

관수조절에 의한 벽면녹화의 냉각효과 분석 연구*

- 아이비, 수호초를 식재한 모듈형 벽면녹화를 중심으로 -

김은섭¹⁾ · 윤석환¹⁾ · 박정강²⁾ · 전윤호²⁾ · 강혜원²⁾
김상혁²⁾ · 김지연¹⁾ · 이용구³⁾ · 이동근⁴⁾

^{1,5)} 서울대학교 협동과정 조경학 학생, 스마트시티 글로벌 융합 전공 학생 ·

²⁾ 서울대학교 조경지역시스템공학부 학생 · ³⁾ (주)에코엔지오 부장 ·

^{4,5)} 서울대학교 조경지역시스템공학부 교수, 스마트시티 글로벌 융합 전공 교수

A field Study to Evaluate Cooling Effects of Green Facade under Different Irrigation Conditions*

- Focusing on modular green facade planted with Hedera helix L and Pachysandra terminalis -

Kim, Eun-Sub^{1,5)} · Yun, Seok-Hwan¹⁾ · Piao, Zheng-gang²⁾ · Jeon, Yoon-Ho²⁾ ·
Kang, Hye-Won²⁾ · Kim, Sang-Hyuck²⁾ · Kim, Ji-Yeon¹⁾ ·
Lee, Young-Gu³⁾ and Lee, Dong-Kun^{4,5)}

¹⁾ Interdisciplinary program in Landscape Architecture,
Seoul National University, Seoul, South Korea, Student,

²⁾ Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering,
Seoul National University, Seoul, South Korea, Student,

³⁾ EConGEO, Department Manager,

⁴⁾ Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Professor.

⁵⁾ Integrated Major in Smart City Global Convergence Program, Seoul National University, Seoul 08826,
South Korea, Professor

ABSTRACT

Green facade has a significant impact on building's energy performance by controlling the absorption

* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(2020002770003)

First author : Kim, Eun-Sub, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, Student,
Tel : +82-2-880-4885, E-mail : mr.solver92@snu.ac.kr

Corresponding author : Lee, Dong-Kun, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul
National University, Professor,
Tel : +82-2-880-4875, E-mail : dklee7@snu.ac.kr

Received : 16 October, 2021. **Revised** : 24 December, 2021. **Accepted** : 23 December, 2021.

of solar radiation and improving outdoor thermal comfort through shading and evapotranspiration. In particular, since high-density building does not enough green space, green facade, and rooftop greening using artificial ground plants are highly utilized. However, the level of cooling effect according to plant traits and irrigation control is different. Therefore, in this study, the cooling effect analyzed for a total of 4 cases by controlling the irrigation condition based on heder and spurge. Although heder under sufficient water had the highest cooling effect ($-2^{\circ}\text{C}\sim-4^{\circ}\text{C}$), had the lowest cooling effect under non-irrigation ($+1.1^{\circ}\text{C}\sim+4.4^{\circ}\text{C}$). In addition, heder under sufficient water had cooling effect than heder under non-irrigation ($-1^{\circ}\text{C}\sim-8.1^{\circ}\text{C}$) and in the case of spurge, it had cooling effect ($-0.3^{\circ}\text{C}\sim-7.8^{\circ}\text{C}$) more than non-irrigation. As a result of measuring the amount of transpiration according to the light intensity (PAR) and carbon dioxide concentration conditions, transpiration of heder was higher than the spurge (respectively $0.63204\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $0.674367\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$). The difference in the cooling effect of the green facade under irrigation condition was significant. But the potential cooling effect of green facade according to plants species was different. Therefore, in order to maximize and continuously provide the cooling effect of green facade in urban areas, it is necessary to consider the characteristics of plants and the control of water supply through the irrigation system.

Key Words : *Urban heat island, Green infrastructure, Transpiration, Experiment, Facade thermal performance*

I. 서 론

최근 급격한 도시화로 인한 무분별한 도시 개발과 불투수층 면적 증가는 도시 내 녹지 과편화 및 감소를 일으켜 도시홍수, 열섬현상 등 도시 내 복합적인 환경문제들을 발생시킨다 (Zhang et al., 2019; Susorova et al., 2013). 도시 열섬은 주변 녹지지역보다 도시 표면의 태양복사 흡수가 증가하여 발생하는 현상으로 고층 빌딩의 수직 구조로 인한 높은 표면적은 투수층보다 저장열이 높고 제한된 증발산량으로 밤 동안 더 많은 열을 방출한다 (Jesus et al., 2017). 이는 도시 인구의 실내뿐만 아니라 실외에서도 열 스트레스를 증가시킨다.

선행연구에 따르면, 벽면녹화의 비율을 10% 늘리면 도시 규모에서 평균 기온을 약 2.5°C 감소시키며 (Akbari et al., 2001), 외벽 온도를 최대 20.8°C , 내벽 온도를 7.7°C 까지 낮출 수 있고 (Chen et al., 2013), 국가 에너지 사용량의 최대 20%를 절약할 수 있음을 추정하였다 (Kolokotroni et al., 2006;

Morakinyo et al., 2019). 이에 도시 열섬현상 완화를 위해 녹지 조성의 중요성이 대두되고 있으나, 고층밀집 지역은 녹지 조성이 어려운 한계점이 있다. 이에 벽면녹화의 활용도가 높아짐에 따라 (Besir and Cuce, 2018), 고층밀집 지역에서는 벽면녹화를 통한 실외 열 쾌적성 및 실내 에너지 효율개선에 대한 연구가 다수 진행되고 있다.

