

건물 형상과 녹화 전략이 실내 열환경에 미치는 영향: EnergyPlus 기반 시뮬레이션 연구

김지나* · 장새연**† · 이동근***,****

*서울대학교 사회과학대학 지리학과 학사과정, **서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템 공학부 박사과정,
서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템 공학부 조경학과 교수, *서울대학교 농업생명과학연구원 지역개발·조경연구소 겸무연구원

Effects of building geometry and greening on indoor climate: A simulation approach using EnergyPlus

Kim, Gina* · Jang, Sae Yeon**† and Lee, Dong Kun***,****

*Bachelor's Student, Dept. of Geography, College of Social Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

**Ph.D. Student, Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

***Professor, Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

****Adjunct Researcher, Institute of Regional Planning and Landscape Architecture, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

The intensification of climate change is destabilizing thermal conditions in high-density cities; however, most urban heat island mitigation strategies continue to emphasize outdoor microclimates rather than outdoor-indoor interactions. This study quantitatively evaluated how building form and multilayered greening strategies jointly affect indoor air temperature in a typical Korean apartment complex. A parametric simulation framework was developed by coupling EnergyPlus with the Python-based eppy library. A residential block was modelled on a 150 m × 150 m site, with building height and inter-building spacing varied under identical conditions using Seoul-Sinyongsan TMY weather data. Ground greening scenarios combined lawn and trees in perimeter, scattered, and clustered layouts, while building-integrated strategies compared green roofs, green walls, and combined roof-wall greening. The results showed that geometric changes alone had limited thermal effects: narrower gaps slightly reduced indoor temperatures through mutual shading, but the changes were small, remaining within approximately 0.7 °C, and produced no energy savings. In contrast, ground greening with lawns and trees improved free-floating thermal conditions, lowering summer indoor temperatures by up to 4.9 °C and increasing winter temperatures through radiative buffering. However, these benefits did not reduce HVAC demand because shading decreased solar gains, increased heating loads, and limited cooling savings. Green roofs and facade greening reduced summer temperatures while lowering winter heating demand by enhancing insulation and thermal mass. Among all strategies, green roofs provided the greatest benefit, reducing winter heating demand by up to 3,400 kWh. Overall, building-integrated greening was more effective than geometric modification or ground greening for improving residential energy performance.

Key words : Urban Heat, Indoor Thermal Environment, Building Geometry, Green Roof, Green Wall, Ground Greening Layout, Parametric Simulation, EnergyPlus

†Corresponding author : saecgg911@snu.ac.kr, (Room 9211, Bldg. 200, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea. Tel. +82-2-880-4885) ORCID 김지나 0009-0006-2584-6661 이동근 0000-0001-7678-2203 장새연 0009-0008-9072-0752

Received: January 27, 2026 / Revised: March 16, 2026 1st, April 29, 2026 2nd / Accepted: May 27, 2026

1. 서론

기후변화의 심화는 도시의 열환경 균형을 빠르게 붕괴시키고 있다. 최근 수십 년간 폭염과 한파의 발생 빈도와 강도가 모두 증가하면서 냉·난방 에너지 소비는 꾸준히 상승하고 있으며, 이로 인한 온실가스 배출 증가는 다시 기온 상승을 가속화하는 순환적 구조를 강화하고 있다. 이러한 열의 순환은 단순히 대기 중의 온도 상승에 국한되지 않고, 도시 내의 미기후(microclimate)와 건물 내부의 열환경까지 연쇄적으로 영향을 미친다.

그동안의 연구와 정책은 주로 도시 외부 열섬 완화(Urban Heat Island Mitigation) 또는 지표면 온도 저감(surface temperature reduction)에 초점을 두어 왔다. 그러나 이러한 접근만으로는 건물 내부의 실내 열환경 변화와 에너지 소비 간의 상호작용을 충분히 설명하기 어렵다. 실내 기온은 거주자의 열적 쾌적성을 직접적으로 결정할 뿐 아니라, 냉난방 부하를 통해 에너지 소비량을 좌우한다. 나아가 이 과정에서 발생하는 인공열 배출은 다시 도시 대기의 열축적을 가속화한다. 도시의 열환경 문제는 실외와 실내가 상호 연결된 순환 체계로 이해되어야 하며, 이에 따라 도시 기후 대응 전략은 외부 미기후뿐 아니라 실내 기후(Indoor Climate)를 함께 고려하는 통합적 접근으로 확장될 필요가 있다(Li et al., 2022).

이러한 맥락에서 건물의 형상(geometry)은 도시 열환경과 실내 온도 모두에 중대한 영향을 미치는 요인으로 주목받고 있다. 건물의 높이, 간격, 밀도, 방위는 일사량과 통풍, 그림자 분포를 결정하며 외피의 열교환 구조를 변화시킨다. 최근의 수치모의 연구에서는 이러한 형상적 요소들이 도시의 냉난방 부하와 실내 열환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 건물의 높이와 간격이 일사차폐 및 환기 성능에 복합적인 영향을 미치며, 고밀·저간격 배치가 여름철 일사 차단에는 유리하나 겨울철 태양열 획득을 제한하여 난방부하를 증가시키는 경향이 있다는 결과가 보고되었다(Liu et al., 2021; Wen et al., 2022). 또한 건물의 높이-폭 비율(Height-to-Width ratio) 및 하늘시계지수(Sky View Factor, SVF)가 여름철 도시의 열축적 및 방열 효율을 결정짓는 중요한 물리 변수로 작용한다는 연구 결과도 제시된 바 있다(Shashua-Bar et al., 2009). 이처럼 형상 변수는 도시 열환경을 물리적으로 매개하는 핵심적 구조 요소이지만, 실제 단지계획에서는 일조권, 사생활, 법규 등 사회적 요인에 의해 자유로운 조정이 어려운 한계를 지닌다.

이와 달리 녹화 전략(greening strategy)은 기존 건축 구조를 크게 변경하지 않고도 실내 열환경을 개선할 수 있는 수동적(passive) 수단으로 주목받고 있다. 옥상녹화(green roof), 벽면녹화(green wall, green façade), 지상 식재 등은 모두 표면 복사열을 완화하고 증발산(evapotranspiration) 작용을 통해 외피 및 주변 공기의 온도를 저감시키는 효과가 있다. 옥상녹화는 토양층의 열용량과 수분 보유력에 의해 외피의 열적 완충 작용을 제공하며(Idouanaou et al., 2020), 벽면녹화는 수직면의 일사차폐 및 복사 반사율 감소를 통해 실내 기온을 낮추는 것으로 알려져 있다(Perini and Rosasco, 2013; Wong et al., 2010). 지상 식재는 지표면의 알베도와 복사 평형을 조절하여 건물 외피로의 복사유입을 줄이는 역할을 한다.

