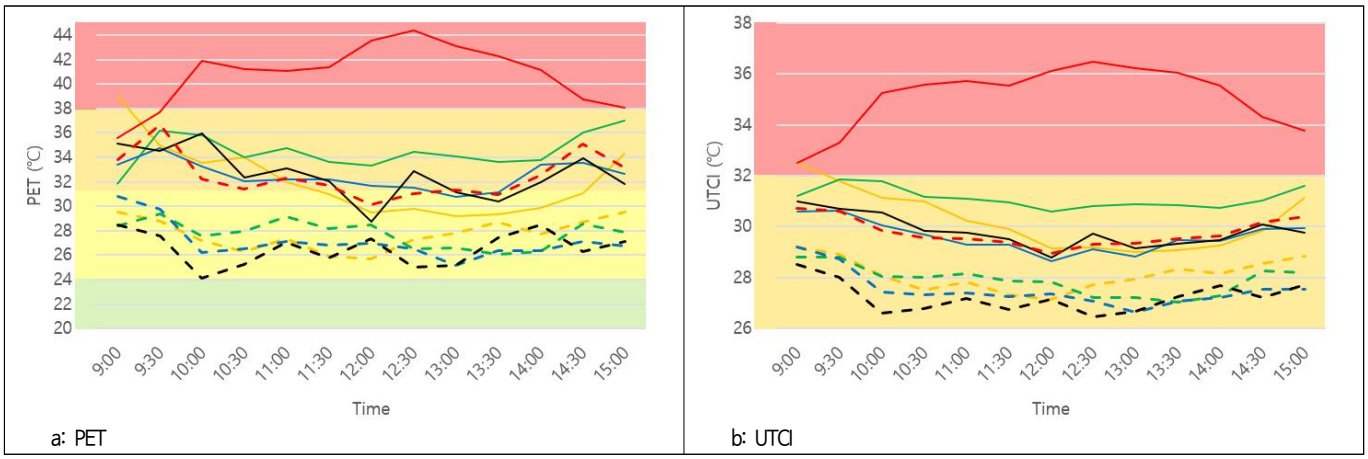


Figure 4. Diurnal variations of PET and UTCI on June 6, 2025
Legend: Jeju national univ. Seongpanak Eorimok Yeingsil Sajebi
Samgakbong Jindallaebat Hallasannambyeok Witseoreum Baeknokdam
a: Hot, Warm, Slightly warm, Neutral; b: Strong heat stress, Moderate heat stress

여름철의 시간별 미기후 자료를 추가적으로 분석한 결과, 9:00에 제주대학교 지점의 PET는 35.6℃를 기록한 반면, 백록담 지점은 28.5℃로 두 지점 간 격차는 7.1℃로 열지각 약 1단계 차이 수준이었다. 그러나, 측정기간 중 열환경이 가장 높은 값이 나타난 12:30에 제주대학교 지점의 PET는 44.4℃로 가장 높은 값을 보였고, 이와 대조적으로 동일 시간대 최고 지점인 백록담 지점의 PET는 25.0℃로 19.4℃ 차이를 보여 열지각 약 2.8단계 차이를 보였다. UTCI에서도 마찬가지로 9:00에 제주대학교 지점 32.5℃로 백록담 지점의 28.5℃와 4.0℃ 차이로 열지각 0.7단계 차이를 보였으며, 12:30에 제주대학교 36.5℃, 백록담 27.1℃로 10.0℃ 차이를 보여 열지각 1.7단계 차이를 보였다.

3.2 가을철

가을철 9월의 분석 결과, 여름철과 마찬가지로 고도 상승에 따라 기온이 감소하는 경향을 보였다(Table 5, Figure 5 참조). 그러나, 일부 지점에서 고도가 높은 지점보다 낮은 기온 값을 보였다. 특히, 삼각봉 지점에서 최저 기온 값을 보였는데, 이는 삼각봉 지점이 한라산 북쪽 사면에 위치하고 있어, 더 많은 음지의 영향을 받았기 때문으로 사료된다. 반대로 고도가 더 높은 한라산 남벽 지점과 윗세오름 지점에서 더 높은 기온을 보였는데 이는 한라산 남쪽 사면에 위치하여 더 많은 양지의 영향을 받았기 때문으로 사료된다. 상대습도는 윗세오름 지점에서 5.2%의 차이를 보이며 가장 낮은 값을 보였고, 사제비 지점에서 19.4%의 차이로 가장 높은 값을 보였다. 절대습도는 어리목 지점에서 0.9gm^{-3} 차이로 가장 높은 값을 보였고, 윗세오름 지점에서 5.1gm^{-3}의 차이로 가장 낮은 값을

Table 5. Mean ± standard deviation of microclimate aspects, PET, and UTCI values on September 21, 2025

Site (altitude, m)	Air temperature (℃)	Relative humidity (%)	Absolute humidity (gm^{-3})	Wind speed (ms^{-1})	Mean radiant temperature (℃)		PET (℃)	UTCI (℃)
					Measured	Predicted		
Jeju national univ. (300)	23.0 ± 0.6	71.3 ± 4.4	14.6 ± 0.5	2.0 ± 0.4	46.7 ± 6.4	59.1 ± 2.1	33.2 ± 1.7	32.3 ± 0.8
Seongpanak (750)	19.0 ± 0.5	77.8 ± 3.5	12.7 ± 0.4	2.5 ± 0.4	45.1 ± 8.2 measured at Jindallaebat	45.6 ± 4.7 predicted at Jindallaebat	22.2 ± 1.5	25.3 ± 1.1
Eorimok (970)	18.3 ± 1.0	87.2 ± 5.0	13.7 ± 0.4	1.2 ± 0.2			25.7 ± 1.8	27.6 ± 1.0
Yeongsil (1390)	16.9 ± 0.5	87.2 ± 2.9	12.5 ± 0.5	0.9 ± 0.2			26.1 ± 2.9	27.0 ± 1.3
Sajebi (1390)	15.1 ± 1.1	90.7 ± 2.2	11.7 ± 0.8	2.3 ± 1.1			19.4 ± 3.0	23.2 ± 2.1
Samgakbong (1480)	14.7 ± 0.7	90.5 ± 6.2	11.4 ± 0.8	0.5 ± 0.2			26.9 ± 2.1	26.4 ± 1.0
Jindallaebat (1490)	15.2 ± 0.8	81.8 ± 4.7	10.6 ± 0.7	1.5 ± 0.4			21.3 ± 1.1	24.7 ± 0.7
Hallasannambyeok (1580)	15.7 ± 0.7	87.4 ± 9.3	11.7 ± 1.1	0.9 ± 0.3			25.1 ± 2.3	26.3 ± 1.1
Witseoreum (1670)	16.8 ± 1.1	66.1 ± 16.5	9.5 ± 2.6	1.2 ± 0.5			24.2 ± 1.6	25.7 ± 0.8