도시지역에서 벽면녹화, 옥상녹화와 같은 인공지반 녹화식물은 식물 유형과 토양수분함량 등 특성에 따라 주변 환경조건과의 상호작용을 통해 잠재적인 냉각효과에 크게 영향을 미친다 (Acero et al., 2019). 특히, 식물종, 형태, 수분요구도와 같은 식물의 특성은 냉각효과를 제공하는 다양한 메커니즘(그림자 및 증발산 효과, 태양복사 흡수량, 알베도 등)을 변화시킨다 (Cameron et al., 2014; Hoelscher et al., 2016). 예를들어 냉각효과의 약 80%를 차지하는 그림자 효과는 잎의 너비, LAI가 클수록 효과가 증가하며, 추가적으로 실내 에너지 효율성을 증가시킨다 (Convertino et al., 2020). 또한, 증발산 효

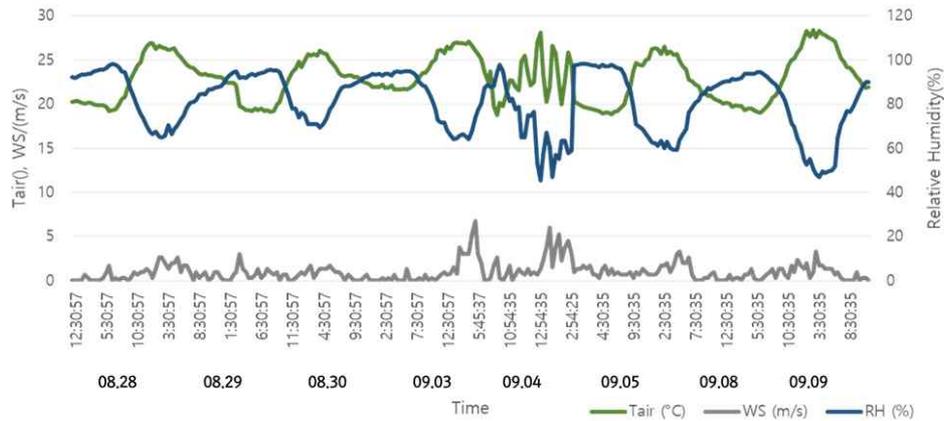


Figure 1. Meteorological conditions from green facade (blue line: Air temperature (°C), orange line:Relative Humidity(%), Gray line: Wind speed (m/s) from August 28- September 9.

과는 냉각효과에 영향은 적으나, 주변 지역에 기온을 낮추는데 큰 의미가 있으며, 잠열량을 증가시켜 외의 표면온도를 감소시킨다(Bauerle et al; Gräf et al., 2021). 기존 연구에서 건물의 열 성능 및 실외 열 쾌적성 개선을 위해 벽면녹화의 연구가 진행되어 왔다(Besir and Cuce, 2018). 증발산 작용으로 인한 냉각효과 평가는 복잡한 도시 공간에서 관수의 활용도에 따라 미치는 영향이 크지만, 이를 정량적으로 평가하기 위해 토양수분함량을 고려한 관수유무에 따른 벽면녹화의 냉각효과를 정량적으로 분석한 연구는 미흡하다.

따라서 본 연구의 목적은 식생별 관수유무에 따른 벽면녹화의 냉각효과를 분석하기 위한 벽면녹화를 설계하고 토양수분함량에 따른 각 식생별 냉각효과 차이를 파악하고자 하였다. 이는 관수시스템 적용이 어려운 도시공간에서 벽면녹화의 냉각효과를 평가할 수 있으며, 도시 벽면녹화 관수시스템 관리를 위한 기초자료로 제공할 수 있다. 특히 도시 열 저감을 위한 벽면녹화 적용 계획을 세우는 등 도시녹지계획 측면에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 연구재료 및 방법

본 연구에서는 수호초, 아이비를 중심을 관수유무에 따른 벽면녹화 냉각효과를 분석하였다. 이를 위해 (1)토양수분함량을 고려한 관수유무에 따른 벽면녹화 냉각효과를 측정하였으며, (2) 식생별 잠재적인 냉각 효과를 평가하기 위해 광합성 측정기를 활용하여 식생별 냉각 효과 차이 비교하였다.

1. 연구 대상지 및 환경 조건

수원시는 2010년대 이후 광교신도시와 호매실지구등 지역개발 사업이 진행되면서 인구 밀도 및 도시개발이 빠르게 진행되고 있으나, 도시열 저감을 최대화하기 위해 모듈형 벽면녹화 방식을 적용한 건축물의 시스템이 부족하다. 이에 본 연구는 벽면녹화의 열 저감 효과를 분석하기 위해 수원시 도시공사 옥상에 위치한 건물을 대상으로 2021년 8월 28일~9월8, 09:00~20:00 동안 30분 간격으로 측정하였다. 본 연구는 강우 기간을 제외한 총 8일에 대해 분석하였으며, 실험기간 동안 평균 낮 기온은 26°C, 최대 30°C였으며, 상대습도의 경우 20%의 조건에서 실험이 진행되었다(Figure 1).

2. 벽면녹화 시스템 및 실험 설계

본 연구는 (1) 벽면녹화 식생에 따른 열 저감

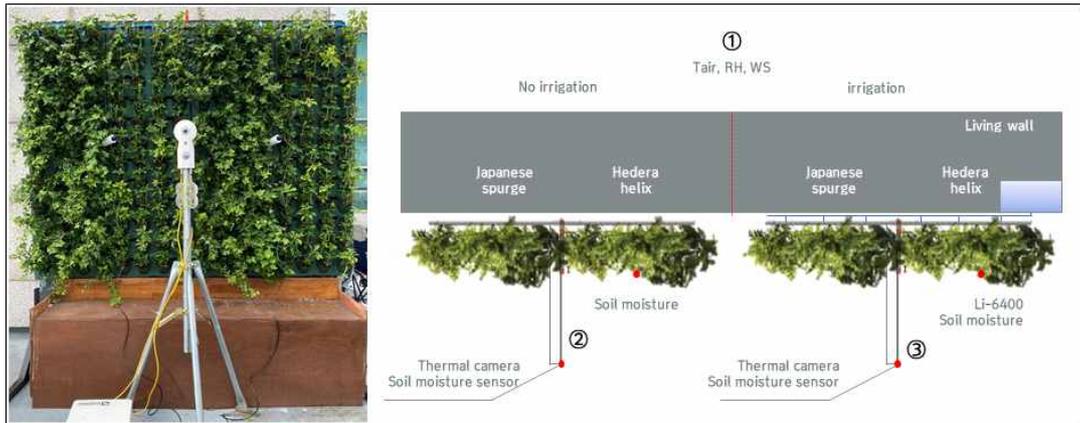


Figure 2. Experimental set up: (left) North facing green facade on suwon urban development corporation (right) From left to right: plants under non irrigation, plants under sufficient water in pots and sensors positions (red crosses)

