

Green Curtain 형식의 벽면녹화시스템을 통한 여름철 건물 실내 열환경 비교 분석[†]

Analysis of Thermal Environment Improving Effects of Green Curtain in Summer[†]

이선영*, 조상만*, 박수국**

*제주대학교 생명자원과학대학 원예학과 대학원 조경학연구실 대학원생,

**제주대학교 생명자원과학대학 생물산업학부 원예환경전공 조경학연구실 부교수

Lee, Sunyoung*, Jo, Sangman*, Park, Sookuk**

*Graduate Student, Lab. of Landscape Architecture, Graduate School of Horticultural Science, College of Applied Life Sciences, Jeju National University

**Associate Professor, Lab. of Landscape Architecture, Horticultural Science, College of Applied Life Sciences, Jeju National University

Received: June 15, 2022

Revised: July 17, 2022 (1st)

October 12, 2022 (2nd)

Accepted: October 12, 2022

3인익명 심사됨

Corresponding author :

Sookuk Park

Associate Professor, Lab. of

Landscape Architecture,

Horticultural Science, College of

Applied Life Sciences,

Jeju National University

Jeju 63243, Korea

Tel.: +82-64-754-3326

E-mail: sooland@jejunu.ac.kr

국문초록

본 연구는 수평적인 열환경 개선의 한계점을 해결하기 위해, 수직적인 녹화방법인 green curtain을 이용한 건물의 벽면녹화 유무에 따른 여름철 건물 실내와 실외의 열환경을 비교하였다. 측정은 2021년 여름철 건물내부 중심부 지점과 건물 외부 잔디밭 지점을 대상으로 미기후 자료인 기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구복사에너지를 측정하여 인간 열환경지수인 PET와 UTCI를 계산하여 비교 분석하였다. 그 결과, 주간 기온은 평균 1.6°C 더 시원한 결과를 보였으며, 야간에는 green curtain의 효과가 나타나지 않았다. 상대습도는 주간에 평균 5.6%, 야간에 평균 1.0% 실내가 더 높은 결과를 보였다. 풍속은 주간에 평균 1.4~1.8ms⁻¹, 야간에 평균 1.4~1.5ms⁻¹로 green curtain의 설치 여부와 관계없이 실외에서 높은 값을 보였다. 평균복사온도는 평균 4.7°C 감소 효과를 보여주었으며, 야간에는 green curtain의 효과가 나타나지 않았다. 인간 열환경지수인 PET와 UTCI 결과에서는 주간 PET는 평균 2.1°C의 저감 효과를 보여 1/3 단계의 실내 열지각 개선 효과를 나타내었으며, UTCI는 평균 1.1°C로 1/6 단계의 열스트레스 저감 효과를 보이는 것으로 나타났고, 야간에는 PET와 UTCI 모두 green curtain의 효과가 나타나지 않았다. 조경계획 시 여름철 주간시간대의 열환경 개선을 위한 방안으로 green curtain을 활용하는 것도 효과적일 것이다.

주제어: 인간 열환경지수, 녹색 벽면, 열개선, 생리등가온도, 범용열기후지수

ABSTRACT

In order to solve the limitations of horizontal thermal environment improvement, this study compared the thermal environment of the indoor and outdoor of a building in summer according to the presence or absence of a green curtain, a vertical greening method. In the summer of 2021, the air temperature, relative humidity, wind speed, and shortwave and longwave radiation were measured at a central point inside a building and the grass field outside of the building to determine the human thermal sensation index, PET and UTCI. As a result, the green curtain showed an average 1.6°C cooler air temperature during the daytime, but it did not have an effect at night. For relative humidity, it showed higher humidity indoors by an average of 5.6% and 1.0% during the daytime and at night, respectively. Wind speed was 1.4~1.8 ms⁻¹ and 1.4~1.5 ms⁻¹ higher outdoors on average during the daytime and at night, respectively, showing a high value outdoors regardless of whether a green curtain was installed. The green curtain showed an average indoor mean radiant temperature reduction effect of 4.7°C during the daytime, but it did not have an effect at night. In PET and UTCI, the green curtain reduced the indoor PET by about a 1/3 level, an average of 2.1°C, and the indoor UTCI by about a 1/6 level, an average of 1.1°C, during the daytime. However, no effects appeared in PET and UTCI at night. For landscape planning, a green curtain can effectively modify the thermal environment during the daytime in summer.

Keywords: Human Thermal Sensation, Green Facade, Thermal Modification, PET, UTCI

[†]이 논문은 제주대학교 이선영 석사학위논문을 수정하였습니다. 이 논문은 2022학년도 제주대학교 교육연구 및 학생지도비 지원에 의해서 연구되었습니다.

1. 서론

지난 수십 년 동안 도시지역으로의 지속적인 인구 이동으로 세계 인구의 절반 이상이 도시에 거주하고 있으며, 도시 인구는 2030년까지 60% 증가할 것으로 예상된다(Manso and Castro-Gomes, 2015). 이로 인한 도심지의 개발로 기존의 녹지공간이 감소하고 고층 건물이 증가하여(Shafiee et al., 2020), 주변 농촌 지역보다 도시 지역의 기온 및 표면 온도가 증가하는 도시열섬현상이 일어나고 있다(Tiwari et al., 2021). 이러한 도심에서의 열환경적인 문제들을 해결하기 위해 공원, 가로수, 옥상녹화와 같은 수평적인 녹지공간의 확보로 열쾌적성 개선에 관한 연구들이 진행되었다(Ju et al., 2004; Park, 2012; Jo et al., 2017; Wang et al., 2022). 그러나, 인구밀집으로 인한 교통량 증가, 토지사용에 대한 갈등, 특히 지가 상승 등으로 더 이상 수평적인 방법으로는 도시 내 녹지공간의 확보가 어려워진 상황이다. 오히려 도심 내의 여유 공간이 생기더라도 새로운 도로나 건물이 들어서고 재건축이나 재개발로 용적률이 올라감에 따라 인구 밀도는 높아져서 도심지 거주자의 삶의 질은 점차 낮아지고 열환경적인 문제들은 더 심해지고 있다.

