



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

컴퓨터 시뮬레이션을 이용한
아파트단지 인간 열환경 분석

- 서울특별시 고덕강일지구 -

제주대학교 대학원

원예학과

현 철 지

2019년 2월



컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 아파트단지 인간 열환경 분석

- 서울특별시 고덕강일지구 -

지도교수 박 수 국

현 철 지

이 논문을 농학 석사학위 논문으로 제출함.

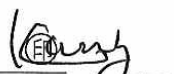


2018년 12월

현철지의 농학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장

위 원

위 원

강 훈 
조 영철 
박 수국 

제주대학교 대학원

2018년 12월

Analysis of Human Thermal Environments in
The Apartment Complex by Computer
Simulation

- Goduck-gangil area, Gangdong-gu, Seoul Metropolitan City -

Cheolji Hyun

(Supervised by professor Sookuk Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Master of Science in
Agriculture

2018. 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Horticultural Science

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

- 목 차 -

List of Tables	I
List of Figures	III
Abstract	IV
I. 서언	1
II. 연구방법	3
1. 미기후 조사	3
2. 마곡지구 및 고덕강일지구 컴퓨터 시뮬레이션 모델	4
3. 고덕강일지구 컴퓨터 시뮬레이션 모델 시나리오	8
III. 연구결과 및 고찰	12
1. 마곡지구	12
1-1. 마곡지구 여름철 인간 열환경 분석	12
1-2. 미기후 측정 자료와 컴퓨터 시뮬레이션 결과 비교	14
2. 고덕강일지구	17
2-1. 고덕강일지구 시나리오별 결과	17
가. 미기후요소 결과	17
나. 인간 열환경지수(PET) 결과	19
2-2. 조경적 요소별 결과	24
가. 투수성포장, 쿨페이브먼트	24
나. 콘크리트 옥상, 쿨루프, 옥상녹화	26
다. 콘크리트 벽, 벽면녹화	30
IV. 결론	33
V. 초록	34
인용문헌	36

-List of Tables-

Table 1. Instruments for micro-climatic data measurement	4
Table 2. Simple forcing data for ENVI-met configuration files in the Magok area from measured micro-climatic data and two weather station data	6
Table 3. Simple forcing data for ENVI-met configuration files in the Goduck-gangil area from Seoul weather station data	8
Table 4. Computer simulation scenarios for the Goduck-gangil area	10
Table 5. Surface types in ENVI-met area input files for the Goduck-gangil area	11
Table 6. Albedos and emissivities of surface materials	11
Table 7. The levels of physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI)	13
Table 8. The mean difference between measured micro-climatic data and ENVI-met simulation results. T_a , RH, U and T_{mrt} mean air temperature, relative humidity, wind speed and mean radiant temperature, respectively	15
Table 9. Correction values of micro-climatic factors by times	15

Table 10. Mean values of air temperature, relative humidity, wind speed, mean radiant temperature and PET of scenarios	21
Table 11. The ENVI-met results of pervious surface, cool pavement	25
Table 12. The ENVI-met results of concrete roof (scenario 1)	27
Table 13. The ENVI-met results of cool roof (scenario 5)	28
Table 14. The ENVI-met results of rooftop garden (scenario 8)	29
Table 15. The ENVI-met results of concrete walls (scenario 1)	31
Table 16. The ENVI-met results of vertical garden (scenario 9)	32

-List of Figures-

Figure 1. Study sites for micro-climatic data measurement in the Magok	3
Figure 2. Area input files and a configuration file for ENVI-met computer simulation in Magok area	5
Figure 3. The Goduck-gangil area master plan from the Seoul housing and communities corporation	7
Figure 4. Area input files and a configuration file for ENVI-met computer simulation in Goduck-gangil area	7
Figure 5. Micro-climatic factors of the Magok in summer	13
Figure 6. Linear regression analysis between times and differences of measured micro-climatic data and ENVE-met results	16

ABSTRACT

Recently, analyzing the thermal environment of cities using computer simulations is starting in the world. The research aims are to analyze the thermal environment of the people in apartments among urban housing types in Korea and to find a landscaping plan and design method to create a pleasant environment. At first, we measured micro-climatic data (air temperature, relative humidity, wind speed, solar and terrestrial radiation in apartments located in Magok-dong, Seoul, and compared them with computer simulation results. The results showed the biggest difference in mean radiant temperature and the human energy balance model PET among comparison factors, and the lowest difference in mean radiant temperature in the open space and the playground. After finding the correction method, a total of 10 additional scenarios were created based on the design drawings of apartment planning sites located in Goduck-dong, Gangdong-gu, Seoul and simulated them for 24 hours. Scenarios 2 and 3 (S.2, 3) reduced and eliminated the green areas, and scenario 4 (S.4) applied to multi-layered plants in the apartment complex, scenario 5 (S.5) applied to cool roof on the buildings, scenario 6 (S.6) applied to cool pavement on the road and sidewalk, scenario 7 (S.7) replaced the existing gardens with rainwater gardens, and scenario 8 (S.8) applied to rooftop garden on the buildings. Scenario 9 (S.9) applied to a vertical garden on the building walls, scenario 10 (S.10) altered the apartment form from a flat to a tower, and scenario 4_final (S.4_final) applied to all elements S.4, 5, 6, 7, 8, and 9. Comparing the criteria scenario 1 (S.1) with the remaining 10 scenarios, there were a little differences in air temperature, relative humidity, and wind speed. A comparison of the hottest 15:00 mean radiant temperature results showed the best thermal reduction effect for scenario 4 (S.4) (mean 51.6°C) using multi-layer plants in the complex. S.6, 8,

and 10 showed slightly mean radiant temperature reduction. However, each of the S.5 and 9 increased mean 0.58 and 0.5°C. Additionally, S.2 and 3 showed the highest thermal environment above mean 56°C. In the comparison of the human energy balance model PET, S.4 showed a mean reduction of 1.1°C (mean 39.3°C). S.7 changed to rainwater gardens and S.4_final applied to all landscape elements, showed the second highest PET reduction with mean 0.8°C (mean 39.6°C). However, the S.5 and 9 increased mean of PET 0.2°C (mean 40.6°C), and S.2 and 3 showed the highest thermal environment with mean of PET 41°C or higher.

Therefore, the method of planting trees was found to have a great effect on heat reduction. Also, it is an effective way of a rainwater garden, a green roof, and a vertical garden. A Cool roof and a cool pavement with high reflectivity would create a more pleasant environment if applied to the building roof.

I. 서언

올 해 여름철은 기상관측 111년 만에 최고 높은 기온을 기록했다(기상청 보도 자료, 2018). 낮 서울의 기온은 39.6℃, 밤의 기온은 30.3℃로 1994년 7월 24일 38.4℃ 보다 1.2℃만큼 높게 나타났다. 이러한 영향으로 수도권 지역의 폭염일수와 열대야일수가 증가 하면서 열질환자수가 증가하고, 열환경적으로 도시민의 삶의 질은 떨어지고 있다. 국립환경과학원 보도자료에 따르면, 폭염주의보가 발생했던 2018년 7월 19~20일과 폭염경보가 발생했던 8월2~3일 수원 호매실 택지개발지구 열환경 측정 9곳에서 산림을 제외한 그린 및 그레이 모든 인프라에서 physiological equivalent temperature(PET; Höppe, 1999) 기준으로 인간들이 매우 심한 열스트레스를 받는다는 연구결과가 나왔다(환경부 보도자료, 2018). 이러한 도시 열환경 악화로 인해 도시의 미기후요소들(기온, 습도, 풍속, 태양 및 지구 복사에너지)과 인간 열환경지수인 PET를 예측 할 수 있는 ENVI-met 컴퓨터 프로그램을 이용한 도시 열환경 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다.

국내에서 진행된 연구로는 실측자료 없이 ENVI-met만을 이용하여 아파트 주동형태 및 배치에 따른 기온과 풍속의 변화를 알아본 연구(Kim et al., 2009), 컴퓨터 시뮬레이션의 정확성을 알아보기 위해, 기존 도시지역의 포장재료에 따른 열환경 실측자료와 ENVI-met 모델의 결과값을 비교한 연구(Song et al., 2014), 경상남도 창원에 위치한 대학 캠퍼스 14개 지점의 실측 PET와 ENVI-met의 PET를 비교 해본 연구(Jeong et al., 2016)들이 있고, 기존의 도시공간에 조경적 요소인 자연적 요소와 인공적 요소를 추가 및 변형하여 도시의 열환경 변화를 분석한 연구들이 있다. 먼저 자연적 요소인 식생을 변형한 연구로는 초본, 관목과 교목의 수종과 식재유형을 다르게 하여 공동주택 단지 내 열환경 저감 효과를 살펴본 연구(Moon and Jang, 2012), 기존 도시 저층주거지역에 옥상녹화를 조성 할 경우, 풍속의 변화에 따른 주변 기온의 저감효과 범위를 알아본 연구(Kim et al., 2013)들이 있다. 다음으로 기존 도시공간에 인공포장재료 대신 수공간을 조성하여 도시 열환경의 변화를 살펴본 연구로는 도시의 열섬현상을 완화하기 위해 기존 아파트 단지 내에 수공간을 조성하여 기온과 풍속의 변화를

살펴본 연구(Park et al., 2011) 하천복원사업으로 복원 전과 후의 대상지 기온변화를 살펴본 연구(Jeong, 2012)들이 있다.

국의 연구에서는 여름철 도시의 열환경을 개선하기 위해 애리조나주에 위치한 실험대상지에서 ENVI-met 비교검증 후 피닉스시의 정형적인 거주형태에 따라 가장 더운 오후 도시의 열환경을 분석한 연구(Middel et al., 2014), 미기후요소인 기온, 상대습도, 총 복사에너지, 평균복사온도들과 열환경지수 모델인 Predicted Mean Vote(PMV)들의 ENVI-met 결과와 현장조사 결과를 비교해 본 연구(Salata et al., 2016), 캐나다 나나이모시와 대한민국 창원시의 도시들을 대상으로 Human Urban Radiation Exchange Simulation(HURES; Park, 2011)과 ENVI-met을 이용하여 Universal Thermal Climate Index(UTCI; Bröde et al., 2012a, 2012b; <http://www.utci.org>)를 분석하고, 인간 생명기후지도(Human Bioclimatic Map)를 만든 연구(Park et al., 2014)들이 있다.

본 연구에서는 우리나라 가구 전체의 48.6%인 9,422천 가구가 살고 있는(통계청 보도자료, 2016) 아파트의 전형적인 특징을 잘 보여주는 마곡지구 아파트 단지 내에서 인체 가슴높이인 1.2m에서의 미기후를 측정하고, 인간 열환경지수를 산출한 뒤 그 지역의 컴퓨터 시뮬레이션 ENVI-met의 미기후 요소들과 인간 열환경지수 PET를 시간대 별로 비교검증을 하고자 한다. 그 이후에는 보정단계를 거쳐 서울특별시 고덕강일 지구 아파트 예정부지의 설계안을 기본으로 다양한 시나리오를 구성하여 인간들에게 쾌적한 열환경을 조성 할 수 있는 조경계획 및 설계방법을 찾아보고자 한다.

II. 연구방법

1. 미기후조사

ENVI-met 결과값과 실측자료 비교검증을 위해 서울특별시 강서구 마곡서1로 100 마곡엠밸리 6단지아파트에서 2018년 7월 18일 09:00~18:00까지 아파트 중심, 옥상(시멘트포장), 옥상(녹화), 운동장(잔디포장), 어린이놀이터(폴리우레탄포장), 가로수길(블럭포장) 총 6지점에서 미기후 측정을 진행하였다(Figure 1). 측정된 미기후 요소들은 기온, 상대습도, 풍속, 풍향, 태양 및 지구복사에너지들을 인체 가슴높이인 1.2m에서 측정하였다(Table 1).

그 이후에는 측정된 미기후 요소들을 RayMan Pro. Ver. 2.2(Matzarakis et al., 2010; <http://www.urbanclimate.net/rayman>)에 입력을 한 후에 인간 열환경지수인 PET, UTCI를 산출했다.



