

공동주택 조경설계요소가 외부공간의 미기후 및 온열쾌적성에 미치는 영향 분석

- 서울시 관악구 A 아파트를 대상으로 -

Effects of Landscape Design Elements in Apartment Complexes on Outdoor Microclimate and Thermal Comfort
- A Case Study on the Apartment in Gwanak-gu, Seoul -

박준호*, 박현*, 이용준**, 강준석***

*현대건설(주) 책임매니저, **BEL Technology 대표, ***서울대학교 조경지역시스템공학부 교수

Park, Joon Ho*, Park, Hyun*, Lee, Yong-jun****, Kang, Junsuk****

*Senior Manager, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd.

**CEO, BEL Technology

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

Received: April 2, 2025

Revised: April 13, 2025 (1st)
March 4, 2026 (2nd)

Accepted: March 5, 2026
3인인명 심사필

Corresponding author :

Junsuk Kang
Professor, Dept. of Landscape
Architecture and Rural Systems
Engineering, Seoul National
University, Seoul 08826, Korea
Tel.: +82-2-880-4872
E-mail: junkang@snu.ac.kr

국문초록

아파트는 대한민국의 대표적인 주거 형태로, 단순한 거주 공간을 넘어 놀이·휴게·운동 기능을 수행하는 복합 외부공간을 포함한다. 이러한 외부공간의 미기후를 조절하여 온열 쾌적성을 개선하는 것은 지구온난화와 도시열섬 현상이 심화되는 환경에서 중요한 설계 과제로 인식된다. 본 연구는 조경 설계 요소가 아파트 외부공간의 온열 쾌적성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 온열 쾌적성 지수 중 인체 대사량과 착의량을 고려하는 PMV, PPD 및 UTCI를 선정하였다. 아파트 '사업승인도면'과 '조경특화설계' 환경을 대상으로 단지 주변 2km 범위의 Macro-modeling과 단지 내부 조경 요소를 반영한 Micro-modeling을 수행하였으며, STAR-CCM+를 활용한 CFD 시뮬레이션을 통해 기후 요소를 산출하였다. 외부 환경이 가장 불리한 7월 중 10년 평균 기후 데이터를 기반으로 대표일을 선정하여 각 지수를 계산하였다. 분석 결과, 조경특화설계 적용 시 PMV는 평균 0.27 감소하였고, PPD는 평균 10.93% 저감되었으며, UTCI는 평균 1.02°C 감소하였다. 이는 수경시설, 대형목 식재 및 음영 형성 요소가 평균복사온도와 공기온도 저감에 기여한 결과로 해석된다. 본 연구는 조경 설계 요소가 미기후를 통해 온열 쾌적성에 영향을 미치는 인과적 관계를 정량적으로 제시하였다는 점에서 의의를 가지며, 향후 공동주택 조경 설계 시 기후 적응형 설계 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 기후적응형설계, 온열쾌적성지수, 미기후 조절, PMV, PPD, UTCI

ABSTRACT

Apartment housing has become the dominant residential type in South Korea, providing not only living spaces but also multifunctional outdoor environments for recreation, rest, and exercise. Improving outdoor thermal comfort through landscape design is increasingly important under conditions of global warming and urban heat island intensification. This study aims to quantitatively evaluate the impact of landscape design elements on the thermal comfort of apartment outdoor spaces. Thermal comfort indices including Predicted Mean Vote (PMV), Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), and the Universal Thermal Climate Index (UTCI) were employed, incorporating metabolic rate and clothing insulation factors. Macro-modeling covering a 2 km radius around the site and micro-modeling reflecting detailed landscape elements were constructed based on the approved site plan and the landscape-specialized design. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were conducted using STAR-CCM+ to obtain microclimatic variables. A representative summer day was selected based on a 10-year average of July climate data to calculate the thermal indices. The results indicate that the landscape-specialized design reduced PMV by an average of 0.27, decreased PPD by 10.93%, and lowered UTCI by 1.02°C compared to the approved site plan. These improvements are attributed to reductions in air temperature and mean radiant temperature resulting from water features, shading elements, and tree planting. This study demonstrates a quantitative causal relationship between landscape design elements, microclimatic modification, and outdoor thermal comfort, providing foundational data for climate-responsive

design strategies in apartment landscape planning.

Keywords: Climate-Responsive Design, Thermal Comfort Index, Microclimate Regulation, Predicted Mean Vote (PMV), Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), Universal Thermal Climate Index (UTCI)

1. 서론

우리나라 거주 형태 중 5개층 이상 공동주택인 아파트에 거주하는 인구가 전체의 60%를 초과하여(최경호, 2021), 아파트는 이제 대한민국의 대표적인 주거 형태로 자리 잡고 있다(Figure 1 참조). 또한 통계청 KOSIS 자료에 의하면 소득이 높을수록 아파트에 거주하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있어(Figure 2 참조), 이는 아파트라는 주거 형태가 일반 국민에게 선호되고 있는 주거형태임을 알려주고 있다. 또한 아파트 총 공사비 대비 조경공사비의 비율이 최근 꾸준히 상승하고 있어(박상진 등, 2015) 우리나라의 대표적인 주거형태인 아파트에 대한 조경의 중요성은 날로 높아지고 있다.

2022년 대한민국 조경 50년을 기념하여 한국조경학회에서 선정한 ‘대한민국 조경 50작품’에 아파트 조경으로 세계의 작품이 선정되면서, 아파트 조경 공간은 단순한 휴게, 놀이, 운동 등 기능적인 면을 넘어 심미적, 경관적, 생태적으로 중요한 역할을 하고 있다.

하지만, 아파트 조경 공간은 도시 열섬 현상(urban heat island)에서 자유로울 수 없으며 특히, 태양 에너지와 주거동 건물의 복사 에너지로부터 직접적인 영향을 받고 있어, 조경 공간 이용자의 쾌적성이 저감되고 있으며, 이를 개선하고자 하는 설계적인 노력이 이루어지고 있다.

본 연구의 목적은 조경 특화 설계 요소의 CFD(computational fluid dynamics) 분석을 통해 아파트 외부 공간 쾌적성의 개선을 객관적이고 정량적으로 확인할 수 있는 방법을 제시하여, 조경 설계를 통해 미기후를 설계적으로 조절하여 조경 공간 이용자의 쾌적성을 향상시키고자 한다.

2. 이론적 고찰

외부공간에서 느끼는 온열 쾌적성은 인간의 건강, 일기예보, 도시계획 등을 위해 연구되어 왔다(Jendritzky, 2012). 초기에는 기온, 풍향, 습도 등 기상 요소를 조합하여 쾌적성을 지표화하기 시작하여, 최근의 연구는 인체의 대사량, 활동량 및 착의량을 통한 인간의 열 수지와 외부 미기후와의 관계를 통해 온열 쾌적성을 지표화하는 방향으로 진행되어 오고 있다(Krzysztof Blazejczyk, 2012).

2.1 온열 지수 리뷰

2.1.1 HI(heat index)

Heat index는 기온(air temperature, T, °C) 과 상대습도(relative humidity, RH, %)의 방정식으로 실제로 얼마나 덥게 느끼는지를 나타내 주고 있다. 습도가 올라가면 인간의 인체에서 열을 낮춰주는 증발을 줄어들게 하여, 건조할 때보다 더 덥게 느끼게 한다. 섭씨 20°C 이상의 기온에서 유효하며 미국에서 널리 쓰이고 있는 지수로 네 단

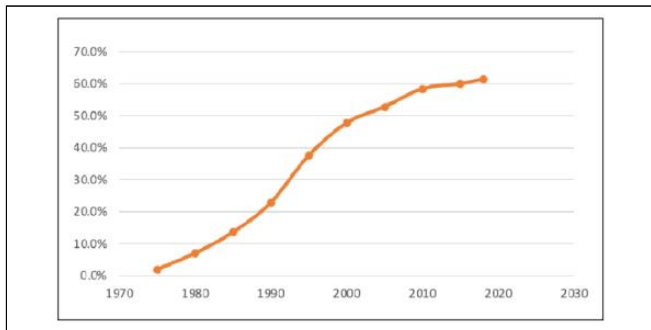


Figure 1. Ratio of apartments to total housing
Source: 최경호(2021)

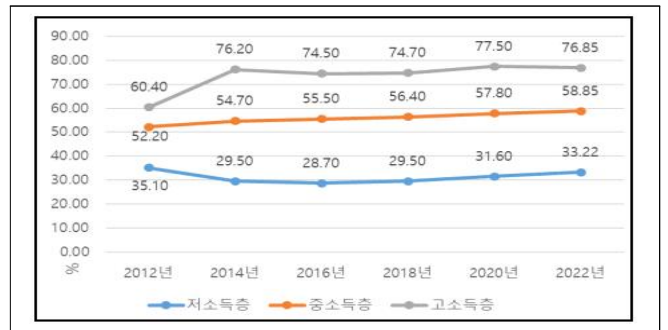


Figure 2. Apartment residence status by income level 0
Low-income, Middle-income, High-income
Source: <http://kosis.kr>

계의 카테고리리로 구분된다(Table 1 참조).

$$\begin{aligned}
 HI = & -8.784695 + 1.61139411 \times T + 2.338549 \times RH - 0.14611605 \times T \times RH - \\
 & 1.2308094 \times 10^{-2} \times T^2 - 1.6424828 \times 10^{-2} \times RH^2 + 2.211732 \times 10^{-3} \times T^2 \times RH + \\
 & 7.2546 \times 10^{-4} \times T \times RH^2 - 3.582 \times 10^{-6} \times T^2 \times RH^2
 \end{aligned}
 \tag{식 1}$$

2.1.2 Humidex

1965년 캐나다에서 개발된 Humidex는 기온과 이슬점(dew point, °C) 그리고 증기압(air vapor pressure, vp, hPa)의 방정식(Masterson and Richardson, 1979)으로 평균적인 사람이 얼마나 덥고, 습하게 느끼는 지를 네 단계로 구분하여 나타낸다(Table 2 참조).