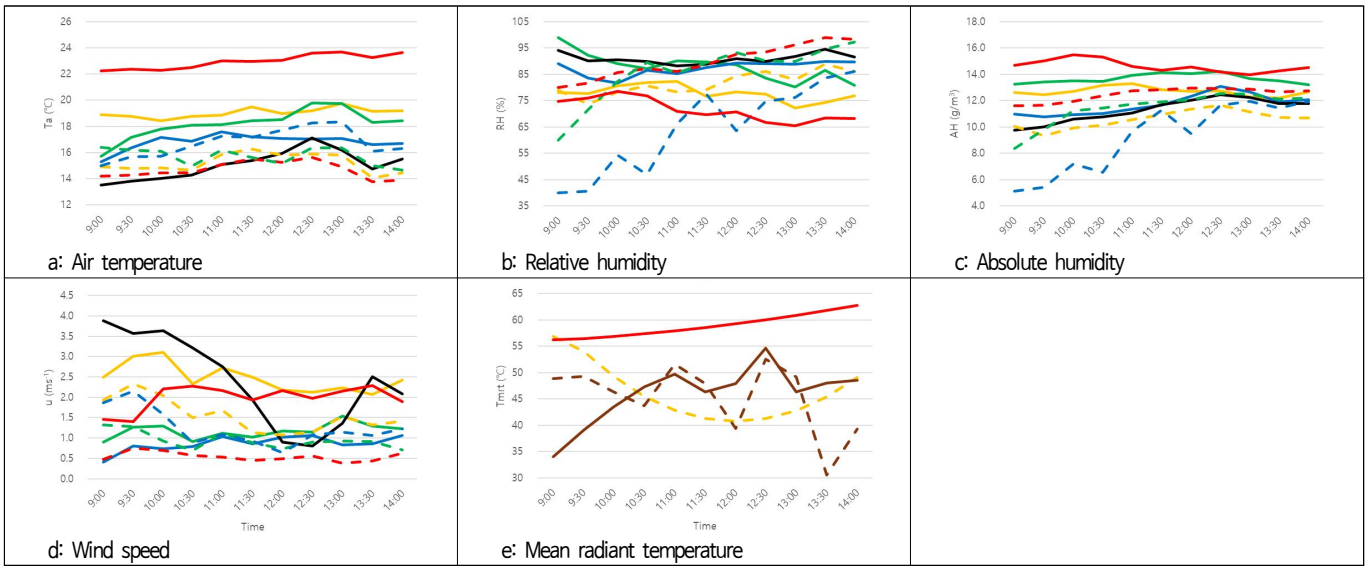


Figure 5. Diurnal variations of microclimate aspects on September 21, 2025

Legend: Jeju national univ. Seongpanak Eorimok Yeingsil Sajebi Measured Jeju national univ.
Samgakbong Jindallaebat Hallasannambyeok Witseoreum Baeknokdam Measured Jindallaebat

보였다. 풍속은 영실, 삼각봉, 한라산 남벽 지점에서 0.5–0.9ms^{-1}로 낮은 값을 보였고, 어리목, 진달래밭, 윗세오름 지점에서 1.2–1.5ms^{-1}로 중간 값을 보였으며, 성판악, 사제비 지점에서 2.3–2.5ms^{-1}로 높은 값을 보였다. 9월은 여름철과 달리 지점의 위치에 따른 풍속 변화 경향을 보이지 않았다. 평균복사온도는 제주대학교 지점은 59.1℃로 진달래밭 지점의 45.6℃보다 13.5℃ 높게 나타났다.

PET는 여름철과 달리 사제비 지점에서 13.8℃로 가장 큰 차이를 보였다(Figure 6 참조). 다음으로는 진달래밭이 11.9℃, 성판악이 11.0℃로 큰 차이를 보였는데, 이는 각각 약 2.0단계, 약 1.7단계, 약 1.6단계 저감효과를 보였다. UTCI는 사제비 9.1℃, 진달래밭 7.6℃, 성판악 7.0℃ 차이를 보였으며, 각각 약 1.5단계, 약 1.3단계, 약 1.2단계 저감효과를 보였다.

시간별 미기후 자료를 추가적으로 분석한 결과, 9:00에 제주대학교 지점의 PET는 32.8℃를 기록한 반면, 사제비 지점은 17.6℃로 두 지점 간 격차는 15.2℃ 열지각 약 2.2단계 차이로 큰 차이를 보였다. 이는 사제비 지점에서의 3.9ms^{-1}의 높은 풍속 때문으로 사료된다. 반대로 영실 지점에서 34.4℃로 오히려 1.6℃ 높은 값을 보였는데, 이는 0.4ms^{-1}의 낮은 풍속 때문으로 사료된다. 측정기간 중 열환경이 가장 높은 값이 나타난 14:00에 제주대학교 지점의

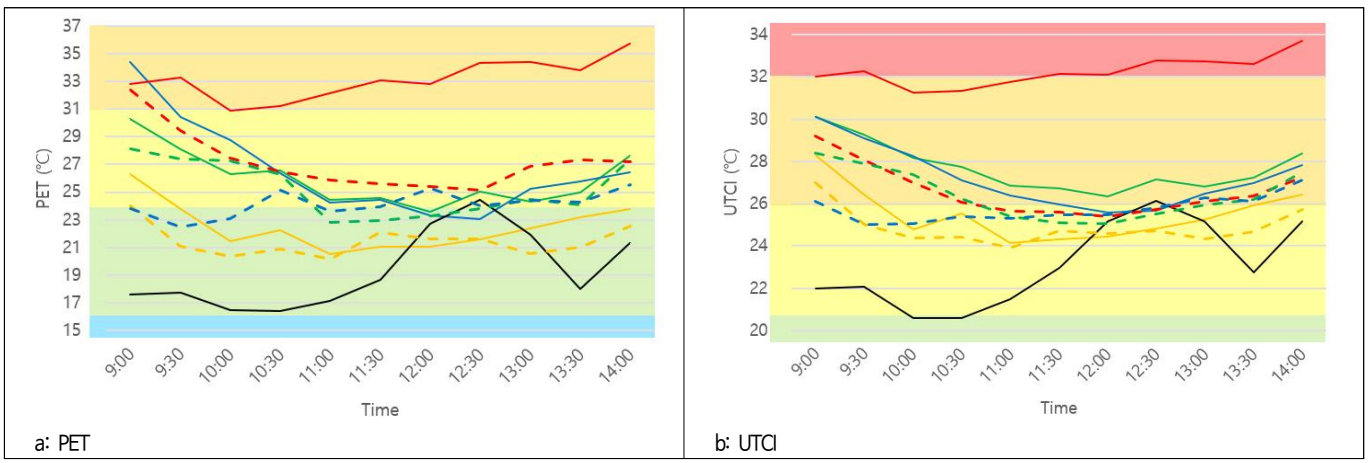


Figure 6. Diurnal variations of PET and UTCI on September 21, 2025

Legend: Jeju national univ. Seongpanak Eorimok Yeingsil Sajebi
Samgakbong Jindallaebat Hallasannambyeok Witseoreum Baeknokdam
a: Warm, Slightly warm, Neutral, Slightly cool; b: Strong heat stress, Moderate heat stress, Slightly heat stress, No thermal stress

PET는 35.8℃로 사제비 지점의 21.3℃보다 14.5℃ 차이를 보여 열지각 약 2.1단계 차이를 보였다. UTCI에서도 마찬가지로 9:00에 제주대학교 지점 32.0℃로 사제비 지점의 22.0℃와 10.0℃ 차이로 열지각 단계 약 1.7단계 차이를 보였으며, 14:00에 제주대학교 지점 33.7℃로 사제비 지점의 25.1℃와 8.6℃ 차이를 보여 약 1.4단계 차이를 보였다.