Figure 1. Study sites for micro-climatic data measurement in the Magok

Table 1. Instruments for micro-climatic data measurement

Instruments			
Data	Name	Accuracy	Manufacture
Radiation	CNR4 Net Radiometer	$\leq 1\%$ (-40-80 °C)	Kipp & Zonen Inc.
Air temp. and Relative humidity	HMP155A	· Air temp.: $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (-80-60 °C) · Relative humidity: 2 % (0-90 %) 3 % (90-100 %)	Campbell Scientific Inc.
Wind speed and direction	Met one 034B-L Windset	· 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: $\pm 4^{\circ}$	
Data storage (Datalogger)	CR1000	$\pm 0.06\%$ (0-40 °C)	

2. 마곡지구 및 고덕강일지구 컴퓨터 시뮬레이션 모델

도시의 열환경을 미기후 단위로 분석하기 위해 전 세계적으로 많이 사용하고 있는 ENVI-met 4. 3. 1 Winter1718 version을 이용하였다. 마곡지구 ENVI-met area input file과 configuration file은 마곡엠밸리 6단지 아파트를 중심으로 만들었다(Figure 2). Model domain은 X×Y×Z방향의 분석 크기를 3m×3m×1m로 총 분석체적을 750m×660m×105m로 만들었고, 시뮬레이션의 진행을 원활하게 하기 위해 Nesting area 5를 추가했다. ENVI-met 4.0 version 부터는 simple forcing 과정을 통해 시간당 기온과 상대습도를 입력 할 수 있어 여름철(2018년 7월 18일)에 09:00~18:00까지 측정된 자료와 그 외 시간대의 기온과 상대습도는 각각 서울특별시 강서구 화곡동, 강서구 공항동에 위치한 지역별상세관측자료(automatic weather system, AWS)자료를 이용하였다(Table 2). 시뮬레이션 시간은 2018년 7월 18일 05:00~7월 19일 04:00까지 총 24시간 진행하였다. ENVI-met 결과값과 실측자료를 비교하기 위해 Microsoft office excel을 이용하였다.

조경계획 및 설계 방법에 따른 아파트 단지의 열환경을 분석하기 위해 고덕강일지구 아파트 계획 부지를 중심으로 ENVI-met 자료를 만들었다(Figure 3). X×Y×Z방향의 분석 크기를 1m×1m×1m로 총 분석체적 238m×218m×85m로 구축하였다(Figure 4). 시간은 2017년 8월 18일로 여름철 서울특별시의 1981~2010년 30년 평균기온, 평균최고기온, 평균최저기온, 평균상대습도, 평균풍속들과 가장

유사한날의 기후자료를 이용하였다.

기온, 상대습도, 풍속자료는 http://www.weather.go.kr/weather/climate/avetage_30years.jsp에서 참고하였으며, 풍향자료는 <http://data.kma.go.kr/data/grnd>에서 참고했다(Table 3).

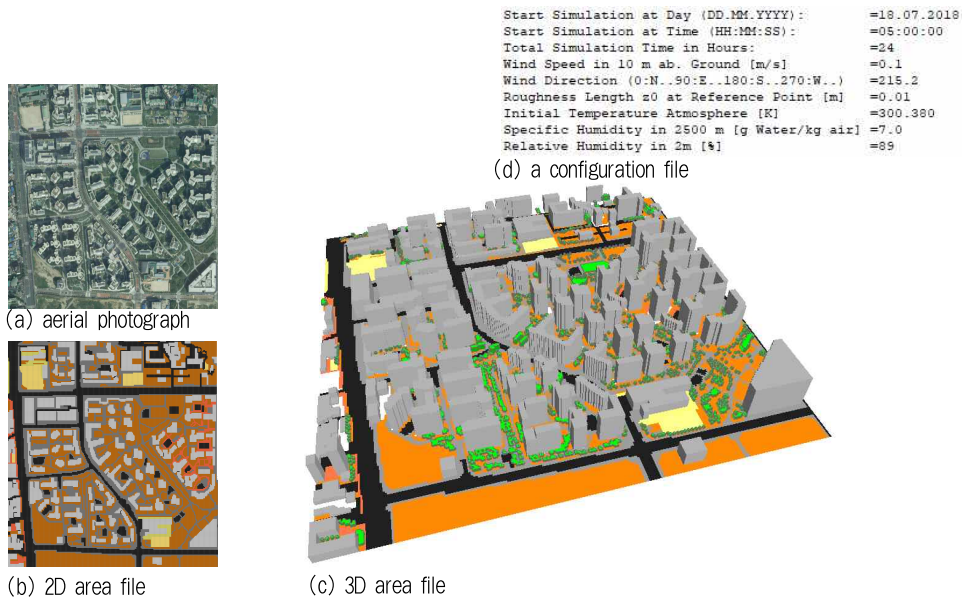


Figure 2. Area input files and a configuration file for ENVI-met computer simulation in the Magok area: (a) aerial photograph, (b) 2D area file, (c) 3D area file and (d) a configuration file

Table 2. Simple forcing data for ENVI-met configuration files in the Magok area from measured micro-climatic data and two weather station data

Summer (July 18)			
Time	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind speed (ms ⁻¹)
5:00	22,6	89,0	0,1 (wind direction: 215,2)
6:00	22,9	90,0	
7:00	23,2	89,0	
8:00	24,9	87,0	
9:00	27,1	74,6	
10:00	28,2	68,3	
11:00	29,0	65,0	
12:00	29,7	62,4	
13:00	30,9	58,0	
14:00	31,7	53,2	
15:00	32,0	50,8	
16:00	31,7	52,2	
17:00	31,3	55,6	
18:00	30,7	57,3	
19:00	29,6	60,0	
20:00	28,2	70,0	
21:00	27,1	75,0	
22:00	26,1	81,0	
23:00	25,7	83,0	
0:00	24,7	84,0	
1:00	25,0	86,0	
2:00	24,4	87,0	
3:00	23,2	88,0	
4:00	22,6	89,0	



Figure 3. The Goduck-gangil area master plan from the Seoul housing and communities corporation

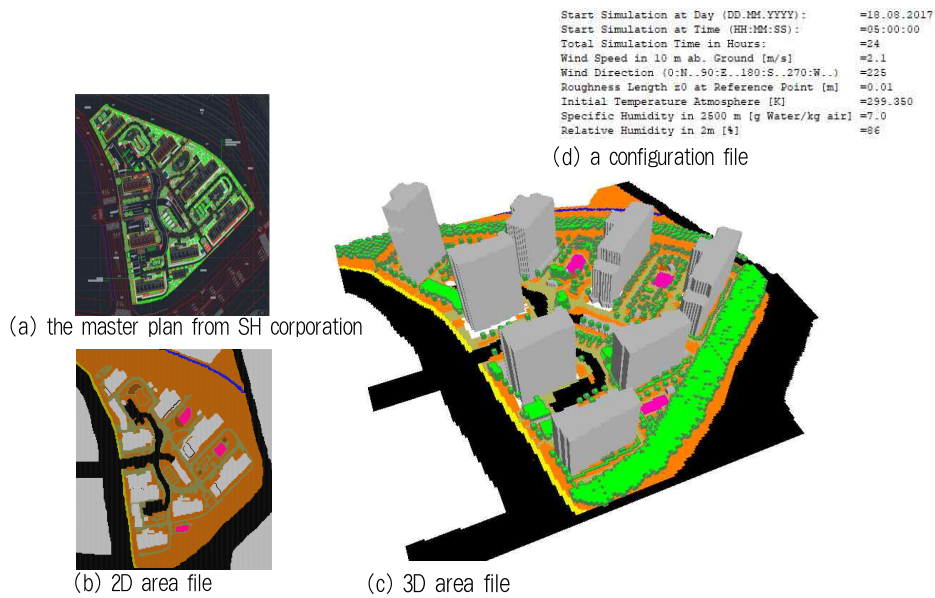


Figure 4. Area input files and a configuration file for ENVI-met computer simulation in the Goduck-gangil area: (a) the master plan from the Seoul housing and communities corporation, (b) 2D area file, (c) 3D area file and (d) a configuration file

Table 3. Simple forcing data for ENVI-met configuration files in the Goduck-gangil area from Seoul weather station data

Summer (Aug. 18, 2017)			
Time	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind speed (ms ⁻¹)
5:00	24.0	86	2.1 (wind direction: 225)
6:00	23.9	86	
7:00	24.0	85	
8:00	24.4	85	
9:00	24.6	82	
10:00	25.2	79	
11:00	26.6	70	
12:00	27.3	66	
13:00	28.5	60	
14:00	28.4	66	
15:00	29.4	62	
16:00	30.0	59	
17:00	30.5	57	
18:00	29.3	62	
19:00	28.4	60	
20:00	27.3	68	
21:00	26.3	77	
22:00	25.4	83	
23:00	25.2	83	
0:00	24.9	84	
1:00	24.3	87	
2:00	24.0	87	
3:00	23.6	86	
4:00	23.4	85	

3. 고덕강일지구 컴퓨터 시뮬레이션 모델 시나리오

서울주택도시(SH)공사의 서울고덕강일 1지구 2단지 기존 설계안을 기본 시나리오(S.1)로 단지 내·외 녹지계획을 축소 및 제거한 시나리오들(S.2, S.3)과 열저감 효과를 나타낼 수 있는 식재 계획 변경(S.4), 쿨페이브먼트 적용(S.6), 식생수로 및 식재 계획(S.7), 쿨루프(S.5)와 옥상녹화(S.8), 벽면녹화(S.9), 아파트형태 변경(일자형에서 타워형으로, S.10) 등 다양한 시나리오들로 구성하여 컴퓨터 시뮬레이션을 24시간 동안 진행하였다(Table 4). 이후에는 종합안으로 이전 시나리오들의 모든 열저감 효과가 있는 조경적 요소들을 적용한 시나리오를 추가적으로 만들었다(S.4_final).

SH공사가 설계한 서울고덕강일 1지구 2단지의 아파트 단지를 중심으로 만들어진 ENVI-met area input file에 나타난 각 포장면적들을 산출하기 위해 Adobe Photoshop CC 2018을 사용하였다(Table 5). 기본 S.1 포장재료는 자연토양이 35.8%, 아스팔트와 콘크리트가 49.3%로 대부분의 면적을 차지하고 있다. 수목식재는 기본 S.1 시나리오에서 10,258m², S.4에서는 S.1보다 450m² 증가된 10,708m²를 차지하였다. 식재구성은 20cm 높이의 잔디, 1m 높이의 관목, 다양한 높이의 교목으로 구성되어 있다. 포장재료들에 대한 데이터베이스 입력 요소인 태양복사에너지 반사율(albedo)과 지구복사에너지 방사율(emissivity)에 대한 자료는 실측자료를 참고하여 수정하였다(Table 6).

Table 4. Computer simulation scenarios for the Goduck-gangil area

	Scenario
S.1 (Criteria)	Basic Design of Apartment Complex. - Application of Site Layout in Apartment Complex. - Application of the planning technique applied to the design of the complex. Application of basic plan for green fields within the complex (existing apartment plant area + general green area pattern) and outside of the complex (buffer green area + link green).
S.2	Without default greenfield planning in S.1.
S.3	Not applied to basic and external green areas (buffer green + link green) plan in S.1.
S.4 (Multi-layered planting)	The road side and the outside of the complex are changed to conifer trees, and the green space within the complex is changed to a multilayered plant pattern. -In the link green area (outside of northeast), the broadleaf trees (8m width and 6m height) are planted (3,304m ² , 6.4% of the total site area, and about 401 trees). -In the buffer green area (outside of southeast), the needle leaf trees (4m width and 6m height) are planted (2,908m ² , 5.6% of the total site area, and about 444). -In the complex area, multi-layered plants are planted (4,979m ² , 9.6% of the total site area, and about 582 trees).
S.5 (Cool roof)	Cool roof is installed on all roofs of the buildings inside the complex (including apartments, all buildings with weak roof structure, etc.). *Application of cool roof albedo to 0.65 (based on 'Support for Building Energy Efficiency' albedo).
S.6 (Cool pavement)	Apply the heat exchanging paint to all roads and sidewalks in the complex, and cork for playground flooring in the complex. *Application of albedo (0.35) and emissivity (0.575) of heat exchanging paint.
S.7 (Rainwater garden)	Alteration of the existing garden into rainwater garden in the complex, and plant trees considering the sun's elevation and azimuth angles near the playground (three trees of 11m width and 18m height are planted near the playground).
S.8 (Rooftop garden)	Apply rooftop garden to all building roofs in the complex.
S.9 (Vertical garden)	Apply a vertical garden to building walls (vertical garden of size 20×10m ²).
S.10 (Tower type)	Alter the apartment form from a flat to a tower (concrete floor area including buildings is reduced 930m ²).
S.4_final	Green area -The road side and the outside of the complex are changed to conifer trees, and the green space within the complex is changed to a multi-layered plant pattern.
	Apartment roof -Apply cool roof to the half of roofs area (2,615m ²). -Apply rooftop garden to the other half of roofs area (2,615m ²).
	Facility roof -Apply cool roof to the facility roofs.
	Road / Sidewalk -Apply the heat exchanging paint to the pervious pavement (8,063m ²). *Application of albedo (0.35) and emissivity (0.575) of heat exchanger paint.
	Playground -Alteration of the playground flooring into cork (344m ²).
	Garden -Alteration of the existing garden into the rainwater garden (678m ²).
	Modification of tree height -Plant three trees considering the sun's elevation and azimuth angles near the playground.
Apartment wall -Apply vertical garden to building walls (each size of a building, 20×10m ² : total, 1,600m ²).	