2.1.3 ET(effective temperature)

기온과 상대습도 그리고 풍속(wind speed, v, m/s)과 같은 기상 요소가 결정하는 인간 유기체와 환경과의 열 교환을 통해 사람이 느끼는 효과적인 온도를 측정한다. 독일, 폴란드, 러시아 등 중앙 유럽에서는 다음과 같이 일곱 단계로 구분하여 날씨 및 의복 착용에 대한 생리학적 기준으로 사용된다. Effective temperature을 변형한 NET(normal effective temperature)는 홍콩 기상청에서 28년간 관측된 기상자료를 기초로 여름(5-9월)과 겨울(11-3월)로 나누어 계산한다(Li and Chan, 2000; Table 3 참조).

2.1.4 WBGT(wet-bulb globe temperature)

미국 해군의 훈련 중 열사병을 연구하다가 개발된 WBGT는 건구 온도(dry-bulb temperature)와 습구 온도

Table 1. Assessment scale of heat index (HI)

Heat Index (°C)	Category
27-32	Caution
32-41	Extreme Caution
41-54	Danger
Above 54	Extreme Danger

Table 2. Assessment scale of humidex

Humidex (°C)	Degree of Comfort
20-29	No discomfort
30-39	Some discomfort
40-45	Great discomfort, avoid exertion
Above 46	Dangerous; possible heat stroke

Table 3. Assessment scale of effective temperature

Effective Temperature (°C)	Description
below 1	Very cold
1-9	Cold
9-17	Cool
17-21	Fresh
21-23	Comfortable
23-27	Warm
Above 27	Hot

(wet-bulb temperature) 그리고 흑구 온도(black-globe temperature)의 가중치로 계산한다. WBGT 지수는 US Army 등에서 외부 활동시 온열질환의 기준으로 사용되고 있다(Yaglou and Minard, 1957; Table 4 참조).

2.1.5 WCT(wind chill temperature)

극지방 등 추운 환경에서의 피부 노출 등 외부 활동은 건강에 심각한 위해를 일으킬 수 있어서, 기온과 지상 10m 위 풍속(v_{10})을 기반으로 WCI(wind chill index, W/m^2)가 개발되었다.

$$WCT = 13.12 + 0.6215 \times T - 11.37 \times v_{10}^{0.16} + 0.3965 \times T \times v_{10}^{0.16} \tag{식 2}$$

우리나라에서는 한국형 체감온도지수(korea wind chill temperature index, KWCTI)로 응용하여(박종길 등, 2007) 기상청에서 일기 예보에 사용하고 있다(Table 5 참조).

2.1.6 PMV(predicted mean vote), PPD(predicted percentage of dissatisfied)

대사량(metabolic rate, M, W/m^2), 착의량(clothing insulation, clo, $m^2 \times K/W$), 대기온도, 평균복사온도(mean radiant temperature, mrt, $^{\circ}C$), 풍속, 증기압 등 기상 요소를 변화시키면서 대규모 피실험인들이 느끼는 온열감을 투표하여 쾌적성을 정량화한 Predicted Mean Vote(Fanger, 1970)는 미국 냉동공조학회(ASHRAE) 표준 55로 채택되어 공공 건축물 실내 환경의 쾌적성에 대한 지표로 사용되고 있다. 또한, ISO 7730(Third Edition, 2005-11-15) ‘Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria’는 ISO(international organization for standardization, <http://www.iso.org>)에 등록되어 표준적인 계산법에 의해 7단계의 온열감을 예측할 수 있으며, PMV 값에 대해 사람들이 느끼는 불만족 정도를 퍼센트로 나타내는 PPD를 이용하면, 직관적인 예상 불만족율을 확인할 수 있다. 다만 대규모 실험과 계산이 실내 환경을 대상으로 진행되었다는 한계가 있다(Table 6 참조).

Table 4. Assessment scale of wet-bulb globe temperature

WBGT ($^{\circ}C$)	Recommended outdoor activity
Below 27.8	No restriction
27.9-30.5	Caution
30.5-32.1	Increased caution
32.2-33.3	Extreme caution
Above 33.3	Danger

Table 5. Assessment scale of wind chill temperature

WCT ($^{\circ}C$)	Health concerns
0 to -9	Low risk
-10 to -27	Moderate risk
-28 to -39	High risk
-40 to -47	Very high risk
-48 to -54	Severe risk
-55 and colder	Extreme risk

Table 6. Assessment scale of PMV

-3	-2	-1	0	1	2	3
Cold	Cool	Slightly cool	Neutral	Slightly warm	Warm	Hot

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times (M - W - E_d - E_s - E_{re} - C_{re} - R - C) \tag{식 3}$$

$$t_s = 35.7 - 0.028(M - W)$$

$$E_s = 0.42(M - W - 58.15)$$

t_s : Average skin temperature [°C]

M: Metabolic rate [W/m²]

W: Mechanical workload [W/m²]

E_s : Evaporative heat loss from skin surface [W/m²]

2.1.7 UTCI(universal thermal climate index)

2000년 국제생물기상학회(The International Society of Biometeorology)에서 발의하고 2004년 COST(European Cooperation in Scientific and Technology) Action 730(2004-2009년)을 통해 정립된 UTCI(Universal Thermal Climate Index)는 지구상의 어떤 지역, 기후, 환경에서도 적용될 수 있는 전체적인 범위의 외부환경 온열지수를 표방하고 있다(Jendritzky, 2012). 인간의 대사량, 착의량은 물론, 대기온도, 평균복사온도, 풍속, 증기압 및 상대습도 등의 요소를 계산하여, 기존 온열 지수와의 비교 평가를 통해 극한의 추위와 더위까지 열환경을 10단계를 구분하여, 일기예보, 공공 건강증진, 도시계획, 관광 및 여가, 직업 및 훈련 프로그램 등에 적용할 수 있다. Bröde(2021)에 의해 정리된 UTCI는 다음과 같이 계산된다(Table 7 참조).

$$UTCI(T_a, T_r, v_a, p_a) = T_a + \text{Offset}(T_a, T_r, v_a, p_a) \tag{식 4}$$

T_a : Temperature

T_r : Mean Radiant Temperature

v_a : Wind Speed [m/s]

p_a : Water Vapor Pressure

Offset: UTCI로 나타나는 등가온도와 실제 공기온도 간의 차이

2.2 외부 공간에서의 온열 쾌적성 분석 선행 연구

임종연 등(2008)은 공동주택 단지내 외부환경의 온열 쾌적감 평가를 위해서 effective temperature를 개선한 standard effective temperature(SET*, 신표준유효온도)를 활용하였으며, 옥외공간에서는 실내에 비해 온열 쾌적감에 대한 기대치가 낮아짐을 확인하고, 실내환경을 기준으로 작성된 기존의 온열 쾌적감지표로 옥외 공간의 평가에 적용할 경우 불쾌감에 대해 과대평가가 될 가능성을 지적하였다.

윤용한 등(2014)의 학교운동장과 녹지공간의 열적 쾌적성을 분석하여 UTCI, PMV, WBGT가 모두 녹피율과 녹

Table 7. Assessment scale of universal thermal climate index

UTCI (°C)	Stress category
Above +46	Extreme heat stress
+38 to +46	Very strong heat stress
+32 to +38	Strong heat stress
+26 to +32	Moderate heat stress
+9 to +26	No thermal stress
+9 to 0	Slight cold stress
0 to -13	Moderate cold stress
-13 to -27	Strong cold stress
-27 to -40	Very strong cold stress
Below -40	Extreme cold stress

자율적계수가 높을수록 쾌적하다는 연구 결과를 보여주고 있다. 하지만, 김정호 외(2015)는 학교 옥외공간 녹지에서 열쾌적 지표 중 UTCI, PMV, WBGT를 이용하여 녹지특성에 따른 열적 쾌적성을 비교 분석하였는데, 녹피율과 녹지 용적 계수가 높을수록 UTCI는 낮아져 쾌적성이 높아지는 것을 확인하였으나, PMV와 WBGT는 녹지 특성에 따른 상관성이 없는 것으로 분석되었다.