최근에는 이러한 단일 녹화 유형의 효과를 넘어, 다층적 녹화(Three-dimensional Greening)의 통합적 효과에 주목하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. Lin and Zhang (2024)은 옥상·벽면·지상을 통합한 복합 녹화가 고피복(75~100%) 조건의 정오 시간대에 옥상 단독 대비 평균복사온도를 최대 약 2 °C, 외부 공기온도를 최대 0.8 °C 낮추는 효과를 보고하였으며, Harbiankova and Manso (2025)는 옥상·수직·지상 녹화를 통합한 시스템이 단일 녹화보다 우수한 열저감 효과를 나타낸다고 분석하였다. 그러나 대부분의 연구는 여전히 특정 녹화 유형에 한정되어 있거나 하절기 냉각 효과에만 초점을 맞추고 있으며, 겨울철 단열 및 보온 효과를 함께 고려한 통합 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 이러한 연구의 공백을 보완하기 위해, 다양한 녹화 전략(지상, 벽면, 옥상 및 복합형)을 통합적으로 비교하고 이를 건물 형상 변수(높이, 간격)와 연계하여 실내 열환경 변화를 분석하고자 하였다. 이를 위해 EnergyPlus와 Python 기반 eppy 라이브러리를 연계하여 건물 형상과 녹화 조건을 체계적으로 변형한 파라메트릭 시뮬레이션(parametric simulation)을 수행하였다. 본 연구의 결과는 한정된 도시 공간 내에서 효율적이고 현실적인 녹화 배치를 제시하고자 한다.

2. 방법론

본 연구는 서울·신용산 TMY 기상자료, 건축 재료 물성, 공동주택 프로토타입 조건을 바탕으로 기본 모델을 구축한 뒤, Python 기반 eppy를 활용하여 건물 형상 및 녹화 전략 시나리오를 생성하였다. 이후 EnergyPlus에서

free-floating 조건과 HVAC 가동 조건을 각각 모의하고, 실내 평균공기온도와 냉난방 에너지 수요를 추출하여 일원분산분석과 Tukey HSD 사후검정을 통해 시나리오 간 차이를 비교하였다.

2.1. 시뮬레이션 툴

본 연구는 주거공간에서 녹지의 배치가 실내 열환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 EnergyPlus와 Python 기반의 eppy 라이브러리를 연계하여 시뮬레이션을 수행하였다(U.S. DOE/BTO and NREL, n.d.). EnergyPlus는 미국 에너지부와 건물기술국의 지원으로 개발되어 National Renewable Energy Laboratory (NREL)에서 관리하고 배포되는 건물 에너지 해석 프로그램이다. 이 프로그램은 건물의 정적인 작동 기제뿐 아니라 시간에 따라 변화하는 외기조건, 태양복사, 점유 스케줄, 설비 운전 등을 통합적으로 해석할 수 있어 실내 열환경 모의에 적합하다(Lee, 2018). 표면 열평형과 공간 내 에너지 수지를 시간 단위로 계산함으로써 실내 기온의 변화를 물리적으로 근사할 수 있으며, 외피 열전달·태양복사 취득·내부 발열 및 HVAC 시스템과의 상호작용을 동시에 고려할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 EnergyPlus의 기본 기능을 확장하기 위해 eppy를 활용하여 기본적인 부지 위에 건물 모델과 기상 조건을 유지하고 건물의 배치 및 높이 녹지를 변형시키는 파라메트릭 실험을 구성하였다. 이후 시뮬레이션 간 차이는 일원분산분석(One-way Analysis of Variance, ANOVA)을 통해 파악했으며 집단 간 유의한 차이가 확인된 경우, 각 시나리오 간의 구체적인 차이를 규명하기 위해 Tukey의 Honestly Significant Difference (HSD) 사후검정을 추가로 실시하였다. 모든 통계 분석에서 유의수준은 $\alpha = 0.01$ 로 설정하였다.

2.2. 주거 프로토타입 설정

가상 주거 단지는 150 m × 150 m 부지에 3 × 3 배열로 배치된 블록으로 구성하였고, 각 블록은 13 m × 13 m의 대표 평면과 층고 4 m를 가정하였다. 대표 평면은 디지털 트윈 국도의 공동주거공간 건물의 평균을 이용한 값이다. 각 층에는 남향 벽면에 가로 4 m, 세로 1 m 크기의 창호가 배치되었으며, 창하의 하부는 바닥으로부터 1 m, 상부는 2 m 높이에 위치한다. 또한, 각 층은 독립 열 존(Thermal zone)으로 정의하여 층간 온도 차이와 열환경 분포를 분석할 수 있도록 하였다. 건물의 기본적인 자체 설정은 국내 공동주택의 통상적인 설정을 따랐다. 외벽 단열은 「건축물의 에너지절약설계기준」의 단열재 등급 체계에 부합하는 재료를 적용하였고, 설계 열전도율은 KS L 9016(열전도율 측정) 및 KS L 8301/KS L 8302(평판열류계/보호열판법) 시험값을 근거로 산정하였다(Korean Agency for Technology and Standards (KATS), 2016, 2018a, 2018b; MOLIT, 2025). 실내 마감은 석고보드 제품을 적용하였으며 표준은 KS F 3504를 준거로 하였다(KATS, 2019). 바닥은 「주택건설기준 등에 관한 규정」 제14조의2를 따라 벽식 구조 기준 슬래브 210 mm 이상을 기본으로 하였다. 지붕은 철근콘크리트 평지붕을 기본 골격으로 하되, 지붕부 열관류율 요구 사항을 만족하도록 방수층·단열층 조합을 설정하였다(MOLIT, 2025). 창 및 문은 KS F 2278(창호의 단열성 시험방법)에 근거하여 성능을 모델링하였다(KATS, 2017)(Table 1). HVAC 설정은 Ideal Loads Air System을 적용하여 냉·난방 부하 기반으로 분석을 수행하였다. 실내 설정온도는 한국에너지공단이 건강온도로 지정한 것을 기준으로 하여 여름철 냉방의 경우 26°C, 겨울철 난방의 경우 20°C로 설정하였으며, 실내 온도가 냉방 설정온도를 초과하거나 난방 설정온도 이하로 감소할 경우 시스템이 가동되도록 하였다.