Table 5. Surface types in ENVI-met area input files for the Goduck-gangil area

Type	Area (m ²)	Percentage (%)	
Soil	18,562	35.8	Vegetation - S.1: 10,684m ² (20.6%) - S.4: 11,207m ² (21.6%) - S.7: 11,092m ² (21.4%) - S.9 (vertical garden): 8×20×10m ² =1,600m ² (3.1%)
Pedestrian street inside the apartment area	6,245	12.0	
Concrete	13,326	25.7	- S.8 (Green roof): 5,229m ² (10.1%) - S.10: 12,396m ² (23.9%)
Asphalt	12,236	23.6	Inside the apartment area: 1,818m ² (3.5%)
Pedestrian street outside the apartment area	682	1.3	
Water	261	0.5	- S.7: inside the apartment area 678m ² (1.3%)
Polyurethane	344	0.7	
Wood plank	228	0.4	
Total	51,884	100.0	

Table 6. Albedos and emissivities of surface materials

Materials	Albedo	Emissivity
Asphalt	0.08	0.97
Concrete	0.18	0.96
Pervious pavement	0.18	0.9
Polyurethane	0.112	0.99
Cool pavement	0.35	0.575
Cork court	0.17	0.79

Ⅲ. 연구결과 및 고찰

1. 마곡지구

1-1. 마곡지구 여름철 인간 열환경 분석

여름철 마곡엠밸리 6단지아파트 기온은 어린이놀이터지점이 평균 31.2℃로 가장 높게 나타났으며, 나머지 5 지점들에서는 평균 30.4~30.5℃로 미미한 차이를 보였다(Figure 5). 상대습도는 식물이 있는 가로수길, 옥상녹화, 운동장 3지점들이 나머지 지점들에 비해 평균 0.8% 높게 나타났지만, 기온과 동일하게 차이가 거의 나지 않았다. 풍속은 시간이 지날수록 강해지며, 옥상녹화지점이 평균 1.5ms⁻¹로 가장 높았고, 다음으로 운동장지점이 오픈스페이스의 영향으로 평균 1.4ms⁻¹로 높았다. 다른 지점들은 평균1.0~1.2ms⁻¹로 미미한 차이를 보였다. 인체의 열환경에 가장 영향을 많이 주는 평균복사온도는 폴리우레탄으로 포장된 어린이놀이터지점이 평균 64.2℃로 가장 높았고, 옥상시멘트지점이 평균 63.7℃, 아파트중심지점 평균 62.3℃로 나머지 세 지점들보다 평균 3.0~5.7℃ 높게 나타났다. 옥상지점들의 평균복사온도 비교 시 옥상녹화지점이 옥상시멘트 지점보다 평균 7.1℃ 열저감 효과를 보였다.

인간 열환경지수 모델인 PET에서는 6지점 모두 41.0℃ 이상으로 매우 더움으로 나타났다(Table 7). 어린이놀이터지점이 평균 46.2℃로 가장 높았고, 옥상시멘트지점이 평균 45.2℃로 두 번째로 높게 나타났다. 가장 낮게 나온 지점은 평균 40.7℃로 옥상녹화지점으로 옥상시멘트지점 보다는 평균 4.5℃, 어린이놀이터지점 보다는 평균 5.5℃만큼 낮은 열환경을 보였다. 시간대별 최대차이는 15:05에 어린이놀이터지점과 18.1℃로 가장 큰 차이를 보였다. UTCI에서는 PET와 유사하게 옥상녹화지점이 평균 37.8℃로 가장 낮게 나왔으며, 옥상시멘트지점보다는 평균 2.0℃, 어린이놀이터 지점보다는 평균 2.6℃만큼 열저감 효과를 보였다. 시간대별 최대차이는 PET보다 85분 늦은 16:30에 어린이놀이터지점과 9.8℃의 차이를 보였다.

위의 결과 옥상녹화는 PET 평균 3/4단계~1단계(최대 3단계), UTCI 평균 1/3~1/2단계(최대 1.5단계)의 열환경 개선효과를 보였다.

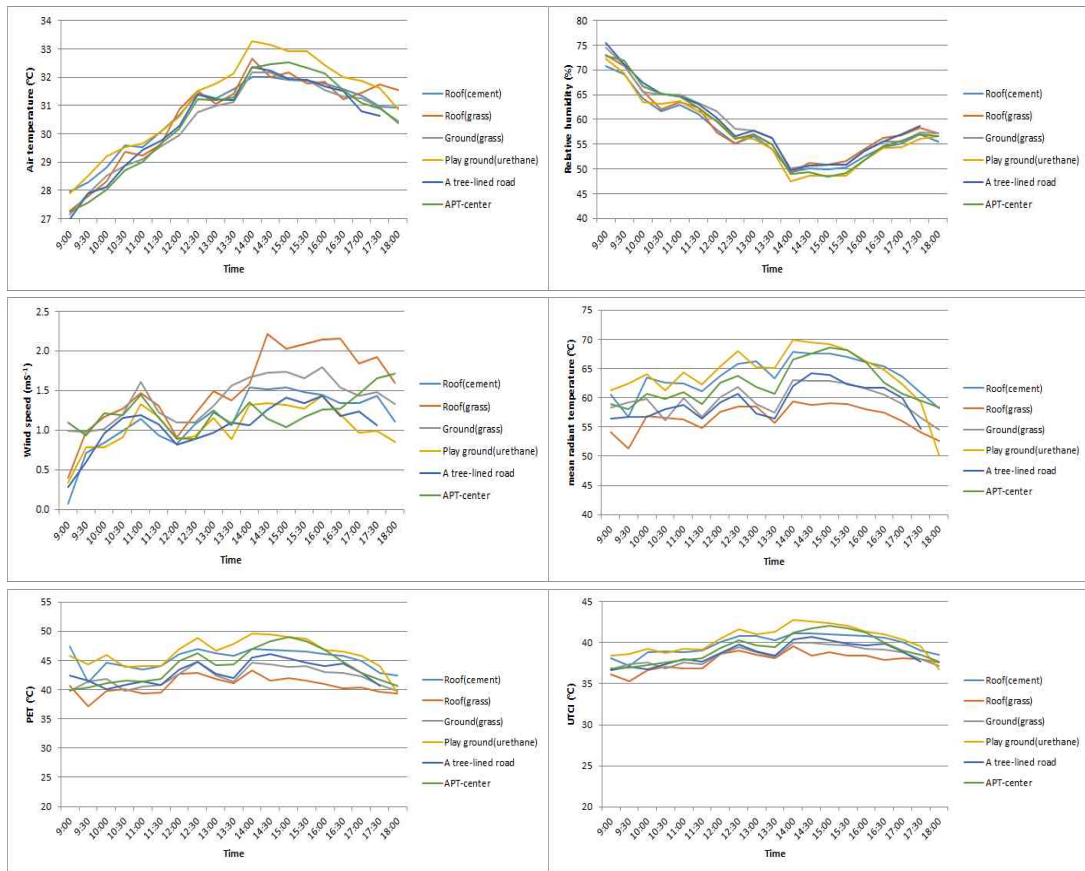


Figure 5. Micro-climatic factors of the Magok area in summer

Table 7. 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 heat 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

1-2. 미기후 측정 자료와 컴퓨터 시뮬레이션 결과 비교

마곡지구 여름철 미기후 자료와 ENVI-met 결과값을 비교 해 본 결과 5개의 비교 요소들 중 평균복사온도와 PET에서 가장 높은 차이를 보였다(Table 8). 평균복사온도는 아파트 중앙에서 평균 11.5℃ 만큼 미기후 자료가 높은 값을 보였고, PET는 오픈스페이스인 운동장에서 평균 7.1℃만큼 여름철 미기후 자료가 낮게 나타났다. 오픈스페이스인 놀이터와 운동장에서 각각 평균복사온도 차이가 평균 0.3℃, 1.6℃로 작은 차이를 보였고, PET는 평균복사온도와 다르게 아파트 중심과 가로수길에서 평균 약 0.2~0.5단계의 차이를 나타냈다.

보정방법을 찾기 위해, 옥상 2곳을 제외한 동일한 높이인 4곳 지점(놀이터, 운동장, 가로수길, 아파트중심)들의 미기후 요소 차이값들과 측정된 시간들의 상관성 분석을 해본 결과, 기온과 상대습도는 각각 결정계수(coefficients of determination, r^2)가 0.805, 0.687로 높은 상관성을 보였다(Figure 6). 그러나 ENVI-met 프로그램 특성상 풍속이 시간에 상관없이 고정되어있기 때문에 풍속의 차이값과 시간의 상관성은 $r^2=0.051$ 로 아주 낮게 나타났다. 그래서, Fig. 6의 상관식 대신, 지점들의 시간별 평균값(Table 9)을 기준으로 각 지점들의 풍속을 보정하여 PET계산에 이용하였다. 이때, 풍속의 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE)를 계산해 본 결과, $RMSE=0.33ms^{-1}$ 로 나타났다. 이 수치는 여름철 풍속이 약할 때, $0.23ms^{-1} \approx 1^\circ C$ PET의 차이를 만들 수 있어(Jo, 2018) 그 영향이 적지 않을 것으로 여겨지나, 현재로서는 가장 작은 차이를 보이는 방법이라서 적용하였다. 평균복사온도의 차이값과 시간은 $r^2=0.492$ 상관성을 보였지만, 각 지점들의 하늘시계지수(sky view factor, SVF)를 추가하여 SPSS Ver. 20을 이용해 Linear Regression을 재분석 해 본 결과 $r^2=0.546$ 의 유의성을 보였다.

고덕강일지구 보정은 Microsoft office excel프로그램을 이용하였다. 미기후 요소인 기온, 상대습도, 풍속 보정은 시간별로 산출한 보정비율을 가지고, 보정비율이 양의 정수 경우에는 고덕강일지구 시나리오들 결과값에 더하고, 음의 정수 경우에는 뺄셈하였다(Table 9; Eq. 1~3). 평균복사온도는 각 시나리오별 고덕강일지구 지점들의 SVF를 ENVI-met LEONARDO 4.3.0을 통해 산출한 뒤, 보정비율에 추가하여 계산을 하였다(Eq. 4). 보정시간은 마곡지구에서 실측한 09:00~18:00

으로 제한을 두었다.

$$T_{a_new} = T_{a_old} - 0.0045 \cdot t^3 + 0.0647 \cdot t^2 + 0.8051 \cdot t - 9.2086 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$RH_{new} = RH_{old} + 0.0089 \cdot t^3 + 0.1486 \cdot t^2 - 9.2321 \cdot t + 68.125 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$U_{new} = U_{old} - 0.0025 \cdot t^3 + 0.1059 \cdot t^2 - 1.4056 \cdot t + 6.812 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$T_{mrt_new} = T_{mrt_old} + 1.107 \cdot (0.1035 \cdot t^3 - 4.3537 \cdot t^2 + 58.816 \cdot t - 254.51) + 4.173 \cdot SVF - 3.12 \quad (\text{Eq. 4})$$

위의 식에서, T_a , RH, U, T_{mrt} 는 각각 기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도를 뜻한다. t 는 시간을, SVF는 하늘시계지수를 뜻한다.