이를 해결하기 위하여 조정포장재료, 차양, 가로수의 효과적인 수종선택, 식재방법의 변화를 주는 연구가 진행되었으나(Lee and Ryu, 2010, 2012, 2013; Park et al., 2011; Jo et al., 2017; Huyn, 2019), 가장 기본이 되는 녹지공간의 확보를 위해 수평적인 공간이 아닌 수직적인 공간으로 녹지공간을 확보할 수 있는 vertical garden, green wall 등의 벽면녹화시스템(vertical greenery system)이 이를 해결할 수 있는 대안의 하나로 제안되고 있다. 벽면녹화시스템은 용벽이나 경사면을 녹화시키기 위해 개발된 조정 방법의 발전된 형태이지만, 건축물에 사용하면서 소음 감소와 방음의 도구로서 잠재력을 가지고 있다는 사회적 관점으로서의 장점(Wong et al., 2010), 생물의 도시 내 서식지를 확보함으로써 다양성의 증가를 가져오는 환경적 효과(Madre et al., 2015), 건축물을 자연환경에 통합하여 조정 미학을 최적화하는 이상적인 도구로서의 심미적 기능(Medl et al., 2017), 비용과 편익을 분석하여 초기 비용을 줄여 더 넓은 녹지공간 확보를 가능하게 하여 지속가능성이 높은 방법을 제시한 경제적 관점(Perini, 2013), 특히, 벽면녹화시스템을 통하여 실내·외 미기후의 변화를 가져올 수 있다는 열환경적 효과에 대한 연구들이 활발히 이루어지고 있다(Davis et al., 2015; Medl et al., 2017). Han and Choe(2018)의 연구에서 수직정원 유형 분류를 건축물이나 구조물에 직접 설치하는 ‘부착형’, 식물의 식재 기반을 독립적으로 설치하는 ‘독립형’, 건축물과 구조물에 유기적으로 결합된 ‘적층형’으로 나누어 제안하였고, 2017년 독일 기후 서비스 센터(Climatic Service Center Germany, GERICS)에 따르면 벽면녹화시스템은 자연 자원에 식재하는 지상 기반 녹화 방법(ground based system)인 direct green facade 형식과 double-skin green facade(green curtain) 형식으로 구분하였고, 건축물이나 구조물에 직접 설치 식재하는 정면 경계 녹화 방법(wall based system)인 continuous green wall, modular green wall, liner green wall 형식으로 구분된다. 대표적인 연구로는, 이란 쉬라즈(Shiraz)에서 벽면녹화가 주변 기온을 최대 8.7°C, 주간 평균 2.59°C 저감할 수 있다는 연구(Shafiee et al., 2020), 이란 테헤란(Tehran)에서 벽면녹화시스템이 여름에 기온 0.39–0.75°C, 겨울에 0.39–1.26°C 저감효과를 보인 연구(Daemei et al., 2018), 스리랑카 콜롬보(Colombo)에서 도시 구조 및 재료의 열적 특성을 변경하지 않고 벽면녹화, 옥상녹화의 비율에 대한 열환경 평가에 대한 연구에서 벽면 녹화로 인해 1.88–2.03°C 저감효과를 보인 연구(Herath et al., 2018) 등 많은 연구가 진행되고 있다.

벽면녹화를 통한 실내의 기온을 비교한 연구로는 Li et al.(2019)의 연구에서 3가지의 벽면 녹화방식을 통하여 실외뿐만 아니라 실내의 열환경을 비교한 결과, 벽면녹화로 인하여 실내 기온이 1.5–4.5°C 저감되는 것으로 나타났다. Mo(2019)의 연구에서는 실외 또는 실내 벽면 녹화방식을 통하여 실내·외 열환경을 비교한 결과, 실외 벽면녹화로 인하여 실내 기온이 최대 6.5°C, 실내 벽면녹화로 인하여 실내 기온이 최대 1°C 저감되는 것으로 나타났다.

그러나, 벽면녹화시스템에 관한 연구는 대부분 자연지반에 설치된 녹화시스템이 아닌 벽에 모듈이나 패널 등을 연속적으로 설치한 벽 방식의 녹화시스템에 대한 연구가 대부분이기에 현재 많은 고층 건물에 도입하고 있는 유리로 된 외벽 건축 방식인 커튼월(glass curtain wall) 양식의 건물에는 설치가 불가능하다는 단점이 있다. 커튼월 양식의 건물에 설치 가능한 벽면녹화시스템으로는 벽에 줄이나 그물 등을 이용하여 덩굴성 식물층을 생성하여 만드는 방법이 제시되고 있으며 이를 double-skin green facade 또는 green curtain이라 한다. 또한, 기존의 연구는 벽면녹화에 대한 실내·외의 기온만을 비교하였으며, 인체에 가장 큰 영향을 미치는 평균복사온도와 인간 열환경지수에 대한 연구는 진행되지 않았다.

이에 본 연구에서는 유리로 된 외벽 건축 방식인 커튼월(glass curtain wall) 양식의 건물에 설치가 가능한 green curtain 형식의 벽면녹화시스템을 건물 외벽에 설치하여 여름철 미기후(기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구복사에너지) 자료를 측정하여 인간 열환경지수를 비교 분석해 보고자 한다.

2. 연구방법

연구대상지는 제주특별자치도 제주시 구좌읍 송당리에 위치한 송당나무 카페로, 건물의 형태는 가로(동서 방향) 14.5m, 세로(남북 방향) 8.0m, 높이 6.0m이다. 건물의 주요 구조는 경량철골조(150mm × 150mm □형 각관구조)로 설계되었으며, 전체 면적은 동·서향은 각각 56㎡, 남·북향은 각각 58㎡로 되어 있다. 남향(유리 면적, 41㎡) 및 동향(유리 면적, 56㎡)과 북층유리는 특별한 코팅 가공을 하지 않은 2중 패어글라스 유리(유리 6mm + 공기층 12mm + 유리 6mm)로 설계되었다. 북·서향 벽면은 8인치 블록을 이용하여 미장 마감하였으며, 건물 전체 특별한 단열재나 중간재는 사용하지 않았다. 실험을 위해 일반적인 건물의 층 높이(2.8m)를 고려하여, 남향 위에 있는 유리 면적 9㎡는 우드 패널로 차폐하였다. 외부 차양은 사용하지 않았으며, 실내 대류 및 복사열원은 없는 조건에서 연구를 진행하였다.