Table 1. equipment list and location of measurement sensor

Measured	Sensor	Location of sensors	Unit	Accuracy
Air temperature	S-thb-m002	①	°C	± 0.21°C
Relative Humidity		①	%	± 2.5%
Wind speed	S-wcf-m003	①	m/s	± 1.1 m/sec
Thermal camera	Fluke Ti100	②③	°C	± 2°C
Soil moisture sensor	WT1000B	③	%	± 1%
Photosynthesis measurement	Li-6400	③		

효과 (2) 관수유무에 따른 열 저감 효과를 분석하기 위해 Figure 2와 같이 관수시스템 유무에 따라 벽면녹화를 좌·우측으로 분류하였으며, 관수유무 판단을 위한 토양수분측정기와 벽면녹화의 냉각 효과 평가를 위한 열화상카메라를 이용하여 실험을 설계하였다. 벽면녹화는 400mm x 200mm x 60의 크기의 플라스틱 용기에 1개씩 식재하여 설계되었으며, 아이비(*Hedera helix* L.)와 수호초(*Pachysandra terminalis*) 2종이 선정되었다. 아이비는 음지에 강한 식물로 잎의 너비가 약 3~8cm, 길이 2~9cm이며, 잎의 개수는 포트당 평균 460개로 많은 잎의 수를 지니고 있다. 또한, 높은 온도에서 적응을 잘하고 내한성도 매우 좋으나, 전체 토양을 항상 수분이 있도록 유지하도록 관리가 필요한 식물이다. 수호

초는 아이비와 동일하게 음지에 강하며 잎의 너비는 2~4cm, 길이 5~10cm, 높이가 약 30cm이며, 잎의 개수는 포트당 평균 90개로 적은 편이다. 경사가 심한 구역의 정원 혹은 공원에서 피복식물로 벽면녹화에 많이 활용되고 있으며, 높은 수분 흡수량을 가진 식생으로 관리가 용이하다 (Park et al., 2021).

추가적으로, 관수유무에 따른 벽면녹화의 효과를 분석하기 위해 매일 오전 7시 벽면녹화 우측 표면에 관수 조절을 하였으며, 좌측 표면에 물을 공급하지 않았다. 관수 조절의 경우 물이 공급된 벽면녹화의 토양수분함량은 55~65%가 유지되도록 하였으며, 물을 공급하지 않은 식생의 경우 0~5%가 유지되도록 설정하였다 (Figure 3).

Date Time	8.28		8.29		8.3		9.3		9.4		9.5		9.8		9.9	
	Wet_G (%)	Dry_G (%)														
8:00	59.9	6.3	59.9	2.1	59.6	2.7	63.2	0.2	62.8	0	60.5	0	59.6	0	58.8	0
8:30	59.9	6.4	60.1	2.7	59.6	2.7	63.2	0.4	62.8	0	60.3	0	59.9	0	59.6	0
9:00	59.9	6.4	60.7	3.2	59.6	2.7	64	1.2	63.4	0.2	60.1	0	60.9	0	59.9	0
9:30	59.8	6.5	60.5	3.4	59.6	2.8	64.2	1.2	63.2	0.4	60.3	0	61.1	0	59.8	0
10:00	59.8	6.5	60.5	3.6	59.8	3	65.1	1.8	63.4	0.8	60.5	0	61.1	0.2	59.9	0
10:30	58.8	6.4	60.5	3.6	59.8	3.2	65.1	1.9	63.4	1.1	60.5	0	60.7	0.2	59.9	0
11:00	58.5	6.4	60.7	3.9	59.9	3.6	65.1	2.3	63.1	1.2	60.3	0	60.3	0.2	60.3	0.6
11:30	58.1	5.4	60.5	3.9	59.8	3.6	64.2	2.5	62.8	1.2	60.3	0	59.9	0	59.9	0.6
12:00	58.1	5.2	60.5	4.1	59.8	3.6	64	2.7	62.5	1.1	60.3	0	60.1	0.2	59.6	0.4
12:30	57.9	4.9	60.5	4.2	59.9	3.6	63.6	2.5	62.1	0.9	60.7	0	60.1	0.4	58.8	0.6
13:00	57.9	4.8	60.5	4.4	59.6	3.6	63.2	2.3	62.1	0.9	60.7	0	59.9	0.4	59.6	1.1
13:30	57.9	4.8	60.3	4.4	58.8	3.6	63.1	2.1	62.3	1.1	60.3	0	59.8	0	59.8	1.1
14:00	57.9	4.6	60.1	4.2	59.6	3.6	62.6	1.9	60.7	1.1	60.5	0	59.6	0	58.8	0.9
14:30	56.7	4.6	60.1	4.4	58.7	3.4	63.1	2.1	60.5	0.9	60.1	0	59.6	0	58.7	0.8
15:00	56.6	4.3	58.9	4.1	58.5	3.2	63.1	2.3	60.3	1.1	60.1	0	58.7	0	58.1	0.4
15:30	56.3	4.1	57.7	3.9	58.5	3.2	62.6	2.1	60.1	1.1	60.1	0	58.5	0	58.3	0.4
16:00	56.1	4.2	57.5	3.6	58.5	3.2	61.9	1.5	59.8	0.6	60.5	0	58.5	0	58.1	0.2
16:30	56.1	4.1	57.3	3.2	58.5	3	62.1	1.9	59.6	0.4	60.1	0	58.1	0	57.7	0
17:00	56.1	4.1	57.3	3	58.3	2.7	62.1	1.8	58.8	0	58.7	0	57.9	0	57.3	0
17:30	56.1	4.1	57.3	3	58.3	2.5	61.7	1.7	58.8	0	58.7	0	57.9	0	57.3	0
18:00	56.1	4.1	57.3	3	58.3	2.3	61.5	1.2	58.8	0	58.7	0	57.7	0	57.3	0
Average	57.83333	5.152381	59.4619	3.614286	59.19048	3.133333	63.27143	1.790476	61.49048	0.671429	60.10952	0	59.51905	0.07619	58.92857	0.3381

Figure 3. Soil moisture of green facade under different irrigation conditions

본 연구는 벽면녹화의 식생별, 관수유무에 따른 냉각 효과 분석을 위해 광합성측정기를 이용하여 식생별 증산량을 측정하였으며, 열화상 카메라(Fluke -Ti100)를 활용하여 잎의 표면온도 값을 도출하여 비교 분석하였다(Table 1).

