

수목과 그늘막의 도시 열 스트레스 완화 효과 비교 분석

남현우* · 이동근**† · 박병진* · 김선진* · 남예경***

*서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 석사과정생, **서울대학교 농업생명과학대학 정교수,

***서울대학교 환경대학원 협동과정 조경학 박사과정생

Comparative analysis of urban heat stress mitigation effects of trees and shade structures

Nam, HyunWoo* · Lee, Dong-kun**† · Park, Byeong-jin* · Kim, Sun-jin* and Nam, Ye-kyung***

*Master student, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

**Professor, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

***Doctoral student, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

As urban heat islands and extreme heat events intensify due to climate change, reducing heat stress in cities has become a critical issue. This study aims to quantitatively compare the thermal mitigation effects of an artificial shade structure and a single tree in pedestrian environments. Wet-bulb globe temperature (WBGT) and air temperature were measured under direct sunlight, a fixed shade structure, and a *Zelkova serrata* tree on the Seoul National University campus. Results showed that both shading strategies significantly lowered WBGT and air temperature compared to direct sunlight. The tree provided greater cooling, lowering WBGT by 0.6°C and air temperature by 1.0°C more than the structure. This difference was attributed to the tree's evapotranspiration and multi-layered foliage, which blocks solar radiation. In contrast, the effectiveness of the shade structure, which lacks evaporative cooling, was limited by longwave radiation emitted from its heated surface. While artificial shading was effective and space-efficient, its thermal performance was approximately 88% (WBGT) and 84% (air temperature) of the tree's result. Additionally, the tree offered broader environmental value, improving air quality, supporting biodiversity, and enhancing climate resilience. These findings highlight that trees play a dual role in both heat mitigation and long-term climate adaptation. Given the functional differences, selection or combination of different strategies should take into consideration site-specific constraints and planning goals. A hybrid approach that balances short-term measures and long-term ecological benefits is essential for future urban climate strategies.

Key words : Urban Heat Island, Heat Wave, WBGT, Air Temperature, Urban Planning

1. 서론

도시 열섬 효과와 폭염 문제는 세계 여러 도시에서 중요한 이슈로 다루어지고 있다. 영국의 국제개발환경연구소(IIED)의 분석에 따르면, 지난 30년간 전 세계 주요 대도시에서 일 최고기온이 35도를 넘는 '폭염일수'가 52%

증가하였으며, 특히 서울은 그 증가율이 가장 가파르게 나타난 도시 중 하나로 보고되었다. 한국의 도시는 꾸준한 개발을 통해 건물들의 높이와 밀집도가 높아지면서 도시 열섬 효과(Urban Heat Island, UHI)가 강해지고 있으며, 이는 시민 건강과 도시 지속 가능성에 악영향을 미치고 있다(Heaviside et al., 2017; Kug and Ahn, 2013).

†Corresponding author : dklee7@snu.ac.kr (Room 9219, Bldg. 200, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826 Korea. Tel. +82-2-880-4875)

ORCID 남현우 0009-0005-6324-041X
이동근 0000-0001-7678-2203
박병진 0009-0004-9460-440X

김선진 0000-0003-2482-6555
남예경 0000-0003-0721-3220

도시 열섬(UHI) 현상은 지속적인 도시 개발과 기후변화로 인해 더욱 심화되고 있으며, 이에 따라 폭염일수와 온열질환자 또한 증가하고 있다. 이때 캐나다 근로자산재예방위원회(Workers' Compensation Board, 2000)에 따르면, 열 스트레스(heat stress)는 고온 환경에서 사람이 체온을 유지하지 못하고 인체 온도가 상승할 때 경험하는 생리적 부담을 의미한다. 이는 열사병, 탈진, 심혈관계 이상 등 다양한 건강 문제를 유발할 수 있으며, 특히 노인, 아동 등 열 취약계층에게는 더욱 치명적이다(Shahmohamadi et al., 2011).

이러한 열 스트레스를 나타내는 대표적인 지표로는 습구흑구온도(Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT)가 사용된다. 세계보건기구(WHO)는 WBGT를 작업 환경에서의 열 스트레스 판단 기준으로 권고하고 있으며, 국제표준기구(ISO) 역시 이를 표준 지표로 규정하고 있다. WBGT는 인간의 열 쾌적성에 영향을 미치는 주요 요소인 기온, 태양 복사, 그리고 습도를 반영하는 복합 지표로, 실제 체감 열 환경을 반영하는 데 적합하다. 이에 본 연구에서는 직사광선 조건을 기준으로 그늘막 및 수목 아래에서 WBGT와 기온을 측정하였으며, 이를 통해 두 전략의 열 스트레스 완화 효과를 정량적으로 분석하였다.

도시 환경에서 보행자의 열 쾌적성(thermal comfort)을 확보하는 것은, 시민의 건강을 보호하는 동시에 기후변화 적응의 핵심 요소로 간주된다. 열 쾌적성은 열 환경에 대한 주관적인 만족을 표현하는 마음의 상태이며, 인체와 주변 환경 간의 복사열 교환에 영향을 받는다(Lai et al., 2020). 이때 수목과 그늘막은 그늘을 제공함으로써 복사열을 차단하여, 열 스트레스를 완화하는 효과적인 수단으로 주목받는다(Middel et al., 2016; Siqi et al., 2023). 수목은 그늘 제공 및 증산작용을 통해 표면 온도와 공기 온도를 낮추어 도시 열섬 완화할 수 있으며(Rahman et al., 2019), 그늘막은 직사광선을 차단함으로써 인체 온도의 상승을 억제하고 열 부담을 줄이는 효율적이고 경제적인 수단이다(Turner et al., 2023).