측정지점은 태양직사광선이 미치지 않는 건물 내부 중심부 1지점과 태양직사광선이 낮 시간 동안 계속 미치는 건물 외부 잔디밭 위 1지점을 선정하였다(Figure 1 참조). 미기후 요소 측정은 2021년 8월 27일 09:00부터 9월 1일 18:00까지 총 6일(129시간) 동안 실시하였으나, 여름철 열환경에 대한 최대 효과를 비교하기 위하여 많은 구름과 소나기로 인한 측정 일(8월 28~30일)을 제외하였다. Green curtain이 설치된 8월 27일과 green curtain이 설치되지 않은 31일의 데이터만을 일출 일몰 시간을 고려하여 주간(09:00-19:00)과 야간(19:01-06:00)으로 분류하여 비교·분석하였다.

Green curtain 조성을 위해 건물 남향 유리 면적 가로 14.5m, 높이 2.8m에 나팔꽃(*Pharbitis nil*)을 5개의 나무 식재박스에 식재하여 약 72% 차폐율의 green curtain을 설치하였다(Table 1 참조).

미기후 요소 측정은 신체의 가슴높이인 지표면으로부터 1.2m 높이에 미기후 요소 측정 장비를 설치하여, 기온(air temperature, T_a)과 상대습도(relative humidity, RH)는 HMP155A(Campbell Scientific Inc.; <http://campbellsci.com>), 풍속(wind speed, U) 및 풍향은 Met One 034B-L Windset(Campbell Scientific Inc.)을 이용하여 매 1분 단위, 태양 및 지구복사에너지는 CNR4 Net-radiometer(Kipp & Zonen Inc.; <http://kippzonen.com>)를 이용하여 매 5초 단위로 측정하여 CR1000 datalogger(Campbell Scientific Inc.)에 저장하였다(Table 2 참조). 평균복사 온도(mean radiant temperature, T_{mrt})는 측정된 태양 및 지구복사에너지를 이용하여 주간의 경우 $T_{mrt} = \left[\{f_p \cdot K_b^+ \cdot a_k + 0.5(K_d + K_r)a_k + 0.5 \cdot \epsilon_p(L\downarrow + L\uparrow)\} / \epsilon_p \sigma \right]^{0.25} - 273.15^\circ\text{C}$, 야간의 경우 $T_{mrt} = \left[\{0.5(K_d + K_r)a_k + 0.5 \cdot \epsilon_p(L\downarrow + L\uparrow)\} / \epsilon_p \sigma \right]^{0.25} - 273.15^\circ\text{C}$ 로 나누어 계산하였다(Park, 2011). 이 식에서 ϵ_p 는 지구복사에너지 방사율(보통 0.97), σ 는 Stefan-Boltzman 상수($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)를 의미한다. f_p 는 인간이 서

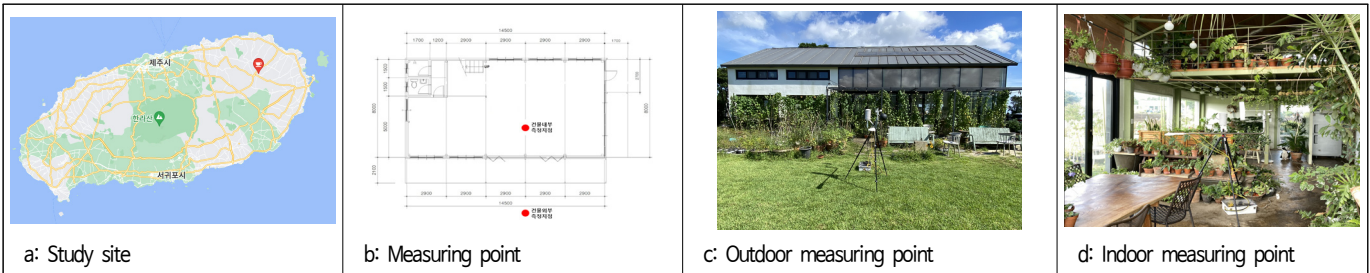



Figure 1. A study site and two measuring points

Table 1. Green curtain setting

Building image	Plant image	Definition	Base cases value
		Plant type	<i>Pharbitis nil</i> (Morning glory)
		Width × Height	14.5 m × 2.8 m
		Plant coverage ratio	72%
		Planting method	Wooden plant box, plastic mesh, planting 10cm intervals

Table 2. Instruments for microclimatic data

Instrument					
Image	Data	Name	Accuracy	Resolution	Manufacture
	Solar and longwave radiation	CNR4 net radiometer	$\leq 1\%$ ($-40\sim 80^{\circ}\text{C}$)	0.1Wm^{-2}	Kipp & Zonen Inc.
	Air temperature and relative humidity	HMP155A	<ul style="list-style-type: none"> Air temp: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ($-80\sim 60^{\circ}\text{C}$) Relative humidity: 2% ($0\sim 90\%$) 3% ($90\sim 100\%$) 	0.01°C 0.01%	Campbell Scientific Inc.
	Wind speed and direction	Met one 034B-L windset	<ul style="list-style-type: none"> Wind speed: $\pm 0.1\text{ms}^{-1}$ ($\leq 10.1\text{ms}^{-1}$) $\pm 1.1\%$ ($\geq 10.1\text{ms}^{-1}$) Wind direction: $\pm 4^{\circ}$ 	0.001ms^{-1}	
	Datalogger	CR1000	$\pm 0.06\%$ ($0\sim 40^{\circ}\text{C}$)		