모든 시뮬레이션은 단지 내 배치된 9개 동 전체와 각

Table 1. List of variables and their definitions

	Thickness (m)	Thermal Conductivity	Density	Specific Heat
	Envelope	(W/m·K)	(kg/m ³)	(J/kg·K)
	0.20	1.95	2200	900
Wall	0.1	0.04	30	1400
	0.013	0.16	800	1090
Floor	0.30	1.40	2400	1000
Roof	0.30	1.40	2400	1000
Window	-	U=1.5	-	-

Table 2. Descriptive statistics of variables

(a) Overall summary of temperature

	Mean	Std	Min	Q1	Q3	Max
Dry Bulb Temperature (C)	12.74268	10.31279	-13	4.1	13.7	21.8
Relative Humidity (%)	60.34269	19.63434	10	46	61	77
Wind Speed (m/s)	2.561701	1.350558	0	1.6	2.4	3.4
Global Horizontal Radiation (Wh/m ²)	141.4061	223.2788	0	0	0	222.75
Direct Normal Radiation (Wh/m ²)	110.6581	222.0449	0	0	0	79
Diffuse Horizontal Radiation (Wh/m ²)	76.60342	115.3384	0	0	0	136
Liquid Precipitation Depth (mm)	0.120753	0.808879	0	0	0	0

(b) Summertime summary of temperature

	Mean	Std	Min	Q1	Q3	Max
Dry Bulb Temperature (C)	24.15938	3.299511	14.7	22	24.3	26.225
Relative Humidity (%)	71.67482	16.11272	22	60	75	85
Wind Speed (m/s)	2.487319	1.320667	0	1.6	2.3	3.225
Global Horizontal Radiation (Wh/m ²)	165.9647	245.4277	0	0	22	261
Direct Normal Radiation (Wh/m ²)	88.16712	187.9738	0	0	0	53
Diffuse Horizontal Radiation (Wh/m ²)	101.8691	137.2304	0	0	19	187
Liquid Precipitation Depth (mm)	0.259466	1.323337	0	0	0	0

(c) Wintertime summary of temperature

	Mean	Std	Min	Q1	Q3	Max
Dry Bulb Temperature (C)	-0.09782	4.945273	-13	-3.8	-0.1	3.3
Relative Humidity (%)	54.35602	17.502	14	41	54	67
Wind Speed (m/s)	2.502824	1.339006	0	1.6	2.3	3.3
Global Horizontal Radiation (Wh/m ²)	98.22546	170.0254	0	0	0	139
Direct Normal Radiation (Wh/m ²)	119.5829	244.2601	0	0	0	62
Diffuse Horizontal Radiation (Wh/m ²)	44.79028	74.80509	0	0	0	64
Liquid Precipitation Depth (mm)	0.027731	0.215483	0	0	0	0

동의 5개 층을 개별 열 존(Thermal Zone)으로 구성하여 수행하였으며, 총 45개 존에 대한 EnergyPlus 시뮬레이션 결과를 분석에 활용하였다. 각 존의 온도는 EnergyPlus Heat Balance 알고리즘에서 존 내부 공기의 완전 혼합을 가정하여 산출되는 Zone Mean Air Temperature를 기준으로 하였다. 계절별 대표 온도는 여름철(6월 1일 ~ 8월 31일, 92일) 및 겨울철(12월 1일 ~ 2월 28일, 90일)의 1시간 간격 타임스텝 출력값 전체를 총 타임스텝 수로 나눈 기간 산술 평균값으로 정의하였으며, 이를 단지 전체 45개 존에 대해 산술 평균하여 단지 대표 온도로 채택하였다.

2.3. 기상 데이터

기상 데이터는 EnergyPlus에서 요구하는 표준 형식인

EPW (EnergyPlus Weather) 파일을 활용하였다. 본 연구에서는 Ladybug Tools에서 제공하는 EPW 데이터베이스 (Ladybug Tools, n.d.; <https://www.ladybug.tools/epwmap/>)를 통해 서울-신용산 기상 관측소의 TMY (Typical Meteorological Year) 데이터를 다운로드하여 적용하였다. EPW 파일은 연중 8,760시간(365일 × 24시간)의 시계열 데이터를 포함하며, 외기 온도, 상대 습도, 일사량, 풍속 등을 제공한다. EnergyPlus는 이 데이터를 입력받아 각 시간 단계별로 건물의 실내기온을 계산한다.

신용산 기상대는 서울 도심 내 주거 및 상업 복합 지역에 위치해 있으며, 주변의 고밀도 도시환경을 대표할 수 있다(Table 2).

2.4. 시나리오

2.4.1. 건물의 높이와 간격

본 연구에서 건물 높이는 층고를 4 m로 고정한 상태에서 층 수를 변화시켜 조정하였다. 실내 유효 층고는 통상 2.6~2.9 m 수준이지만 구조와 설비의 여유를 포함하여 4m로 고정하였다. 건물 높이는 20 m와 40 m로 나누어 시나리오를 선정했다. 국토교통부의 아파트주거환경통계에 따르면 중층인 5~10층이 대표 높이로 나타나 이에 해당하는 높이를 모델링하였다. 이는 건물 높이가 외피 면적 증가와 체적 변화를 통해 실내 열환경 및 외부 미기후에 미치는 영향이 크다는 선행연구 결과를 반영한 것이다 (Perini and Magliocco, 2014). 저층에서 고층으로 갈수록 태양 복사 차폐, 바람 흐름, 그리고 지상 열축적 양상이 달라지며, 이러한 변화를 모사하기 위해 건물 높이를 변수로 설정하였다.

한편 건물 간격은 5 m 단위로 점진적으로 변화시켜, 공간 간섭에 따른 차폐·통풍 효과를 검토하였다. 이는 단지 계획에서 공간 거리의 변화가 열환경 및 환기 성능에 준대한 영향을 준다는 연구에 기반한다(Li et al., 2022).

2.4.2. 녹지 배치 시나리오

본 연구는 녹지의 유형과 배치 패턴이 실내 열환경 및 외피 열거동에 미치는 영향을 규명하고자 시나리오를 구성하였다. 모든 시나리오에서 건물, 기상 조건은 동일하게 유지하고, 녹지 구성만 변화시켰다. 녹지 구성은 크게 지상 녹화와 건물에 녹화를 직접적으로 설치하는 것으로 구분된다. 지상 식재의 경우 복사 차단 효과 중심으로 근사하는 경우가 많다(Tsoka et al., 2021). 지상 녹화는 잔디를 통한 녹화와 수목을 통한 녹화로 다시 구분된다. 지상 녹화의 경우 입사되는 복사장을 조절하여 알베도를 통해 녹화의 효과를 반영하였다. 수목은 캐노피를 설정하여 광투과율을 기반으로 한 복사 차단 효과를 통해 모델링을 진행하였다. 수목은 5 m 높이로 고정하였으며 SHADING:SITE:DETAILED / SHADING:BUILDING:DETAILED 객체로 기하학적 캐노피를 구성하였다. 광투과율 스케줄은 국내 공동주택 단지에서 주로 식재되는 낙엽활엽수의 계절성을 고려하여 하계에는 0.20의 값을, 동계 0.60으로 설정하였다.