국내에서도 그늘막, 쿨링포그, 무더위 쉼터 등 다양한 폭염 대응 전략이 시행되고 있으나, 대부분 인공 구조물 중심으로 구성되어 있고 수목은 상대적으로 간과되고 있다. 이는 수목의 열 스트레스 완화 가능성이 과소평가되고 있으며, 도시 기후변화 적응 관점에서의 검토가 필요함을 시사한다. 수목과 그늘막은 각각 물리적 구조 및 냉각 작동 원리가 다른 폭염 대응 전략이며, 기후변화 적응 옵션으로서의 효과성 또한 서로 다른 양상을 보인다. 따

라서 단순한 냉각 효과 비교를 넘어, 실효성과 지속 가능성 측면에 대해서도 고려할 필요가 있다. 일부 연구는 그늘막과 유사한 기능을 하는 자외선 차단 양산과 수목의 열 스트레스 완화 효과를 비교한 바 있지만(Kusaka et al., 2022), 수목과 그늘막의 효과를 직접 비교한 연구는 부족하다. 서울기술연구원의 Choi et al. (2022)에서도 가로수와 그늘막의 온도 저감 효과를 비교하였지만, 표면 온도를 기준으로 이루어져 실질적으로 인체가 체감하는 열 환경을 반영하지 못한 한계가 있다.

본 연구는 기존의 표면 온도 기반 접근과 달리, 인체 수준의 열 스트레스(WBGT) 지수를 직접 측정함으로써 온열질환의 발생 위험과 연계된 실질적인 열 환경 평가를 시도했다는 점에서 차별성을 지닌다. 또한, 국내에서 그늘막이 주요 열 완화 전략으로 널리 활용되고 있음에도 불구하고, 수목이 자연기반해법(Nature-based Solutions, NbS)으로서 기후변화 적응 측면에서도 의미 있는 대안이 될 수 있으며, 열 스트레스 완화 효과에서도 경쟁력 있는 잠재성을 가질 수 있음을 탐색하고자 한다.

이에 본 연구의 목적은 도심 환경에서 수목과 그늘막이 보행자의 열 스트레스에 미치는 영향을 WBGT와 기온을 기준으로 정량적으로 비교·분석하고, 이를 통해 기후변화 적응을 위한 효과적인 열 스트레스 완화 전략의 방향을 제시하는 것이다. 이를 위해 다음과 같은 연구 질문을 설정하였다.

- (1) 수목과 그늘막은 각각 보행자의 열 스트레스를 어느 정도 완화하는가?
- (2) 두 전략은 WBGT 및 기온 측면에서 어떤 정량적 차이를 보이는가?
- (3) 두 전략은 도시 공간에서의 적용 가능성, 열 저감 안정성, 유지관리 측면에서 어떤 차이를 보이며, 폭염 대응 전략 및 기후변화 적응 전략으로서 어떤 의미를 지니는가?

2. 재료 및 방법

2.1. 대상지

본 연구는 서울특별시 관악구에 있는 서울대학교 캠퍼스 내 광장에 설치된 그늘막의 환경을 기준으로 실험 대상을 설정하였다(Fig. 1). 서울대학교 캠퍼스는 다양한 건물과 가로수, 형태가 다른 보행로가 혼재되어 있으며, 유동 인구가 지속적으로 존재하는 공간으로 열 스트레스 환

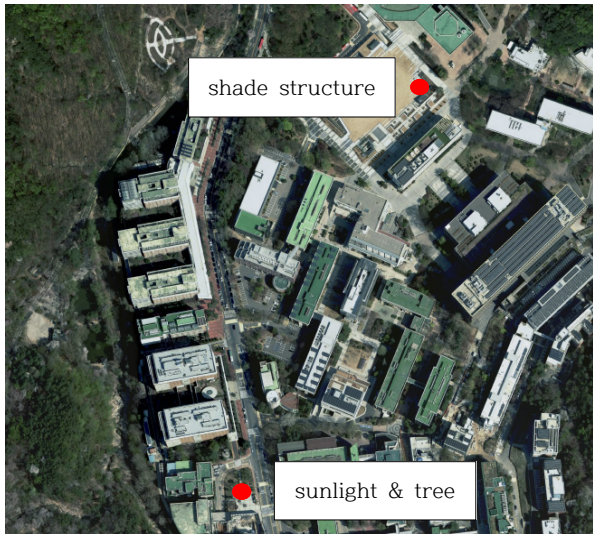


Fig. 1. Study site and measurement locations

경을 분석하기에 적합한 조건을 갖추고 있다. 직사광선과 수목을 측정하는 지점 또한 그늘막이 설치된 환경 조건(바닥면, 주변 장애물에 의한 그늘 유무 등)과 유사한 위치로 설정하여 실험 조건 간 비교의 타당성을 확보하였다.

각 측정 지점의 바닥면은 동일하거나 유사한 색상과 재질로 구성된 공간으로 선정하여, 지표면 특성으로 인한 복사에너지 반사량의 차이를 최소화하였다. 또한, 건물이나 수목 등 외부 장애물의 그림자 영향이 배제된 장소로 설정하여 차광 효과가 각 전략에 의해 독립적으로 나타나도록 통제하였다.

다만, 측정 지점 간에는 물리적 거리가 존재하며, 전략

이 설치된 지점과 인접한 영역 외에는 바닥면의 재질이나 색상이 다르다는 점에서 통제의 한계가 있다. 이러한 제한에도 불구하고, 모든 측정 지점은 장애물 간섭이 없는 야외 공간에 위치하여 그림자의 중첩 없이 안정적인 열환경 비교가 가능하도록 설계되었으며, 실험 간 환경적 조건은 최대한 일관되게 유지되었다.

실험에 사용된 그늘막은 2024년 8월에 설치된 고정식 구조물로, 하나의 기둥에 네 개의 초록색 차광막이 부착된 형태이다. 해당 그늘막의 재원은 납품 업체의 시방서를 기준으로 확인하였다. 시방서에 따르면, 차광막은 고밀도 폴리에틸렌(High Density Polyethylene, HDPE) 재질로 제작되었으며, 차광률은 약 90%, 차광막 설치 높이는 약 2.3 m, 전체 구조물 높이는 약 3.5 m이다. 차광막의 크기는 3 m × 3 m이며, 그늘 면적은 약 9 m²이다.

수목은 느티나무(*Zelkova serrata*)가 사용되었으며, 이는 국내에서 은행나무와 양버즘나무 다음으로 많이 식재된 대표적인 가로수 종이다. 수목의 높이는 약 5.5 m, 잎면적 지수(Leaf Area Index, LAI)는 3.38, 그늘의 폭은 약 7.1 m이며, 수관의 형태는 원형에 가까워 그늘 면적은 약 40 m²로 추정된다.