있는 자세와 걷는 자세를 결합한 식($f_p = 3.34 \cdot 10^{-7} \cdot \beta^3 - 6.6 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2 + 8.42 \cdot 10^{-4} \cdot \beta + 0.297$)으로 태양의 위치 변화에 따라 직사광선이 인체에 영향을 미치는 표면적(projected area factor)을 의미한다(Park, 2011). K_b' 는 인체의 표면에 수직으로 들어오는 태양 직사광선($K_b/\sin(\text{solar elevation}, \beta)$)을 의미하며, K_b 는 수평면으로 들어오는 태양 직사광선(direct beam solar radiation), β 는 시간별 태양 고도의 값으로, 한국천문연구원 천문우주지식정보(<https://astro.kasi.re.kr/life/pageView/10>)의 태양 고도/방위각계산(하루의 태양위치자료)에서 미기후 요소 측정시간과 위치를 입력하여 얻은 결과를 이용하였다. a_k 는 태양복사에너지 인체흡수율(0.7)을 의미하며, 0.5는 인체의 표면적 전체를 1.0으로 가정했을 때, 빛의 방향성으로 인체에 영향을 미치는 복사에너지의 면적 비율을 의미한다. K_d 는 건축물 또는 수목에 의해 가려지지 않은 하늘이 보이는 공간(sky view factor, SVF)에서 오는 태양 분사광선(diffuse beam solar radiation)으로, 실외의 K_d 값을 구하기 위해 주간에 30분마다 1분씩 인체의 주먹을 이용하여 CNR4의 pyranometer로 들어오는 태양직사광선을 가려주는 Lee et al.(2021)의 방법을 이용하였다. K_r 는 건축물, 수목, 지표면에서 반사되어 오는 반사광선(reflected solar radiation, K_r)을 의미한다. L_{\downarrow} 은 하늘공간, 건축물, 수목에서 방출되어 인체에 미치는 지구복사에너지(terrestrial or longwave radiation)를 의미하며, L_{\uparrow} 은 지표면에서 방출되어 인체에 미치는 지구복사에너지를 의미한다.

인간 열환경지수는 인간 에너지 균형 모델(human energy balance model)을 기반으로 인체와 주변 환경 간의 흡수·방출되는 에너지를 정량적으로 계산하여 열생리학적(thermophysiological)으로 인간이 느끼는 반응을 분석하는 것이다(Park, 2012). 국제적으로 활발하게 사용되고 있는 지수로는 독일에서 개발된 PET(physiological equivalent temperature)와 국제생명기상학회(International Society of Biometeorology)에서 개발한 UTCI(universal thermal climate index)가 있다. 본 연구에서는 PET와 UTCI를 계산하기 위해 RayMan Pro. 2.2(<http://www.urbanclimate.net/rayman>)를 이용하였다(Matzarakis, 2009). 인간 열환경지수 계산을 위한 기상요소 입력자료는 실내·외에서 측정된 기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도를 입력하였다(Jo, 2018). 식물의 차폐율은 Adobe photoshop 2020을 이용하여 계산하였으며, 미기후 자료와 인간 열환경지수 비교 분석은 Microsoft Office Excel 365(<https://www.office.com>)를 이용하였다. 미기후 요소와 인간 열환경지수에 대한 green curtain이 설치된 27일과 green curtain이 설치되지 않은 31일의 유의성 수준을 계산하기 위해 통계프로그램인 SPSS Statistics Version 20(<http://www.ibm.com/spss>)을 이용하여 계산하였다.

3. 연구결과

3.1 미기후 요소 측정 결과

미기후 자료 측정 결과, T_a 는 주간에 green curtain이 설치되었을 때는 실내가 평균 0.2°C 높은 값을 보였고, green curtain이 설치되지 않았을 때는 실내가 평균 1.6°C 높은 값을 보였다(Figure 3, Table 3 참조). Green curtain이 설치되었을 때가 green curtain이 설치되지 않았을 때보다 건물내부로 들어오는 태양광을 차단하고, 남향 유리에 투과되는 면적이 적어 실내 기온이 낮아져 평균 1.4°C 더 시원한 결과를 보인 것으로 보인다. Green curtain이 설치되었을 때는 18:55에 최대 2.3°C , green curtain이 설치되지 않았을 때는 10:22에 최대 4.1°C 실내가 더 높은 값을 보여, green curtain의 설치 효과로 주간 시간대에 최대 1.8°C 실내가 더 시원한 결과를 보였다. 야간에는 주간에 축적된 실내 T_a 로 인해 green curtain이 설치되었을 때는 실내가 평균 1.1°C , green curtain이 설치