건물을 제외한 부지에 잔디와 녹지를 다양한 형태로 배치하여 그 차이를 분석하였다. 녹지의 배치는 건물의 주변부를 둘러싸는 형태(perimeter ring), 부지에 산발적으로

흩어진 형태(scatter) 그리고 한 곳에 모여져 있는 형태(cluster)로 나누어서 모의하였다. 수목의 경우 녹지와 상관없이 건물을 제외한 부지에 무작위(random)하게 배치되도록 하였다(Fig. 1).

건물에 직접적으로 녹화를 추가하는 것은 옥상 녹화와 벽면 녹화를 통해서 진행했다. 옥상녹화의 경우 EnergyPlus의 Material:RoofVegetation을 사용하여 식생층-토양층-슬래브로 이루어진 지붕을 정의하였다. 이를 통해 열용량 증가, 토양 수분 저장, 증발산(ET)에 따른 표면 온도-전도열류의 시간 변동을 물리적으로 반영하였다. (U.S. DOE/BTO and NREL, n.d.). EnergyPlus의 내장 식생 모델(EcoRoof)이 수직면의 방위, 식생 캐노피 구조, 증발산의 방향성을 고려하지 못하기 때문에 선행연구를 참조하여 층상(layered) 외벽 구성으로 근사하였다 (Dahanayake and Chow, 2017; Pérez et al., 2014). 기존 외벽에 잎, 배양토, 공기층, 얇은 수분층으로 이루어진 벽면을 적용하였다. 이 근사는 전도 경로 연장, 표면 열용량 증가, 복사 교환 완화 효과를 포착하는 데 목적이 있으며,

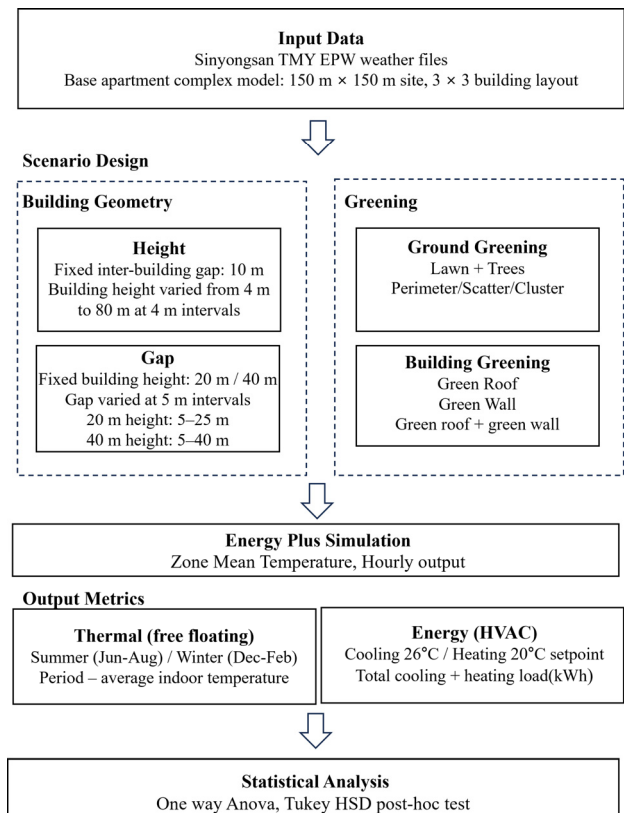


Fig. 1. Overall workflow of the parametric simulation framework

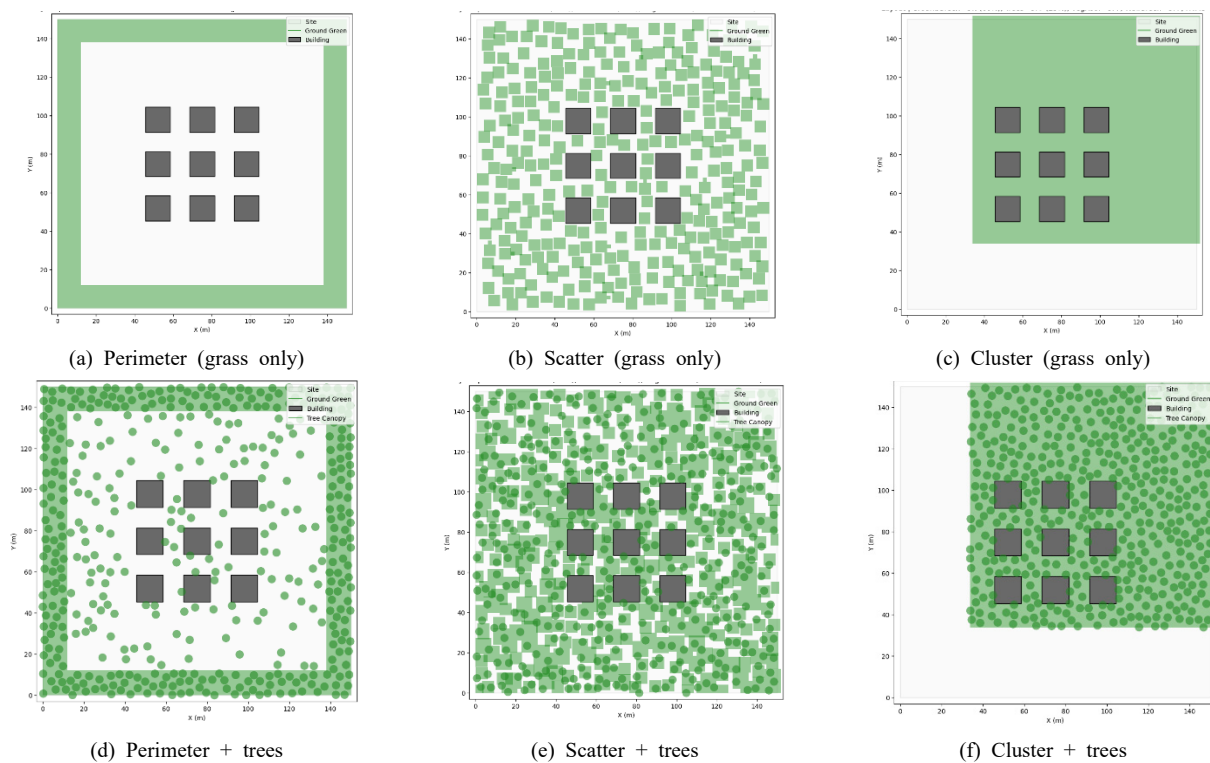


Fig. 2. Green areas, vegetation layout

통기·증발산의 동적 상호작용은 보수적으로 표현하였다. 옥상녹화는 옥상 전체 면적에 대한 설치 비율을 설정할 수 있도록 하였으며, 벽면녹화는 설치할 외벽의 방위, 면적, 그리고 상·하부 위치를 지정할 수 있도록 구성하였다. 실험적 변수의 수를 줄이고 효과를 명확히 보기 위해 가장 일사 민감도가 높은 남향을 대표 방향으로 선택하였다 (Kontoleon and Eumorfopoulou, 2010). 옥상녹화를 100% 식재하는 것을 기준으로 동일면적을 벽면 혹은 벽면과 옥상녹화를 혼합하여 식재하는 방식을 채택하였다.