2.2. 측정 방법

두 전략의 열 스트레스 완화 효과를 평가하기 위해 본 연구에서는 직사광선, 그늘막, 수목 아래에서 WBGT와 기온을 측정하였다(Fig. 2). 각 측정은 지상 1.5 m 높이에서 수행되었으며, 측정 장비로는 WBGT-2010SD 모델(Lutron Electronics Co., Inc., Coopersburg, PA, USA)을



(a) Sunlight



(b) Shade structure



(c) Tree

Fig. 2. Field measurement sites



Fig. 3. WBGT-2010SD

사용하였다(Fig. 3). 측정 시간은 일사량과 기온이 가장 높은 시간대인 오후 1시부터 4시까지이며, 2초 간격으로 실시간 데이터를 수집하였다. 실측에 앞서 2024년 8월 29일에는 시범 측정을 통해 장비 오류 여부를 점검하였으며, 본 측정은 9월 4일에 동일 조건에서 수행되었다.

WBGT는 세 가지 요소로 구성되어 있으며, 각기 다른 열 환경 요인을 반영하고, 보행자의 열 스트레스에 서로 다른 방식으로 영향을 미친다.

건구온도(Dry-bulb temperature, TA)는 일반적으로 공기 온도이며, 실제 열역학 온도이다. 습구온도와 달리 건구온도는 공기 중 수분의 양을 나타내지 않으며, 열 쾌적성 계산을 위한 주요 변수 중 하나이다.

흑구온도(Globe temperature, TG)는 복사열의 영향을 포함한 온도로, 태양 복사 및 주변 표면에서 방출되는 장파 복사에 크게 영향을 받는다. 흑구온도가 높을수록 인체는 더 많은 복사열을 흡수하게 되어, 열 스트레스가 급격히 증가한다.

습구온도(Wet-bulb temperature, WB)는 현재 환경 조건에서 물의 증발만으로 도달할 수 있는 가장 낮은 온도를 의미한다. 이는 인체가 땀을 통해 체온을 낮추는 증발 냉각 작용의 효율성을 나타내며, 습구온도가 높을수록 땀이 증발하기 어려워 체온 조절 능력이 떨어지고, 열사병 등의 위험이 증가한다.

WBGT는 위 세 가지 온도를 바탕으로 측정 장비에 의해 자동 산출되며, 다음 식 (1)에 따라 계산된다(Yaglou and Minaed, 1957).

Table 1. Criteria of WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature) for the prevention of heat illness in daily life (Japanese Society of Biometeorology, 2022)

Reference range by WBGT	Intensity of daily activities to be monitored
Danger WBGT $\geq 31^{\circ}\text{C}$	Exercise should be suspended in principle
Severe warning $31^{\circ}\text{C} > \text{WBGT} \geq 28^{\circ}\text{C}$	Intense exercise should be avoided
Warning $28^{\circ}\text{C} > \text{WBGT} \geq 25^{\circ}\text{C}$	Frequent rest is strongly recommended
Caution WBGT $< 25^{\circ}\text{C}$	Hydration is strongly recommended

Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT)

$$\text{WBGT} = 0.7 \times \text{WB} + 0.2 \times \text{TG} + 0.1 \times \text{TA} \quad (1)$$

Table 1은 일본생기상학회(JSB)에서 발표한 온열질환 위험도에 대한 WBGT 기준이다. 일본생기상학회(JSB)에서는 WBGT를 기준으로 온열질환 위험에 관련된 환경 요인을 4단계로 분류한다. WBGT가 위험(WBGT $\geq 31^{\circ}\text{C}$)일 경우, 고령자는 가만히 휴식을 취하더라도 온열질환에 걸릴 위험이 있다고 말한다. 그리고 모든 사람에게 야외 활동을 피하고 냉방시설이 갖춰진 실내에 머물 것을 권고한다. JSB는 심각한 경고($28^{\circ}\text{C} \leq \text{WBGT} < 31^{\circ}\text{C}$)일 경우, 모든 사람은 야외 활동 시 직사광선을 피하고 실내 활동 시 실내 온도를 주의할 것을 권장한다.

2.3. 분석 방법

본 연구는 수목과 그늘막의 열 스트레스 완화 효과를 정량적으로 비교하기 위해, 세 가지 환경(직사광선, 그늘막, 수목)에서 WBGT와 기온을 측정하고 통계 분석을 수행하였다. 측정된 변수 간의 유의미한 차이를 검증하기 위해 일원분산분석(One-way ANOVA)을 실시하였으며, 그룹 간 통계적 유의성을 확인한 후 Tukey HSD 사후 검정을 통해 환경별 비교를 하였다. 이를 통해 각 환경 간 WBGT 및 기온의 차이가 통계적으로 의미 있는지를 검증하였다.

또한, 열 스트레스 완화 효과의 기여도를 비교하기 위해 WBGT의 구성 요소인 건구온도(Dry-bulb temperature, TA), 흑구온도(Globe temperature, TG), 습구온도(Wet-bulb

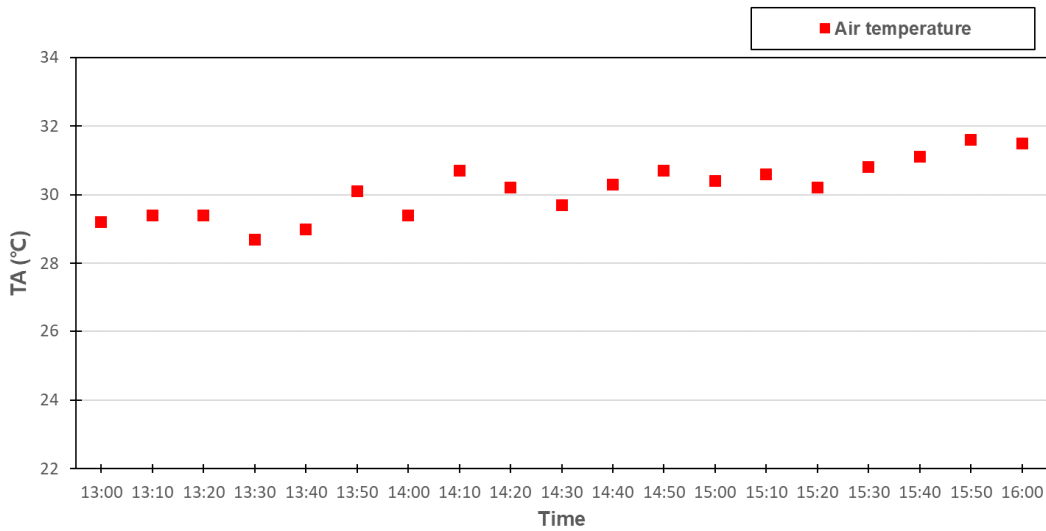


Fig. 4. Korea Meteorological Administration (KMA) based Air temperature (TA)