3. 광합성 측정기

증산량 측정 실험은 LI-COR, LI-6400에 의한 광합성 측정을 통해 각 식물의 증산량을 계량화 하였다. 실험 식물은 수분부족에 의한 영향이 없도록 매일 물을 공급하는 벽면녹화 식생을 대상으로 하였고, 광합성이 활발히 일어나는 오전 8시에서 오후 3시 사이에 측정을 수행하였다 (Park et al., 2010; Ann et al., 2010). 측정 시기는 9월2일~9월10일까지 식생별 4회 반복하여 측정하였다. 광도 변화에 따른 광합성 반응은 CO₂ 주입량을 평소 대기상태의 농도와 유사한 400µmol/mol, 유속 500µmol/s 조건에서 측정하였으며, 증산량 측정 시 광도는 1500, 1200, 1000, 800, 600, 400, 200, 150, 100, 50, 0, 200의 수준으로 조절하여 광도-광합성 곡선 (Light-Curve2)를 도출하였다.

추가적으로, CO₂ 농도 변화에 따른 광합성 반응을 분석하기 위해 광도 1500µmol·m⁻²·s⁻¹, 유속 500µmol/s, 잎 표면온도 25℃ 조건으로 설정하였다. 이때 CO₂ 농도는 400, 200, 100, 50,

400, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1800수준으로 조절하여 A-Ci curve를 도출하였다(Shin and Son, 2015). 따라서 본 연구에서는 동일한 환경조건에서 식생별 광도, CO₂ 농도에 따른 광합성 측정을 통해 잠재적인 증산량을 파악하고자 하였다.

4. 열화상 카메라 측정

잎의 온도를 측정하기 위해 열화상 카메라 (Fluke Ti400)을 사용하여 1.5m 거리에서 수평으로 표면온도를 측정하였다(Figure 4). 열화상 카메라는 ±2℃의 정확도로 320x240(76,800 pixel) 해상도의 이미지로 Fluke Thermal image File 형식으로 저장하였으며, 09:00~20:00시 까지 30분 간격으로 동일한 위치에서 촬영하였다 (Yin et al., 2017; Morakinyo et al., 2019). 벽면 녹화의 방사율은 선행연구의 경험적 값에 따라 0.98로 설정하여 방사율 보정 온도를 직접 제공 받았으며, 벽면녹화 설치 이후 식생의 위치가 크게 변하지 않아 관수유무, 식생별 4개의 직사각형을 생성하여 평균온도를 도출하였다(Zou et al., 2019). 촬영된 이미지는 Smartview 프로그램에서 분석하였다.

III. 연구결과 및 고찰

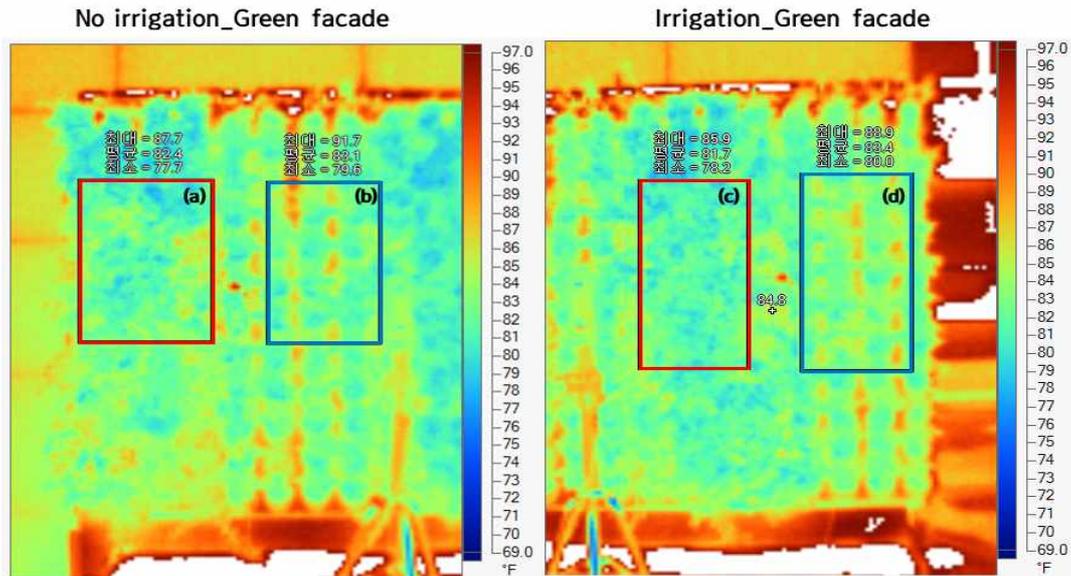


Figure 4. The surface temperature(°F) image of the plants under different irrigation conditions in the experimental designed on 29 Aug 2021 at 14:00. (a) the surface temperature of the Hedera helix under non-irrigation (b)the surface temperature of the Japanese spurge under non-irrigation (c)the surface temperature of the Hedera helix under sufficient irrigation (d) the surface temperature of the Japanese spurge under sufficient irrigation