가을철 10월의 분석 결과, 고도 상승에 따라 기온이 감소하는 동일한 경향을 보였다(Table 6, Figure 7 참조). 그러나, 9월과 마찬가지로 북쪽 사면에 위치한 삼각봉 지점에서 더 낮은 기온 값을 보였고, 남쪽 사면에 위치한 한라산 남벽 지점에서 더 높은 기온값을 보여 고도 상승에 따른 기온 감소 경향과 반대되는 결과를 보였다. 상대습도는 한라산 남벽 지점에서 4.9% 차이를 보이며 가장 낮은 값을 보였고, 백록담 지점에서 30.1% 차이로 가장 높은 값을 보였다. 절대습도는 어리목 0.5gm^{-3} 차이로 가장 높은 값을 보였고, 한라산 남벽 지점과 백록담 지점에서 3.5gm^{-3} 차이로 가장 낮은 값을 보였다. 풍속은 영실, 삼각봉 지점에서 0.9–1.0ms^{-1}로 낮은 값을 보였고, 어리목, 진달래밭, 한라산 남벽, 백록담 지점에서 1.4–1.6ms^{-1}로 중간 값을 보였으며, 성판악, 사제비, 윗세오름 지점에서 2.2–2.8ms^{-1}로 높은 값을 보였다. 10월도 9월과 마찬가지로 지점의 위치에 따른 풍속 변화 경향을 보이지 않았다. 평균복사온도는 제주대학교 지점은 45.4℃로 진달래밭 지점의 32.0℃보다 13.4℃ 높게 나타났다.

PET는 백록담 지점에서 13.2℃, 윗세오름 지점에서 12.9℃, 사제비 지점에서 12.9℃ 차이를 보여, 각각 약 1.9단계 저감효과를 보였다(Figure 8 참조). UTCI는 사제비 지점에서 11.3℃, 윗세오름 지점에서 10.7℃, 백록담 지점

Table 6. Mean ± standard deviation of microclimate aspects, PET, and UTCI values on October 24, 2025

Site (altitude, m)	Air temperature (℃)	Relative humidity (%)	Absolute humidity (gm^{-3})	Wind speed (ms^{-1})	Mean radiant temperature (℃)		PET (℃)	UTCI (℃)
					Measured	Predicted		
Jeju national univ. (300)	19.0 ± 0.5	65.9 ± 3.3	10.7 ± 0.3	2.1 ± 0.5	37.9 ± 8.0	45.4 ± 5.3	23.1 ± 1.8	25.4 ± 1.3
Seongpanak (750)	14.9 ± 0.7	74.0 ± 5.7	9.4 ± 0.4	2.6 ± 0.5	36.1 ± 9.7 measured at Jindallaebat	32.0 ± 0.7 predicted at Jindallaebat	14.1 ± 0.9	17.5 ± 1.2
Eorimok (970)	14.0 ± 1.4	84.8 ± 8.3	10.2 ± 0.2	1.4 ± 0.3			15.8 ± 1.3	20.1 ± 0.8
Yeongsil (1390)	12.9 ± 0.7	78.1 ± 3.9	8.8 ± 0.5	0.9 ± 0.3			16.7 ± 1.3	20.1 ± 0.6
Sajebi (1390)	10.4 ± 1.3	86.5 ± 4.4	8.3 ± 0.3	2.8 ± 0.9			10.2 ± 2.2	14.1 ± 2.9
Samgakbong (1480)	9.1 ± 1.3	94.8 ± 5.9	8.4 ± 0.3	1.0 ± 0.3			13.4 ± 2.0	18.0 ± 1.1
Jindallaebat (1490)	9.4 ± 1.2	89.9 ± 9.8	8.1 ± 0.4	1.4 ± 0.3			12.1 ± 1.3	17.2 ± 0.8
Hallasannambyeok (1580)	11.3 ± 0.7	70.8 ± 7.7	7.2 ± 0.8	1.6 ± 0.4			13.2 ± 1.3	17.4 ± 0.9
Witseoreum (1670)	9.1 ± 1.6	85.5 ± 7.6	7.5 ± 0.4	2.2 ± 0.7			10.2 ± 2.5	14.7 ± 2.7