3. 결과

3.1. 건물 형상 변경

건물 높이를 20 m로 고정한 조건에서 건물 간격을 5, 10, 15, 20, 25 m로 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다 (Table 3). 건물 간격에 따른 여름철 실내온도는 HVAC 및 free-floating 조건 모두에서 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.01$). free-floating 조건에서는 5 m (24.71 °C)와 25 m (25.39 °C) 간 약 0.68 °C 차이가 확인되었다. 사후검정 결

과 5 m와 10 m 간격의 온도와 그 외 온도 사이에서는 유의한 차이가 확인된 반면 15 m이상의 구간에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 겨울철 난방부하는 간격이 넓어 질수록 유의하게 감소하였으며($p < 0.01$), free-floating 겨울 온도 역시 간격이 넓을수록 높아졌다. 에너지 사용량의 총량은 건물 간격이 넓을수록 높아졌다.

건물 높이를 40 m로 고정하여 다시 간격을 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40으로 고정하여 실시한 결과도 유의미한 차이를 보였고($p < 0.01$) 간격이 좁을수록 낮은 온도를 관찰할 수 있었다. 하지만 겨울철 온도도 함께 낮아지면서 전체 에너지 사용량은 늘어났다(Table 4).

한편, 건물의 간격을 고정하고 높이의 변화를 관찰하면 건물이 높아짐에 따라 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다(Table 5).

3.2. 녹화의 결과

Table 6에서 지상녹화 배치에 따른 free-floating 조건에서는 세 배치 모두 약 20.1 °C로 baseline (25.02 °C) 대비 약 4.9°C 낮게 나타났다($p < 0.01$). 그러나 겨울철 난방부하는 perimeter (27,938 kWh), scatter (27,952 kWh), cluster

Table 3. Simulation results under 20 m building height with varying gap distances

(a) Temperature Results (°C)

Gap	Overall temperature under free floating	Summer temperature under free-floating	Winter temperature under free-floating
5 m	17.582	24.714	5.833
10 m	16.647	25.024	6.353
15 m	17.710	25.204	7.044
20 m	17.742	25.325	7.466
25 m	17.758	25.391	7.784

(b) Energy Results (kWh)

Gap	Overall total energy	Summer total energy	Winter total energy
5 m	47819.607090	3034.296218	28449.539903
10 m	46623.419714	3175.143080	27902.844359
15 m	45746.209780	3256.573181	27367.592766
20 m	45243.521350	3321.800271	27021.363460
25 m	44985.772349	3345.176292	26839.147571

Table 4. Simulation Results under 40 m Building Height with Varying Gap Distances

(a) Temperature Results (°C)

Gap	Overall temperature under free floating	Summer temperature under free-floating	Winter temperature under free-floating
5 m	15.624	24.589	4.947
10 m	17.673	24.991	5.377
15 m	16.534	25.218	5.914
20 m	16.820	25.375	6.319
25 m	17.027	25.481	6.680
30 m	17.182	25.568	6.967
40 m	17.346	25.683	7.226

(b) Energy Results (kWh)

Gap	Overall total energy	Summer total energy	Winter total energy
5 m	75822	3668	39295
10 m	74132	3387	38851
15 m	72794	3223	38393
20 m	71850	3113	38046
25 m	71237	3040	37811
30 m	70795	2981	37634
40 m	70235	2902	37395

(28,001 kWh) 모두 baseline (27,903 kWh) 대비 증가하였다. 사후검정 결과 세 배치 방식 간에는 여름 온도 및 겨울 난방부하 모두에서 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다($p>0.05$).

Table 7에서 건물녹화의 경우, 여름철 실내온도는 옥상

과 벽면녹화를 병행한 경우(19.914 °C), 옥상녹화(20.110 °C), 벽면녹화(20.112 °C) 순으로 낮았으며, 모든 유형이 baseline (25.024 °C) 대비 유의하게 낮은 온도를 보였다($p<0.01$). 사후검정 결과 free-floating 조건에서 옥상녹화(20.110 °C)와 벽면녹화(20.112 °C)는 유의한 차이를 보이

Table 5. Simulation results under 10 m gap distances with varying building height

Height	Overall temperature under free floating (°C)	Summer temperature under free-floating (°C)	Winter temperature under free-floating (°C)
4 m	17.244	25.724	9.744
8 m	16.954	25.678	8.352
12 m	16.976	25.568	7.499
16 m	16.814	25.332	6.823
20 m	16.647	25.024	6.353
24 m	16.388	25.023	6.045
28 m	16.388	25.043	5.815
32 m	17.674	25.032	5.632
40 m	17.676	24.991	5.377
80 m	17.664	24.727	4.776

Table 6. Simulation results under different greenery layouts

(a) Temperature Results (°C)

Variables	Overall temperature under free floating	Summer temperature under free-floating	Winter temperature under free-floating
Baseline	16.647	25.024	6.353
Perimeter	17.623	20.116	14.744
Scatter	17.610	20.104	14.732
Cluster	17.624	20.116	14.745

(b) Energy Results (kWh)

Variables	Overall total energy	Summer total energy	Winter total energy
Baseline	46623	3175	27903
Perimeter	46775	3202	27938
Scatter	46870	3225	27952
Cluster	47025	3245	28001

Table 7. Simulation results under different green roof and green wall configurations

(a) Temperature Results (°C)

Variables	Overall temperature under free floating	Summer temperature under free-floating	Winter temperature under free-floating
Baseline	16.647	25.024	6.353
Green Roof (100%)	17.659	20.110	15.255
Green Roof + Green Wall	17.657	19.914	15.052
Green Wall (100%)	17.597	20.112	14.706

(b) Energy Results (kWh)

Variables	Overall total energy	Summer total energy	Winter total energy
Baseline	46623	3175	27903
Green Roof (100%)	40810	2303	24496
Green Roof + Green Wall	44068	2667	26414
Green Wall (100%)	45480	3005	25389

지 않았다($p>0.05$). 겨울철 난방부하는 옥상녹화 (24,496 kWh), 벽면녹화(25,389 kWh), 옥상과 벽면녹화를 병행한 경우(26,414 kWh) 순으로 baseline (27,903 kWh) 대비 유의하게 감소하였으며($p<0.01$), 옥상녹화와 벽면녹화 간 난방부하 차이도 통계적으로 유의하였다($p<0.01$). 한편 벽면녹화 단독 조건과 baseline 간 겨울철 난방부하 차이는 통계적으로 유의하지 않아($p>0.05$), 벽면녹화의 에너지 절감 효과는 옥상녹화에 비해 제한적임이 확인되었다.