1. 식생에 따른 냉각 효과 비교 분석

본 연구는 8월 28일~9월 9일 측정기간 내 강우 기간을 제외한 총 8일 동안 벽면녹화 식재 및 관수 조절에 따른 냉각 효과를 평가하였다(Figure 5). 실험대상지의 기후조건인 평균 대기 온도 26°C, 최대 30°C, 최저 18°C를 고려해볼 때, 벽면녹화 식생의 잎 표면온도는 대기온도보다 전반적으로 높게 나타났다. 식생의 잎 표면온도는 정오를 기점으로 일사량이 높은 오후 16:00까지 높게 나타나는 경향이 보이며, 일몰 1~2시간 전부터 잎의 표면온도가 감소하는 추세이다. Figure 5 (a)는 벽면녹화에 식재되어있는 모든 실험조건에 대해 열화상카메라로 촬영한 표면온도 데이터값을 나타낸 그래프로, 대기 온도가 높은 9월 3일~9일에 잎의 표면온도가 미세하게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 5(b,c) 그래프는 동일한 관수조건 상태에서 식생별(수호초, 아이비) 냉각효과를 비교분석하였다. Figure 5 (b)는 관수 시스템에 의해 충분

히 물을 공급받은 수호초와 아이비 표면온도 데이터로, 아이비는 수호초보다 표면온도가 전반적으로 낮게 나타난다. 특히 일사량이 높은 낮 12:00~15:00에서 잎의 표면온도는 약 2°C~4.4°C 차이가 나타났으며, 16:00시 이후 두 식생 간의 표면온도 차이가 점점 작아진다.

반면 물을 공급받지 않은 식생별 냉각효과 비교 결과, 수호초가 아이비보다 낮은 표면온도를 유지하고 있다. 물이 공급되고 있는 식생과 유사한 경향으로, 일사량이 높은 시기에 표면온도는 +1.1°C~+4.4°C 차이가 나타나고 있다. 즉, 물을 공급받고 있는 조건에서 아이비는 수호초보다 -2°C~4.4°C 냉각 효과가 높게 나타났으며, 물 공급을 받지 않는 환경에서는 아이비가 아이비보다 표면온도가 약 +1.1°C~+4.4°C 높게 나타났다.

관수의 유무에 따른 식생의 냉각효과는 식생별 상반된 결과를 보였다. 이는 식생의 특성에서 고려해 볼 때, 아이비는 토양의 수분이 적절

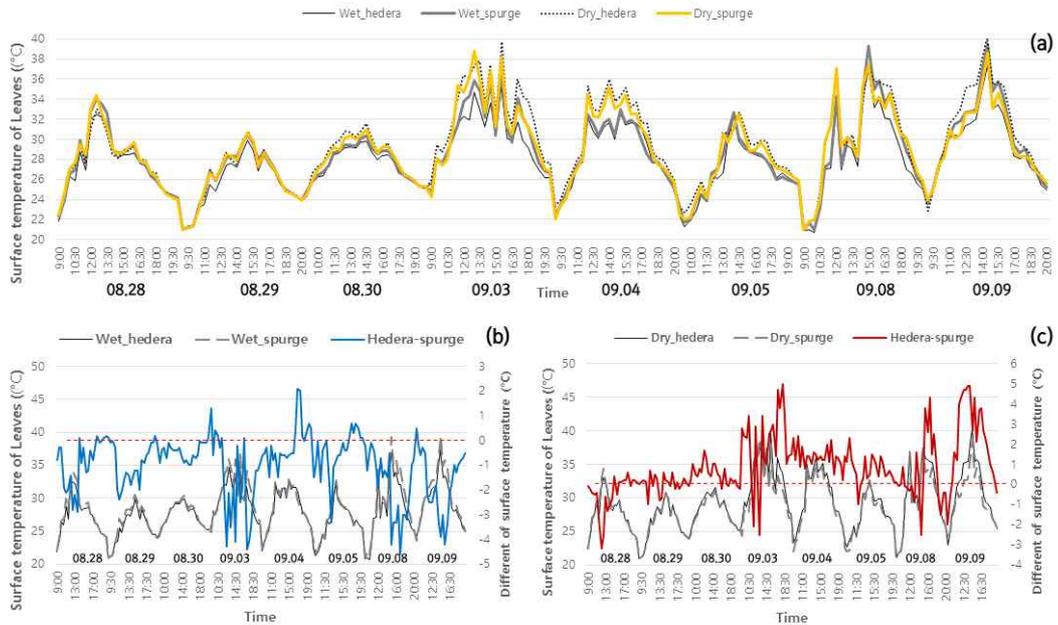


Figure 5. (a) Surface temperature of the hedera and spurge for comparison over the eight days. (b) Difference between hedera and spurge under sufficient water (c) Difference between hedera and spurge under Non-irrigation

하계 유지될 때 잘 자라는 식물로 수분요구도가 높은 식물이다(MacIvor and Lundholm, 2011). 반면 수호초의 경우 높은 수분 흡수량을 가진 식물로 물 공급량이 적은 환경에서 적응력이 높아 관리적인 측면에서 용이하다. 선행연구에 따르면, 수분 요구도가 높은 식생은 토양수분함량이 증가할수록 냉각효과가 커지나, 수분이 부족할 경우 냉각효과가 기하 급수적으로 감소한다(Xu et al., 2015). 이는 본 연구의 결과와 유사하게 도출되었으며, 수분요구도가 적은 수호초는 물이 공급되지 않을 때 아이비보다 냉각효과가 크게 나타났다.

2. 관수 조절에 따른 벽면녹화 냉각효과

관수 조절에 따른 벽면녹화 식생의 냉각효과 비교 분석결과, 아이비는 최저: -1°C~최대: -8.1°C의 냉각 효과를 보였으며(Figure 6 (a)), 수호초는 최저: -0.3°C~최대: -7.8°C 냉각효과가 발생했다(Figure 6 (b)). 아이비는 수호초보다 관수

조절에 따른 냉각효과 차이가 크게 나타났으며, 물을 공급하지 않는 식생에서 수호초가 아이비보다 냉각효과가 더 크게 나타났다. 이는 식생 관리의 중요성으로 해석할 수 있다. 관수 조절을 지속적으로 유지할 수 있는 공간에 벽면녹화를 설치할 경우, 냉각효과가 큰 아이비가 적합할 수 있으며, 반면에 관수 시스템 설치가 어렵거나 물 공급이 어려운 공간에서는 관리가 용이한 수호초가 적합할 수 있다.