김수진 등(2019)은 도시공원과 휴양림에서의 열적 쾌적성에 관해 PMV를 적용한 연구를 통해 울폐율(crown closure)과 입목밀도가 높을수록 쾌적성이 높아지고, 휴양림의 경우 도시에 비해 더 높은 울폐정도와 쾌적한 환경을 지니고 있기 때문에 도심지에 비해 PMV 변화율이 크지 않다는 것을 보고하였다.

배응규와 박진철(2021)은 재건축 아파트 단지의 재건축 전, 후 온열 쾌적성을 PMV를 기반으로 발전시킨 PET(physiological equivalent temperature)를 적용하였고, 재건축 후 상황은 Envi-met을 이용한 CFD (computational fluid dynamics) 분석을 통해 재건축 후 녹지공간 증가와 수공간 조성, 용적율의 증가 등으로 온열 환경개선에 긍정적인 영향이 나타남을 확인하였다.

박주현과 엄정희(2025)는 열환경 개선을 위한 가로녹지 조성위치에 따른 설계전략을 Envi-met을 이용한 CFD분석을 통해 주간시간대 평균 PET 및 열피크타임 PET를 적용하여 열쾌적성 향상을 분석하였다.

선행 연구를 통해 녹지가 증가하거나, 울폐율, 입목밀도가 높아질수록 온열 쾌적성이 개선됨을 확인할 수는 있으나, 단순 녹지량의 증가 또는 입목밀도의 개선이 아닌 이용자 만족도를 향상시키는 전문적인 조정 설계를 통해서 외부공간의 온열 쾌적성이 각 요소별로 어느 정도 개선되는지를 확인할 수 없다는 한계가 있었다. 본 연구에서는 수경시설, 미스트분수, 대형목 식재, 티하우스 설치 등 조정 설계 요소가 도입됨에 따라 각 개별 공간에서의 온열 쾌적성에 대해 CFD 분석을 통하여 객관적이고 정량적으로 확인하고자 한다(Table 8 참조).

2.3 조경 공간 쾌적성 적용 가능한 온열 지수 선정

앞에서 살펴본 온열지수를 정리하면 Table 9와 같다. 초기의 온열 지수는 기온, 상대습도, 이슬점, 풍속 등 기후

Table 8. Application of outdoor thermal comfort indices in previous studies

Reference	Study site	SET*	WBGT	PMV	PET	UTCI
임종연 등(2008)	Apartment complex	O				
윤용한 등(2014)	School		O	O		O
김정호 등(2015)	School		O	O		O
김수진 등(2019)	Urban park			O		
배응규 등(2021)	Apartment complex				O	
박주현 등(2025)	Street greenery				O	

Table 9. Thermal climate index with factors

Index	Abbreviation	Air temperature	Relative humidity	Dew point	Air velocity	Mean radiant temperature	Vapour pressure	Metabolic	Clothing	Mainly used in
Heat index	HI	O	O							United States
HUMIDEX		O		O						Canada
Effective temperature	ET	O	O		O					Central Europe
Wet-bulb-globe temperature	WBGT	O								ISO7243 US Navy
Wind chill temperature	WCT	O			O					ISO 11079
Predicted mean vote	PMV	O			O	O	O	O	O	ISO 7730 ASHRAE55
Universal thermal climate index	UTCI	O	O		O	O	O	O	O	

요소만을 대상으로 계산하였다면, 최근에는 인간의 대사량, 착의량 등을 포함하여 인간의 활동에 따른 쾌적성을 직접적으로 파악할 수 있게 되었다.

외부공간에 대한 온열 쾌적성을 분석한 선행 연구에서는 SET*, WBGT, PMV, PET, UTCI 지수가 사용되었으며, 특히 PMV, PET와 UTCI 지수가 많은 선택을 받았음을 알 수 있다. 박수국(2012)은 현재 조정계획이나 디자인에 이용가능한 모델로서는 PMV, PET, UTCI가 있다고 발표하였다. 따라서 본 연구에서는 휴게공간, 운동공간, 놀이공간, 산책로 등 조정 설계에 의도된 인간의 활동에 따른 온열 쾌적성을 알아보기 위하여 PMV(predicted mean vote)를 산출하여 이에 대한 예상불만족률(PPD)을 확인하고, UTCI(universal temperature climate index)를 이용하여 조정공간의 온열 쾌적성을 분석, 평가하고자 한다.

3. 연구 방법

3.1 연구의 범위

서울특별시 서울특별시는 대한민국 인구의 약 18%인 933만 명이 거주(2025년 3월 행정안전부 인구통계)하는 대표적인 인구밀집 지역이며, 본 연구의 대상지인 관악구 소재 A아파트는 한강 남쪽과 관악산 북쪽에 위치하고, 국사봉의 남사면에 위치하여 대지의 고저차가 +64.0에서 +82.0까지 18m에 이르는 특징으로, 일조와 풍속의 영향을 분석하기에 양호하다. 지상22층~28층의 9개동 997세대의 신축 공동주택으로 조정공간이 +64.0 레벨, +73.0 레벨, +82.0 레벨에 각각 중정형으로 위치하고 있어, 일조가 양호하고, 국사봉의 사면과 주변 아파트에 의한 거시적인 풍속변화와 대상지 아파트 주거동에 의한 미시적으로 풍속과 풍향의 변화가 예상된다. 대상지 내 주거동과 동선의 배치가 완료된 상황에서 조정 설계에 의해 추가 도입될 조정 수목 및 시설물 계획에 따라 미기후 개선 가능성이 높은 5개소의 분석지점을 선정하였다.

시간적 범위는 2014년부터 2023년까지 10년간 기상청 및 서울시의 데이터를 활용하여 월평균 기온, 상대습도 값을 분석한 후 조정 특화 설계에 의한 단지내 쾌적성 향상에 대한 정량적 확인을 위해 가장 불리한 기후 환경으로 기온, 습도의 일평균 값이 가장 덥고 습해서 외부 활동을 하기에 좋지 않은 대표월을 먼저 선정 후 대표월의 평균 값에 근접하는 특정일의 기후 데이터를 적용하였다. 외부 활동에 가장 불리한 1월의 강추위와 7월의 무더위가 그 대상이 될 수 있으나, 1월의 추위에는 외부 공간의 이용율이 저하되고, 외부 활동 자체가 현저히 줄어들어 분석대상에서 제외하였고, 그늘제공, 수분공급 등 조정 식재 및 시설물을 통한 미기후 요소를 조절할 수 있는 7월을 분석 대상으로 선정하였다. 10년간 7월 평균값과 근접한 2014년 7월 21일 10시, 12시, 14시, 16시, 18시의 기온, 습도, 풍속 등 기후 데이터를 적용하여 시물레이션 하였다(Table 10 참조).

Table 10. Hourly air temperature (°C) and relative humidity (RH %) of selected representative days by month (2014-2023)

Time	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Slected date	Jan 5, 2023	Feb 23, 2015	Mar 27, 2016	Apr 19, 2019	May 14, 2023	Jun 17, 2018	Jul 21, 2014	Aug 26, 2023	Sep 25, 2023	Oct 8, 2022	Nov 13, 2017	Dec 31, 2017
10:00	-3.1°C / 68%	0.3°C / 57%	8.0°C / 48%	12.8°C / 50%	19.0°C / 52%	23.0°C / 66%	27.1°C / 73%	26.6°C / 69%	20.9°C / 66%	16.3°C / 65%	6.6°C / 58%	-0.5°C / 73%
12:00	0.2°C / 55%	3.3°C / 44%	11.9°C / 35%	13.7°C / 45%	22.0°C / 42%	24.8°C / 56%	29.6°C / 60%	27.7°C / 63%	24.1°C / 55%	18.9°C / 55%	9.6°C / 51%	1.4°C / 47%
14:00	1.5°C / 47%	5.5°C / 37%	12.6°C / 21%	17.5°C / 39%	23.8°C / 39%	26.8°C / 44%	30.6°C / 60%	29.8°C / 53%	25.8°C / 52%	20.5°C / 47%	10.8°C / 47%	3.0°C / 28%
16:00	3.2°C / 41%	5.6°C / 45%	12.3°C / 23%	19.1°C / 36%	23.0°C / 43%	26.6°C / 51%	30.9°C / 56%	30.2°C / 59%	25.3°C / 55%	20.9°C / 46%	11.3°C / 51%	2.7°C / 26%
18:00	0.9°C / 43%	2.9°C / 53%	9.7°C / 37%	18.9°C / 34%	22.1°C / 44%	25.0°C / 59%	30.0°C / 62%	28.7°C / 62%	24.2°C / 56%	18.7°C / 50%	11.3°C / 57%	0.7°C / 31%