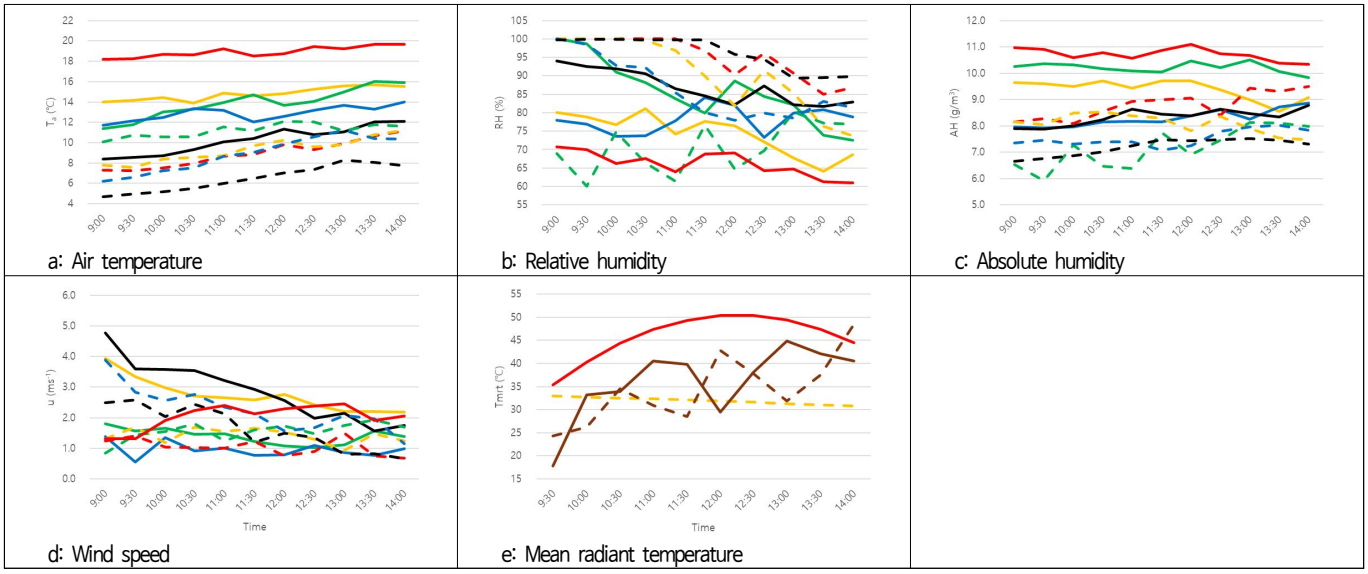


Figure 7. Diurnal variations of microclimate aspects on October 24, 2025

Legend: Jeju national univ. Seongpanak Eorimok Yeingsil Sajebi Measured Jeju national univ. Samgakbong Jindallaebat Hallasannambyeok Witseoreum Baeknokdam Measured Jindallaebat

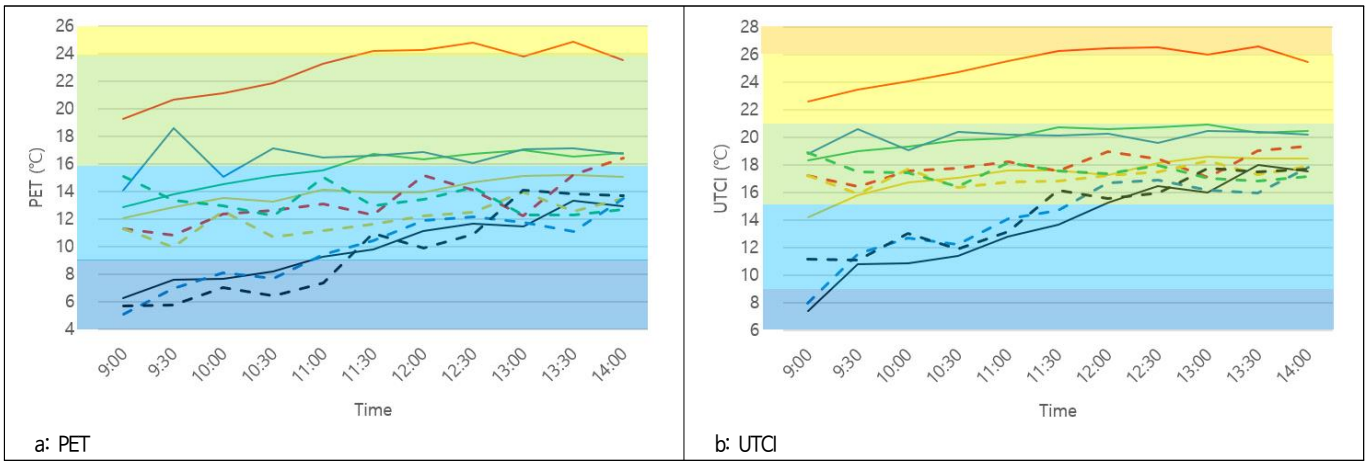


Figure 8. Diurnal variations of PET and UTCI on October 24, 2025
Legend: Jeju national univ. Seongpanak Eorimok Yeingsil Sajebi Samgakbong Jindallaebat Hallasannambyeok Witseoreum Baeknokdam
a: Slightly warm, Neutral, Slightly cool, Cool; b: Moderate heat stress, Slightly heat stress, No thermal stress, Slightly cool stress, Moderate cold stress

에서 10.5℃ 차이를 보여, 각각 약 1.8–1.9단계 저감효과를 보였다.

시간별 미기후 자료를 추가적으로 분석한 결과, 9:00에 사제비 지점과 윗세오름 지점에서 낮은 해발고도임에도 다른 지점보다 낮은 PET 값을 보였고, 영실 지점과 한라산 남벽 지점에서 높은 해발고도임에도 다른 지점보다 높은 PET값을 보였다. 이는 사제비 지점 4.8ms^{-1}, 윗세오름 지점 3.9ms^{-1}의 높은 풍속과 영실 지점 1.4ms^{-1}, 한라산 남벽 지점 0.8ms^{-1}의 비교적 낮은 풍속의 영향으로 사료된다. 측정기간 중 열환경이 가장 높은 값이 나타난 13:30에 제주대학교 지점 24.9℃로 윗세오름 지점 11.1℃와 13.8℃의 차이를 보여 열지각 약 2.0단계 차이를 보였다.

UTCI에서도 PET와 마찬가지로 9:00에 성판악 지점, 사제비 지점과 윗세오름 지점에서 낮은 해발고도임에도 다른 지점보다 낮은 UTCI 값을 보였다. 13:30에는 제주대학교 지점 26.6℃로 윗세오름 지점 16.0℃와 10.6℃ 차이를 보여 열지각 약 1.8단계 차이를 보였다.

여름철과 가을철 분석을 종합하면, 인간 열환경지수(PET, UTCI) 저감 요인은 기온뿐만 아니라 풍속의 영향과 한라산 사면 중 위치한 장소에 따른 차이가 주요 요인으로 사료된다.

4. 고찰

4.1 산악 지형의 사면 방위

본 연구에서 낮은 고도의 북사면에 위치한 삼각봉 지점에서 높은 고도의 남사면에 위치한 한라산 남벽 지점이나 윗세오름 지점보다 기온이 낮게 나타난 기온 역전현상은 산악지형에서 사면 방위가 열환경에 지대한 영향을 미침을 시사한다. Lai et al.(2010)의 연구에서 대만의 고해상도 DEM 모델을 사용하여 산악지형에 도달하는 일사량을 분석한 결과, 사면의 경사각과 방위각에 따라 최대 300Wm^{-2}까지 차이를 보였다. Batlles et al.(2008)의 연구에서도 복잡한 산악지형의 일사량을 추정한 결과, 일사량은 경사와 방위각 같은 지형적 특성에 큰 영향을 받으며 지형적 특성에 따라 최대 약 3배의 일사량 차이를 보였다.