temperature, WB)를 각각 측정하고, WBGT 산정식에서 제시된 가중치(0.1, 0.2, 0.7)를 곱하여 각 요소의 기여도를 정량화하였다. 이 분석을 통해 각 전략이 어떤 원리를 통해 열 스트레스 완화에 기여하는지를 평가하였다. 이러한 접근은 단순한 온도 비교를 넘어, 수목과 그늘막의 효과 차이를 더욱 구체적으로 해석할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. WBGT와 건구온도 측정 결과

비가 오지 않는 맑은 조건(2024년 9월 4일, 13시~16시)에서 기상 환경에 따른 세 지점에서의 WBGT와 기온 측정값을 비교하였다. 기상청(KMA) 관측 자료에 따르면, 해당 시간대 연구 대상지의 최고기온은 32.1°C, 평균 기온은 30.4°C, 체감온도는 평균 29.7°C, 평균 습도는 48%, 평균 풍속은 1.9 m/s였다(Fig. 4, Table 2). 측정 현장에서는 지속적인 바람이 불었으며, 간헐적으로 구름이 태양을 가리는 상황이 반복되었다.

직사광선 아래에서 측정된 WBGT는 28.4°C에서 33.6°C 사이, 평균 30.4°C였으며(Fig. 5), 이는 관측 기간 내내 온열질환 위험도가 “심각한 경고” 수준임을 나타내었다(Table 1). 그리고 기온은 35.4°C에서 43.4°C 사이, 평균은 38.9°C로 확인되었다(Fig. 6). 이에 비해, 그늘막 아래에서의 평균 WBGT는 26.1°C, 수목 아래에서는 25.5°C로 위험도가 모두 “경고” 단계로 감소하였다. 기온 역시 그늘막

Table 2. Hourly mean weather conditions (KMA)

Weather variable	Mean value
Air temperature (°C)	30.4
Wind speed (m/s)	1.9
Wind direction	South-West
Relative humidity (%)	48
Sunshine duration (hr)	0.975
Solar radiation (MJ/m ²)	2.74
Cloud cover (tenths)	1

아래에서 평균 33.5°C, 수목 아래에서는 32.5°C로 나타나, 두 전략 모두 직사광선에 비해 열 스트레스와 기온을 유의하게 완화하는 것으로 나타났다(Fig. 5, Fig. 6).

측정된 기온이 기상청 관측 자료에 비해 높게 나타난 것은 측정 환경의 차이에 기인한다. 기상청은 직사광선과 복사열로부터 차단된 조건에서 기온을 측정하지만, 본 연구는 햇빛과 지면의 복사열에 노출되어 공기가 지속해서 가열되는 실제 보행 환경에서 측정하였기 때문이다 (Taleghani et al., 2018).

3.2. 열 스트레스 완화 효과 비교 및 통계 분석

WBGT 및 기온 측정값의 차이에 대한 통계적 유의성을 검토하기 위해 일원분산분석(ANOVA)을 수행한 결과(Table 3), 세 가지 환경 모두에서 유의미한 차이가 나타

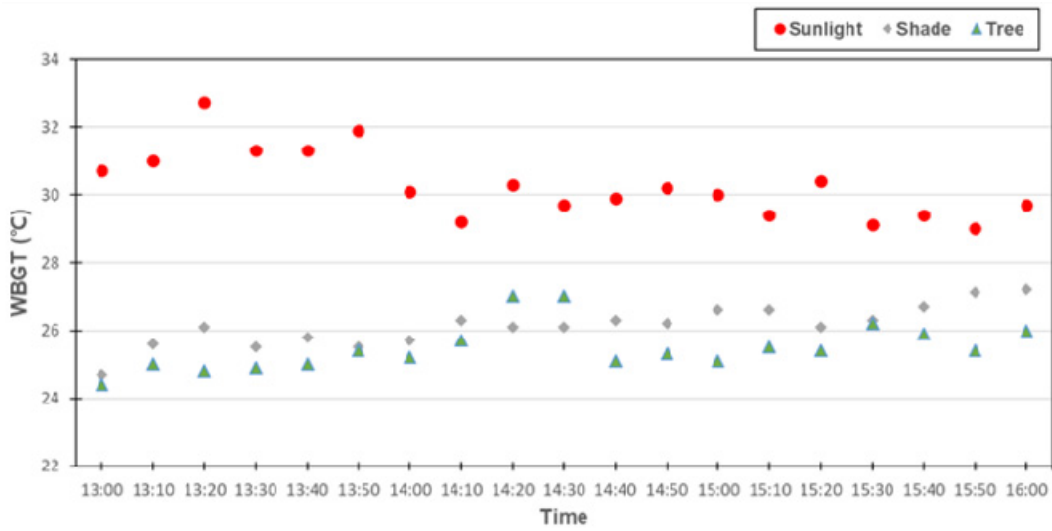


Fig. 5. Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) under sunlight, shade structure and tree