3.2 대상지 모델링

모델링은 필지와 지형 그리고 건축물 모두를 시뮬레이션할 수 있어 국내외에서 꾸준히 도시설계에 사용되고 있는 Rhino 6 프로그램을 이용하였다(전연수와 정재현, 2014). Macro model은 대상지를 중심으로 2 × 2km의 지형과 건물 등 인공 구조물을 4m unit cell로 입력하였고, Micro model은 대상지 내부 9개동과 어린이집, 구립 보육시설 등 부대 건축물과 대상지 내부 계단, Dry Area 등 모든 인공구조물을 1m unit cell로 모델링하였으며, 각 cell에는 평균복사온도를 계산할 수 있는 물성 데이터를 입력하여, Figure 3과 같이 총 3,700,206개의 cell을 통한 시뮬레이션으로 보다 정밀한 계산을 가능하게 하였다.

3.3 분석

미기후 분석을 위해 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 프로그램의 사용이 요구되었으며, 안중현 등(2024)은 Siemens에서 개발한 STAR-CCM+ 프로그램이 외부 환경에서도 각 격자요소에 대해 적분형 지배방정식을 차분화하여 복잡한 형상과 불연속면의 유동에 적합함을 확인하였으며, 김재경 등(2024)은 STAR-CCM+은 도시 공간에서 물리적 영역을 격자화함으로써 각 지점의 유체 특성을 계산할 수 있는 장점이 있다고 하였다. 본 연구에서도 열 전달, 열 복사, 풍속 및 풍향 등 미기후 관련 시뮬레이션 및 분석으로 STAR-CCM+ v.2210 을 사용하였다. 서울시 관악구의 풍속 풍향을 Macro model에 입력하여 대상지의 건축과 조경설계 이후의 풍속과 풍향을 산출했으며, Micro model을 통해 5개 분석지점 월별 대표일의 태양고도, 건물에 의한 복사열 등 열환경과 풍환경을 지표면 2m 높이를 기준으로 시뮬레이션 하여 PMV와 UTCI의 계산에 필요한 분석지점별 기후 요소를 산출하였다.

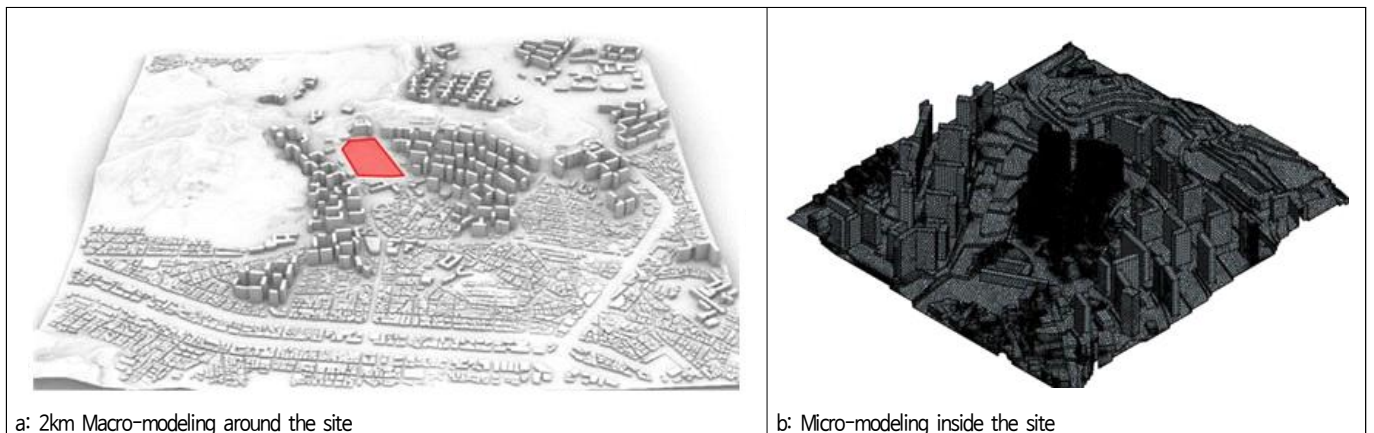
3.3.1 실측자료와 시뮬레이션 비교

공동주택 외부공간의 열쾌적 분석을 위한 전산유체역학 분석의 해석 타당성을 검증하기 위하여 대상 단지의 2025년 7월 25일 오전 11시에서 16시까지 외부 환경에 대한 기후요소를 분석지점 5개소 중 Figure 4의 4개소 A, B, D, E 지점에서 실측하였다. 분석 대상 단지에서 실측한 외부 환경 조건과 해석을 위한 기후 조건을 Table 11에 정리하였다. 현장 실측 외 적용 조건은 기상청 제공 기후자료개방포털 데이터(data.kma.go.kr)를 활용하였다.

분석 지점별 열화상 카메라(모델명: Ti480 PRO)로 촬영한 마감별 표면온도의 최댓값과 최솟값 그리고 각 표면의 온도를 적분한 평균값과 공기온도를 실측한 데이터, STAR-CCM+ v.2210으로 전산유체역학 분석을 통해 계산한 결과값을 Table 12를 통해 확인할 수 있다.

3.3.2 실측을 통한 해석 결과의 타당성 검증

실측과 해석 결과의 일평균 값을 비교한 결과로 기온의 평균절대오차(MAE)는 1.05°C, 평균제곱근오차(RMSE)는 1.27°C로 나타났다. 표면온도의 경우 MAE는 1.53°C, RMSE는 1.69°C로 나타났다. 외부 열환경을 대상으로 한 CFD 연구에서 ±2°C 이내의 오차는 수용 가능한 범위로 평가되며(Tominaga et al., 2008; Blocken, 2015), 본 연구의 해석 결과는 실측 결과와 비교할 때 합리적인 수준의 정합성을 확보한 것으로 판단된다.