4.2 미기후 요소

본 연구의 가을철 시간별 미기후 자료 분석 결과, 사제비 지점과 윗세오름 지점에서 4.8ms^{-1}, 3.9ms^{-1}의 강풍이 동반되어 고도가 높은 지점보다 낮은 열환경을 보였다. 이는 고산 지대의 기온 저하와 강한 국지풍이 결합할 때, 인체의 대류(현열) 및 증발(잠열) 열손실이 급격히 증가하여, 단순 기온 저하보다 열환경 악화에 더 큰 영향을 미침을 시사한다. Wu et al.(2024)의 연구에서 해발 2,560m와 4,290m의 영하 10℃의 저온 환경을 모사하여 풍속이 생체열에 미치는 영향을 분석한 결과, 1.34ms^{-1}를 초과하는 풍속은 인체의 대류 및 증발 열전달 계수를 급격히 증가시키며, 바람에 의한 대류 열손실이 말단부의 피부 온도를 동상 위험 수준으로 급강하시키는 것으로 나타났다. 또

한, Duan et al.(2023)의 연구에서 해발 400m의 평야와 해발 3,650m 고원의 17℃ 저온 조건에서 인체 반응을 분석한 결과, 고산의 저압 및 저산소 환경에서는 말초 혈류량 감소로 인해 평지 대비 피부 온도가 1.4℃ 더 낮게 떨어졌으며, 체온이 다시 안정화되는데 걸리는 회복 시간도 20분에서 30분으로 지연된 바 있다. 다만, 위 실험들은 고지대의 환경이 조성된 실내에서 진행된 실험으로, 실제 야외 고지대에서의 영향은 더 클 것으로 예상된다.

4.3 절대습도와 풍향

일반적으로 절대습도는 기온과 마찬가지로 해발고도가 상승함에 따라 점차 감소하는 경향을 보인다. 그러나, 본 연구의 측정 결과, 6월에 R^2 0.5237, 9월에 0.7911, 10월에 0.8768로 고도 상승에 따른 절대습도의 감소가 특히 여름철에 불규칙하게 변화하였다(Figure 9 참조). 이는 지형적 특성과 계절에 따른 주풍향의 변화가 국지적 습도 분포에 영향을 미쳤기 때문으로 사료된다.

각 지점의 풍속 자료를 바람장미도로 분석한 결과, 여름철에서 가을철로 넘어가며 뚜렷한 변화가 관찰되었다. 여름철에는 바다에서 한라산을 향해 불어오는 해풍이 강세를 보였고, 가을철 9월과 10월로 진행되며 해풍의 영향이

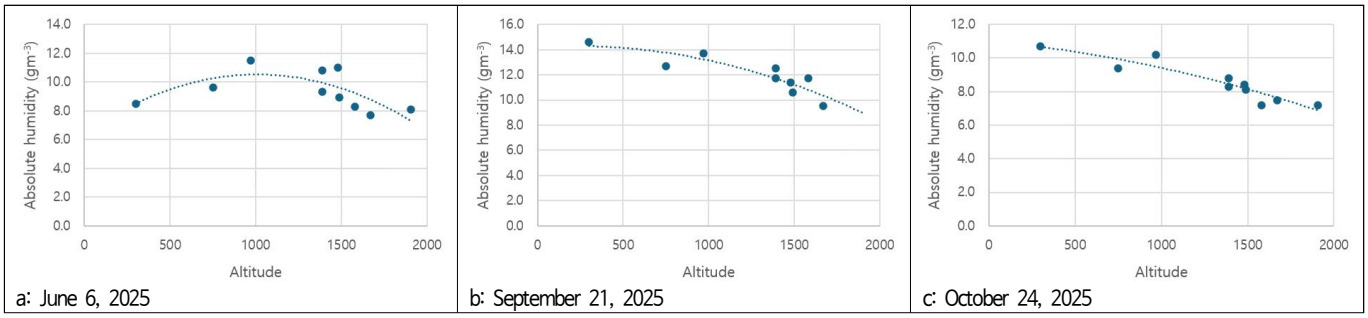


Figure 9. Polynomial regression analysis of absolute humidity as a function of altitude across sites[2)]

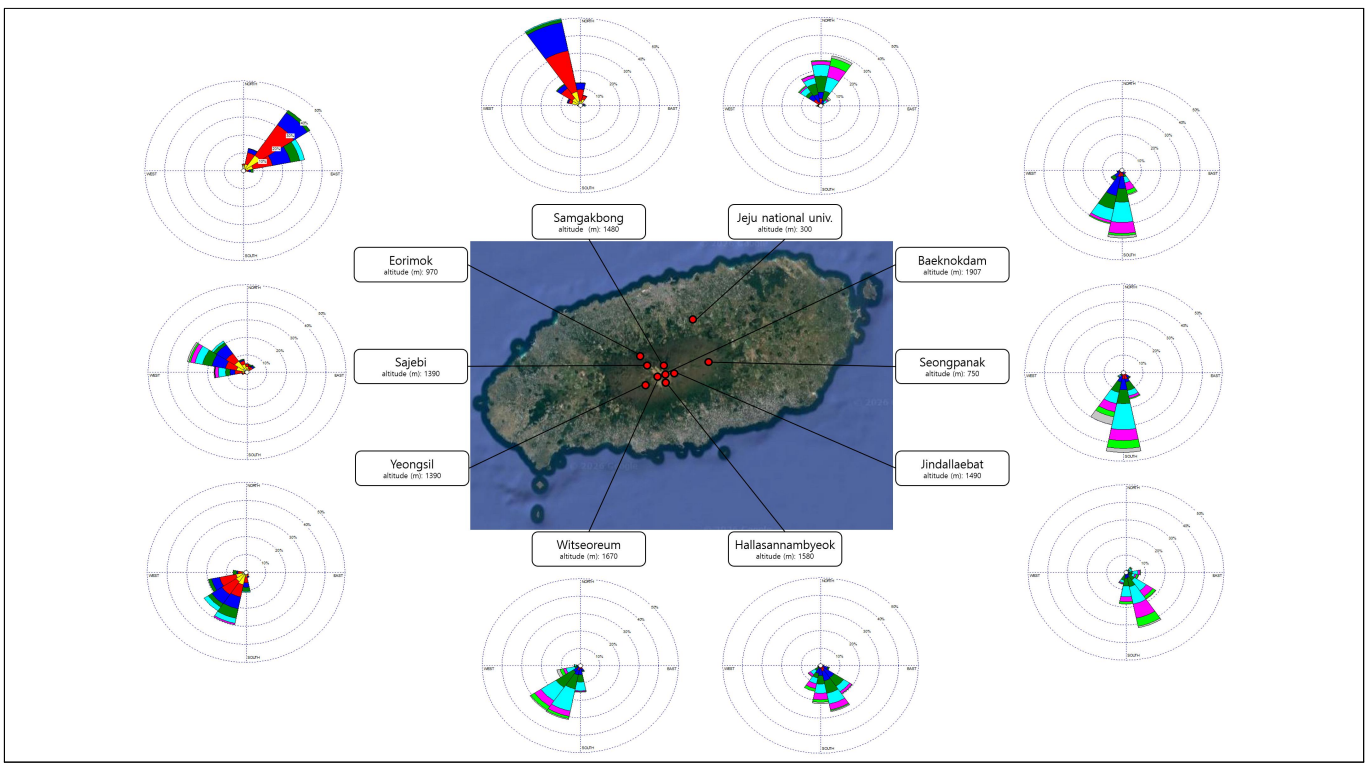


Figure 10. Wind rose diagrams on June 6, 2025: The radial length of each spoke denotes the occurrence frequency of winds from a specific direction, with concentric dashed circles indicating 10% increments, extending to a maximum outward limit of 50%