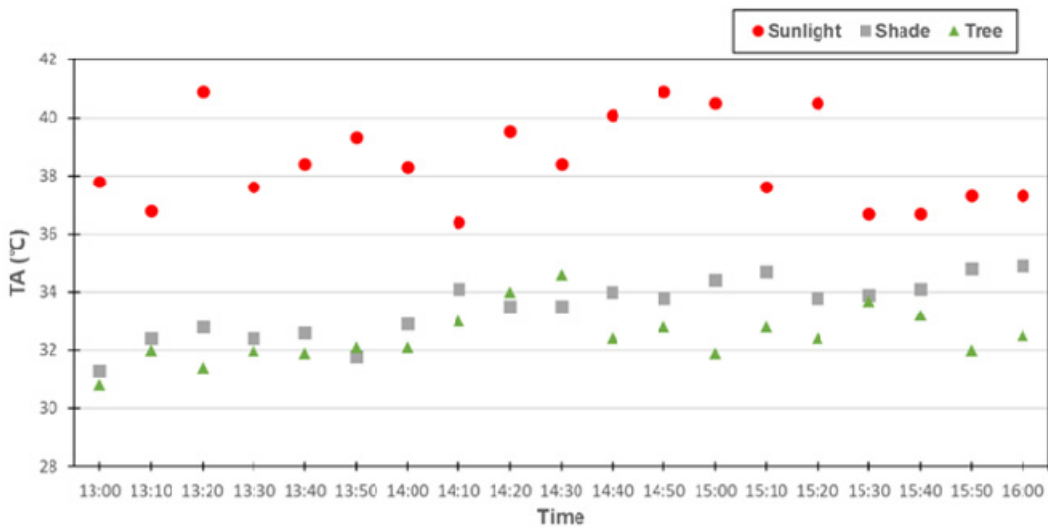


Fig. 6. Air temperature (TA) under sunlight, shade structure and tree

Table 3. Results of one-way ANOVA

Variable	Source	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
WBGT	Group	2	77,160	38,580	68,846	< 0.001
	Residuals	16,200	9,078	1		
TA	Group	2	128,720	64,360	52,476	< 0.001
	Residuals	16,200	19,869	1		

Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT), air temperature (TA)

났다($p < 0.001$). 이어진 Tukey HSD 사후 검정에서도 모두 유의한 차이가 확인되었으며(Table 3), 수목 아래의 환경은 그늘막보다 WBGT와 기온이 낮아, 수목이 더 나은 냉각 효과를 가지는 것으로 해석된다.

WBGT 평균은 직사광선에서 30.4°C, 그늘막 아래에서 26.1°C, 수목 아래에서는 25.5°C로, 수목은 직사광선보다 4.9°C, 그늘막보다 0.6°C 더 낮았다. 기온 또한 직사광선에서 평균 38.9°C, 그늘막 33.5°C, 수목 32.5°C로 측정되었으며, 모든 그룹 간 비교에서 통계적으로 유의한 차이가 있었다(Table 4). 그늘막의 완화 효과는 수목에 비해 WBGT는 약 88%, 기온은 약 84% 수준으로 나타나, 수목이 상대적으로 더 효과적인 열 스트레스 완화 수단임을 시사한다. 이러한 결과는 그늘막과 비슷한 기능을 하는

자외선 차단 양산과 수목의 냉각 효과 비교를 한 Kusaka et al. (2022)의 연구 결과와 유사하다.

바이올린 플롯을 통한 분포 비교에서는, 수목에서의 온도 분포가 상대적으로 더 낮은 값에 집중되어 있으나, 오후 2시 30분 전후 햇빛이 잎 사이로 들어온 시간대에는 일시적으로 온도가 상승하며 분포가 비대칭적으로 나타났다(Fig. 7). 이는 수목 캐노피의 구조적 특성상 빛이 부분적으로 투과되며, 시간대에 따라 차광 효과가 일정하지 않다는 점을 시사한다. 실제로 수목 구간의 WBGT 표준 편차는 0.67로, 그늘막(0.46)보다 크며, 이는 차광 조건의 변동성을 통계적으로 뒷받침한다(Table 5).

반면 그늘막은 빈 공간 없이 일정한 그늘 조건을 유지하기 때문에, 온도 변동성이 가장 낮게 나타났다. WBGT

Table 4. Results of Tukey HSD post-hoc test

	Comparison	Mean difference	95% CI (Lower-Upper)	p-value	Interpretation
WBGT	Sunlight-Shade	4.3°C	[4.22, 4.29]	< 0.001	Sunlight > Shade
	Tree-Shade	-0.6°C	[-0.71, -0.64]	< 0.001	Tree < Shade
	Tree-Sunlight	-4.9°C	[-4.96, -4.89]	< 0.001	Tree < Sunlight
TA	Sunlight-Shade	5.4°C	[5.36, 5.46]	< 0.001	Sunlight > Shade
	Tree-Shade	-1.0°C	[-1.06, -0.96]	< 0.001	Tree < Shade
	Tree-Sunlight	-6.4°C	[-6.47, -6.37]	< 0.001	Tree < Sunlight

Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT), air temperature (TA)

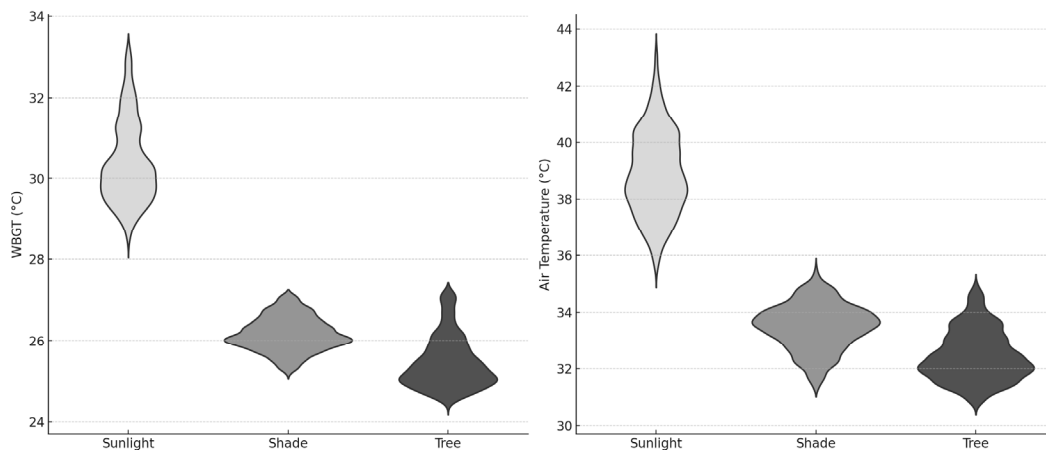


Fig. 7. Distribution of Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) and air temperature (TA) in sunlight, shade structure and tree (violin plot analysis)

와 기온의 표준편차가 각각 0.46, 0.83으로 세 조건 중 가장 작았으며, 이는 외부 환경에 덜 민감하게 반응함을 의미한다. 이처럼 통계적 지표에서도 확인되듯, 그늘막은 열 환경의 안정성 측면에서 강점을 갖는다.