냉각효과는 낮 12:00~13:00 사이에서 차이가 크게 나타났으며, 일사량이 높은 14:00시 이후로는 관수조절에 따른 효과차이가 점점 작아지는 추세이다. 증산량으로 인해 발생하는 식생의 잠열량보다 높은 입사 태양복사에너지로 인한 현열량이 높아 표면온도 차이가 점점 작아지는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 낮시간 보다는 일몰 이후에 관수 조절에 따른 냉각효과가 크게 나타나는 경향을 볼 수 있다(Figure 6).

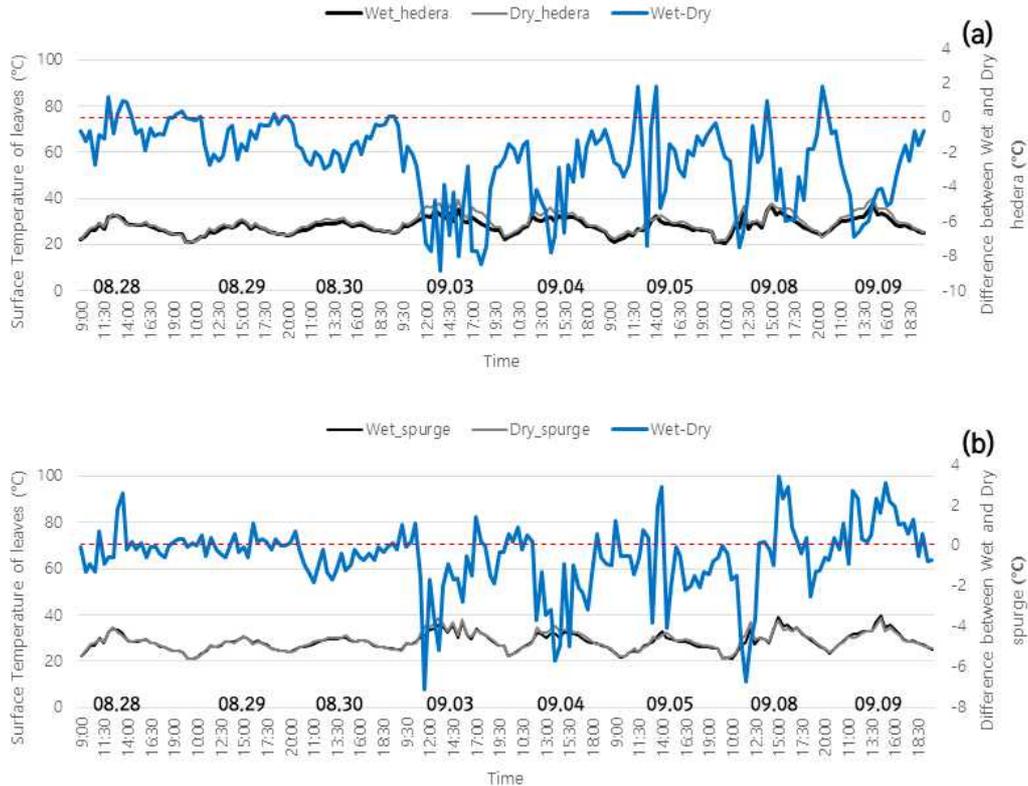


Figure 6. (a) Surface temperature of the hederia under difference water supply over the eight days. (b) Surface temperature of the spurge under difference water supply over the eight days. (blue line) indicate difference Surface temperature of leaves between irrigation conditions

3. 식물별 증산량 비교

벽면녹화 식생 2종을 대상으로 광도(PAR) 변화, 이산화탄소 농도에 따라 4번 반복하여 증산량을 측정된 결과(Figure 7), 광도가 증가함에 따라 증산량이 증가하였고, 이산화탄소 농도가 증가할수록 증산량이 낮아지는 것으로 나타났다(Craparo et al., 2017). 광도에 따른 증산량의 경우, 두 식생 모두 광도량에 비례하여 $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 가장 높았으며, 이산화탄소 농도의 경우 반비례하여 $50 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 에서 증산량이 가장 높았다.

광합성 측정기를 통해 광도 $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \sim 1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 조건에서 식생별 증산량을 비교한 결과, 수호초의 경우 각각

$0.2469 \sim 0.5093 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0.3598 \sim 0.6136 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 양을 발산했고, 아이비는 $0.0713 \sim 0.6840 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $1.2541 \sim 2.2586 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 양을 발산했다. 광도양에 따른 증산량 차이는 광도 낮은 $0 \sim 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 사이를 제외하고, 아이비가 수호초보다 평균적으로 $0.6320 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 만큼 더 많은 증산량을 발산했다. 이산화탄소 농도에 따른 증산량 측정결과의 경우, 수호초는 $0.3808 \sim 0.6801 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0.6426 \sim 1.1574 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 양을 발산했고, 아이비는 $0.3545 \sim 1.4703 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $1.8039 \sim 2.2715 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 증산량을 보였다. 이산화탄소 농도에 따른 식생별 증산량 차이는 평균적으로