Legend: 0.0–0.3 ms^{-1}, 0.3–0.6 ms^{-1}, 0.6–0.9 ms^{-1}, 0.9–1.2 ms^{-1}, 1.2–1.5 ms^{-1}, 1.5–1.8 ms^{-1}, 1.8–2.1 ms^{-1}, 2.1–2.4 ms^{-1}, 2.4– ms^{-1}

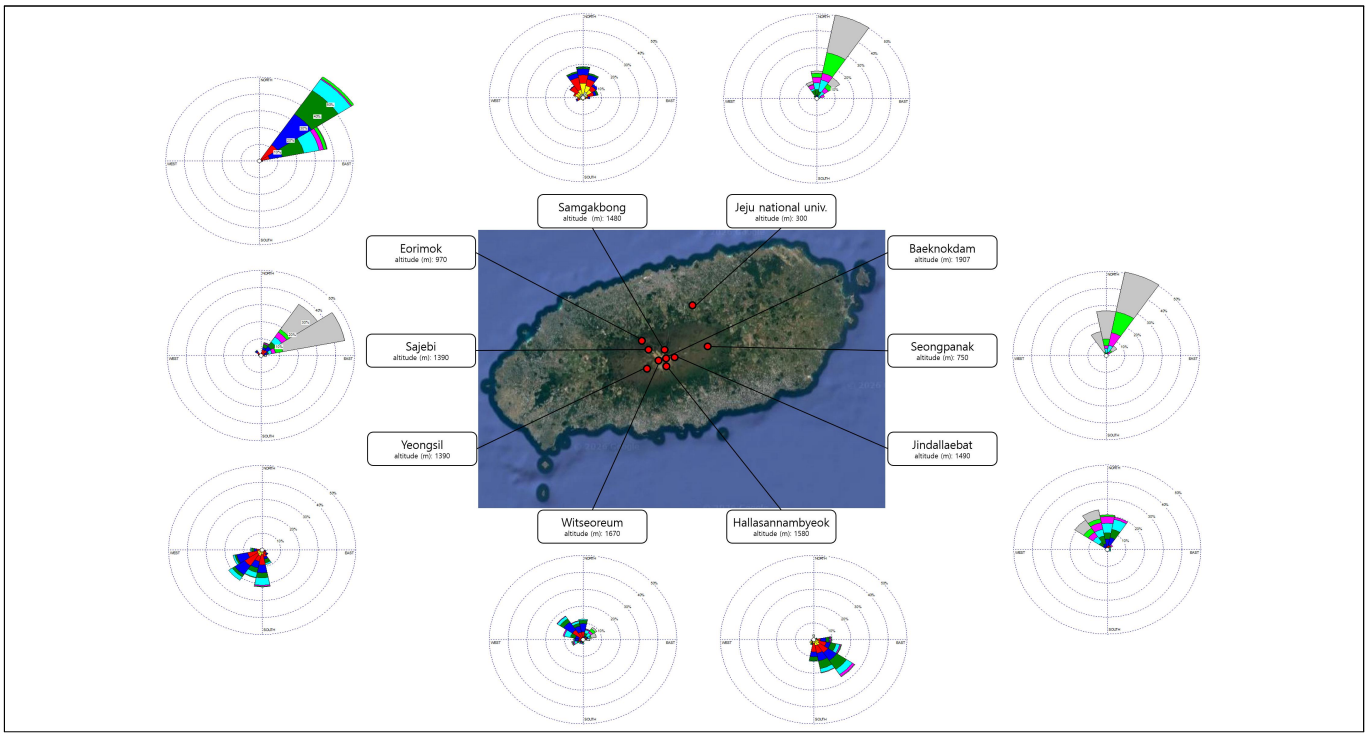


Figure 11. Wind rose diagrams on September 21, 2025: The radial length of each spoke denotes the occurrence frequency of winds from a specific direction, with concentric dashed circles indicating 10% increments, extending to a maximum outward limit of 50%

Legend: 0.0–0.3 ms^{-1} 0.3–0.6 ms^{-1} 0.6–0.9 ms^{-1} 0.9–1.2 ms^{-1} 1.2–1.5 ms^{-1} 1.5–1.8 ms^{-1} 1.8–2.1 ms^{-1} 2.1–2.4 ms^{-1} 2.4– ms^{-1}