직사광선 환경에서는 WBGT와 기온의 표준편차가 각각 1.01, 1.48로 온도 분포의 변동성이 가장 크게 나타났으며, 이는 구름과 바람의 영향으로 여겨진다. 측정 당일은 대체로 맑은 날씨였으나, 구름이 1~3분 동안 태양을 가리는 현상이 여러 차례 발생하였으며, 평균 풍속은 1.9 m/s로 간간히 불어왔다. 구름은 태양 복사량을 감소시켜 WBGT를 약 1°C 낮출 수 있으며, 바람은 대류와 표면 증발을 촉진하여 열을 빠르게 식힘으로써 풍속이 0 m/s에서 2 m/s로 증가할 때 WBGT를 약 5.4°C까지 감소시킬 수 있다(Clark and Konrad, 2024). 따라서 직사광선 환경의 온도 변화는 구름과 바람의 영향을 크게 받은 결과이며, 2초 간격의 기록 주기로 인해 외부 환경에 민감하게 반응

한 것이 나타난 것이다.

결과를 종합해 보면, 수목은 냉각 효과 측면에서는 우수한 성능을 보였지만, 캐노피 구조 특성상 차광의 안정성 측면에서는 일정하지 못하다는 한계를 보였다. 반면, 그늘막은 일정한 그늘을 제공함으로써 열 환경을 안정적으로 유지할 수 있었고, 좁은 공간에도 설치가 가능하여 공간의 유연성 측면에서도 실용적인 이점이 있다. 수목은 생장에 따라 수관의 크기 및 잎 밀도가 불확실하게 변화하지만, 그늘막은 직관적이고 일관된 그늘을 제공하며 공간 활용 측면에서도 효율성이 높다는 차별적 특성을 갖는다. 따라서, 효과적인 열 스트레스 완화 전략을 수립하기 위해서는 목표 공간의 환경과 조건에 맞는 수단을 제시할 필요가 있다.

3.3. 열 스트레스 감소 기여도 비교

그늘막과 수목이 어떤 원리로 열 스트레스를 완화하는

Table 5. Mean and standard deviation of WBGT and TA

Location	WBGT Mean (°C)	WBGT SD	TA Mean (°C)	TA SD
Sunlight	30.4	1.01	38.9	1.48
Shade	26.1	0.46	33.5	0.83
Tree	25.5	0.67	32.5	0.90

Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT), air temperature (TA)

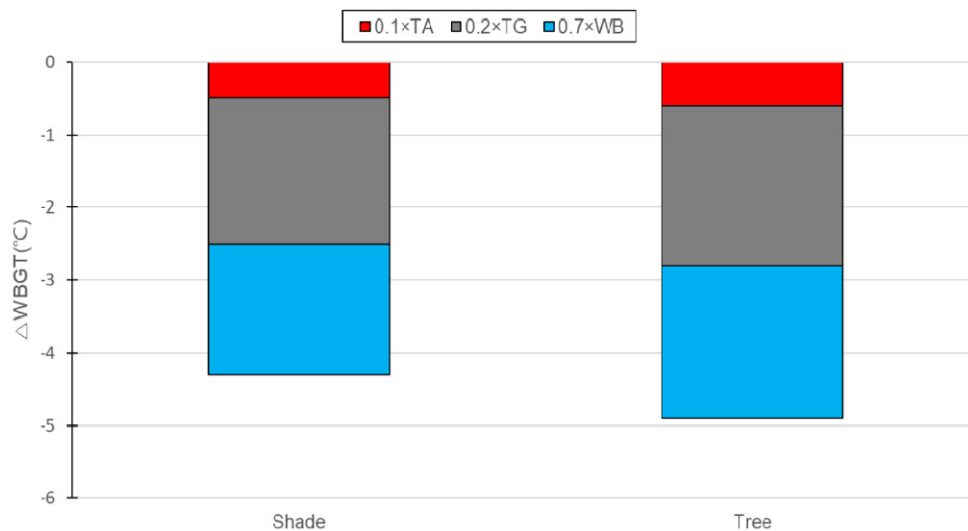


Fig. 8. The difference in Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) under direct sunlight and the other two locations

지 비교하기 위해, WBGT를 구성하는 세 요소의 감소량을 분석하고 가중치를 적용하여 기여도를 산출하였다(식 (1)). 분석 결과, 두 전략 모두 흑구온도와 습구온도가 WBGT 감소에 가장 큰 영향을 미친 것으로 나타났다(Fig. 8). 이는 열 환경에서 태양 복사 차단 및 수증기 증발에 의한 냉각 효과가 열 스트레스 완화에 결정적인 역할을 한다는 점을 시사한다.

수목의 경우, WBGT는 직사광선 대비 4.9°C 감소하였으며, 건구온도 0.6°C(13.0%), 흑구온도 2.2°C(44.6%), 습구온도 2.1°C(42.4%)가 각각 기여하였다. 그늘막은 WBGT를 4.3°C 감소시켰으며, 이에 대한 각 요소의 기여도는 건구온도 0.5°C(12.7%), 흑구온도 2.0°C(45.8%), 습구온도 1.8°C(41.5%)로 나타났다.

이때 전반적으로 세 요소 모두에서 수목의 절대 감소량은 그늘막보다 높게 나타났다. 이는 수목의 잎이 겹겹이 층을 이루는 캐노피 구조를 통해 복사에너지를 효과적으로 차단하고(Luo et al., 2024), 증산작용을 통해 주변 공기를 냉각함으로써 주변 공기의 온도를 효과적으로 낮춘 것이 원인으로 해석된다(Kong et al., 2017; Rahman et al., 2019). 반면, 그늘막은 증산작용으로 표면 온도와 주변 온도를 냉각시키는 기능이 없다. 따라서 시간이 지남에 따라 가열된 차광막 표면이 장파 복사를 방출함으로써 오히려 열 스트레스 완화에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Kusaka et al., 2022).