4. 논의

4.1. 건물 형상 변수의 열환경적 한계와 상호작용

본 연구의 시뮬레이션 결과 건물 간격이 좁을수록 평균 실내온도가 낮아지는 경향을 확인하였다. 여름과 겨울 모두에서 통계적으로 유의하게 나타났으며($p\text{-value} < 0.01$) 동일한 경향이 건물 높이 40 m의 시나리오에서도 관찰되었다. 이는 건물 간격이 넓어질수록 직사일사 유입이 증가하기 때문으로 해석된다. 반대로 건물 간격이 좁을 경우에는 상호 차폐(shading) 효과가 커져 일사 차단 효과가 강화되어 냉방부하 측면에서 유리하게 작용할 수 있다. 이러한 현상은 해외의 고밀도 도시 연구들에서도 보고된 바 있다. Perini and Magliocco (2014)는 고밀도·고층 도시 환경에서 식생의 온도 저감 효과가 더 크게 나타남을 보고하였으며, 건물 밀도와 높이가 외부 열환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

그러나 이러한 열환경 측면의 장점이 곧바로 에너지 절감으로 이어지는 않았다. 특히 겨울철 HVAC 가동 조건에서는 건물 간격이 좁아질수록 상호 차폐에 의해 일사 유입이 감소하면서 수동 태양열 획득이 제한되었고, 이로 인해 난방부하가 증가하는 경향이 나타났다. 건물 간격이 좁을수록 열환경 측면에서는 긍정적인 효과가 나타나지만, 에너지 소비 측면에서는 오히려 총 에너지 사용량이 증가할 가능성이 있으며, 이는 건물 배치 계획 시 열환경과 에너지 성능을 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

건물의 높이는 높을수록 온도가 낮아지는 현상을 확인할 수 있다. 건물의 높이는 공기 흐름과 그늘, 태양 복사에 영향을 주어 실내 열환경을 변화시킨다(Hisham and Rijal, 2014; Li et al., 2022). 그러나 이러한 형상적 변수의 영향력은 상대적으로 제한적이다. 간격을 5 m에서 25 m로 극단적으로 변경하더라도 여름 실내온도 변화 폭은 0.6°C 내외로, 냉난방 부하 절감 효과는 미미할 것으로

추정된다.

또한 동간 축소나 고층화는 채광, 조망, 환기, 프라이버시 등 사회적·법적 제약에 의해 현실적으로 조정이 어렵다. 따라서 형상 변수만으로는 실질적인 열환경 개선을 기대하기 어렵고, 기존 건물의 한계 내에서 보완적 수단으로 녹화 전략을 병행하는 접근이 필요하다. 실무적 차원에서는 법적 최소 기준을 준수하면서도, 녹지 도입, 수목 캐노피, 옥상 및 벽면녹화 등 보완 전략을 병행하여 열환경 개선 효과를 극대화할 필요가 있다.

4.2. 지상 녹화 전략의 열환경 효과

Free-floating 조건에서 지상녹화는 여름철 실내온도를 약 25.0°C 에서 20.1°C 수준으로 유의하게 낮추고, 겨울철 실내온도를 6.4°C 에서 14.7°C 수준으로 높이는 열적 완충 효과를 나타냈다. 이는 여름철 수목의 차광 및 증발산에 의한 주변 미기후 냉각과, 겨울철 복사열 손실 감소에 따른 열완충 효과가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 여름철 지상녹화는 수목의 차광과 증발산 작용에 의해 주변 미기후를 냉각시키며, 이는 실내온도 감소로 이어진다. 기존 연구들은 도시 식생이 태양복사를 차단하고 잠열 플럭스를 증가시켜 공기온도와 표면온도를 낮추는 주요 메커니즘으로 작용함을 보고하였다. 또한 증발산 과정에서 발생하는 잠열 소비는 추가적인 냉각 효과를 유발하여 도시 열환경을 완화하는 것으로 알려져 있다. Tsoka et al. (2021)은 도시 수목의 냉각 효과가 수관 밀도와 식재 패턴에 크게 좌우되며 조밀한 수관의 차광이 에너지 절감으로 이어질 수 있다고 설명하였으며, Berry et al. (2013) 역시 수목 차광이 벽면 표면온도를 크게 낮출 수 있음을 보고한 바 있다. 본 연구는 위의 선행연구와 달리 식생에 의한 풍속 변화나 난류 구조 변화와 같은 미기후 효과를 고려하지 않았음에도 불구하고 겨울철 실내온도가 상승한 결과를 보였으며, 이는 복사열 손실 억제만으로도 일정 수준의 열완충 효과가 발생할 수 있음을 시사한다.

그러나 HVAC 가동 조건에서는 이러한 온도 완충 효과가 에너지 절감으로 직접 이어지지 않았다. 이는 건물 에너지 소비가 단순한 실내온도 변화가 아니라, 설정온도를 유지하기 위한 열수지 관점에서 결정되기 때문이다. 지상녹화에 의한 일사 차폐는 여름철에는 태양복사 유입을 줄여 냉방부하 감소에 기여할 수 있으나, 동시에 외피를 통한 열 제거 과정에도 영향을 미쳐 냉방부하 감소 효과를 제한할 수 있다. 또한 겨울철에는 일사 차폐로 인해 수동

태양열 획득이 감소하면서, 설정온도를 유지하기 위한 난방 에너지 요구가 증가하게 된다(Simpson, 2002). 이러한 결과는 지상녹화가 도시 열환경 완화에는 효과적일 수 있으나, 건물 에너지 절감 측면에서는 그 효과가 조건에 따라 상이하게 나타날 수 있음을 시사한다.