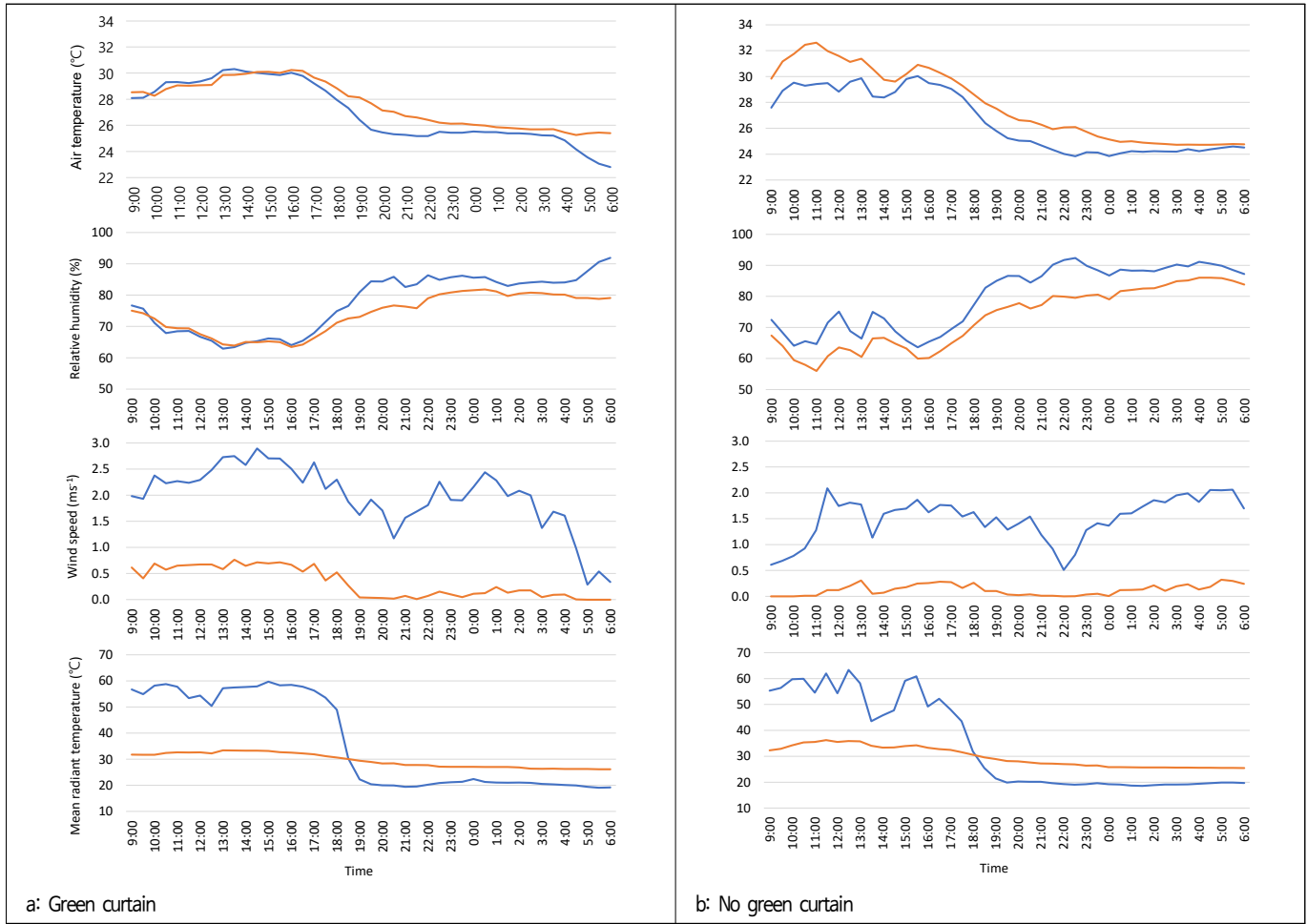


Figure 3. Microclimatic factors according to the presence or absence of green curtain

Legend: — outdoor
— indoor

Table 3. Mean (maximum) values according to the presence or absence of green curtain. These results were from the values of outdoor location minus the values of indoor location. T_a , RH , u and T_{mrt} mean air temperature, relative humidity, wind speed and mean radiant temperature, respectively

Outdoor-indoor	Daytime						Nighttime					
	T_a (°C)	RH (%)	u (ms ⁻¹)	T_{mrt} (°C)	PET (°C)	UTCI (°C)	T_a (°C)	RH (%)	u (ms ⁻¹)	T_{mrt} (°C)	PET (°C)	UTCI (°C)
20210827 green curtain	-0.2 (-2.3 at 18:55)	0.8 (10.1 at 18:53)	1.8 (3.4 at 12:36)	21.1 (32.4 at 11:44)	5.9 (13.1 at 11:49)	3.5 (7.8 at 11:49)	-1.1 (-2.9 at 6:00)	6.1 (13.8 at 5:59)	1.5 (3.1 at 23:39)	-6.6 (-9.1 at 19:03)	-6.2 (-8.5 at 19:10)	-3.3 (-5.4 at 19:10)
20210831 no green curtain	-1.6 (-4.1 at 10:22)	6.4 (15.1 at 11:35)	1.4 (2.4 at 11:12)	16.4 (37.7 at 14:49)	3.8 (16.7 at 10:23)	2.4 (8.7 at 14:54)	-1.0 (-2.4 at 22:02)	7.1 (13.6 at 22:22)	1.4 (2.8 at 3:01)	-6.9 (-8.7 at 19:03)	-6.3 (-7.9 at 20:00)	-3.2 (-4.5 at 18:57)

되지 않았을 때는 실내가 평균 1.0°C 높은 값을 보였으며, green curtain 설치에 따른 야간 T_a 의 차이는 거의 나타나지 않았다. 최대 차이는 green curtain이 설치되었을 때는 06:00에 최대 2.9°C, green curtain이 설치되지 않았을 때는 22:02에 최대 2.4°C 실내가 더 높은 값을 보여 green curtain인 설치되지 않았을 때 야간에 최대 0.5°C 실내가 더 시원한 결과를 보였다.

RH 는 green curtain이 설치되었을 때는 주간에 평균 0.8%, 야간에 평균 6.1%, green curtain이 설치되지 않았을 때는 주간에 평균 6.4%, 야간에 평균 7.1% 실내가 실외보다 낮은 값을 보였다. Green curtain이 설치되었을 때 건물 내부로 들어오는 태양광을 차단하여 주간에 평균 5.6%, 야간에 평균 1.0% 실내가 더 높은 습도를 보였다. 최

대 차이는 green curtain이 설치되었을 때는 주간에는 18:53에 최대 10.1%, 야간에는 05:59에 13.8% 실내가 더 낮은 값을 보였고, green curtain이 설치되지 않았을 때는 11:35에 최대 15.1%, 야간에는 22:22에 13.6% 실내가 더 낮은 값을 보였다.

u 은 주간에 green curtain이 설치되었을 때는 실외가 실내보다 평균 1.8ms^{-1} (최대 3.4ms^{-1}), green curtain이 설치되지 않았을 때는 평균 1.4ms^{-1} (최대 2.4ms^{-1}) 높은 값을 보였으며, 야간에는 green curtain이 설치되었을 때는 평균 1.5ms^{-1} (최대 3.1ms^{-1}), green curtain이 설치되지 않았을 때는 평균 1.4ms^{-1} (최대 2.8ms^{-1}) 높은 값을 보였다. Green curtain의 설치여부와 관계없이 변동폭이 거의 없는 것으로 나타났다.

평균복사온도(mean radiant temperature, T_{mr})는 green curtain이 설치되었을 때는 주간에 실외보다 실내가 평균 21.1°C , 11:44에 최대 32.4°C , green curtain이 설치되지 않았을 때는 평균 16.4°C , 14:49에 최대 37.7°C 더 낮은 값을 보여, green curtain이 설치되었을 때 건물 내부로 들어오는 태양광을 차단하여 주간에 평균 4.7°C 감소 효과를 보여주었다. 야간에는 주간에 건물 내부에 축적된 열에너지로 인하여 green curtain이 설치되었을 때는 평균 6.6°C , 19:03에 최대 9.1°C , green curtain이 설치되지 않았을 때는 평균 6.9°C , 19:03에 최대 8.7°C 높은 실내 T_{mr} 를 보였으며, green curtain이 설치되었을 때가 green curtain이 설치되지 않았을 때보다 평균 0.3°C 높은 값을 보였으나 그 값은 미비하였다. 이것은 green curtain이 실내에서 실외로 방출되는 지구복사에너지를 막아서 발생된 결과이다.