Table 8. The mean difference between measured micro-climatic data and ENVI-met simulation results. T_a , RH, U and T_{mrt} mean air temperature, relative humidity, wind speed and mean radiant temperature, respectively

Difference = Micro-climatic data - ENVI-met_results						
Location	Season	T_a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T_{mrt} (°C)	PET (°C)
Playground (polyurethane)	Summer	1.8	-3.6	0.8	-0.3	-4.9
Ground(grass)	Summer	1.2	-2.8	1.1	-1.6	-7.1
A tree-lined-road	Summer	1.2	-2.7	0.9	5.2	-2.7
APT-center	Summer	1.3	-3.8	1.1	11.5	1.0

Table 9. Correction values of micro-climatic factors by times

Time	T_a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)
9	0.00	3.6	0.67
10	0.81	-0.4	1.22
11	1.49	-3.6	1.29
12	1.99	-5.9	0.42
13	2.31	-7.2	0.84
14	2.40	-7.6	1.47
15	2.24	-6.9	1.04
16	1.80	-5.1	1.58
17	1.07	-2.1	1.00
18	0.00	2.0	1.38

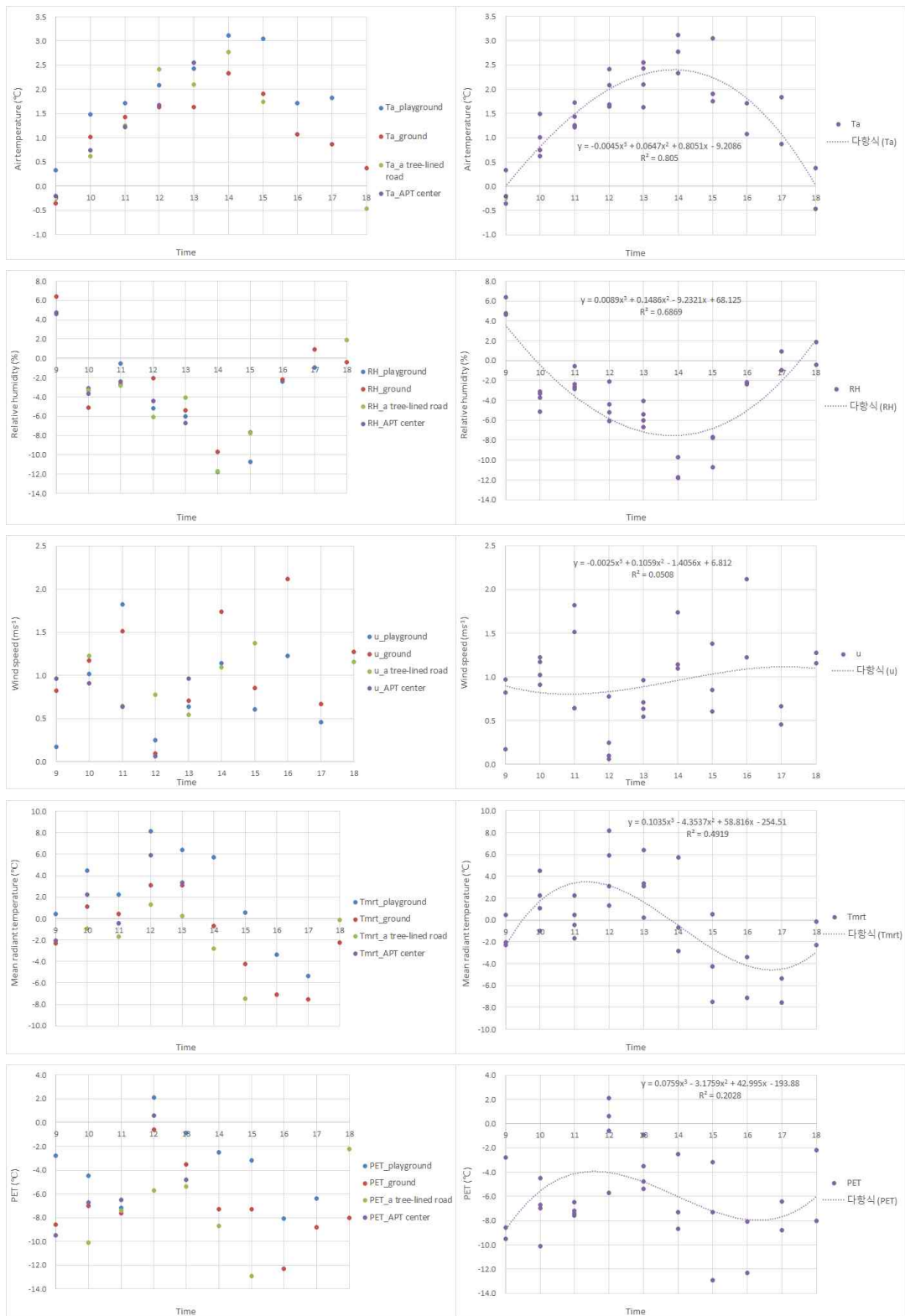


Figure 6. Linear regression analysis between times and differences of measured micro-climatic data and ENVI-met results

2. 고덕강일지구

2-1. 고덕강일지구 시나리오별 결과

가. 미기후요소 결과

S.1을 기반으로 만든 10개의 시나리오들의 미기후 요소들을 S.1과 비교해 본 결과, 모든 시나리오에서 기온, 상대습도, 풍속의 차이는 거의 없었다(Table 10). 최대 기온차이는 S.6에서 주간에 0.29℃, 야간에 0.22℃ 만큼 감소했고, 상대습도는 S.6에서 주간에 1.5% 야간에 0.8%로 가장 높은 차이를 보였다. 풍속은 옥상녹화를 적용한 S.8에서 0.14~0.15ms⁻¹(6:00~8:00)의 최대 저감 현상이 발생하였으며, 낮 시간대(평균 0.12ms⁻¹)와 동일하게 밤 시간대(평균 0.09ms⁻¹)에도 풍속이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 다중식재를 실시한 S.4에서도 평균 0.03ms⁻¹ 감소하는 것으로 나타났으며, 다중식재와 옥상녹화를 같이 적용한 S.4_final에서도 평균 0.03ms⁻¹ 저감되는 것으로 나타났다.

Jo(2018)의 PET 민감도 조사에 따르면, 여름철 기온이 20~40℃ 범위에서 1℃ 변할 때와 평균복사온도가 30~80℃ 범위에서 1℃ 변할 때 PET는 0.375℃ 만큼 비례하여 변화하는 것으로 나타났다. 또한, 상대습도가 1.0% 변할 때 0.04℃만큼 정비례하여 변화하며, 풍속은 0.3~3.0ms⁻¹ 범위에서 대략 1.0ms⁻¹를 기준으로 낮을 때는 0.1ms⁻¹ 당 0.43℃, 높을 때는 0.1ms⁻¹ 당 0.14℃ 씩 반비례하는 것으로 나타났다. 이를 기준으로 최대 기온차이를 보인 S.6의 12:00~14:00시 0.4℃는 0.15℃ PET 저감효과를 보이는 것으로 나타났으며, 상대습도에서 가장 큰 차이를 보인 S.6의 11:00~12:00시 2.3%는 0.09℃ PET 상승효과를, 최대 풍속저감을 보인 S.8 6:00시 0.15ms⁻¹는 0.65℃ PET 상승효과를 보이는 것으로 나타났다. 그러므로, 시나리오별 기온과 상대습도의 변화는 인간 열환경에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보이며, 풍속의 영향도 크지는 않으나 기온과 상대습도에 비해서는 어느 정도 영향을 미친다고 할 수 있겠다.

옥외공간에서 인간 열환경지수에 가장 큰 영향을 주는 평균복사온도의 차이는 전체 부지에 식재계획을 적용하지 않은 S.3에서 낮 평균 2.63℃(8:00에 최대

3.27℃) 높게 나타났으며, 단지 내 다층식재를 적용한 S.4에서 낮 평균 2.34℃ (9:00에 최대 3.11℃) 가장 낮게 나타났다. 식재량의 차이가 가장 큰 S.3과 S.4를 비교해 보면, 다층식재를 적용한 S.4가 단지 내외부에 식재를 하지 않은 S.3에 비해 평균 2.33℃ 낮은 것으로 나타났으며, 낮 시간대에는 S.4가 평균 4.97℃ (8:00~9:00에 최대 5.66~6.11℃) 저감 효과를 나타내었으나, 밤 시간대에는 반대로 S.3가 평균 0.55℃(6:00에 최대 1.20℃) 낮은 것으로 나타났다. 이것은 수목이 낮 시간대에는 태양복사에너지 차단효과를 보이지만, 밤 시간대에는 하늘시계지수(sky view factor)를 낮추어 지구복사에너지 상승효과를 만들기 때문이다. 여름철 PET의 민감도 분석에서, 평균복사온도 2.67℃ \approx 1℃ PET로 나타나(Jo, 2018), 수목식재 유무에 따라 낮 시간대에 평균 1.86℃ PET(최대 2.29℃ PET) 저감 효과가 있는 것으로 보인다.

다음으로 빗물정원을 적용한 S.7에서 평균 0.9℃ 저감 효과를 보였으며, 모든 조경적 요소를 적용한 S.4_final에서 평균 0.73℃의 저감 효과를, 옥상녹화를 적용한 S.8에서 평균 0.68℃ 저감 효과를 보였다. 그러나, 하루종일 저감 효과를 보였던 S.7(낮 시간대 평균 1.33℃, 밤 시간대 평균 0.42℃)과 S.8(0.78℃, 0.57℃)에 비해, S.4_final에서는 낮 시간대에는 평균 1.88℃(15:00에 최대 2.52℃) 저감 효과를 보였지만, 밤 시간대에는 반대로 평균 0.52℃(6:00에 최대 0.82℃) 상승 효과를 보이는 것으로 나타났다. 이것은 S.3와 S.4 차이에서도 보였듯이, S.4_final에서 다층식재를 적용한 S.4와 벽면녹화를 적용한 S.9를 모두 적용하여 수목식재량이 너무 많아 그에 따른 역작용으로 밤 시간대에 상승 효과를 보이는 것으로 판단된다.

쿨페이브먼트를 적용한 S.6와 건물을 타워형으로 변경한 S.10에서도 각각 평균 0.64℃, 0.36℃ 저감 효과를 보여 주었다. 그러나, 밤 시간대 S.6에서 평균 0.78℃(19:00시에 최대 0.93℃)로 가장 낮게 나타났는데, 이러한 이유는 다른 포장재료에 비해 지구복사에너지 방사율을 0.575(실제 0.725)로 낮게 입력하여 시뮬레이션을 진행했기 때문이다. 밤 시간대에 두 번째로 낮게 나온 S.10에서는 평균 0.71℃로 17:00시에 최대 1.32℃ 저감 효과를 보였으나, 반대로 10:00~11:00시에 최대 1.33~1.48℃ 상승 효과를 보였다. 나머지 조경적 요소들 중 쿨루프(S.5)는 밤 시간대에는 평균 0.63℃ 저감 효과를 보였으나, 태양복사에너지 반사율(albedo)이

0.65로 콘크리트의 반사율(0.18)보다 3배 이상 높게 나타나, 건물 옥상에서 반사되는 태양복사에너지의 영향으로 낮 시간대에는 평균 0.5℃ 상승하는 효과를 보였다. 벽면녹화를 적용한 S.9에서도 밤 시간대에는 평균 0.57℃의 저감 효과를 보였으나, 낮 시간대에 0.43℃로 상승효과를 보였다. 이것도 아파트 건물의 콘크리트의 albedo(0.18)보다 식물의 albedo(0.2)가 높아서 발생한 현상으로 생각된다.