수목은 도시 환경에서 단순히 그늘을 제공하는 것에 그치지 않고 공기질 개선, 시민의 건강과 심리적 안정, 미적 가치 제공, 생물다양성 향상 등 다양한 이점을 제공한다(Mullaney et al., 2015). 그중 하나는 제한적이지만 탄소를 흡수하고 격리하는 기능으로(Tang et al., 2016), 이는 대기 중 온실가스 농도를 저감시켜 장기적인 온도 상승을 억제함으로써 기후변화 완화 및 적응에 기여할 수 있다.

인공 및 자연 그늘을 제공하는 것은 여름철 도시에서 열 스트레스를 완화하는 데 중요한 역할을 한다(Ouyang et al., 2024). 그늘막은 햇빛을 차단하여 즉각적인 냉각 효과를 유도하지만, 수목은 그늘 제공 외에도 공기 정화, 증산을 통한 냉각, 생물다양성 유지 등 복합적인 생태적 기능을 수행하므로 단순히 그늘막으로 대체될 수 없다(Turner et al., 2023). 본 연구 결과에서도 수목은 복사 차단 및 증산작용을 통해 그늘막보다 더 큰 온도 감소 효과를 보였으며, 이는 열 스트레스 완화와 더불어 기후변화 적응 전략으로서 수목의 잠재적 가치를 시사한다.

본 연구는 수목과 그늘막의 열 스트레스 완화 효과를

비교하기 위한 실측 분석으로, 실외 환경에서의 생리적 열 부담을 실제 조건에 가깝게 반영하려는 의의가 있다. 그러나 연구 설계 및 실행 측면에서 다음과 같은 한계가 존재한다.

첫째, 본 실험은 2024년 9월 초 단일 일자에 한정된 측정 결과를 기반으로 하며, 이는 여름철 전반을 대표한다고 보기에는 무리가 있다. 고온 다습한 환경이 반복되는 폭염 시기와 비교할 때, 특정 일자의 기상 조건은 상대적으로 안정적일 수 있으며, 이에 따라 측정 결과의 시간적 대표성이 제한될 수 있다.

둘째, 실험에 사용된 수목과 그늘막은 각각 단일 수종과 구조물 유형으로 제한되어 있어, 다양한 차광 조건에서의 효과 차이를 반영하지 못한다는 한계가 있다. 실제 도시 환경에서는 다양한 수종, 캐노피 구조, 차광막 재질 및 형상 등이 존재하므로, 일반화된 결론을 도출하기 위해서는 다양한 조건을 반영한 추가 연구가 필요하다.

셋째, 반복 측정이 이루어지지 않았다는 점은 결과의 신뢰성 확보 측면에서 중요한 제한 요소이다. 본 연구는 하루 단일 시점의 데이터를 기반으로 하지만, 열 환경은 날마다 크게 변동될 수 있으므로, 반복적인 관측이 뒷받침되어야 신뢰성 있는 결과를 이끌어 낼 수 있다.

향후 연구에서는 도시 폭염을 대표할 수 있는 시기를 선정하고 반복 측정함으로써 신뢰도를 확보하고, 다양한 수종과 차광 재질을 가진 그늘막을 비교 분석하여 일반화와 대표성을 보완할 필요가 있다. 또한 WBGT와 기온뿐 아니라 복사에너지, 상대 습도, 풍속, 반사율 등 열 환경의 다양한 물리적 인자들을 함께 측정하여 다차원적인 요인 분석이 이루어져야 할 것이다. 이러한 보완을 통해 수목과 그늘막의 효과성과 한계를 더욱 명확히 규명하고, 도시 기후변화 적응 전략 수립에 실질적 근거를 제공할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구는 다양한 도시 공간에 적용할 수 있는 인공 구조물인 그늘막과 자연기반해법(Nature-based Solutions, NbS)으로서의 수목의 열 스트레스 완화 효과를 실측 기반으로 정량적으로 비교하였다. 실험 결과, 두 전략 모두 WBGT와 기온을 효과적으로 완화하여 온열질환의 위험 수준을 한 단계 낮추는 데 기여하였다. 특히 수목은 그늘막 대비 WBGT를 평균 0.6°C, 기온을 평균 1.0°C 더 낮추었으며, 상대적으로 더 우수한 냉각 효과를 보였다. 이러

한 열 저감 효과의 차이는 수목의 기작인 증산작용과 다층적 잎 구조에 의한 복사 차단 기능에 기인한 것으로 해석된다. 반면, 그늘막은 안정된 냉각 효과를 제공하지만, 증산작용과 비슷한 기능이 없으며, 표면 온도 상승에 따른 장파 복사 방출 특성으로 인해 열 완화 효과가 다소 제한적이라는 한계가 존재한다.

나아가 수목은 단순한 차광 효과를 넘어, 공기질 개선, 생물다양성 증진, 도시 경관 형성 등 다양한 이점을 제공한다. 이 점에서 환경적·사회적 가치가 크며, 도시 기후변화 적응 전략으로서의 잠재력이 높다. 그러나 수목의 조성 및 관리에는 장기적인 예산 확보, 수종 선정, 생장 조건, 토양 확보 등 복잡한 제약 요소가 따르며, 이는 실제 정책 실행 단계에서 고려되어야 할 현실적 과제이다. 이에 반해 그늘막은 상대적으로 설치가 용이하고 즉각적인 효과를 기대할 수 있는 비용 효율적 전략이라는 점에서 실무적 장점이 있다. 특히 보도폭이 좁거나 지하 시설물 등으로 수목 식재가 어려운 구간에서는 그늘막이 효과적인 대안이 될 수 있다.