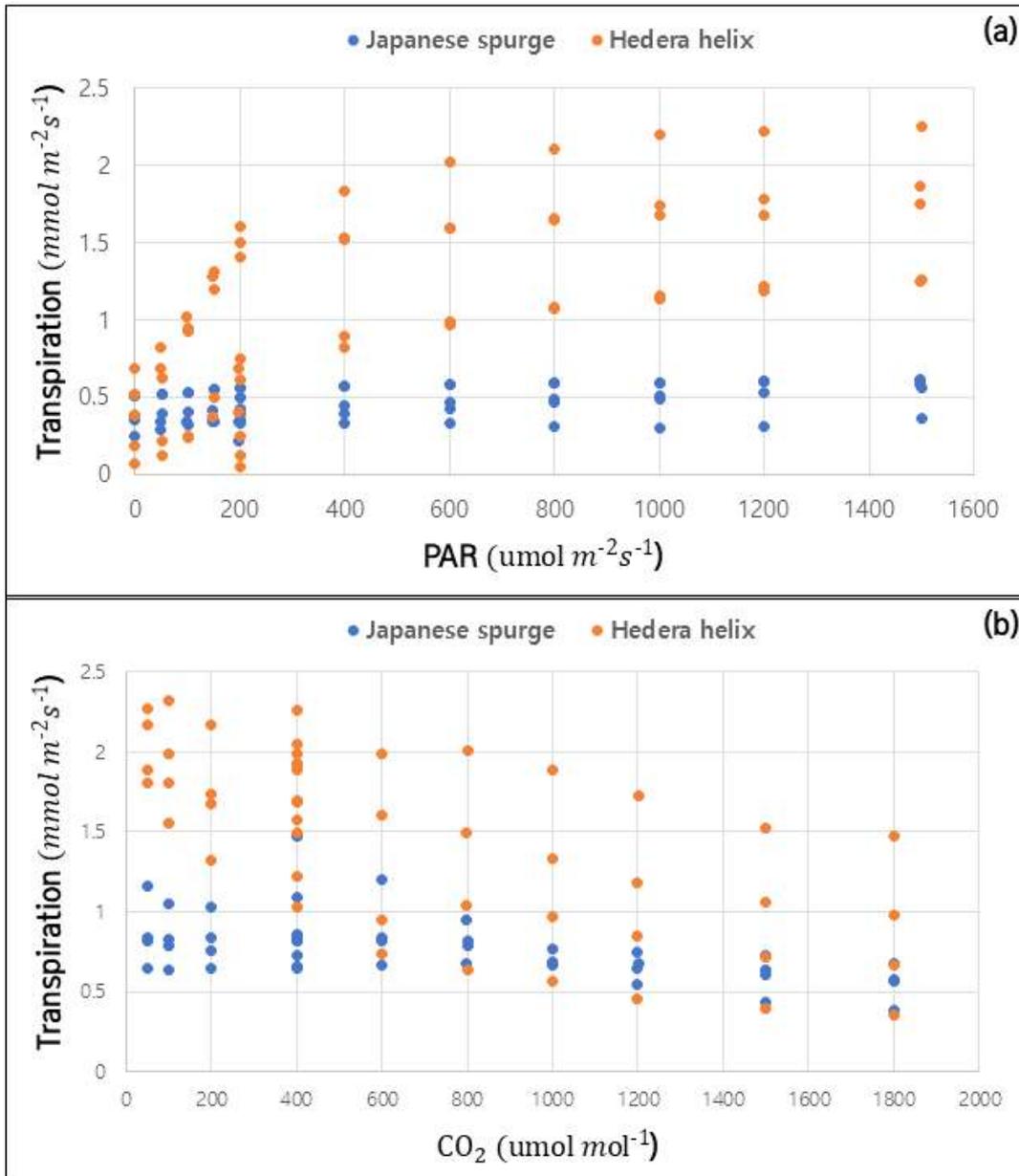


Figure 7. Transpiration to PAR based on Photosynthetic light - response (a) and transpiration to CO₂ based on CO₂ - response curves (b) in the leaves of Japanese spurge(blue point) and Hedera helix(Orange point) (the measurements were made at a CO₂ concentration of 400 μmol mol⁻¹ and at a PPFD of 1500 μmol mol⁻¹, respectively for light - response curves and CO₂ - response curves).

0.6743mmolm⁻²s⁻¹ 정도 차이가 나타났다.

9월2일~10일까지 동일한 외부환경 조건에서 식생별 4회 반복 측정된 결과, 광도 및 이산화탄소 농도별 증산량은 아이비가 높게 나타났다.

특히 아이비는 광도변화에 따라 증산량이 민감하게 반응하여 광도가 증가할수록 기하급수적으로 증가하는 모습을 볼 수 있으며, 반면에 수호초의 경우 광도변화에 따라 민감하게 반응하

지 않는다. 이산화탄소 농도에 따른 증산량을 비교하면 광도와 유사하게 아이비는 크게 민감하여 증산량의 감소량이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 수호초의 경우 크게 민감하게 반응하지 않는다. 즉, 광도 및 이산화탄소 농도에 따른 증산량은 아이비가 수호초보다 더 높게 나타났다.

IV. 결 론

본 연구는 관수유무에 따른 식생별 벽면녹화의 냉각효과를 평가하기 위해 식생 2종을 선정하고, 30분 간격으로 표면온도, 토양수분함량 및 광합성 측정을 진행하였다. 물을 공급받는 아이비는 수호초보다 약 $2^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 냉각 효과가 높게 나타났으며, 물을 공급받지 않는 아이비는 수호초보다 표면온도가 약 $+1.1^{\circ}\text{C}\sim +4.4^{\circ}\text{C}$ 높게 나타나 물을 공급받는 조건과 상반된 효과를 보였다. 특히, 일사량이 높은 12:00~15:00 사이에 두 식생 간 표면온도 차이가 크게 나타났다. 식생별 표면온도 차이의 결과를 해석하기 위해 광합성 측정기를 통해 식생별 광도 및 이산화탄소 농도별 증산량을 측정한 결과, 아이비는 수호초보다 평균적으로 더 높은 증산량을 발산하였다(각각, $0.6320\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $0.6743\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$). 즉, 입사 태양복사로 인해 대기온도 보다 높아진 잎의 표면온도는 증산량으로 인한 냉각효과가 직접적으로 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한, 관수유무에 따른 벽면녹화의 효과의 경우, 아이비는 약 $-1^{\circ}\text{C}\sim -8.1^{\circ}\text{C}$, 수호초는 약 $-0.3^{\circ}\text{C}\sim -7.8^{\circ}\text{C}$ 로 평균 -3.5°C 의 표면온도 냉각효과를 보였다. 따라서 냉각효과 수준은 관수 아이비, 관수 수호초, 무관수 수호초, 무관수 아이비 순으로 나타났다.

물을 공급받는 아이비는 수호초보다 표면온도 저감 효과가 크게 나타났으나, 물을 공급받지 않는 아이비는 수호초보다 표면온도 저감효과가 낮게 도출되었다. 이는 식생특성 중 수분요구도

에 따라 최대 냉각효과 성능의 차이가 발생한다. 또한, 물을 공급하지 않는 조건에서 모든 식생의 증산량 및 표면온도 저감효과는 감소되지만, 수호초는 자생종으로 개량종인 아이비에 비해 환경 적응능력이 뛰어나 저감효과 차이가 선행연구에 비해 크게 나타난 것으로 판단된다(Asawa et al., 2020). 모든 식생은 관수조절에 따라 냉각효과의 차이가 발생한다. 따라서 본 연구에서 실험한 결과를 통해 도시지역과 같은 관수 시스템 적용이 어려운 공간에는 열 저감 능력을 최대화하는 것은 어려운 것으로 예상된다.