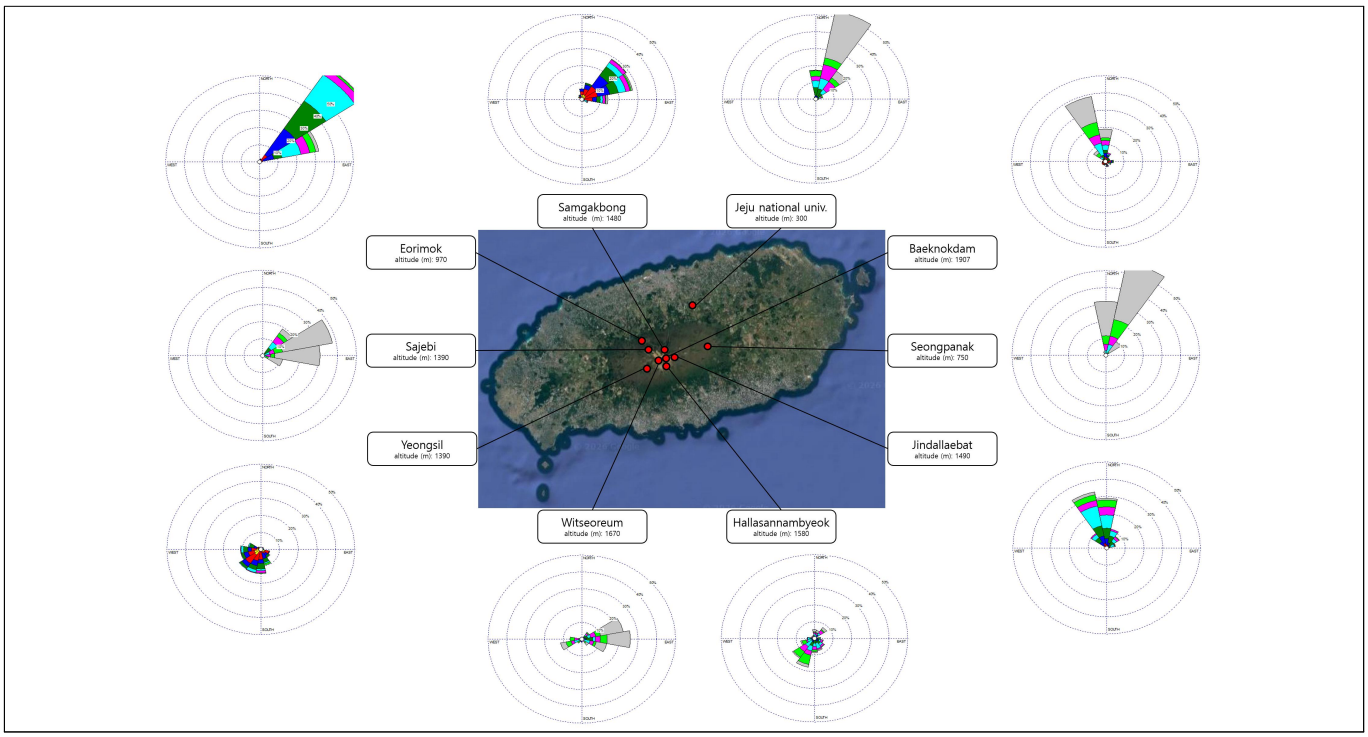


Figure 12. Wind rose diagrams on October 24, 2025: The radial length of each spoke denotes the occurrence frequency of winds from a specific direction, with concentric dashed circles indicating 10% increments, extending to a maximum outward limit of 50%

Legend: 0.0–0.3 ms^{-1} 0.3–0.6 ms^{-1} 0.6–0.9 ms^{-1} 0.9–1.2 ms^{-1} 1.2–1.5 ms^{-1} 1.5–1.8 ms^{-1} 1.8–2.1 ms^{-1} 2.1–2.4 ms^{-1} 2.4– ms^{-1}

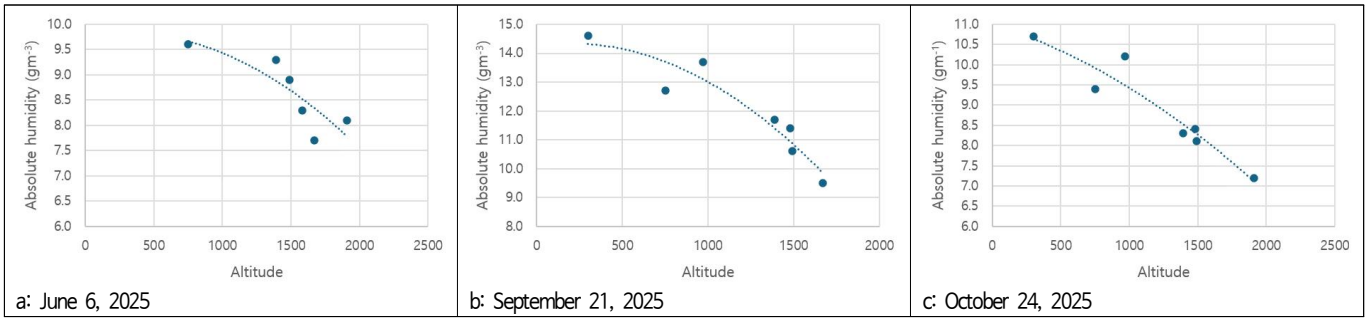


Figure 13. Polynomial regression analysis of absolute humidity as a function of altitude across sites grouped by respective prevailing wind directions[3)]

감소하여 풍향이 다양하게 변화하였다(Figure 10−12 참조).

풍향의 차이에 따른 영향을 최소화하여 분석하고자, 각 지점의 주풍향을 남풍과 북풍으로 이분하여 고도에 따른 절대습도의 변화량에 대한 회귀분석을 진행하였다(Figure 13 참조). 그 결과, 남풍이 우세했던 여름철에는 성판악, 영실, 진달래밭, 한라산 남벽, 윗세오름, 백록담의 총 6개 지점이 이에 해당하였다. 이들 지점의 고도별 절대습도 변화를 분석한 결과 R^2값이 0.7136으로 산출되어 고도 상승에 따른 뚜렷한 절대습도 감소 경향이 확인되었다. 그리고, 북풍이 우세했던 가을철의 경우, 9월에는 제주대학교, 성판악, 어리목, 사제비, 삼각봉, 진달래밭, 윗세오름의 7개 지점이 해당하였고, 10월에는 제주대학교, 성판악, 어리목, 사제비, 삼각봉, 진달래밭, 백록담의 7개 지점이 해당하였다. 가을철 회귀분석 결과 R^2값이 9월과 10월에 각각 0.8956, 0.9055로 도출되어 여름철과 마찬가지로 매우 강한 절대습도 감소 경향을 나타냈다.

5. 결론

본 연구는 제주대학교를 기준으로 한라산 국립공원의 고도별 기상청 관측 지점에서 실측한 미기후 자료와 기상청 AWS자료를 연계하여 고도에 따른 열환경 변화를 분석하였다.

6월 미기후 분석 결과, 해발고도 상승에 따른 기온 저감률은 약 0.61℃/100m로 산출되었으며, 이는 전형적인 자유대기의 기온 저감률 0.65℃/100m와 유사한 수준의 냉각 효과를 지니고 있음을 확인하였다. 그러나, 6월과 9월, 10월의 분석 결과를 종합하면, 산악 환경에서의 체감 열환경은 단순히 기온의 변화뿐만 아니라 각 지점의 지형적 위치와 국지적 풍속에 크게 영향을 받음을 확인하였다. 특히, 낮은 고도의 북사면에 위치한 삼각봉 지점이 높은 고도의 남사면 지점인 한라산 남벽 지점과 윗세오름 지점보다 기온이 낮게 관측된 기온 역전 현상은, 산악 지형에서 사면 방위와 지형적 차광이 국지 미기후 형성에 결정적인 역할을 할 수 있다는 것을 시사한다.

또한, 고산 지대의 기온 저하 환경에 강한 국지풍이 결합할 경우, 인체의 대류 및 증발 열손실이 급격히 증가하여 기온 강하 수치를 상회하는 심각한 열환경 악화를 유발함을 확인하였다.

마지막으로 고도 상승에 따른 절대습도의 감소 경향은 계절별 주풍향의 변화에 따라 불규칙한 양상을 보였다. 주풍향을 남풍과 북풍으로 이분화하여 분석한 결과 고도에 따른 절대습도의 감소가 명확히 확인되었다.

결론적으로, 지형적 복잡성이 높은 산악 환경의 열환경 평가를 위해서는 해발고도에 따른 기온 변화 외에도 사면 방위에 따른 복사량 변화와 국지적인 풍속, 그리고 주풍향에 따른 습도 변화를 필수적인 변수로 고려해야 할 것이다.