a: 2km Macro-modeling around the site

b: Micro-modeling inside the site

Figure 3. Site modeling by Rhino 6

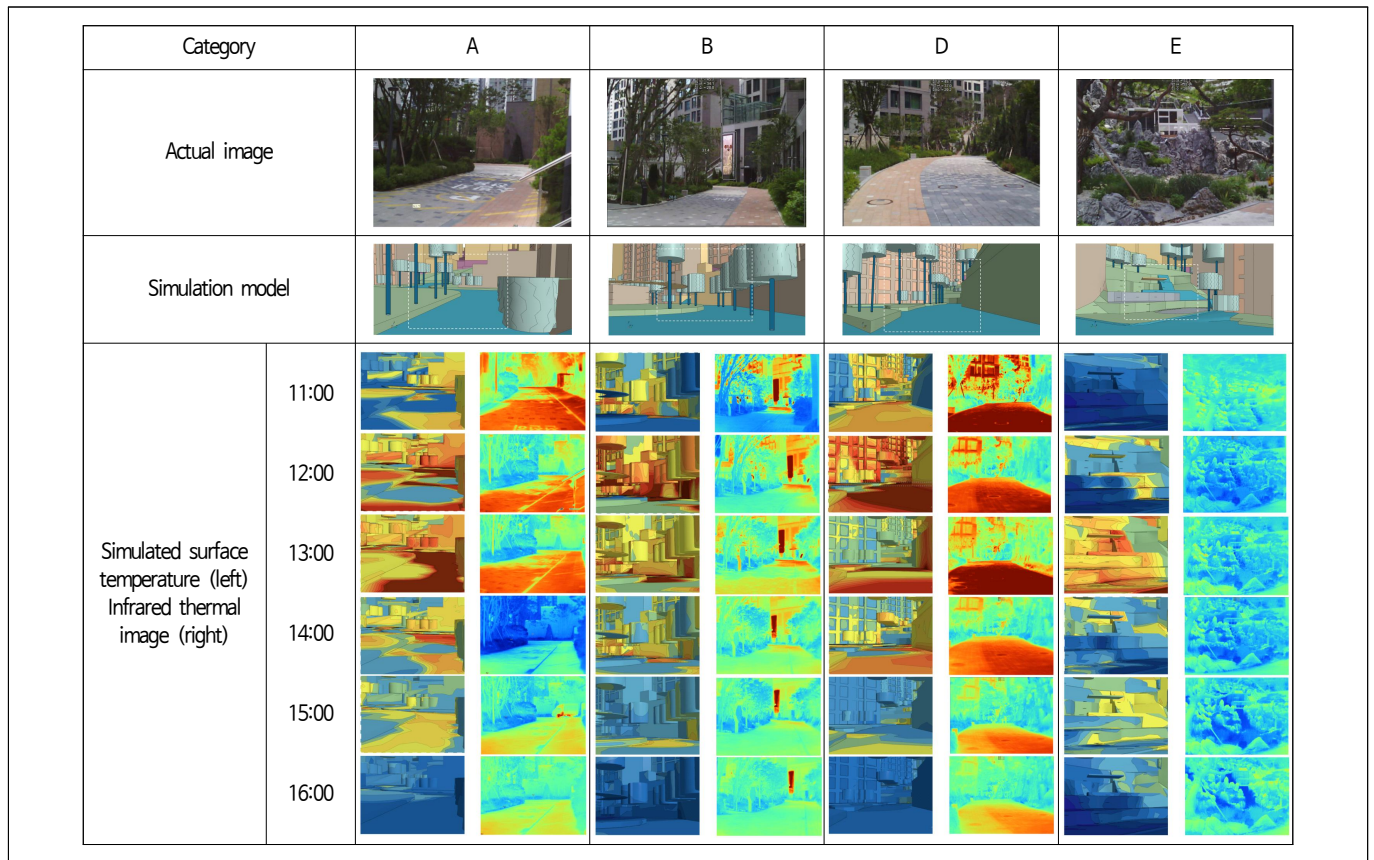


Figure 4. Comparison of simulated and measured surface temperature distributions by time at analysis locations

Table 11. Simulation conditions for validation between field measurements and simulations

Category		11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	Source
Simulation conditions	Solar altitude (degree)	62.4	70.6	71.9	65.1	54.7	43.1	KMA Open weather data portal
	Solar azimuth (degree)	122.5	151.9	196.6	231.1	250.3	262.7	
	Solar radiation (MJ/m ²)	2.5	3.5	2.9	3.4	2.1	1.1	
	Cloud cover (ratio)	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	
	Air temperature (°C)	30.7	31.6	32.1	33.1	32.5	32.0	Field measurement
	Wind speed (m/s)	2.0	2.1	2.4	2.0	3.8	2.4	Field measurement
Physical models		Steady, Three dimensional Turbulent, Realizable K-epsilon turbulence Gravity, Boussinesq model Segregated flow, Segregated fluid temperature Surface to surface radiation, Solar load model						STAR-CCM+ v.2210
Mesh		Polyhedral mesher, Prism layer mesher (3,700,000 cells)						

Table 12. Measured and simulated surface and air temperatures by location and time

Location	Category		Air temperature (°C)						Average
			11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	
A	Surface temperature	Measured	33.0	37.9	34.8	36.2	35.8	35.4	35.5
		Simulated	30.0	35.3	34.7	37.5	33.7	30.6	33.6

Table 12. Continued

Location	Category		Air temperature (°C)						
			11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	Average
A	Air temperature	Measured	29.7	31.7	31.4	32.4	32.5	32.0	31.6
		Simulated	26.8	29.5	30.6	33.3	32.3	27.0	29.9
B	Surface temperature	Measured	31.0	34.5	33.5	35.8	34.6	34.1	33.9
		Simulated	31.2	38.4	34.9	37.4	33.7	30.0	34.3
	Air temperature	Measured	32.2	31.9	32.8	31.5	31.8	32.8	32.2
		Simulated	29.0	30.8	30.9	32.5	32.0	27.5	30.5
D	Surface temperature	Measured	37.0	38.2	35.5	38.0	36.1	35.2	36.7
		Simulated	36.0	41.7	35.5	34.6	32.4	31.0	35.2
	Air temperature	Measured	32.2	31.7	32.5	32.1	32.5	33.9	32.5
		Simulated	31.1	32.8	32.5	33.6	32.7	31.6	32.4
E	Surface temperature	Measured	33.2	31.7	32.7	32.1	32.2	32.8	32.5
		Simulated	34.7	38.9	34.3	36.3	33.5	31.7	34.9
	Air temperature	Measured	30.6	32.0	31.4	33.0	32.2	32.1	31.9
		Simulated	31.2	32.7	32.6	33.8	32.7	32.0	32.5

시간대별 온도 변화 경향 역시 실측과 해석이 전반적으로 유사하게 나타났으며, 특히 최고 온도 발생 시점이 대체로 일치하였다. 일부 오후 시간대에서 해석값이 다소 낮게 나타난 것은 정상상태(steady-state) 해석으로 인해 지표면 및 구조물의 축열 효과가 충분히 반영되지 못한 한계에 따른 것으로 해석된다.

따라서 본 연구에서 적용한 CFD 모델은 공동주택 외부공간의 미기후 분석에 활용 가능한 수준의 신뢰성을 확보한 것으로 판단된다.

3.3.3 분석지점 선정

박상욱(2019)은 공동주택 조경공사 전후 온도저감 및 열환경 개선에 대해서 비교 검증하였는데 입주민이 주로 이용하는 주요 조경공간을 측정으로 선정하여 연구를 진행하였다. 본 연구에서도 입주민들의 이용이 많은 어린이놀이터, 단지 출입구 및 연결 동선에서 분석지점을 선정하였다. 각 분석지점은 경관성 향상 및 이용성 제고를 위해 조경 설계적으로 특화 시설이 도입된 지점으로, 분석지점 A는 사업승인도면에는 어린이 놀이 공간과 이동 동선으로 구성되어 있었으나 조경특화설계로 티하우스와 물놀이터 도입하였고, 분석지점 B는 어린이 놀이공간과 이동 동선에서 회랑형 파고라와 미스트 분수를 도입하였다. 분석지점 C는 단지 입구부 포장과 단순 녹지에서 2단 조형 폰드와 대형 소나무 반송을 설계하였고, 분석지점 D는 외부 연결 동선으로 당초 콘크리트 옹벽 계단과 사면 녹화에서 자연석 옹벽과 자연석 계단 그리고 자작나무 교목 식재로 변경하였다. 마지막으로 분석지점 E는 단지 내 이동 동선으로 단차가 심한 구간이어서 당초 콘크리트 옹벽과 계단으로 구성되었으나 조경 특화설계를 통해 계단 일부를 삭제한 후 옹벽 구간에는 석가산을 조성하고, 미스트분수, 티하우스를 설치하였다. 그리고 단차를 이용하여 폭포와 자연형 연못 2개소를 도입하였다.

3.3.4 사업승인도면 분석

건축 배치가 완료된 상태에서, 건축법 제42조(대지의 조경) 및 관할 지방자치단체인 서울특별시 건축조례 제24조(대지안의 조경)에 의한 조경면적은 대지면적의 15퍼센트 이상을 적용하고, 주택건설기준등에관한규정 제55조의 2(주민공동시설)에 의한 어린이놀이터 및 주민운동시설과 국토교통부 고시 제2021-1778호 조경기준에 의한 식재수량 및 규격을 적용하여, 법적 조건을 만족한 사업승인도면의 녹지 및 조경 공간에 대한 모델링을 한 후, 태양에 의한 열환경과 건축물에 의한 복사열, 건축물 배치 및 수목에 의한 풍환경 등을 STAR-CCM+를 이용하여 시뮬레이션하여, 미리 선정한 5개소의 분석지점에 대한 Ta(air temperature, °C, 지면 2m 상부), Tr(mean radiant temp-

erature, °C), Va(air velocity, m/s), RH(relative humidity, %)를 계산하였다(Figure 5-8 참조).

3.3.5 조경 특화 설계 후 분석

사업승인도면 수준의 조경 설계 이후, 단지의 고급화를 위한 조경 특화설계를 진행하였고, 고저차가 큰 단지의 특성을 고려하여, 전망과 휴게, 놀이 및 경관 시설을 특화하여 입주자 만족도를 높이도록 계획하였다. 수경시설로는 물놀이터, 석가산의 폭포와 연못, 미스트 분수 등을 통해 경관성 향상과 동시에 미기후를 조절할 수 있도록 하였으며, 티하우스와 회랑형 파고라, 수목의 도입으로 그늘을 더 많이 제공하였다. 또한 단지 전반에 걸쳐 녹지면적을 11,075m²에서 11,772m²으로 확대하였고, 교목은 당초 1,220주에서 2,153주로, 관목은 12,060주에서 61,050주로 수량을 대폭 증가하여 외부 공간의 경관성과 쾌적성을 향상시켰으며, 이를 모델링에 반영하여, 분석 지점 5개소의 Ta, Tr, Va, RH를 계산하였다.