해당 연구는 식생별 잠재적인 증산량에 따라 표면온도 저감효과에 영향을 미치는 정도를 파악하였으며, 관수유무에 따른 냉각효과 차이를 실험 측정을 통해 분석하였습니다. 특히, 주기적인 수분요구도가 크고 주기적인 관리가 필요한 아이비는 관수 시스템이 적용되는 공간에서 큰 냉각효과를 기대할 수 있으며, 관수시스템 설치가 어려운 공간에서는 수호초의 활용도가 높을 것으로 판단된다. 그러나 다양한 식생과 관수조절로 인한 점진적으로 낮아지는 토양수분함량에 대한 실험이 진행되지 않은 점을 고려하여, 추후 다양한 수종과 점진적으로 감소하는 토양수분함량을 반영하여 식생별 수분함량에 따른 증산량을 고려한 냉각효과 분석 평가가 필요하다.

References

- Acero, J. A., Koh, E. J. Y., Li, X. X., Ruefenacht, L. A., Pignatta, G., & Norford, L. K. 2019. Thermal impact of the orientation and height of vertical greenery on pedestrians in a tropical area. *Building Simulation*, 12(6), 973-984. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0537-1>
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* 70:295-310.

- Ann, kun young, Han, seong wan, Lee E. 2010. Effects of Artificial Ground Greening on Microclimate Improvement through Measurement of Evapotranspiration. *korean Soc Environ Ecol* 20:255-260
- Asawa, T., & Fujiwara, K. 2020. Estimation of Sensible and Latent Heat Fluxes of an Isolated Tree in Japanese Summer. *Boundary-Layer Meteorology*, 175(3), 417-440. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00507-y>
- Bauerle, W. L., & Bowden, J. D. 2011. Predicting transpiration response to climate change: Insights on physiological and morphological interactions that modulate water exchange from leaves to canopies. *HortScience* 46:163-166.
- Besir, A. B., & Cuce, E. 2018. Green roofs and facades: A comprehensive review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82:915-939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Cameron, R. W. F., Taylor, J. E., & Emmett, M. R. 2014. What's "cool" in the world of green facades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment*, 73, 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.005>
- Chen, Q., Li, B., & Liu, X. 2013. An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. *Energy and Buildings*, 61, 298-307. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.030>
- Convertino, F., Vox, G., & Schettini, E. 2020. Thermal barrier effect of green facades: Long-wave infrared radiative energy transfer modelling. *Building and Environment*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106875>
- Craparo, A. C. W., Steppe, K., van Asten, P. J. A., Läderach, P., Jassogne, L. T. P., & Grab, S. W. 2017. Application of thermography for monitoring stomatal conductance of *Coffea arabica* under different shading systems. *Science of the Total Environment*, 609, 755-763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.158>
- de Jesus, M. P., Lourenço, J. M., Arce, R. M., & Macias, M. 2017. Green façades and in situ measurements of outdoor building thermal behaviour. In *Building and Environment*, 119:11-19. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.041>
- Gräf, M., Immitzer, M., Hietz, P., & Stangl, R. 2021. Water-stressed plants do not cool: Leaf surface temperature of living wall plants under drought stress. *Sustainability* 13(7). <https://doi.org/10.3390/su13073910>
- Hoelscher, M. T., Nehls, T., Jänicke, B., & Wessolek, G. 2016. Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>
- Kolokotroni, M., Giannitsaris, I., & Watkins, R. 2006. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. *Solar Energy*, 80(4), 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.03.010>
- MacIvor, J. S., & Lundholm, J. 2011. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, 37(3), 407-417. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.004>

- Morakinyo, T. E., Lai, A., Lau, K. K. L., & Ng, E. 2019. Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong. *Urban Forestry and Urban Greening*, 37, 42-55. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.010>
- Park S-A, Kim M-G, Yoo M-H. 2010. Plant physiological responses in relation to temperature, light intensity, and Co2 concentration for the selection of efficient foliage plants on the improvement of indoor environment. *Korean J Hortic Sci Technol* 28:928-936
- Shin, J. H., & Son, J. E. 2015. Irrigation Criteria based on Estimated Transpiration and Seasonal Light Environmental Condition for Greenhouse Cultivation of Paprika. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 24(1), 1-7. <https://doi.org/10.12791/ksbec.2015.24.1.001>
- Susorova, I., Angulo, M., Bahrami, P., & Brent Stephens. 2013. A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.027>
- van de Wouw, P. M. F., Ros, E. J. M., & Brouwers, H. J. H. 2017. Precipitation collection and evapo(transpi)ration of living wall systems: A comparative study between a panel system and a planter box system. *Building and Environment*, 126, 221-237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.002>
- Xu, P., Moshelion, M., Wu, X. H., Halperin, O., Wang, B. G., Luo, J., Wallach, R., Wu, X., Lu, Z., & Li, G. 2015. Natural variation and gene regulatory basis for the responses of asparagus beans to soil drought. *Frontiers in Plant Science*, 6:1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00891>
- Yin, H., Kong, F., Middel, A., Dronova, I., Xu, H., & James, P. 2017. Cooling effect of direct green façades during hot summer days: An observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data. *Building and Environment*, 116, 195-206. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.020>
- Zhang, L., Deng, Z., Liang, L., Zhang, Y., Meng, Q., Wang, J., & Santamouris, M. 2019. Thermal behavior of a vertical green facade and its impact on the indoor and outdoor thermal environment. *Energy and Buildings*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109502>
- Zou, Z., Yang, Y., & Qiu, G. Y. 2019. Quantifying the evapotranspiration rate and its cooling effects of urban hedges based on three-temperature model and infrared remote sensing. *Remote Sensing*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/rs11020202>