한편 perimeter, scatter, cluster 세 가지 배치 방식 간에는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이는 본 연구의 조건에서 녹화의 배치 방식보다 녹화 적용 여부 자체가 실내 열환경에 더 큰 영향을 미침을 시사한다. Tsoka et al. (2021)은 같은 총량이라도 수관 밀도와 식재 패턴이 중요하지만 그 효과는 주변 도시 형태와 함께 해석해야 한다고 지적하였다. Yang et al. (2025)은 도시 수목의 에너지 영향이 지역, 수종, 배치에 따라 크게 달라진다고 정리하였다. 또한, 본 연구의 대상지 규모와 식재 규모가 배치 방식 간 차이를 뚜렷이 드러내기에 제한적이었을 가능성도 배제할 수 없다. 이를 고려하여 향후 다양한 배치 조건과 식재 밀도를 체계적으로 변화시킨 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.3. 건물 녹화 전략의 열환경 효과

건물녹화는 지상녹화와 달리 free-floating 조건에서의 온도 완충 효과와 HVAC 조건에서의 에너지 절감 효과가 동시에 확인되었다. 여름철 실내온도는 옥상녹화, 복합녹화, 벽면녹화 모두에서 baseline 대비 유의하게 낮아졌으며, 겨울철 난방부하 역시 모든 건물녹화 유형에서 유의하게 감소하였다. 이는 건물녹화가 외피를 통한 열획득과 열손실을 동시에 억제하는 단열 및 열완충 기능을 수행하기 때문으로 해석된다. De Cristo et al. (2025)은 옥상녹화가 대체로 여름철 에너지 절감 효과가 크며 겨울철 효과는 기후 및 설계 조건에 따라 달라진다고 정리한 바 있다.

건물녹화가 지상녹화와 달리 HVAC 조건에서 일관된 에너지 절감 효과를 나타낸 이유는 두 녹화 방식의 작용 위치와 열전달 메커니즘의 차이에 기인한다. 지상녹화는 건물 외부의 미기후를 변화시켜 간접적으로 실내 열환경에 영향을 미치는 반면, 건물녹화는 외피에 직접 적용되어 열전달 경로 자체를 제어한다는 점에서 근본적인 차이가 있다. 특히 지상녹화의 경우 일사 차폐에 따른 냉각 효과와 수동 태양열 획득 감소 간의 트레이드오프가 발생하여 HVAC 에너지 절감 효과가 일관되게 나타나지 않는 반면, 건물녹화는 외피의 열저항 증가와 열용량 증가를 통해 열획득과 열손실을 동시에 억제하는 방향으로 작용

한다. 따라서 건물녹화는 계절에 관계없이 에너지 절감 효과가 비교적 안정적으로 나타나며, 이는 본 연구에서 확인된 결과와도 일치한다.

옥상녹화의 절감 효과가 가장 크게 나타난 것은 옥상면이 건물 외피 중 일사 수용이 가장 큰 부위이기 때문으로 판단된다. Bevilacqua et al. (2017)은 녹색지붕이 겨울철 지붕 표면온도를 높게 유지하고 열손실을 30~37% 감소시킬 수 있음을 보고하였다. 본 연구에서도 옥상녹화 적용 시 겨울철 난방부하가 baseline 대비 약 3,407 kWh 감소하여 가장 큰 절감 효과를 나타냈다. 이러한 효과는 태양 기질층의 추가 단열, 열질량 효과에 의한 온도 변동 완충, 야간 열손실 억제 등의 메커니즘이 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다. 이러한 결과는 건물녹화가 외피를 통한 열전달을 직접 제어함으로써 열환경 개선과 에너지 절감을 동시에 달성할 수 있는 전략임을 시사한다. 특히 옥상 및 외벽 녹화는 열획득과 열손실을 동시에 억제하는 방향으로 작용하여 계절에 관계없이 비교적 안정적인 에너지 성능 향상을 기대할 수 있다. 다만 본 연구에서 제시한 free-floating 조건의 결과는 녹화 전략에 따른 열환경 변화의 상대적 경향을 비교하기 위한 것이며, 실제 거주 환경에서의 실내온도를 직접적으로 의미하지는 않는다. 실제 공동주택의 실내 열환경은 HVAC 운전 방식, 재실자 행동, 환기, 창호 개폐, 내부발열 등 다양한 요인의 영향을 받기 때문이다. 따라서 향후 연구에서는 실측자료를 통한 모델 검증과 분석을 통해 건물녹화의 성능을 보다 정교하게 평가할 필요가 있다.

벽면녹화의 경우 여름철 HVAC 온도 저감 효과는 확인되었으나, 겨울철 난방부하 절감 효과는 옥상녹화에 비해 제한적이었으며 baseline과의 차이도 통계적으로 유의하지 않았다. 이는 본 연구에서 벽면녹화가 layered wall 방식으로 구현되어 실제 벽면녹화의 핵심 메커니즘인 증발산과 표면 미기후 변화보다 열저항 증가 효과가 상대적으로 크게 반영되었기 때문일 가능성이 있다. 따라서 벽면녹화의 효과를 실제 식생 시스템에 그대로 일반화하는 것은 제한적이며, 향후 보다 정교한 모델링을 통한 검증이 필요하다.

5. 결론

본 연구는 건물 형상 변수와 녹화 전략이 실내 열환경 및 에너지 소비에 미치는 영향을 통합적으로 분석하였다. 그 결과, 건물 간격과 높이와 같은 형상 변수는 실내온도

에 통계적으로 유의한 영향을 미치지 않지만, 그 변화 폭이 제한적이며 HVAC 에너지 절감으로 이어지지 않는 것으로 나타났다. 특히 건물 간격이 좁아질수록 상호 차폐 효과로 인해 실내온도는 낮아지지만, 겨울철 일사 유입 감소로 인해 난방부하가 증가하여 전체 에너지 소비량은 오히려 증가하는 경향을 보였다.

지상녹화는 free-floating 조건에서 뚜렷한 열환경 개선 효과를 보였으며, 수목의 차광 및 증발산 작용에 의해 여름철 실내온도를 크게 낮추고 겨울철에는 복사열 손실을 억제하는 온도 완충 효과를 나타냈다. 그러나 이러한 효과는 HVAC 조건에서 에너지 절감으로 이어지지 않았으며, 이는 일사 차폐에 따른 태양열 획득 감소가 냉난방 에너지 요구에 상반된 영향을 미치기 때문으로 해석된다.

반면 건물녹화는 외피를 통한 열전달을 직접적으로 제어함으로써, 열환경 개선과 에너지 절감을 동시에 달성할 수 있는 전략으로 나타났다. 특히 옥상녹화는 일사 수용이 큰 외피 부위를 효과적으로 차단하고 추가적인 단열층을 형성함으로써 가장 큰 에너지 절감 효과를 보였으며, 벽면녹화는 상대적으로 제한적인 효과를 나타냈다. 이러한 결과는 지상녹화와 건물녹화가 서로 다른 메커니즘으로 작용함을 보여주며, 건물 외피 녹화가 보다 안정적인 에너지 절감 전략임을 시사한다.