3.2 인간 열환경지수 분석 결과

인간 열환경지수 분석 결과, 주간 PET는 green curtain이 설치되었을 때 평균 5.9°C , green curtain이 설치되지 않았을 때는 평균 3.8°C 실내가 더 낮은 값을 보여, green curtain이 설치되었을 때 평균 2.1°C PET를 감소시켜 주었으며(Figure 4, Table 3 참조), 이는 1/3의 열지각(thermal perception) 단계 차이를 보여주었다(Table 5 참조). 최대 차이는 green curtain이 설치되었을 때, 11:49에 최대 13.1°C , green curtain이 설치되지 않았을 때는 10:23에 최대 16.7°C 실내가 실외보다 더 낮은 값을 보였다. 야간에는 주간과 반대로 green curtain이 설치되었을 때는 평균 6.2°C , green curtain이 설치되지 않았을 때는 평균 6.3°C 실내가 더 높은 값을 보여주었기에 0.1°C 의 차이만 효과가 거의 나타나지 않았다 할 수 있다. 최대 차이는 green curtain이 설치되었을 때는 19:10에 최대 8.5°C , green curtain이 설치되지 않았을 때는 20:00에 최대 7.9°C 실내가 실외보다 더 높은 값을 보여주었다.

UTCI의 경우, 주간에 green curtain이 설치되었을 때 평균 3.5°C , green curtain이 설치되지 않았을 때 평균 2.4°C 실내가 실외보다 더 낮은 값을 보여, green curtain이 설치되었을 때 평균 1.1°C UTCI를 감소시켜 주었으며, 이는 1/6 단계의 열 스트레스(heat stress) 저감 효과를 보여주었다. 최대 차이는 green curtain이 설치되었을 때 11:49에 7.8°C , green curtain이 설치되지 않았을 때 14:54에 8.7°C 실내가 더 낮은 값을 보였다. 야간에는 green

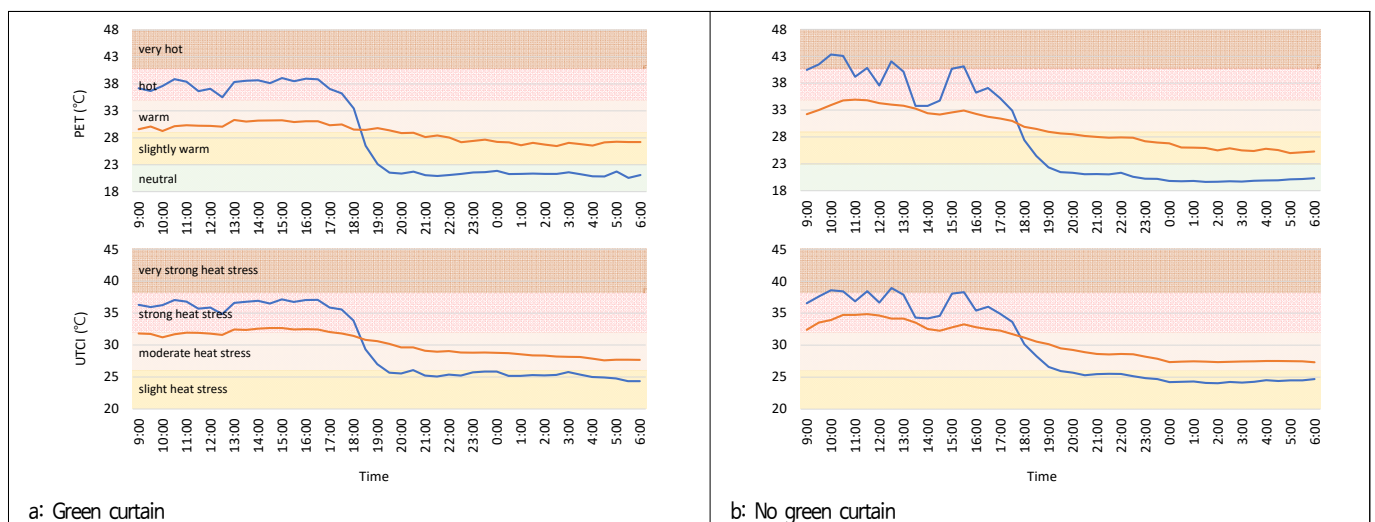


Figure 4. Physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI) values according to the presence or absence of green curtain

Legend: — outdoor
— indoor

Table 5. The levels of physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI)

Thermal perception	PET (°C)	UTCI (°C)	Grade of physiological stress
Very cold	< 4	< -40	Extreme cold stress
		-40 ~ -27	Very strong cold stress
Cold	4 ~ 8	-27 ~ -13	Strong cold stress
Cool	8 ~ 13	-13 ~ 0	Moderate cold stress
Slightly cool	13 ~ 18	0 ~ 9	Slight cold stress
Neutral	18 ~ 23	9 ~ 26	No thermal stress
Slightly warm	23 ~ 29		Slight heat stress
Warm	29 ~ 35	26 ~ 32	Moderate heat stress
Hot	35 ~ 41	32 ~ 38	Strong heat stress
Very hot	> 41	38 ~ 46	Very strong heat stress
		> 46	Extreme heat stress

Source: Jo et al., 2017

curtain이 설치되었을 때 평균 3.3°C, green curtain이 설치되지 않았을 때 평균 3.2°C 실내가 실외보다 더 높은 값을 보였으며, PET와 마찬가지로 야간의 green curtain 효과는 미비한 것으로 나타났다. 최대 차이는 green curtain이 설치되었을 때 19:10에 5.4°C, green curtain이 설치되지 않았을 때 18:57에 4.5°C로 실내가 실외보다 더 높은 값을 보였다.

주간에 green curtain이 PET에서는 실내·외 평균 저감효과가 1/3 단계, UTCI에서는 1/6 단계로 나타났다. 이 결과는 green curtain으로 인해 태양광이 건물 내부에 영향을 미치는 면적이 작아지기 때문에 값의 차이가 나타난 것으로 보이며, 야간에는 green curtain이 지구복사에너지를 가두는 효과를 주어, 주간과 반대로 PET와 UTCI의 값을 더 높이는 결과를 보이는 것으로 나타났다.