4. 결과 및 분석

대상지의 5개 분석지점에 대해 Star-CCM+ 시뮬레이션을 통해 기온 Ta, 평균복사온도 Tr, 풍속 Va, 상대습도 RH 데이터를 구하였고, 이를 PMV, PPD와 UTCI에 적용하여 계산하였다. 인간의 활동을 기반으로 한 대사량 (metabolic rate)은 UTCI에서 reference condition으로 적용하는 4km/h의 속도로 산책하는 수준의 걸음걸이의 대사량 2.3met, 입력하였고, 착의량(clothing)은 여름철 반팔 반바지 기준인 0.5 clo를 입력하였다.

4.1 분석 지점별 기후 데이터

온열 쾌적성의 개선 정도를 비교 평가하기 위해 외부 환경이 가장 가장 불리한 경우인 7월(대표일 2014년 7월 21일)의 기상 정보를 대상지의 사업승인도면과 조경특화설계로 시뮬레이션한 결과는 Table 13과 같다.

공기온도 Ta(temperature air)는 평균 30.9°C에서 29.7°C로, 복사온도 Tr(temperature radiant)은 평균 31.1°C에서 30.0°C로 각각 1.2°C와 1.1°C 저감되었으나 태양고도가 높은 시간대(12-16시)에 일부 분석지점에서는 온도가 올라가는 역전현상도 발생하였다. 평균값은 5개 분석지점 5개 시간대 총 25개 데이터의 산술 평균으로 계산하였다. 풍속 Va(air velocity, m/s)는 0.79m/s에서 0.66m/s로 변화하였는데, 이는 수목의 밀도 증가가 풍속의 방해 역할을 한 것으로 판단된다. 상대습도 RH(relative humidity, %)는 연못, 미스트 분수 등 수경시설의 확대로 57.28%에서 62.03%로 증가하였다. 상대습도의 증가는 잠열 교환 효과와 미기후 안정화에 기여하였으나, 쾌적성 개선의 주요 요인은 Ta와 Tr의 저감으로 해석된다.

시뮬레이션 데이터가 가장 크게 변화한 곳은 석가산 폭포와 생태연못, 미스트 분수, 그리고 티하우스가 설치되어 조경 설계 요소가 많이 적용된 분석지점 E(석가산 폭포 + 미스트분수 + 티하우스) 12시에 공기온도 Ta가 33.8°C



Figure 5. 5 Analysis locations


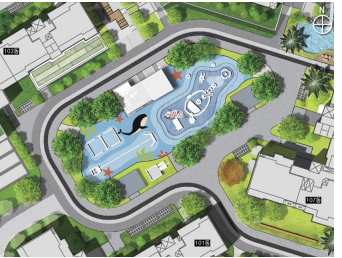






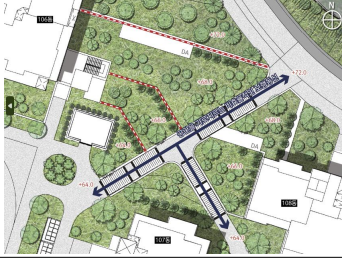

Location	Approved site plan	Landscape-specialized design
A Children's playground		
	Playground area: 837m ² Separated by a 4m-wide pathway	2-story tea house Water playground (Water surface area: 146m ²)
B Children's playground		
	Playground Area : 564m ² Separated by a 4m-wide pathway	Mist Fountain Corridor-type Pergola (L: 51m, W: 1.8-3.7m ²)
C Entrance		
	Complex sub-entrance Simple green space within paved area (38m ²)	Sculptural pond (Water surface area: 126m ²) 1 Multi-stemmed Pine (H4.0 × W5.0)
D Pathway		
	1.5m-wide concrete retaining wall stairs (Level: +73.0-+84.5) 5 pine trees (H5.0-6.0), 5 White Pines (H3.0)	1.5m-wide natural stone retaining wall stairs 3 pine trees (H10), 75 birch trees (H3.0-5.0)
E Pathway		
	3.0m-wide concrete retaining wall stairs (Level: +64.0-+72.0)	Tea house, Mist fountain Rockery waterfall and 2 ponds (W.S.A: 103m ²)

Figure 6. Plans and characteristics of the 5 analysis locations

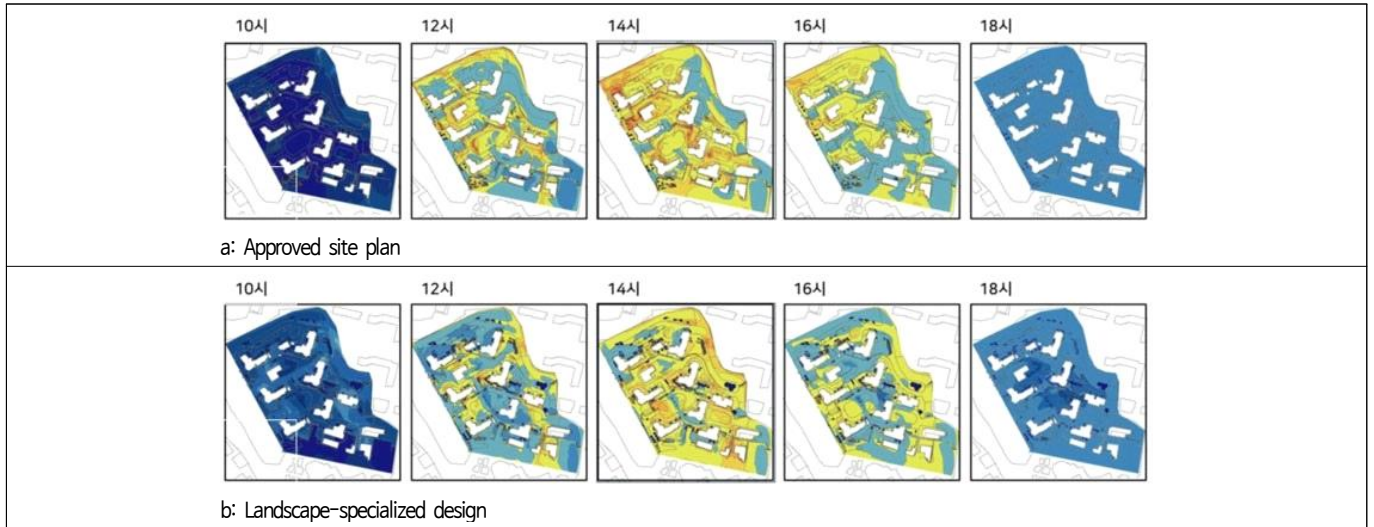


Figure 7. Air temperature simulation results

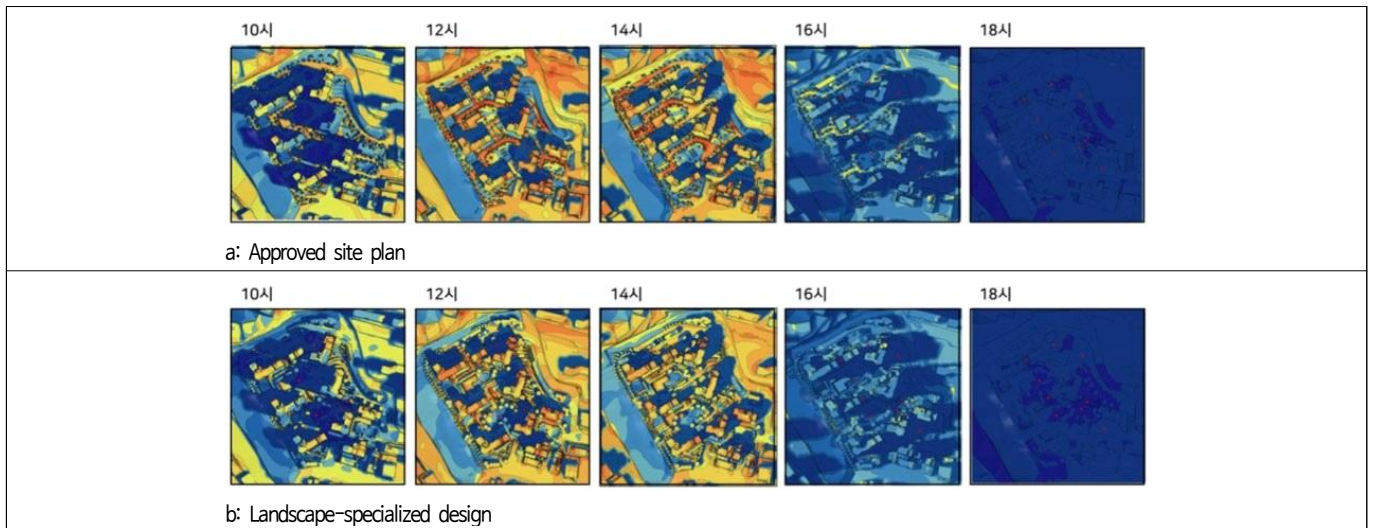


Figure 8. Mean radiant temperature simulation results

Table 13. Simulated microclimate variables for the approved site plan and landscape-specialized design