다만 본 연구는 시뮬레이션 기반 분석으로서 몇 가지 한계를 지닌다. 첫째, 본 연구에서 사용한 공동주택 모델은 실제 단지를 단순화한 프로토타입이므로, 실제 건물의 복잡한 평면 구성, 창호 배치, 외피 재료, 설비 운전 방식, 재실자 행동 등을 모두 반영하지는 못하였다. 둘째, free-floating 조건에서의 실내온도 결과는 녹화 전략에 따른 열환경 변화 경향을 비교하기 위한 보조적 지표로 해석되어야 하며, 실제 거주 환경에서의 실내온도를 직접적으로 의미하지는 않는다. 셋째, 지상녹화와 벽면녹화의 경우 실제 식생의 성장 상태, 수종별 차이, 토양 수분 조건, 증발산 및 통기 효과 등을 정교하게 반영하는 데 제한이 있었다. 따라서 향후 연구에서는 실측자료를 활용한 모델 검증, 다양한 기후 조건에서의 비교 시뮬레이션, 식생 특성과 유지관리 조건을 반영한 보다 정교한 모델링을 통해 본 연구 결과의 적용 가능성을 확장할 필요가 있다.

종합적으로, 본 연구는 공동주택 설계에서 형상 조정보다 녹화 전략, 특히 건물 외피 녹화를 우선적으로 고려하는 것이 실내 열환경 개선과 에너지 성능 향상을 동시에 달성하는 데 효과적임을 제안한다.

사사

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

References

- Berry R, Livesley SJ, Aye L. 2013. Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature. *Build Environ* 69: 91-100. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.07.009
- Bevilacqua P, Mazzeo D, Bruno R, Arcuri N. 2017. Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern Mediterranean climate. *Energy Build* 150: 318-327. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.05.081
- Dahanayake KWDC, Chow CL. 2017. Studying the potential of energy saving through vertical greenery. *Energy Build* 42: 47-59. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.002
- De Cristo E, Evangelisti L, Barbaro L, De Lieto Vollaro R, Asdrubali F. 2025. A systematic review of green roofs' thermal and energy performance in the Mediterranean region. *Energy Build* 18(10): 2517. doi: 10.3390/en18102517
- Harbiankova A, Manso M. 2025. Integrating green roofs and green walls to enhance buildings thermal performance: A literature review. *Build Environ* 270: 112524. doi: 10.1016/j.buildenv.2025.112524
- Hisham NA, Rijal HB. 2014. Effect of building height and orientation on indoor thermal performance. *Energy Build* 82: 9-12. doi: 10.18948/shasetaikai.2022.6.0_9
- Idouanaou A, Malha M, Bah A, Kardellass S. 2020. The potential of green roof strategies for reducing CO₂ emissions and energy use in Moroccan office buildings. *Green Technol Sustainability* 3(3): 110-135. doi: 10.1016/j.grets.2025.100177
- Kontoleon KJ, Eumorfopoulou EA. 2010. The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall

- layer on the thermal performance of a building zone. *Build Environ* 45(5): 1287-1303. doi: 10.1016/j.buildenv.2009.11.013
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS). 2016. KS L 8301: Thermal conductivity measurement — Heat flow meter method. Sejong, Korea: KATS.
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS). 2017. KS F 2278: Test method for thermal insulation performance of windows. Sejong, Korea: KATS.
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS). 2018a. KS L 8302: Thermal resistance and thermal conductivity — Guarded hot plate method. Sejong, Korea: KATS.
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS). 2018b. KS L 9016: Measurement of thermal conductivity of thermal insulation materials. Sejong, Korea: KATS.
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS). 2019. KS F 3504: Gypsum board products. Sejong, Korea: KATS.
- Ladybug Tools. n.d. EPWmap / EnergyPlus Weather Files. <https://www.ladybug.tools/>.
- Lee G. 2018. EnergyPlus: Modeling techniques with HVAC theory (energy simulation software). Seoul: Hansol Academy.
- Li J, Zheng B, Bedra KB, Li Z, Chen X. 2022. Effects of residential building height, density, and floor area ratios on indoor thermal environment in Singapore. *Energy Build* 209: 109-118. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114976
- Lin C, Zhang S. 2024. Impact of green roofs and walls on the thermal environment of pedestrian heights in urban villages. *Buildings* 14: 4063. doi: 10.3390/buildings14124063
- Liu H, Pan Y, Yang X, Zhang H. 2021. Evaluating the impact of shading from surrounding buildings on heating/cooling energy demands of different community forms. *Build Environ* 206: 108322. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108322
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2025. Building Energy Conservation Design Standards for Buildings (MOLIT Notice No. 2025-738; amended Dec 16, 2025; effective Dec 31, 2025). Korean Law Information Center (Korea Ministry of Government Legislation); [accessed 2026 Feb 9]. <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulId=2002794&efYd=0>
- Pérez G, Coma J, Martorell I, Cabeza LF. 2014. Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable Sustainable Energy Rev* 39: 139-165. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.073
- Perini K, Magliocco A. 2014. Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban For Urban Greening* 13(3): 495-506. doi: 10.1016/j.ufug.2014.03.003
- Perini K, Rosasco P. 2013. Cost-benefit analysis of green facades and living wall systems. *Build Environ* 70: 110-121. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.08.012
- Shashua-Bar L, Pearlmutter D, Erell E. 2009. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape Urban Plann* 48: 19-28. doi: 10.1016/j.landurbplan.2009.04.005
- Simpson JR. 2002. Improved estimates of tree-shade effects on residential energy use. *Energy Build* 34(10): 1067-1076. doi: 10.1016/S0378-7788(02)00017-8
- Tsoka S, Leduc T, Rodler A. 2021. Assessing the effects of urban street trees on building cooling energy needs: The role of foliage density and planting pattern. *Sustainable Cities Soc* 65: 102633. doi: 10.1016/j.scs.2020.102633
- U.S. Department of Energy & Building Technologies Office, National Renewable Energy Laboratory. n.d. EnergyPlus documentation set. <https://energyplus.net/>
- Wen J, Xie Y, Yang S, Yu J, Lin B. 2022. Study of surrounding buildings' shading effect on solar radiation through windows in different climates. *Sustainable Cities Soc* 87: 104143. doi: 10.1016/j.scs.2022.104143
- Wong NH, Tan AYK, Chen Y, Sekar K, Tan PY, Chan D, Chiang K, Wong NC. 2010. Thermal evaluation of

vertical greenery systems for building walls. *Build Environ* 45: 663-672. doi: 10.1016/j.buildenv.2009.08.005

Yang C, Xie M, Mendis T. 2025. Evaluating the role of urban trees on building energy use: A global literature review. *Landscape Urban Plann* 264: 105475. doi: 10.1016/j.landurbplan.2025.105475