3.3 유의성 검증

Green curtain이 설치된 27일과 설치되지 않은 31일 차이를 보였던 주간시간대의 실내·외 미기후 요소와 인간 열환경지수(PET, UTCI)의 유의성 검정을 위해, SPSS의 독립표본 *t*-test를 95% 신뢰수준에서 30분 평균자료를 이용하여 진행하였다. 그 결과, 주간 실외의 경우에는 T_a , RH, T_{mrt} 는 유의성이 없는 것으로 나타났으나, μ 만 유의성이 있는 것으로 나타났다(Table 6 참조). PET와 UTCI에서는 유의성이 없는 것으로 나타나, 통계학적으로 27일과 31일 주간의 인간 열환경은 동일한 것으로 판단할 수 있다.

주간 실내의 경우에는 T_a , RH, μ 는 유의성이 있는 것으로 나타났으나, T_{mrt} 는 유의성이 없는 것으로 나타났다(Table 7 참조). PET와 UTCI에서는 유의성이 있는 것으로 나타나, green curtain에 의한 여름철 인간 열환경 개선 효과가 있는 것으로 나타났다.

4. 고찰

본 연구에서는 green curtain의 효과로 주간 실내 T_a 가 평균적으로 1.6°C, 최대 1.8°C 더 시원한 결과를 보였는데, 이 결과는 Li et al.(2019)의 연구에서 벽면 녹화로 인하여 실내의 기온을 평균 1.5~4.5°C 저감효과를 준다는 결과와 유사하였으며, Mo(2019)의 연구에서 실외 벽면 녹화로 인하여 실내의 기온을 최대 6.5°C 저감효과를 준다는 결과보다는 낮은 값을 보였다. 이러한 결과는 Mo(2019)의 연구에서는 4종의 식물을 이용하여 100% 유리를 차폐하였지만, 본 연구에서는 유리의 면적을 약 72% 차폐하여 낮은 값을 나타낸 것으로 보인다.

미기후 요소인 T_a , RH, T_{mrt} 의 증가는 PET와 UTCI가 증가하는 양의 상관관계, μ 의 증가는 PET와 UTCI가 감소하는 음의 상관관계를 보인다(Jo, 2018). 본 연구에서 인간 열환경지수 분석 결과, 주간 green curtain의 설치 효과로 PET는 2.1°C, UTCI는 1.1°C의 차이를 보였으나, no green curtain의 결과가 green curtain의 결과와 유사하게 T_a 와 RH의 실내·외 차이가 감소하거나 또는 μ 의 실내·외 차이가 커지면, PET와 UTCI 차이는 감소하여 green

Table 6. Verification of the significance of outdoor microclimate factors and human thermal sensation according to the presence or absence of green curtain in the daytime

Variable	Group	Number	Mean	Standard deviation	<i>t</i>	Significance (2-tailed)
T_a	20210827(green curtain)	21	29.12	1.04	0.997	0.325
	20210831(no green curtain)	21	28.78	1.10		
RH	20210827(green curtain)	21	69.06	5.12	-0.852	0.399
	20210831(no green curtain)	21	70.51	5.89		
u	20210827(green curtain)	21	2.35	0.33	7.870*	0.000
	20210831(no green curtain)	21	1.49	0.38		
T_{mrt}	20210827(green curtain)	21	53.36	9.50	0.970	0.338
	20210831(no green curtain)	21	50.16	11.76		
PET	20210827(green curtain)	21	36.36	4.11	-0.091	0.928
	20210831(no green curtain)	21	36.51	5.89		
UTCI	20210827(green curtain)	21	35.49	2.59	0.039	0.969
	20210831(no green curtain)	21	35.45	3.44		

* $p < 0.05$

Table 7. Verification of the significance of indoor microclimate factors and human thermal sensation according to the presence or absence of green curtain in the daytime

Variable	Group	Number	Mean	Standard deviation	<i>t</i>	Significance (2-tailed)
T_a	20210827(green curtain)	21	29.26	0.74	-3.070*	0.005
	20210831(no green curtain)	21	30.35	1.46		
RH	20210827(green curtain)	21	68.26	3.90	2.738*	0.009
	20210831(no green curtain)	21	64.40	5.15		
u	20210827(green curtain)	21	0.64	0.35	4.944*	0.000
	20210831(no green curtain)	21	0.19	0.22		
T_{mrt}	20210827(green curtain)	21	33.32	5.48	-0.744	0.461
	20210831(no green curtain)	21	34.56	5.32		
PET	20210827(green curtain)	21	30.77	1.61	-3.538*	0.001
	20210831(no green curtain)	21	32.90	2.25		
UTCI	20210827(green curtain)	21	32.14	1.12	-2.472*	0.018
	20210831(no green curtain)	21	33.19	1.59		

* $p < 0.05$

curtain의 설치에 따른 실내 저감 효과가 더 크게 나타날 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서 green curtain 형식의 유리 벽면녹화가 여름철 실내·외의 열환경에 미치는 영향을 비교하기 위해, 제주도 송당나무 카페를 대상으로 하여 2021년 여름철 건물 외부 잔디밭과 건물 내부 중심부에서 미기후 자료(T_a , RH , u , 태양 및 지구복사에너지)를 측정하여 인간 열환경지수를 비교 분석하였다.

Green curtain의 설치효과로 인간 열환경지수인 PET와 UTCI는 주간에 평균 2.1°C로 약 1/3 단계, 평균 1.1°C로 약 1/6 단계의 저감효과를 보여주었고, 야간에는 green curtain의 효과가 거의 나타나지 않았다. 본 연구를 통해

여 green curtain은 여름철 주간시간대에는 채광과 조망을 중시하는 커튼월 형식의 건물에서 열환경 개선에 효과를 나타내었다. 반대로, 여름철 야간시간대에는 효과가 거의 없는 것으로 나타났다.