Location	Time	Approved site plan				Landscape-specialized design			
		Ta	Tr	Va	RH (%)	Ta	Tr	Va	RH (%)
A	10:00	27.6	28.3	2.1	70.3	24.4	24.4	0.5	85.2
	12:00	31.9	36	1.2	51.5	30.5	30.5	2.4	56.1
	14:00	35.9	38.2	2.1	43.1	31.4	31.0	0.0	56.2
	16:00	32.3	34.9	1.0	49.5	31.4	31.3	1.5	52.5
	18:00	30.2	30	0.4	62.5	29.7	28.8	0.2	64.1
B	10:00	27.9	28.7	0.4	68.9	25.1	25.0	0.6	81.9
	12:00	31.5	39.4	1.1	52.6	31.3	31.1	0.7	53.3
	14:00	32.2	40	1.0	53.6	31.9	31.6	1.4	54.5
	16:00	31.9	34.8	1.2	50.8	31.4	31.4	0.7	52.2
	18:00	30.0	30	0.1	63.3	29.4	29.1	0.1	65.6

Table 13. Continued

Location	Time	Approved site plan				Landscape-specialized design			
		Ta	Tr	Va	RH (%)	Ta	Tr	Va	RH (%)
C	10:00	27.9	28.6	1.5	68.7	25.5	25.8	0.4	79.9
	12:00	31.5	33.3	0.5	52.7	30.7	31.0	1.3	55.4
	14:00	32.0	35.7	1.6	54.3	32.1	34.1	1.1	54.0
	16:00	32.3	36.6	0.8	49.5	32.4	33.6	0.7	49.4
	18:00	29.9	29.9	0.2	63.5	30.0	30.0	0.2	63.2
D	10:00	29.1	32.7	1.0	64.2	26.7	27.2	0.4	74.2
	12:00	31.6	36	0.3	52.4	31.9	34.9	1.3	51.5
	14:00	32.0	39.4	1.1	54.1	33.1	35.7	0.3	50.7
	16:00	31.7	35.6	0.4	51.5	31.8	32.0	0.6	51.2
	18:00	30.0	29.9	0.3	63.3	30.0	29.9	0.4	63.2
E	10:00	25.3	29.7	0.3	80.5	25.0	25.1	0.4	82.3
	12:00	33.8	34.1	0.5	45.8	28.2	28.8	0.2	64.3
	14:00	33.0	42.1	0.1	51.1	30.5	30.7	0.4	59.1
	16:00	31.9	37.9	0.5	50.8	29.5	30.2	0.3	58.8
	18:00	29.9	29.9	0.1	63.5	27.8	27.8	0.3	72.0

에서 28.2℃로, 복사온도 Tr은 34.3℃에서 28.8℃로, 상대습도 RH는 45.8%에서 64.3%로 변하여 쾌적성을 크게 증가시켰으나, 분석지점 D(자연석 계단)는 밀식된 교목으로 인해 풍속이 저하되어 오히려 온도가 상승하고 상대습도가 낮아지는 결과를 얻었다.

이러한 분석결과는 박상욱(2020)의 조경공사 후 열환경이 개선되는 것을 뒷받침하고, 더 나아가 조경 설계 요소에 따라서 열환경 개선에 대한 차이가 존재함을 알 수 있다. 하지만, 분석지점 D(자연석 계단)에서는 조경 특화 설계에 도입된 요소에 따라 부분적으로 공기 온도, 복사 온도가 오히려 올라가거나, 풍속이 저감되는 경우가 발생하여 외부공간 온열쾌적성에 부정적인 영향을 나타내고 있어 이에 대한 후속 연구가 필요하다.

4.2 분석 지점별 PMV, PPD, UTCI

5개 분석지점 PMV는 평균 2.11에서 1.84로 Slightly Warm 단계로 개선되었으며, PPD는 77.27%에서 66.34%로 10.93%의 불만족률이 줄어들어 입주민 이용시 온열쾌적성이 10% 이상 향상됨을 예측할 수 있었다. UTCI 평균도 32.08℃에서 31.06℃로 1.02℃ 저감되어 단지 전체적으로 여름철 온열 쾌적성의 개선을 정량적으로 확인할 수 있었다(Table 14 참조).

각 분석지점별로는 기후 요소의 시뮬레이션 데이터가 가장 긍정적으로 분석된 분석지점 E(석가산폭포 + 미스트 분수 + 티하우스) 12시에 온열 쾌적성 개선이 두드러지게 나타났다. PMV는 2.8에서 1.6으로 저감되었으며, PPD는 97.8%에서 55.3%로 무려 42.5% 불만족율이 감소되었다. UTCI 역시 34.7℃에서 29.7℃로 5.0℃ 저감되어 쾌적성이 증가하였다. 분석지점 C(조형폰드 + 대형목 식재)에서 온열쾌적성이 가장 적게 개선되었는데, 폭포 또는 분수, 미스트를 활용하지 않는 정적인 수경시설의 경우 잠열을 통한 공기중 온도저감 효과가 상대적으로 적어 쾌적성의 개선 효과 역시 두드러지게 나타나지 않았으며, 대형목 1개의 식재만으로는 충분한 그늘을 제공할 수 없어 개선 효과가 적음을 알 수 있었다.

하지만, 옹벽계단을 자연석계단으로 변경하고 교목 식재를 강화한 분석지점 D(자연석 계단) 14시에는 PMV가 2.3에서 2.9로, PPD는 89.3%에서 98.4%로 증가하였고, UTCI 역시 33.1℃에서 34.8℃로 상승하여 온열 쾌적성에 부정적인 영향을 미쳤다. 이는 온도 상승을 완화하거나 저감할 수 있는 아파트 구조물에 의한 그늘 형성이 부족한 위치에서 밀식된 교목에 의한 평균 풍속이 1.1m/s에서 0.3m/s로 감소하여 온열쾌적성이 저감되었음을 알 수 있다.

분석지점 D(자연석 계단)를 제외한 4개소의 평균 PMV는 2.11에서 1.76으로, PPD는 76.34%에서 63.74%로,

Table 14. Calculated thermal comfort indices for the approved site plan and landscape-specialized design

Location	Time	Approved site plan			Landscape-specialized design		
		PMV	PPD (%)	UTCI	PMV	PPD (%)	UTCI
A	10:00	1.1	29.8	28.0	0.5	10.9	26.8
	12:00	2.3	87.5	32.7	1.9	69.5	30.3
	14:00	3.2	99.6	35.7	2.2	86.4	32.4
	16:00	2.3	89.3	33.0	2.1	81.4	31.9
	18:00	2.0	75.3	31.8	1.8	67.6	31.2
B	10:00	1.4	43.0	29.5	0.7	14.0	27.2
	12:00	2.2	84.7	32.4	2.1	81.8	32.2
	14:00	2.4	91.6	33.4	2.3	87.3	32.8
	16:00	2.3	87.5	32.7	2.2	83.1	32.3
	18:00	2.0	77.6	31.5	1.9	70.2	31.0
C	10:00	1.3	38.3	29.2	0.9	20.7	27.7
	12:00	2.3	86.7	32.6	2.0	75.1	31.5
	14:00	2.3	88.9	32.8	2.5	93.2	33.6
	16:00	2.5	93.1	33.5	2.5	93.3	33.5
	18:00	1.9	73.8	31.5	2.0	75.3	31.6
D	10:00	1.8	68.1	31.3	1.2	33.2	28.8
	12:00	2.3	87.2	32.5	2.5	92.5	33.2
	14:00	2.3	89.3	33.1	2.9	98.4	34.8
	16:00	2.3	86.8	32.5	2.3	87.5	32.7
	18:00	1.9	73.7	31.6	1.9	72.2	31.6
E	10:00	0.8	19.9	27.6	0.7	16.1	27.3
	12:00	2.8	97.8	34.7	1.6	55.3	29.7
	14:00	2.7	97.0	34.2	2.0	77.9	31.9
	16:00	2.3	88.7	32.8	1.8	68.4	30.7
	18:00	2.0	76.6	31.5	1.4	47.3	29.8

UTCI는 32.06°C에서 30.77°C로 저감되어 조경 설계요소를 활용하면 외부 공간 온열 쾌적성이 유의미하게 개선됨을 확인할 수 있었다.

본 연구의 분석결과 PMV는 평균복사온도와 기온에 가장 민감하게 반응하며, 특히 평균복사온도의 저감은 인체 열수지의 영향을 미치는 복사 열전달량을 감소시켜 PMV 저감에 직접적으로 기여한다는 점에서 본 연구의 결과는 열수지 이론과도 일치한다.