본 연구에서는 한라산 국립공원 내부의 기상청 AWS 설치 지점의 열환경을 분석하였다. 한라산 국립공원 내부 지점의 평균복사온도는 차이가 적을 것이라 가정하여 진달래밭 지점에서 측정한 값을 동일하게 적용하였으나, 연구 결과 각 지점별로 위치한 사면에 따른 양지와 음지의 영향이 큰 것으로 보여, 보다 정확한 연구를 위해서는 각 지점의 평균복사온도 값을 측정하여 적용할 필요가 있어 보인다. 향후 연구로는 고도에 따른 열환경 변화를 보다 정확하게 분석하기 위하여, 고도에 따른 복사에너지 변화량 분석에 대한 연구를 진행할 예정이다. 이 연구결과는 향후 등산, 산악 트래킹 등 산악지역에서의 쾌적한 인간활동을 위한 등산기후지수 개발에 기초자료로 이용가능할 것이며, 해당 기후지수는 오름, 동산과 같이 도심 속 산지에 공원 조성 시 활용가능한 열환경 평가 자료로 이용가능할 것이다.

주 1. 해당 그래프의 다항 회귀 방정식은 $y = -1.9683x^2 + 47.805x - 271.42$($R^2 = 0.7279$)이다.

주 2. 각 그래프의 다항 회귀 방정식은 다음과 같다: (a) $y = -4E - 06x^2 + 0.0081x + 6.4393$($R^2 = 0.5237$), (b) $y = -2E - 06x^2$

+ 0.0008x + 14.19(R^2 = 0.7911), (c) y = −6E − 07x^2 − 0.001x + 11.011(R^2 = 0.8768)

주 3. 각 그래프의 다항 회귀 방정식은 다음과 같다: (a) y = −8E − 07x^2 + 0.0004x + 9.7929(R^2 = 0.7136), (b) y = −2E − 06x^2 + 0.0008x + 14.266(R^2 = 0.8956) (c) y = −5E − 07x^2 − 0.0011x + 11.017(R^2 = 0.9055)

References

1. 조상만(2024) 인간 열환경지수를 이용한 한국형 관광기후지수 개발: 제주특별자치도 관광 및 레크리에이션 유형을 중심으로. 제주대학교 대학원 박사학위논문.
2. Aldobhani, A. M. S.(2014) Effect of altitude and tilt angle on solar radiation in tropical regions. Journal of Science and Technology 19(1): 96-109.
3. Batlles, F. J., J. L. Bosch, J. Tovar-Pescador, M. Martinez-Durban, R. Ortega and I. Miralles(2008) Determination of atmospheric parameters to estimate global radiation in areas of complex topography: Generation of global irradiation map. Energy Conversion and Management 49(11): 336-345.
4. Blumthaler, M., W. Ambach and R. Ellinger(1997) Increase in solar UV radiation with altitude. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 39(2): 130-134.
5. Bröde, P., D. Fiala, K. Błażejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann and G. Havenith(2012) Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). International Journal of Biometeorology 56(3): 481-494.
6. Buck, A. L.(1981) New Equations for Computing Vapor Pressure and Enhancement Factor. Journal of Applied Meteorology and Climatology 20(12): 1527-1532.
7. Chen, L., Y. Zhang, J. Han and X. Li(2021) An investigation of the influence of ground surface properties and shading on outdoor thermal comfort in a high-altitude residential area. Frontiers of Architectural Research 10(2): 432-446.
8. Chen, R., E. Kang, X. Jia, J. Yang and J. Wang(2007) An hourly solar radiation model under actual weather and terrain conditions: A case study in Heihe river basin. Energy 32(7): 1148-1157.
9. Correa, L. F., D. Folini, B. Chtirkova and M. Wild(2024) Causes for Decadal Trends in Surface Solar Radiation in the Alpine Region in the 1981-2020 Period. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 129(8): e2023JD039998.
10. Dahlback, A.(2008) Global monitoring of atmospheric ozone and solar UV radiation. In E. Bjertness, et al., Solar Radiation and Human Health. The Norwegian Academy of Science and Letters. pp. 23-34.
11. Duan, G., C. Song, Y. Liu, D. Wang and B. Suolang(2023) Study on the influence of hypobaric hypoxia on human thermal comfort under step change thermal environments. Energy and Buildings 279: 112683.
12. Herrería-Alonso, S., A. Suárez-González, M. Rodríguez-Pérez, R. F. Rodríguez-Rubio and C. López-García(2020) A solar altitude angle model for efficient solar energy predictions. Sensors 20(5): 1391.
13. Höppe, P.(1999) The physiological equivalent temperature: A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology 43(2): 71-75.
14. Iziomon, M. G. and H. Mayer(2001) Performance of solar radiation models: A case study. Agricultural and Forest Meteorology 110(1): 1-11.
15. Kong, H., N. Choi and S. Park(2021) Thermal environment analysis of landscape parameters of an urban park in summer-a case study in Suwon, Republic of Korea. Urban Forestry & Urban Greening 65: 127377.
16. Lai, Y. J., M. D. Chou and P. H. Lin(2010) Parameterization of topographic effect on surface solar radiation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 115: D01104.
17. Lee, H., S. Jo and S. Park(2022) A simple technique for the traditional method to estimate mean radiant temperature. International Journal of Biometeorology 66: 521-533.
18. Lee, H., H. Lim and S. Park(2023) Quantitative assessment of green coverage changes under the human-biometeorological perspective: A simulation case study in Jeju, Republic of Korea. Sustainable Cities and Society 97: 104734.

19. Liu, Y., Y. Lai, L. Jiang, B. Cheng, X. Tan, F. Zeng, S. Liang, A. Xiao and X. Shang(2023) A study of the thermal comfort in urban mountain parks and its physical influencing factors. Journal of Thermal Biology 118: 103726.
20. Longman, R. J., T. W. Giambelluca and A. G. Frazier(2012) Modeling clear-sky solar radiation across a range of elevations in Hawai'i: Comparing the use of input parameters at different temporal resolutions. Journal of Geophysical Research. Atmospheres 117: D02201.
21. Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer(2010) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. International Journal of Biometeorology 54(2): 131-139.
22. Park, S. and S. E. Tuller(2011) Comparison of human radiation exchange models in outdoor areas. Theoretical and Applied Climatology 105: 357-370.
23. Song, C., C. Zhou, H. Sang, D. Zhao and Y. Liu(2025) Thermal-humidity response and prediction model of sweating rate for plateau natives at high-altitudes. Building and Environment 271: 112627.
24. Tang, X., T. Yang, D. Yu, H. Xiong and S. Zhang(2024) Current insights and future perspectives of ultraviolet radiation (UV) exposure: Friends and foes to the skin and beyond the skin. Environment International 185: 108535.
25. Wu, J., C. Li, H. Zhu, Z. Hu, Z. Zhao and B. Sun(2024) An extended multi-segmented human bioheat model for high-altitude cold environments and its application in cold risk analysis. International Journal of Thermal Sciences 205: 109285.
26. Yang, K., J. He, W. Tang, J. Qin and C. C. K. Cheng(2010) On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology 150(1): 38-46.
27. https://data.kma.go.kr
28. http://www.urbanclimate.net/rayman