일반적인 벽면녹화시스템은 벽에 모듈이나 패널 등을 연속적으로 설치하는 방식으로 설치에 많은 예산이 들고 건물의 설계 사공에서부터 함께 고려하지 않으면 설치가 어려우며, 설치 이후에는 관리 혹은 철거에 많은 예산이 들기 때문에 쉽게 시도하기 힘든 조정 기법이지만, green curtain은 상대적으로 설치가 간편하고 유지, 철거에도 큰 비용이나 노력이 들지 않기에, 태양 복사에너지를 막아야 하는 여름철에는 설치해서 사용하다가 겨울철에는 간단히 철거하여 태양 복사에너지를 건물 내부에 깊게 들어 올 수 있다는 장점이 있기에 고려해 볼 만한 greening system 이라고 할 수 있다. 또한, 식물을 이용한 인테리어는 가장 고전적이면서도 현재 가장 유행하는 인테리어 및 익스테리어 기법이기도 세련되고 아름다운 공간을 구성하는데 많이 활용되고 있다. 그러기에 본 연구를 통해 열환경적으로도 이점이 있다고 연구되어진 green curtain을 적극적으로 이용해볼 만하다 할 수 있겠다.

다만, 본 연구는 식물의 종류를 한 가지만을 이용하였고, 동향의 유리는 green curtain을 설치하지 않았다. 향후 연구에서는 구름이 없는 맑은 날 동일한 green curtain 형식의 벽면녹화시스템을 이용하여, 다양한 벽면 녹화 수종(덩굴성 식물)에 관한 자료 연구가 이루어져야 할 것이며, green curtain 설치 방법 또한 여러 가지 시도를 해볼 수 있을 것이다. 실험 공간 특성의 제한으로 동향의 유리는 green curtain을 설치하지 못하였으나, 동향의 유리까지 모두 green curtain을 설치하거나 혹은 일반 벽으로 제한하여 실·내외의 열환경을 비교하면 더 명확한 결과를 보여 줄 수 있을 것이다.

References

1. Brune, M., S. Bender and M. Groth(2017) Gebäudebegrünung und Klimawandel: Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Climate Service Center Germany (GERICS).
2. Daemei, A., M. Azmoodeh, Z. Zamani and E. Khotbehsara(2018) Experimental and simulation studies on the thermal behavior of vertical greenery system for temperature mitigation in urban spaces. Journal of Building Engineering 20: 277–284.
3. Davis, M., F. Ramirez and A. Vallejo(2015) Vertical gardens as swamp coolers. Procedia Engineering 2015 118: 145–159.
4. Han, E. and H. Choe(2018) A study on setting the type of 'vertical garden' suitable for urban open space planting function. In Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference (pp. 57–59). The Korean Institute of Landscape Architecture.
5. Herath, H., R. Halwatura and G. Jayasinghe(2018) Modeling a tropical urban context with green walls and green roofs as an urban heat island adaptation strategy. Procedia Engineering 212: 691–698.
6. Huyn, C.(2019) Analysis of Human Thermal Environments in the Apartment Complex by Computer Simulation. Master's Thesis, University of Jeju National.
7. Jo, S.(2018) Analysis of the Influence of Street Trees and Single Trees on Human Thermal Sensation in Summer. Master's Thesis, University of Jeju National.
8. Jo, S., C. Hyun and S. Park(2017) Analysis of the influence of street trees on human thermal sensation in summer. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 45(5): 105–112.
9. Ju, M., C. Lee and N. Ryu(2004) The effect of urban shade trees on the WBGT (Wet Bulb Globe Thermometer Index). Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 32(3): 51–59.
10. Lee, C. and N. Ryu(2010) The influence of landscape pavements on the WBGT of outdoor spaces without ventilation or shade at summer midday. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 38(2): 1–8.
11. Lee, C. and N. Ryu(2012) The influence of ventilation and shade on the mean radiant temperature of summer outdoor. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 40(5): 100–108.
12. Lee, C. and N. Ryu(2013) The comparison of the ultra-violet radiation of summer outdoor screened by the landscaping shade facilities and tree. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 41(6): 20–28.

13. Lee, H., S. Jo and S. Park(2021) A simple technique for the traditional method to estimate mean radiant temperature. *International Journal of Biometeorology* 66: 521–533.
14. Li, J., B. Zheng, W. Shen, Y. Xiang, X. Chen, and Z. Qi(2019) Cooling and energy-saving performance of different green wall design: A simulation study of a block. *Energies* 12(15): 2912.
15. Madre, F., P. Clergeau, N. Machon and A. Vergnes(2015) Building biodiversity: Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages. *Global Ecology and Conservation* 3: 222–233.
16. Manso, M. and J. Castro-Gomes(2015) Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41: 863–871.
17. Medl, A., R. Stangl, S. Kikuta and F. Florineth(2017) Vegetation establishment on ‘green walls’: Integrating shotcrete walls from road construction into the landscape. *Urban Forestry & Urban Greening* 25: 26–35.
18. Mo, P.(2019) Reduction of room temperature and energy saving potential by green curtain in urban area case study of wolchon elementary school in Seoul. In *Proceedings of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment* 19(1): 54–55.
19. Park, K., S. Lee, Y. Shim and H. Hwang(2011) Analysis on the mitigation effects of urban heat island through creation of water space –A case study of Yeol-Mae village apt in Daejeon’s Noeun district. *The International Journal of the Korean Institute of Ecological Architecture and Environment* 11(5): 13–18.
20. Park, S.(2012) Landscape planning and design methods with human thermal sensation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 40(1): 1–11.
21. Perini, K.(2013) Retrofitting with vegetation recent building heritage applying a design tool—the case study of a school building. *Frontiers of Architectural Research* 2: 267–277.
22. Shafiee, E., M. Faizi, S. Yazdanfar and M. Khanmohammadi(2020) Assessment of the effect of living wall systems on the improvement of the urban heat island phenomenon. *Building and Environment* 181: 106923.
23. Tiwari, A., P. Kumar, G. Kalaiarasan and T. Ottosen(2021) The impacts of existing and hypothetical green infrastructure scenarios on urban heat island formation. *Environmental Pollution* 274: 115898.
24. Wang, X., H. Li and S. Sodoudi(2022) The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort. *Building and Environment* 217: 109082.
25. Wong, N., A. Tan, P. Tan, K. Chiang and N. Wong(2010) Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment* 45: 411–420.