나. 인간 열환경지수(PET) 결과

인간 열환경지수인 PET에서는 평균복사온도와 동일하게 단지 내 다층식재를 적용한 S.4에서 낮 평균 0.98℃(최대 1.3℃)만큼 열 저감효과를 나타냈고, 모든 조경적요소를 적용한 S.4_final과 빗물정원을 적용한 S.7에서 각각 0.63, 0.56℃ 열저감효과를 나타냈다. 그러나, 녹지계획을 축소하고 적용하지 않은 S.2, S.3에서는 각각 낮 평균 0.42, 0.9만큼 열 상승효과를 보였고, 쿨루프(S.5)와 벽면녹화(S.9)를 적용한 시나리오들에서도 0.15℃ 이하의 아주 작은 열상승 효과를 나타냈다. 나머지 시나리오들에서는 낮 평균 0.5미만의 미미한 열저감효과를 나타냈다.

가장 더웠던 15:00의 PET결과를 살펴본 결과, 모든 시나리오에서 평균 39℃ 이상으로 더움에서 매우 더움 사이의 열환경을 보였지만, S.4에서는 평균 1.16℃만큼 최대 PET 저감효과를 나타냈고, 모든 조경적 요소들을 적용한 S.4_final에서 다층식재와 옥상녹화로 인해 풍속이 감소하여 단지 내 다층식재를 적용한 S.4보다는 0.32℃ 낮은 열저감 효과를 보였다.

밤 시간대에는 건물을 타워형으로 변경한 S.10에서 0.5℃의 최대 PET 저감효과를 나타냈고, 쿨페이브먼트를 적용한 S.6에서 0.44℃만큼 저감효과를 나타냈다. 그러나 S.4_final에서는 수목의 영향으로 인해 평균 0.27℃만큼의 상승효과를 보였고, 나머지 시나리오들에서는 0.35℃이하의 미미한 PET 저감효과를 나타냈다.

PET 저감효과를 사람들이 알기 쉬운 기온(air temperature)으로 변환하여 본다면, 1℃ PET≈기온 2.67℃이므로(Jo, 2018) S.4의 낮 평균 0.98℃(9:00시에 최대 1.3℃)의 열 저감효과는 기온 2.6℃를 낮추는 효과와 동일하며, 최대효과였던 1.3℃ PET 저감효과는 기온 3.5℃를 낮추는 효과를 보이는 것이다. 특히, 수목식재

는 전혀 하지 않은 S.3와 S.4를 비교해 보면, S.4가 낮 평균 1.88℃(최대 2.53℃)의 열 저감효과를 나타내, 기온상으로 평균 5.0℃(최대 6.8℃)의 기온 저감효과를 나타낸다고 할 수 있겠다.

Table 10. Mean values of air temperature, relative humidity, wind speed, mean radiant temperature and PET of scenarios

		Air temperature (°C)																					
Time Scenario	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4
S.1	24.0	24.1	24.7	25.5	27.4	29.2	30.5	31.6	32.1	32.4	32.2	31.5	29.7	28.6	27.8	27.0	26.3	25.9	25.6	25.1	24.8	24.5	24.2
S.2	24.0	24.1	24.7	25.5	27.3	29.1	30.4	31.6	32.1	32.3	32.2	31.5	29.7	28.6	27.8	27.0	26.3	25.9	25.6	25.2	24.8	24.5	24.2
S.3	24.0	24.1	24.7	25.5	27.3	29.1	30.4	31.5	32.1	32.4	32.2	31.5	29.7	28.7	27.8	27.0	26.3	25.9	25.6	25.2	24.8	24.5	24.2
S.4	23.9	24.0	24.6	25.4	27.3	29.1	30.4	31.6	32.1	32.3	32.1	31.4	29.5	28.5	27.6	26.8	26.1	25.7	25.4	25.0	24.7	24.3	24.1
S.5	23.9	24.0	24.6	25.5	27.3	29.2	30.5	31.6	32.1	32.4	32.2	31.4	29.6	28.5	27.7	26.8	26.1	25.7	25.4	25.0	24.6	24.3	24.1
S.6	23.9	24.0	24.6	25.3	27.1	28.8	30.1	31.2	31.7	32.0	31.9	31.2	29.4	28.3	27.5	26.7	26.0	25.7	25.4	24.9	24.6	24.3	24.0
S.7	23.9	24.0	24.6	25.4	27.3	29.1	30.5	31.6	32.1	32.4	32.2	31.4	29.5	28.5	27.6	26.8	26.1	25.7	25.4	25.0	24.7	24.3	24.0
S.8	23.9	24.0	24.6	25.4	27.3	29.1	30.5	31.6	32.1	32.3	32.2	31.4	29.5	28.5	27.6	26.8	26.1	25.7	25.4	25.0	24.7	24.3	24.1
S.9	23.9	24.0	24.6	25.5	27.4	29.2	30.5	31.6	32.1	32.4	32.2	31.4	29.6	28.5	27.7	26.8	26.1	25.7	25.4	25.0	24.6	24.3	24.1
S.10	23.9	24.0	24.6	25.4	27.3	29.1	30.5	31.6	32.1	32.3	32.1	31.4	29.5	28.5	27.6	26.8	26.1	25.7	25.4	24.9	24.6	24.3	24.0
S.4_final	24.0	24.1	24.8	25.6	27.5	29.3	30.6	31.8	32.3	32.5	32.3	31.6	29.7	28.7	27.9	27.1	26.4	26.0	25.7	25.3	24.9	24.6	24.3

		Relative humidity (%)																					
Time Scenario	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4
S.1	80.2	79.6	78.6	78.6	70.6	60.7	53.8	48.3	48.6	47.9	48.1	50.5	57.3	56.1	60.5	66.2	70.7	72.0	73.1	75.1	75.8	75.6	75.2
S.2	80.0	79.4	78.4	78.5	70.5	60.7	53.8	48.4	48.7	48.0	48.1	50.3	57.1	56.0	60.3	66.1	70.5	71.8	73.0	74.9	75.6	75.4	75.1
S.3	79.9	79.3	78.3	78.4	70.5	60.6	53.6	48.1	48.4	47.7	47.8	50.2	56.9	55.9	60.3	66.0	70.4	71.7	72.9	74.8	75.5	75.3	75.0
S.4	80.5	80.0	79.0	79.1	71.0	60.9	53.9	48.4	48.8	48.3	48.6	51.0	57.9	56.6	61.1	66.9	71.4	72.7	73.8	75.7	76.4	76.1	75.8
S.5	80.5	80.0	79.0	79.0	70.8	60.8	53.9	48.4	48.7	48.1	48.3	50.7	57.6	56.4	61.0	66.9	71.4	72.7	73.8	75.8	76.4	76.2	75.9
S.6	80.4	79.9	79.2	80.0	72.7	63.0	56.1	50.3	50.5	49.6	49.5	51.6	58.3	57.1	61.5	67.2	71.6	72.9	73.9	75.9	76.5	76.3	76.4
S.7	80.6	80.1	79.1	79.2	71.1	61.0	54.1	48.5	48.9	48.3	48.5	50.9	57.8	56.6	61.2	67.2	71.6	72.8	73.8	75.8	76.4	76.1	76.3
S.8	80.7	80.1	79.1	79.1	71.0	60.9	53.9	48.4	48.8	48.2	48.4	50.8	57.7	56.5	61.0	66.8	71.3	72.5	73.6	75.6	76.2	76.0	75.7
S.9	80.5	80.0	78.9	78.9	70.8	60.7	53.8	48.3	48.7	48.1	48.3	50.7	57.6	56.4	61.0	66.9	71.4	72.7	73.8	75.8	76.4	76.2	75.9
S.10	80.6	80.1	79.1	79.1	71.1	61.0	54.1	48.6	49.0	48.4	48.6	50.9	57.8	56.6	61.2	67.1	71.6	72.9	74.0	76.0	76.6	76.4	76.0
S.4_final	80.5	79.7	78.6	78.5	70.4	60.4	53.5	48.1	48.5	47.9	48.2	50.7	57.4	55.9	60.3	66.1	70.5	71.8	72.9	74.9	75.5	75.3	75.0

		Wind speed (ms ⁻¹)																					
Time Scenario	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4
S.1	1.1	1.0	1.0	1.7	2.2	2.2	1.4	1.8	2.4	1.9	2.5	1.9	2.2	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
S.2	1.1	1.1	1.1	1.8	2.3	2.3	1.4	1.8	2.4	2.0	2.5	1.9	2.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
S.3	1.1	1.1	1.1	1.8	2.3	2.3	1.5	1.9	2.5	2.0	2.6	2.0	2.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
S.4	1.0	1.0	1.0	1.6	2.2	2.2	1.3	1.7	2.3	1.9	2.4	1.8	2.2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
S.5	1.1	1.0	1.0	1.7	2.2	2.3	1.4	1.8	2.4	1.9	2.5	1.9	2.2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
S.6	1.1	1.0	1.0	1.7	2.2	2.2	1.4	1.8	2.4	1.9	2.5	1.9	2.2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
S.7	1.0	1.0	1.0	1.6	2.2	2.2	1.3	1.8	2.4	2.0	2.5	1.9	2.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8
S.8	0.9	0.9	0.9	1.5	2.1	2.1	1.2	1.6	2.3	1.8	2.4	1.8	2.1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
S.9	1.0	1.0	1.0	1.7	2.2	2.3	1.4	1.8	2.4	1.9	2.5	1.9	2.2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
S.10	1.1	1.1	1.1	1.7	2.2	2.3	1.4	1.8	2.4	2.0	2.5	1.9	2.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
S.4_final	1.0	1.0	1.0	1.6	2.2	2.2	1.3	1.7	2.3	1.9	2.4	1.8	2.2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

		Mean radiant temperature (°C)																					
Time Scenario	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4
S.1	15.2	20.1	32.3	37.8	48.1	53.7	55.5	56.1	56.5	54.4	49.7	43.0	33.0	23.4	21.9	20.8	19.9	19.3	18.8	18.3	17.8	17.4	17.1
S.2	14.7	20.4	33.3	39.1	49.4	54.9	56.7	57.5	58.1	56.1	51.5	45.0	34.8	23.2	21.6	20.5	19.5	18.9	18.4	17.9	17.4	17.0	16.6
S.3	14.3	23.1	35.6	40.4	50.4	55.9	57.8	58.6	59.2	57.2	52.5	45.8	35.4	23.1	21.5	20.3	19.2	18.6	18.2	17.6	17.1	16.7	16.3
S.4	15.5	18.8	29.5	34.7	45.9	51.8	53.4	53.8	53.9	51.6	47.0	40.7	31.1	23.1	21.7	20.6	19.7	19.2	18.7	18.2	17.8	17.4	17.0
S.5	14.9	19.8	33.1	38.7	49.3	54.5	56.0	56.6	56.9	55.0	50.2	43.2	33.1	22.9	21.3	20.2	19.2	18.6	18.2	17.6	17.2	16.7	16.3
S.6	14.9	19.8	32.0	37.5	47.7	53.1	54.9	55.5	55.9	53.9	49.1	42.4	32.3	22.5	21.0	19.9	19.0	18.5	18.0	17.5	17.1	16.7	16.3
S.7	15.2	19.6	31.3	36.6	47.0	52.3	53.9	54.3	54.6	52.5	48.3	41.6	32.2	22.9	21.4	20.3	19.4	18.8	18.4	17.9	17.4	17.0	16.6
S.8	15.0	19.9	31.7	37.1	47.2	52.7	54.5	55.3	55.7	53.5	48.8	42.3	32.3	22.8	21.3	20.2	19.2	18.7	18.2	17.7	17.3	16.8	16.5
S.9	14.9	19.8	33.0	38.6	49.2	54.5	56.0	56.6	56.7	54.9	50.1	43.1	33.0	22.9	21.4	20.2	19.2	18.7	18.2	17.7	17.2	16.8	16.4
S.10	15.2	20.1	32.9	38.2	49.5	55.2	56.4	56.3	55.6	53.5	48.6	41.7	31.9	22.5	21.1	20.0	19.0	18.5	18.1	17.6	17.2	16.7	16.4
S.4_final	16.0	19.2	30.2	35.4	46.8	52.4	53.9	54.2	54.0	51.9	47.4	40.8	31.6	23.7	22.3	21.2	20.3	19.8	19.4	18.9	18.4	18.0	17.7