5. 결론

지구온난화에 의한 여름철 폭염은 그 정도가 더해지고 있어, 2024년 여름(6-8월) 전국 평균기온(25.6°C), 평균 최저기온(21.7°C), 열대야(20.2일)은 모두 기상 관측망이 전국에 확충돼 기상 기록 기준이 되는 1973년 이후 1위를 기록했다. 특히 2024년 7월 25일부터 2주 동안 대한민국 정부는 ‘폭염피해 집중 대응 기간’을 지정 운영하여 폭염 인명피해를 최소화 하기 위한 정부의 대응책과 온열질환 예방과 감시체계 전반에 대해 발표할 정도로 온열 환경은 날로 악화되어가고 있다.

아파트는 이미 대한민국 주거 형태 중 60%가 넘는 정도로 우리나라의 대표적인 주거형태가 되었고, 법적으로 단지 내에서 휴게와 놀이, 운동 등 주민 복지를 위한 공간을 제공하도록 하고 있다. 이러한 공간을 설계하고 시공하는

조경 분야에서의 온열 쾌적성은 점점 더 중요해지고 있으며, 녹지를 조성하고 큰 나무를 심어 그늘을 제공하고 수경 시설을 통해 습도를 조절하여 조경 공간 이용자의 온열 쾌적성을 개선할 수 있음을 경험적으로 알고 있다. 하지만 조경설계 적용을 통해서 쾌적해진 환경을 객관적, 정량적 수치로 입증하는 노력은 많이 이루어지지 않았다.

본 연구는 공동주택 외부공간에 적용된 조경 특화 설계 요소가 미기후 및 온열 쾌적성에 미치는 영향을 정량적으로 확인하기 위하여 CFD 분석을 수행하고, PMV, PPD 및 UTCI 지수를 활용하여 조경 특화 설계 전후의 차이를 비교하였다. 또한 2025년 7월 현장 실측을 통해 해석 결과의 타당성을 검증함으로써 본 연구에서 적용한 해석 모델이 공동주택 외부공간의 미기후 특성을 합리적으로 재현하고 있음을 확인하였고, 온열 쾌적성 시뮬레이션 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, '사업승인도면'과 '조경 특화 설계'에서 PMV 평균 0.27 최대 1.2 저감, PPD 평균 10.93% 최대 42.5% 불만족을 감소, UTCI 평균 1.02°C 최대 5.0°C 저감되어 온열 쾌적성 개선 효과를 정량적으로 확인할 수 있었다. 이러한 온열 쾌적성의 개선은 기온(Ta) 및 평균복사온도(Tr)의 저감과 상대습도의 증가에 따른 복합적 효과로 해석된다.

둘째, 세부적인 조경 특화 설계 요소를 고려하면, 미스트분수, 물놀이터, 폭포, 수경시설 등의 조경 설계 요소가 적용된 공간의 온열쾌적성이 유의미하게 개선되었는데, 이는 조경 설계 요소가 단순 경관적 기능을 넘어 공기중의 수증기량을 증가시켜, 대기의 잠열을 흡수하여 복사온도를 낮추고, 음영 형성, 풍환경 조절 등 미기후 요소에 직접적으로 작용함으로써 온열 쾌적성 개선에 기여함을 보여준다.

셋째, 대형목 식재와 시설물 설치의 경우 그늘을 제공하여 표면온도와 복사온도가 낮아져 온열 쾌적성이 개선되기도 하지만, 풍속을 저감시켜 국지적으로 온열 쾌적성이 악화되는 역효과를 나타내기도 하였다.

따라서 향후 공동주택 조경 설계에서는 개별 요소의 도입 여부뿐만 아니라 공간적 배치, 규모, 밀도 및 풍환경과의 상호작용을 종합적으로 고려할 필요가 있다.

본 연구는 단일 대상지를 중심으로 수행되었다는 한계를 가지나, 실측 검증을 통해 모델의 타당성을 확보하고, 설계 전후 동일 조건 비교를 통해 조경 설계 요소의 미기후 조절 효과를 정량적으로 제시하였다는 점에서 의의를 갖는다. 특히 조경 설계 요소를 미기후 조절 전략으로 해석하고, 온열 쾌적성 지수를 통해 설계 효과를 객관적으로 제시함으로써 향후 공동주택 조경 설계 시 미기후 조절을 고려한 설계 전략 수립의 정량적 근거로 활용될 수 있으며, 향후 조경 설계 단계에서 기후 적응형(climate-responsive) 설계 지표를 체계화하는 기초 자료로 기능할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. 김수진, 이윤승, 박해인, 정다원, 박범진(2019) 도시공원과 휴양림의 열적쾌적성에 관한 연구. 한국산림휴양학회지 23(4): 41-52.
2. 김재경, 이정민, 전환돈(2024) 디지털트윈 및 전산유체역학(CFD)을 활용한 도시열섬 기후적응 소재의 효과 검토 연구: 경기도 과천시를 대상으로. 기후방재학회논문집 24(5): 9-17.
3. 김정호, 권가욱, 윤용한(2015) 최고기온시 학교 옥외공간 녹지특성에 따른 열쾌적 지표(UTCI, PMV, WBGT) 비교 분석. 인간식물환경학회지 18(5): 363-370.
4. 박상욱(2019) 조경공학적 실측을 통한 공동주택단지 외부공간의 하절기 열환경 개선. 영남대학교 대학원 박사학위논문.
5. 박상욱(2020) 식재설계 및 시공을 통한 공동주택 외부공간의 하절기 열환경 개선. 휴양및경관연구 14(1): 69-76.
6. 박상진, 조세환(2015) 아파트단지 조경 공사비의 공종별 경년변화 특성 분석. 한국조경학회지 43(6): 150-159.
7. 박수국(2012) 인간 열환경 지수(Human Thermal Sensation)를 이용한 조경계획 및 디자인 방법. 한국조경학회지 40(1): 1-11.
8. 박종길, 정우식, 김은별, 박길운(2007) 한국형 체감온도지수 개발 연구. 한국지구과학회지 28(7): 878-890.
9. 박주현, 엄정희(2025) 열환경 개선을 위한 가로녹지 조성 위치에 따른 설계전략. 한국조경학회지 53(4): 33-51.
10. 배용규, 박진철(2021) 공동주택단지 재건축사업 전·후의 외부공간 온도 및 온열 쾌적성 비교 연구: 서울 서초구 반포 주공 1, 2, 4주구를 대상으로. 한국경관학회지 13(2): 88-108.
11. 안중현, 강준석(2024) 중미기후 규모 CFD 시뮬레이션을 통한 열환경 취약성 예측: 경기도 평택시를 대상으로. 기후방재학회논문집 24(6): 51-59.

12. 윤용한, 박승환, 김원태, 김정호(2014) 학교 운동장과 녹지공간의 UTCI, PMV, WBGT 비교 분석. 한국환경생태학회지 28(1): 80-89.
13. 임종연, 황효근, 송두심, 김태연(2008) 공동주택 단지 내 외부환경에서의 하절기 온열쾌적감 평가에 관한 연구. 한국건축환경설비학회 학술발표대회 논문집 2008(10): 110-115.
14. 전연수, 정재현(2014) 파라메트릭 모델링 기반의 도시설계 시뮬레이션 알고리즘 개발 및 개선방안 제언. 한국정보통신학회논문지 28(10): 1201-1210.
15. 최경호(2021) 주거체제로 본 사회주택: 주거 안정과 사회 통합을 위한 공급 생태계다변화 초석. 동향과 전망 111: 115-156.
16. Bröde, P.(2021) Issues in UTCI Calculation from a decade's experience. In E. L. Krüger, ed., Applications of the Universal Thermal Climate Index (UTCI) in Biometeorology: Latest Developments and Case Studies. Springer. pp. 13-22.
17. Blocken, B.(2015) Computational fluid dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. Building and Environment 91: 219-245.
18. Fanger, P. O.(1970) Thermal Comfort: Analysis and Application in Environment Engineering. Danish Technical Press.
19. Jendritzky, G.(2012) UTCI-why another thermal index. International Journal of Biometeorology 56: 421-428.
20. Blazejczyk, K., Y. Epstein, G. Jendritzky, H. Staiger and B. Tinz(2012) Comparison of UTCI to selected thermal indices. International Journal of Biometeorology 56: 515-535.
21. Li, P. W. and S. T. Chan(2000) Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong. Meteorological Applications 7: 369-375.
22. Masterson, J. and F. A. Richardson(1979) Humidex, A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity. Environment Canada.
23. Tominaga, Y., A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa and T. Shirasawa(2008) AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96(10-11): 1749-1761.
24. Yaglou, C. P. and D. Minard(1957) Control of heat casualties at military training centers. Archives of Industrial Health 16: 302-316.
25. 통계청. <https://kosis.kr/>