이러한 특성 차이는 도시 폭염 대응 전략 수립 시, 단순한 우열 비교를 통해 하나의 수단을 일률적으로 적용하기보다, 대상 지역의 공간적 여건, 환경 조건, 제한 요소를 종합적으로 고려하여 수목과 그늘막을 상호보완적으로 조합하는 전략이 필요함을 시사한다. 특히 수목은 단순히 그늘을 제공하는 기능을 넘어, 증산작용과 탄소 흡수, 생물다양성 향상 등 다양한 생태적 기여를 통해 도시의 기후탄력성을 높이는 데 도움을 준다. 이러한 생태 기능은 수목이 폭염 대응을 넘어 중장기적인 기후변화 적응 전략으로서의 가치를 보여준다. 반면, 그늘막은 태양 복사를 차단함으로써 일시적 열 저감 효과를 기대할 수 있으나, 도시 생태계나 기후변화 적응 측면에서는 기여가 제한적이다. 따라서 향후 도시 전략 수립에서는 이러한 두 수단의 기능 차이를 반영하여, 지역 특성과 정책 목표에 따라 유연하게 단기 대응과 장기 적응을 적절하게 조합하는 것이 필요하다.

다만, 본 연구는 단일 일자, 제한된 측정 조건 및 공간 규모에서 도출된 결과이므로, 기후 조건과 시간대에 따른 반복 측정과 다양한 수종 및 그늘막 유형을 고려한 후속 연구가 필요하다. 향후 연구에서는 WBGT와 기온뿐 아니라 복사에너지, 습도, 풍속 등 다양한 열 환경 요소를 포함한 정밀 분석을 통해, 전략의 효과를 더 입체적으로 검증해야 한다.

결론적으로 본 연구는 수목과 그늘막 각각의 특성과 한계를 비교·분석함으로써, 도시 열 스트레스 완화를 위한

전략 수립에 실증적 근거를 제공하였다. 수목 식재 확대의 중요성을 강조함과 동시에, 실질적 제약을 반영한 병행 전략과 공간별 맞춤형 적용 방향을 제시함으로써, 도시 기후변화 적응 전략으로서의 실효성과 실행 가능성을 함께 모색했다는 점에서 의의가 있다.

사사

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(RS-2022-KE002102).

Reference

- Choi JK, Kim MK, Ha R. 2022. An analysis of the effects of heat reduction factors using thermal imaging sensors. *Proceedings of 2022 KAIS Autumn Conference*; 2022 December 2~December 3; Hanwha Resort Daecheon Paros. Boryeong, Korea: Korea Academia-Industrial cooperation Society. p. 533-534
- Clark J, Konrad CE. 2024. Observations and estimates of wet-bulb globe temperature in varied microclimates. *J Appl Meteorol Climatol* 63(2): 305-319. doi: 10.1175/JAMC-D-23-0078.1
- Heaviside C, Macintyre H, Vardoulakis S. 2017. The urban heat island: Implications for health in a changing environment. *Curr Environ Health Rep* 4: 296-305. doi: 10.1007/s40572-017-0150-3
- Japanese Society of Biometeorology. 2022. Guidelines for the prevention of heat illness in daily life (Ver. 4 in English).
- Kong L, Lau KKL, Yuan C, Chen Y, Xu Y, Ren C, Ng E. 2017. Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong. *Sustainable Cities Soc* 31: 12-25. doi: 10.1016/j.scs.2017.01.018
- Kug JS, Ahn MS. 2013. Impact of urbanization on recent temperature and precipitation trends in the Korean peninsula. *Asia-Pac J Atmos Sci* 49: 151-159. doi: 10.1007/s13143-013-0016-z
- Kusaka H, Nakamura Y, Asano Y. 2022. UV parasol, dry-mist spraying, and street trees as tools for heat

- stress mitigation. *J Meteorol Soc Japan* 100(4): 677-685. doi: 10.2151/jmsj.2022-035
- Lai D, Lian Z, Liu W, Guo C, Liu W, Liu K, & Chen Q. 2020. A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces. *Science of the Total Environment*, 742, 140092.
- Luo X, Zhao Y, Li Y, Yang J, Guo T. 2024. Effects of tree species and planting forms on the thermal comfort of campsites in hot and humid areas of China. *Int J Biometeorol* 68(7): 1437-1449. doi: 10.1007/s00484-024-02678-6
- Middel A, Selover N, Hagen B, Chhetri N. 2016. Impact of shade on outdoor thermal comfort—A seasonal field study in Tempe, Arizona. *Int J Biometeorol* 60: 1849-1861. doi: 10.1007/s00484-016-1172-5
- Mullaney J, Lucke T, Trueman SJ. 2015. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape Urban Plann* 134: 157-166. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.10.013
- Ouyang W, Ren G, Tan Z, Li Y, Ren C. 2024. Natural shading vs. artificial shading: A comparative analysis of their cooling efficacy in extreme hot weather. *Urban Clim* 55: 101870. doi: 10.1016/j.uclim.2024.101870
- Rahman MA, Moser A, Rötzer T, Pauleit S. 2019. Comparing the transpirational and shading effects of two contrasting urban tree species. *Urban Ecosyst* 22: 683-697. doi: 10.1007/s11252-019-00853-x
- Shahmohamadi P, Che-Ani AI, Eteessam I, Maulud KNA, Tawil NM. 2011. Healthy environment: The need to mitigate urban heat island effects on human health. *Procedia Eng* 20: 61-70. doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.139
- Siqi J, Yuhong W, Hien WN. 2023. The effect of urban greening on pedestrian's thermal comfort and walking behaviour. *Proceedings of the 11th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings, EDP Sciences*, 05013. doi: 10.1051/e3sconf/202339605013
- Taleghani M, Berardi U. 2018. The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban Clim* 24: 449-459. doi: 10.1016/j.uclim.2017.05.007
- Tang Y, Chen A, Zhao S. 2016. Carbon storage and sequestration of urban street trees in Beijing, China. *Front Ecol Evol* 4: 53. doi: 10.3389/fevo.2016.00053
- Turner VK, Middel A, Vanos JK. 2023. Shade is an essential solution for hotter cities. *Nature* 619(7971): 694-697. doi: 10.1038/d41586-023-02311-3
- Workers' Compensation Board. 2000. Preventing heat stress at work.
- Yaglou CP, Minaed D. 1957. Control of heat casualties at military training centers. *Arch Ind Health* 16: 302-316.