		PET (°C)																					
Time Scenario	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4
S.1	18.7	20.4	25.8	28.1	33.0	36.8	40.3	40.6	40.4	40.4	37.9	35.3	29.4	25.0	23.8	22.9	22.1	21.6	21.2	20.7	20.4	20.0	19.7
S.2	18.5	20.5	26.0	28.5	33.4	37.1	40.7	41.0	40.8	41.0	38.5	36.0	30.0	24.8	23.6	22.7	21.9	21.4	21.0	20.5	20.2	19.8	19.5
S.3	18.5	21.3	27.1	29.0	33.7	37.5	41.1	41.5	41.3	41.4	38.9	36.3	30.3	24.8	23.6	22.6	21.8	21.3	20.9	20.4	20.0	19.6	19.3
S.4	18.8	20.0	24.5	26.8	32.1	36.0	39.4	39.7	39.3	39.3	36.8	34.3	28.6	24.8	23.6	22.7	21.9	21.5	21.1	20.6	20.2	19.9	19.6
S.5	18.6	20.2	26.0	28.4	33.4	37.1	40.5	40.8	40.5	40.6	38.0	35.2	29.4	24.6	23.4	22.5	21.7	21.2	20.9	20.4	20.0	19.6	19.3
S.6	18.6	20.3	25.6	27.8	32.6	36.2	39.7	40.0	39.8	39.9	37.4	34.7	28.9	24.4	23.3	22.4	21.6	21.2	20.8	20.3	19.9	19.5	19.2
S.7	18.7	20.3	25.4	27.7	32.5	36.2	39.6	39.9	39.6	39.6	37.3	34.6	29.0	24.6	23.4	22.5	21.7	21.3	20.9	20.5	20.1	19.7	19.4
S.8	18.7	20.5	25.7	28.0	32.8	36.5	40.1	40.5	40.2	40.1	37.6	35.0	29.1	24.8	23.6	22.7	21.8	21.4	21.0	20.5	20.1	19.7	19.4
S.9	18.6	20.2	26.0	28.4	33.4	37.1	40.6	40.8	40.5	40.6	38.0	35.2	29.3	24.7	23.5	22.5	21.7	21.3	20.9	20.4	20.0	19.6	19.3
S.10	18.6	20.2	25.7	28.2	33.4	37.3	40.6	40.6	39.9	39.9	37.3	34.6	28.9	24.3	23.2	22.3	21.5	21.1	20.7	20.2	19.9	19.5	19.2
S.4_final	19.0	20.1	24.8	27.3	32.6	36.4	39.8	40.0	39.6	39.6	37.2	34.5	29.0	25.2	24.0	23.1	22.3	21.9	21.5	21.0	20.7	20.3	20.0

2-2. 조경적 요소별 결과

가. 투수성포장(S.1), 쿨페이브먼트(S.6)

아파트 단지 내 도로는 전체 부지면적의 3.5%, 보도는 12.0%를 차지하고 있다. 보도 부분을 2가지 포장물질 투수성포장과 쿨페이브먼트를 적용하고, 보도면적 중 열환경 변화의 결과를 잘 보여줄 수 있는 한 지점을 선정하여 S.1과 S.6을 비교해 본 결과, 기온은 24시간 평균 0.3℃, 상대습도는 평균 1.3%로 차이가 거의 없었다(Table 11). 풍속은 두 시나리오에서 평균 1.2ms⁻¹로 동일하게 나타났다. 평균복사온도를 비교해 본 결과, 24시간 평균 0.7℃만큼 쿨페이브먼트를 적용한 S6에서 낮게 나타났고, 최대 평균복사온도 차이는 쿨페이브먼트의 낮은 방사율(0.575)로 인해 낮 보다는 야간 19:00~20:00시에 1.0℃로 가장 높은 차이를 보였다.

인간 열환경지수인 PET 또한 24시간 평균 0.5℃만큼 S.6에서 열저감효과를 보였고, 평균복사온도와 다르게 13:00에 0.8℃로 쿨페이브먼트를 적용한 S.6에서 최대 PET 저감효과를 나타냈다.

Table 11. The ENVI-met results of pervious surface, cool pavement (SD means standard deviation)

Time	S.1					S.6				
	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)
6	24.1	78.9	0.8	15.4	19.0	24.1	79.1	0.8	15.1	18.8
7	24.2	78.5	0.8	17.3	19.6	24.1	78.8	0.8	16.9	19.5
8	24.7	77.7	0.8	23.6	22.2	24.6	78.2	0.8	23.2	22.0
9	25.4	78.4	1.4	24.9	23.1	25.2	79.5	1.4	24.4	22.8
10	27.1	70.7	2.0	34.5	27.5	26.9	72.7	2.0	33.9	27.1
11	29.0	60.9	2.0	64.3	41.3	28.6	63.8	2.0	63.8	40.6
12	30.3	54.0	1.1	63.4	44.4	29.8	57.0	1.1	62.8	43.7
13	31.4	48.7	1.5	63.0	44.0	30.9	51.3	1.5	62.4	43.2
14	31.9	48.8	2.2	63.7	43.3	31.4	51.3	2.2	63.1	42.7
15	32.2	48.3	1.7	63.9	44.6	31.8	50.3	1.7	63.4	44.0
16	32.0	48.6	2.3	34.7	32.1	31.6	50.3	2.3	34.0	31.5
17	31.3	50.8	1.7	57.3	40.9	30.9	52.1	1.7	56.8	40.4
18	29.6	57.2	2.0	37.6	31.0	29.2	58.5	2.0	36.9	30.3
19	28.6	55.9	0.7	23.7	25.2	28.2	57.1	0.7	22.7	24.5
20	27.8	59.8	0.7	22.2	24.0	27.5	60.9	0.7	21.2	23.4
21	27.0	65.1	0.7	21.1	23.1	26.8	66.1	0.7	20.1	22.5
22	26.3	69.3	0.7	20.1	22.3	26.1	70.3	0.7	19.2	21.8
23	26.0	70.6	0.7	19.5	21.8	25.7	71.5	0.7	18.7	21.3
0	25.7	71.7	0.7	19.1	21.4	25.4	72.6	0.7	18.2	21.0
1	25.2	73.6	0.6	18.5	21.0	25.0	74.4	0.7	17.7	20.5
2	24.9	74.3	0.6	18.1	20.6	24.7	75.0	0.7	17.3	20.1
3	24.6	74.1	0.6	17.7	20.2	24.4	74.8	0.7	16.8	19.8
4	24.3	73.8	0.6	17.3	19.9	24.1	75.0	0.6	16.5	19.4
Min	24.1	52.9	0.6	15.4	19.0	24.1	54.2	0.6	15.1	18.8
Max	30.2	78.9	0.8	68.2	48.0	29.9	79.1	0.8	67.7	47.6
Mean	26.9	66.2	0.7	34.1	29.2	26.7	67.6	0.7	33.4	28.7
SD	2.1	9.1	0.0	19.5	10.5	2.0	8.6	0.0	19.6	10.4

나. 콘크리트 옥상(S.1), 쿨루프(S.5), 옥상녹화(S.8)

쿨루프와 옥상녹화의 열저감 효과를 살펴보기 위해 높이가 다른 건물옥상 3개의 지점에서 콘크리트를 적용한 S.1 결과와 비교해 본 결과, 먼저 쿨루프를 적용한 S.5에서 기온과 상대습도의 차이는 거의 없었고, 풍속은 0.3ms^{-1} 만큼 상승했다(Table 12, 13). 평균복사온도에서는 쿨루프의 반사율이 높아 24시간 평균 36m 건물에서 0.8°C , 48m 건물에서 평균 0.6°C , 54m 건물에서 0.7°C 로 열상승효과를 보였다. 그러나 PET는 주간에는 모든 건물 높이에서 평균 $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 의 저감효과를 보였고, 야간에는 쿨루프와 콘크리트의 차이는 없었다.

옥상녹화 비교 결과는 쿨루프와 동일하게 기온과 상대습도의 차이는 거의 없었고, 풍속은 36, 48m 건물에서 쿨루프 보다 약 2배만큼 감소하였다(Table 12, 14). 36, 48, 54m 건물의 낮 평균복사온도 차이는 각각 평균 10.2°C , 12.4°C , 4.1°C 로 옥상녹화를 적용한 S.8에서 열저감효과를 보였다. PET는 36, 48m 건물에서 낮에 약 0.5단계 이상의 저감효과를 보였고, 54m 건물에서는 그 보다 작은 0.8°C 의 저감효과를 나타냈다. 그러나 야간에는 수목의 영향으로 모든 건물 높이에서 평균복사온도 평균 $0.7\sim 3.2^{\circ}\text{C}$ 의 상승효과를 보여, PET에서 $0.2\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 만큼 증가하는 역효과가 발생했지만 미미한 차이를 보였다.

열저감 효과를 보였던 쿨루프와 옥상녹화를 비교 해 본 결과, 기온과 상대습도의 차이는 미미했고, 풍속은 쿨루프에서 $0.7\sim 1.0\text{ms}^{-1}$ 만큼 높게 나타났다(Table 13, 14). 평균복사온도는 낮 시간에 36m 건물에서는 평균 11.3°C , 48m 건물에서는 13.3°C , 54m 건물에서는 5.0°C 만큼 옥상녹화에서 평균복사온도 저감효과를 보였다, PET는 36, 48m 건물에서는 약 0.5단계의 열저감효과를 나타냈고, 54m 건물에서는 0.4°C 로 아주 작은 저감효과를 보였다. 그러나 야간에는 수목의 영향으로 주간과 반대로 옥상녹화 36m 건물지점에서 평균복사온도 평균 2.9°C , 48m 건물에서는 3.3°C , 54m 건물에서는 0.5°C 의 상승효과를 보여, PET는 각각 1.0°C , 1.1°C , 0.3°C 만큼 증가하였다.

Table 12. The ENVI-met results of concrete roof (S.1) (SD means standard deviation)

Time	S.1														
	36 m height building					48 m height building					54 m height building				
	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)
6	24.9	71.4	2.1	12.1	18.0	25.0	70.2	2.3	12.2	18.0	25.1	69.5	2.3	12.4	18.2
7	24.9	71.2	2.1	30.6	22.6	25.0	70.1	2.3	30.7	22.4	25.0	69.5	2.3	30.8	22.4
8	25.1	71.1	2.1	50.5	30.3	25.1	70.0	2.3	50.5	29.8	25.1	69.4	2.3	50.6	29.9
9	25.3	70.1	2.1	56.9	33.5	25.3	69.2	2.3	57.0	32.9	25.3	68.7	2.3	57.1	33.0
10	25.6	68.6	2.0	58.4	34.5	25.6	67.8	2.3	58.5	33.9	25.6	67.4	2.3	58.6	34.0
11	26.3	65.7	2.0	57.5	34.8	26.2	65.4	2.3	57.6	34.2	26.2	65.3	2.3	57.9	34.3
12	26.8	62.2	2.0	55.4	34.5	26.8	62.0	2.3	55.6	33.9	26.7	62.0	2.2	56.0	34.1
13	27.6	58.7	2.0	56.0	35.5	27.5	58.7	2.3	56.3	35.0	27.4	58.7	2.2	56.7	35.1
14	27.9	59.3	2.0	59.0	37.2	27.8	59.0	2.3	59.2	36.6	27.7	58.8	2.3	59.6	36.8
15	28.4	58.2	2.0	62.5	39.4	28.3	57.9	2.3	62.7	38.8	28.2	57.8	2.3	63.1	38.9
16	28.9	56.1	2.0	64.0	40.6	28.8	56.0	2.3	64.1	39.9	28.7	55.9	2.3	64.3	39.9
17	29.2	54.6	2.0	60.7	39.4	29.1	54.5	2.3	60.7	38.7	29.0	54.4	2.3	60.9	38.7
18	28.8	55.7	2.0	46.8	32.9	28.8	55.4	2.3	46.8	32.3	28.7	55.3	2.3	46.9	32.3
19	28.3	55.5	2.0	20.0	22.6	28.2	55.2	2.3	20.1	22.4	28.2	55.1	2.3	20.3	22.4
20	27.7	57.0	2.0	18.5	21.8	27.7	56.4	2.3	18.5	21.6	27.7	56.1	2.3	18.7	21.8
21	27.2	60.0	2.0	17.2	21.0	27.2	59.0	2.3	17.3	21.0	27.3	58.4	2.3	17.5	21.0
22	26.7	62.7	2.0	16.2	20.4	26.8	61.5	2.3	16.2	20.4	26.8	60.8	2.4	16.4	20.4
23	26.4	63.9	2.0	15.7	20.0	26.5	62.6	2.3	15.8	20.0	26.5	61.9	2.4	15.9	20.0
0	26.1	64.6	2.1	15.3	19.6	26.2	63.3	2.3	15.3	19.6	26.3	62.6	2.4	15.5	19.8
1	25.8	65.8	2.1	14.6	19.2	25.9	64.4	2.3	14.6	19.2	26.0	63.6	2.4	14.8	19.4
2	25.5	66.4	2.1	14.1	19.0	25.6	65.0	2.3	14.2	19.0	25.7	64.2	2.4	14.4	19.0
3	25.3	66.5	2.1	13.7	18.6	25.4	65.1	2.3	13.7	18.6	25.4	64.4	2.4	13.9	18.8
4	25.0	66.4	2.1	13.3	18.4	25.1	65.1	2.4	13.4	18.4	25.2	64.4	2.4	13.5	18.4
Min	24.9	54.6	2.0	12.1	18.0	25.0	54.5	2.3	12.2	18.0	25.0	54.4	2.2	12.4	18.2
Max	29.2	71.4	2.1	64.0	40.6	29.1	70.2	2.4	64.1	39.9	29.0	69.5	2.4	64.3	39.9
Mean	26.7	63.1	2.0	36.0	27.6	26.7	62.3	2.3	36.1	27.2	26.7	61.9	2.3	36.3	27.3
SD	1.4	5.5	0.0	21.1	8.3	1.3	5.2	0.0	21.2	8.0	1.3	5.0	0.1	21.2	8.0

Table 13. The ENVI-met results of cool roof (S.5) (SD means standard deviation)

Time	S.5														
	36 m height building					48 m height building					54 m height building				
	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)
6	24.9	71.2	2.4	12.8	18.1	25.0	69.9	2.6	12.7	18.2	25.1	69.2	2.7	13.0	18.2
7	24.9	71.1	2.4	31.1	22.2	25.0	69.9	2.6	31.0	22.2	25.0	69.3	2.7	31.2	22.2
8	25.0	71.3	2.4	50.8	29.6	25.1	70.0	2.6	50.8	29.2	25.1	69.4	2.7	50.9	29.2
9	25.2	70.6	2.4	57.5	32.7	25.2	69.5	2.6	57.4	32.2	25.2	69.0	2.7	57.6	32.2
10	25.5	69.2	2.4	59.2	33.8	25.5	68.2	2.6	59.1	33.3	25.5	67.7	2.6	59.3	33.3
11	26.1	66.3	2.4	58.8	34.4	26.1	65.9	2.6	58.6	33.8	26.1	65.7	2.6	59.0	33.8
12	26.7	62.8	2.4	57.4	34.4	26.6	62.5	2.6	57.1	33.8	26.6	62.4	2.6	57.6	33.8
13	27.4	59.2	2.3	58.3	35.7	27.3	59.1	2.6	58.0	35.0	27.3	59.1	2.6	58.6	35.1
14	27.7	59.9	2.3	61.1	37.3	27.6	59.4	2.5	60.8	36.6	27.6	59.2	2.6	61.4	36.7
15	28.2	58.6	2.3	64.3	39.4	28.1	58.3	2.5	64.0	38.7	28.1	58.2	2.6	64.5	38.6
16	28.7	56.5	2.3	65.1	40.4	28.6	56.4	2.5	64.9	39.6	28.5	56.3	2.6	65.3	39.5
17	29.1	55.0	2.3	61.4	39.0	28.9	54.8	2.5	61.2	38.3	28.9	54.8	2.6	61.4	38.2
18	28.7	56.1	2.3	47.1	32.4	28.7	55.7	2.5	47.0	32.0	28.6	55.5	2.6	47.1	31.8
19	28.2	55.6	2.3	20.6	22.6	28.2	55.3	2.5	20.5	22.4	28.2	55.1	2.6	20.7	22.4
20	27.7	57.1	2.3	18.9	21.8	27.7	56.4	2.5	18.9	21.6	27.7	56.0	2.6	19.1	21.8
21	27.2	60.0	2.3	17.7	21.0	27.2	58.9	2.5	17.6	21.0	27.2	58.3	2.6	17.8	21.0
22	26.7	62.7	2.3	16.6	20.4	26.7	61.3	2.5	16.5	20.4	26.8	60.6	2.6	16.7	20.4
23	26.4	63.8	2.3	16.1	20.0	26.4	62.4	2.5	16.0	20.0	26.5	61.7	2.6	16.2	20.0
0	26.1	64.5	2.3	15.6	19.6	26.2	63.1	2.6	15.6	19.6	26.2	62.3	2.6	15.8	19.8
1	25.8	65.6	2.4	15.0	19.2	25.9	64.1	2.6	14.9	19.2	26.0	63.2	2.7	15.1	19.4
2	25.5	66.2	2.4	14.5	19.0	25.6	64.7	2.6	14.4	19.0	25.7	63.8	2.7	14.6	19.0
3	25.2	66.2	2.4	14.0	18.6	25.4	64.7	2.6	13.9	18.6	25.4	63.9	2.7	14.2	18.8
4	25.0	66.1	2.4	13.7	18.4	25.2	64.7	2.6	13.6	18.4	25.2	64.0	2.7	13.8	18.6
Min	24.9	55.0	2.3	12.8	18.1	25.0	54.8	2.5	12.7	18.2	25.0	54.8	2.6	13.0	18.2
Max	29.1	71.3	2.4	65.1	40.4	28.9	70.0	2.6	64.9	39.6	28.9	69.4	2.7	65.3	39.5
Mean	26.6	63.3	2.3	36.8	27.4	26.6	62.4	2.6	36.7	27.1	26.6	61.9	2.6	37.0	27.1
SD	1.4	5.4	0.0	21.6	8.2	1.3	5.1	0.0	21.5	7.9	1.3	4.9	0.0	21.6	7.8

Table 14. The ENVI-met results of rooftop garden (S.8) (SD means standard deviation)

Time	S.8														
	36 m height building					48 m height building					54 m height building				
	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)
6	24.8	71.6	1.5	16.2	19.1	24.9	70.4	1.7	16.8	19.2	25.0	69.7	1.9	14.1	18.6
7	24.8	71.6	1.5	20.8	20.3	24.9	70.4	1.7	20.4	20.1	24.9	69.9	1.9	30.8	22.8
8	25.0	71.7	1.5	35.5	25.2	25.0	70.5	1.7	33.3	24.0	25.2	69.6	1.9	48.5	30.0
9	25.2	70.7	1.5	44.8	29.5	25.3	69.8	1.7	42.3	27.9	25.4	68.9	1.8	53.7	32.6
10	25.6	69.1	1.5	48.1	31.4	25.6	68.3	1.6	46.5	30.1	25.7	67.6	1.8	54.2	33.2
11	26.3	66.1	1.4	50.1	33.0	26.2	65.8	1.6	48.2	31.6	26.3	65.4	1.8	52.7	33.2
12	26.9	62.6	1.4	50.0	33.5	26.8	62.4	1.6	47.9	32.0	26.8	62.2	1.8	50.4	32.7
13	27.6	59.1	1.4	50.5	34.4	27.5	59.1	1.6	48.4	32.8	27.4	58.9	1.8	51.0	33.6
14	27.9	59.7	1.5	51.3	35.0	27.8	59.4	1.6	49.5	33.7	27.8	59.1	1.8	53.9	35.2
15	28.4	58.6	1.5	53.2	36.4	28.2	58.4	1.6	51.5	35.0	28.2	58.1	1.8	57.8	37.5
16	28.8	56.6	1.5	52.0	36.2	28.7	56.6	1.6	49.2	34.4	28.7	56.3	1.8	59.6	38.8
17	29.1	55.2	1.5	45.4	33.5	29.0	55.2	1.7	42.6	31.8	29.0	54.9	1.8	57.0	37.8
18	28.7	56.4	1.5	34.3	28.4	28.6	56.1	1.7	30.9	26.7	28.6	55.8	1.8	44.4	31.9
19	28.2	55.7	1.5	22.5	23.4	28.1	55.4	1.7	22.8	23.4	28.1	55.3	1.8	20.7	22.7
20	27.6	57.2	1.5	21.3	22.6	27.6	56.6	1.7	21.6	22.6	27.6	56.3	1.8	19.3	22.0
21	27.1	60.2	1.5	20.2	22.0	27.2	59.2	1.7	20.6	22.0	27.2	58.7	1.8	18.1	21.2
22	26.6	62.9	1.5	19.4	21.4	26.7	61.7	1.7	19.8	21.4	26.7	61.0	1.8	17.1	20.6
23	26.3	64.0	1.5	19.0	21.0	26.4	62.7	1.7	19.3	21.0	26.4	62.0	1.8	16.7	20.4
0	26.0	64.7	1.5	18.6	20.7	26.1	63.4	1.7	19.0	20.8	26.2	62.7	1.8	16.3	20.0
1	25.7	65.8	1.5	18.0	20.3	25.8	64.4	1.7	18.4	20.4	25.9	63.7	1.8	15.6	19.6
2	25.4	66.4	1.5	17.6	20.0	25.6	65.0	1.7	18.1	20.0	25.6	64.3	1.8	15.2	19.2
3	25.2	66.5	1.5	17.2	19.6	25.3	65.1	1.7	17.6	19.8	25.4	64.4	1.9	14.8	19.0
4	25.0	66.4	1.5	16.9	19.4	25.1	65.1	1.7	17.3	19.4	25.1	64.4	1.9	14.4	18.8
Min	24.8	55.2	1.4	16.2	19.1	24.9	55.2	1.6	16.8	19.2	24.9	54.9	1.8	14.1	18.6
Max	29.1	71.7	1.5	53.2	36.4	29.0	70.5	1.7	51.5	35.0	29.0	68.9	1.9	59.6	38.8
Mean	26.6	63.4	1.5	32.3	26.4	26.6	62.7	1.7	31.4	25.7	26.7	62.1	1.8	34.6	27.0
SD	1.4	5.5	0.0	14.9	6.4	1.3	5.1	0.0	13.7	5.7	1.3	4.9	0.0	18.5	7.4

다. 콘크리트 벽(S.1), 벽면녹화(S.9)

벽면녹화의 열저감 효과를 알아보기 위해 녹화를 적용한 서로 다른 두 건물의 남쪽지점들을 선정하여 비교해 본 결과, 기온과 상대습도, 풍속의 차이는 거의 없었으며, 평균복사온도는 36m 건물지점에서 낮 평균 5.8℃, 48m 건물지점에서 낮 평균 2.3℃만큼 낮게 나타났다(Table 15, 16). 9:00~18:00까지의 평균복사온도 최대 열저감효과를 살펴본 결과, 36m 건물지점에서는 16:00에 16.1℃, 48m 건물지점에서는 16:00에 7.1℃만큼의 큰 열저감효과를 보였다. 이러한 영향으로 PET는 각 각 낮 평균 2.5℃, 0.9℃의 저감효과를 보였고, 16:00에는 36m 건물지점에서 약 1단계, 48m 건물지점에서는 약 0.5단계 최대 PET 저감효과를 나타냈다. 그러나 야간에는 평균복사온도 평균 0.0~0.6℃, PET 평균 0.0~0.2℃로 아주 작은 차이를 보였다.

Table 15. The ENVI-met results of concrete walls (S.1) (SD means standard deviation)

Time	S.1									
	Location 1 (on the front of 36m height building)					Location 2 (on the front of 48m height building)				
	T_a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T_{mrt} (°C)	PET (°C)	T_a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T_{mrt} (°C)	PET (°C)
6	23.9	81.6	0.5	14.3	18.8	24.0	80.3	1.4	13.9	18.1
7	24.0	81.0	0.5	16.4	19.7	24.1	79.7	1.3	15.8	18.6
8	24.8	80.2	0.5	51.9	36.8	24.7	78.8	1.3	22.6	21.0
9	25.6	80.6	1.4	54.5	35.4	25.4	79.1	2.1	23.5	22.0
10	27.4	73.1	1.9	61.3	38.7	27.2	70.7	2.6	33.0	26.5
11	29.1	62.9	2.0	62.7	40.7	29.3	59.7	2.6	62.4	39.5
12	30.4	56.1	1.1	59.0	42.3	30.7	52.6	1.7	60.8	41.9
13	31.6	50.1	1.5	58.2	41.9	31.8	47.3	2.1	59.9	41.8
14	32.1	50.8	2.1	61.0	42.6	32.3	47.8	2.6	60.9	42.0
15	32.4	49.4	1.7	61.7	43.9	32.5	47.3	2.2	61.6	43.0
16	32.3	49.2	2.2	60.7	42.5	32.4	47.6	2.7	60.7	41.8
17	31.5	51.7	1.6	28.9	29.9	31.6	50.2	2.1	28.9	29.9
18	29.5	59.1	2.0	25.0	26.6	29.7	57.3	2.5	25.0	26.6
19	28.5	57.3	0.4	22.7	25.0	28.7	56.0	1.0	22.6	24.4
20	27.6	62.3	0.4	21.2	23.8	27.8	60.6	1.0	21.1	23.2
21	26.8	68.5	0.4	20.1	22.9	27.0	66.5	1.0	20.0	22.2
22	26.0	73.2	0.4	19.1	22.1	26.3	71.1	1.0	19.1	21.4
23	25.7	74.3	0.4	18.6	21.7	25.9	72.4	1.0	18.5	21.0
0	25.4	75.4	0.4	18.1	21.3	25.6	73.5	1.1	18.0	20.6
1	24.9	77.5	0.4	17.6	20.8	25.1	75.5	1.1	17.5	20.1
2	24.6	78.1	0.4	17.2	20.4	24.8	76.2	1.1	17.1	19.7
3	24.3	77.7	0.4	16.8	20.0	24.5	75.9	1.1	16.7	19.3
4	24.0	77.3	0.4	16.4	19.7	24.2	75.6	1.1	16.3	19.0
Min	23.9	53.7	0.4	14.3	18.8	24.0	52.2	1.0	13.9	18.1
Max	30.5	81.6	0.5	67.0	48.8	30.6	80.3	1.4	67.2	46.7
Mean	26.9	68.7	0.5	35.9	30.9	27.0	66.7	1.1	32.3	27.7
SD	2.3	9.8	0.0	20.6	11.1	2.3	10.1	0.1	19.4	10.0

Table 16. The ENVI-met results of vertical garden (S.9) (SD means standard deviation)

Time	S.9									
	Location 1 (on the front of 36m height building)					Location 2 (on the front of 48m height building)				
	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)	T _a (°C)	RH (%)	U (ms ⁻¹)	T _{mrt} (°C)	PET (°C)
6	23.8	82.0	0.5	14.9	19.1	23.9	80.8	1.3	14.5	18.2
7	23.9	81.4	0.5	16.8	19.8	24.0	80.3	1.3	16.2	18.6
8	24.7	80.6	0.5	34.2	27.8	24.6	79.4	1.3	22.8	21.0
9	25.5	81.0	1.3	45.9	31.8	25.3	79.5	2.1	23.5	21.9
10	27.4	73.3	1.8	56.4	36.7	27.3	70.9	2.6	32.6	26.5
11	29.2	62.8	1.9	58.7	39.2	29.4	59.4	2.6	58.4	38.0
12	30.5	56.0	1.0	55.9	41.0	30.8	52.4	1.7	57.4	40.5
13	31.6	50.0	1.5	55.1	40.7	31.9	47.1	2.1	56.5	40.5
14	32.1	50.9	2.1	57.0	40.9	32.4	47.7	2.7	56.9	40.4
15	32.4	49.6	1.6	55.0	41.0	32.6	47.2	2.2	56.8	41.1
16	32.2	49.5	2.2	44.6	36.0	32.4	47.6	2.7	53.6	39.0
17	31.4	52.0	1.6	28.2	29.6	31.6	50.4	2.1	28.2	29.6
18	29.4	59.6	2.0	24.4	26.3	29.6	57.5	2.5	24.4	26.4
19	28.3	57.6	0.4	22.7	25.0	28.6	56.4	1.0	22.6	24.2
20	27.5	62.8	0.4	21.2	23.8	27.7	61.2	1.0	21.1	23.0
21	26.6	69.2	0.4	20.1	22.9	26.9	67.3	1.0	20.0	22.1
22	25.9	73.9	0.4	19.2	22.1	26.1	71.9	1.0	19.1	21.3
23	25.6	75.0	0.4	18.7	21.7	25.8	73.1	1.1	18.5	20.8
0	25.3	76.0	0.4	18.3	21.4	25.4	74.3	1.1	18.1	20.5
1	24.8	78.2	0.4	17.8	20.8	25.0	76.4	1.1	17.5	20.0
2	24.5	78.7	0.4	17.3	20.5	24.6	77.0	1.1	17.1	19.6
3	24.1	78.3	0.4	16.9	20.1	24.3	76.7	1.1	16.7	19.2
4	23.9	77.9	0.4	16.6	19.8	24.0	76.3	1.1	16.3	19.2
Min	23.8	54.1	0.4	14.9	19.1	23.9	52.4	1.0	14.5	18.2
Max	30.4	82.0	0.5	59.4	44.4	30.6	80.8	1.3	61.5	43.4
Mean	26.8	69.1	0.4	32.9	29.3	27.0	67.1	1.1	31.1	27.0
SD	2.3	10.0	0.0	17.1	9.3	2.4	10.4	0.1	17.4	9.0

IV. 결론

본 연구는 서울특별시 마곡동에 위치한 아파트의 미기후 실측자료와 ENVI-met 결과값을 비교검증 한 뒤, 고덕강일지구 아파트 계획부지의 열환경을 분석하여 쾌적한 환경을 조성할 수 있는 조경계획 및 설계방법을 찾아보았다. 그 결과, 조경적 요소 중 자연적 요소인 수목식재, 특히 사람들이 이용하는 공간과 동선에 태양의 위치와 고도를 고려하여 그늘을 형성할 수 있는 교목의 식재가 인간 열환경 개선에 가장 큰 효과를 나타냈다. 그러나, 지나친 수목의 식재는 풍속을 감소시키고, 오히려 열환경을 상승시키는 역효과가 일어날 수 있으므로, 바람이 잘 통하지 않는 밀식을 지양하는 것이 바람직하다. 또한 수경공간도 효과적인 방법이며, 옥상녹화와 벽면녹화는 전체 면적의 열저감효과는 미미하지만, 녹화 주변지역의 열저감효과는 큰 것으로 나타났다. 인공적 요소 중 반사율이 높은 쿨루프나 열교환도로 같은 재료들은 지표면에서 반사되는 태양복사에너지로 인해 보도 위의 사람들에게 악영향을 줄 수 있기 때문에 인체에 영향을 주지 않는 옥상이나 건물지붕에만 적용하는 것이 바람직 할 것이다. 이 연구에서는 쿨페이브먼트가 아주 작은 열저감효과를 나타내었으나, 실제 쿨페이브먼트의 태양복사에너지 반사율(0.4)과 지구복사에너지 방사율(0.7)을 고려해 보면, 실제로 열저감효과는 없을 가능성이 높고, 반대로 열상승효과가 발생할 수도 있을 것이다. 또한 아파트 건물 형태를 여름철 주풍향을 고려하여 타워형으로 설계를 한다면 조금 더 쾌적한 환경을 조성 할 수 있을 것이다.

V. 초록

최근에 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 도시 열환경 분석 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다. 본 연구는 우리나라의 도시주거형태 중 아파트를 대상으로 인간 열환경을 분석한 뒤 쾌적한 환경을 조성 할 수 있는 조경계획 및 설계방법을 찾고자 한다. 먼저, 서울특별시 마곡동에 위치한 아파트 단지 내에서 총 6곳(옥상, 옥상녹화, 아파트 중심, 가로수길, 운동장, 어린이놀이터)의 미기후 요소(기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구복사에너지)들을 측정하고, 컴퓨터 시뮬레이션 결과값과 비교검증을 진행하였다. 그 결과, 비교 요소들 중 평균복사온도와 인간열환경 지수인 PET에서 가장 큰 차이를 보였고, 오픈스페이스 공간인 운동장, 놀이터에서 평균복사온도의 차이가 가장 낮게 나타났다. 보정방법을 찾은 뒤, 서울특별시 고덕강일지구에 위치한 아파트계획 부지의 설계도면을 바탕으로 총 10개의 시나리오를 추가적으로 만들고, 24시간동안 시뮬레이션을 진행하였다. 시나리오 2, 3(S.2, 3)은 녹지계획을 축소 및 제거했으며, 시나리오 4(S.4)는 아파트 단지 내 다층식재 적용, 시나리오 5(S.5)는 모든 건물에 쿨루프 적용, 시나리오 6(S.6)은 도로와 보도 쿨페이브먼트 적용, 시나리오 7(S.7)은 단지 내 뜰, 정원 계획지를 빗물정원으로 변경, 시나리오 8(S.8)은 모든 건물에 옥상녹화를 적용, 시나리오 9(S.9)는 1,600m² 벽면녹화 조성, 시나리오 10(S.10)은 아파트 형태를 타워형으로 변경, 시나리오 4_final(S.4_final)은 S.4, 5, 6, 7, 8, 9 요소들을 모두 적용하였다. 기준이 되는 시나리오 1(S.1)과 나머지 10개의 시나리오를 비교해 본 결과, 미기후 요소인 기온, 상대습도, 풍속의 24시간 평균차이는 거의 없었다. 가장 더웠던 15:00 평균복사온도 결과를 비교 해 본 결과, 단지 내 다층식재를 적용한 시나리오 4(S.4)에서 평균 2.81℃(평균 51.6℃) 최대 저감효과를 나타냈고, 모든 조경적 요소를 적용한 S.4_final과 빗물정원으로 변경한 S.7은 각각 평균 2.52, 1.86℃(평균 51.9, 52.5℃)만큼 상대적으로 높은 열저감 효과를 보였다. S.6, 8, 10은 미미한 평균복사온도 저감효과를 나타냈다. 그러나, 쿨루프와 벽면녹화를 적용한 S.5, 9에서는 각각 평균 0.58, 0.5℃ 열상승 효과를 보였고, 녹지계획을 축소 및 제거한 S.2, 3은 평균 56℃이상으로 가장 높은 열환경을 나타냈다. 이러한 영향으로,

인간 열환경지수 PET는 S.4에서 평균 1.1℃(평균 39.3℃)이상의 저감효과를 보였다. 빗물정원으로 변경한 S.7과 모든 조경적 요소를 적용한 S.4_final에서 평균 0.8℃(평균 39.6℃)로 두 번째 높은 PET 저감효과를 나타냈고, S.6, 8, 10은 미미한 차이를 보였다. 그러나 쿨루프와 벽면녹화를 적용한 S.5, 9에서는 평균 0.2℃(평균 40.6℃) PET 상승효과를 나타냈고, 녹지계획을 축소 및 제거한 S.2, 3 PET 평균 41℃이상으로 가장 높은 열환경을 보였다.

그러므로, 조경적 요소 중 자연적 요소를 이용한 설계방법이 열저감 효과가 컸으며, 그 중 태양의 위치와 고도를 고려하여 교목을 식재하고, 바람을 감소시키는 밀식을 피하는 것이 전체면적의 열저감 효과가 큰 것으로 나타났다. 수경공간, 옥상녹화와 벽면녹화 또한 매우 효과적인 방법이며, 인공적 요소 중 반사율이 높은 쿨루프와 쿨페이브먼트를 보도에 적용할 경우에 오히려 역효과를 줄 수 있기 때문에 건물 지붕이나 옥상에 적용한다면 조금 더 쾌적한 환경을 조성할 수 있을 것이다.

인용문헌

기상청 (2018) “2018년과 1994년 수도권 폭염 비교”, 보도자료

국립환경과학원 (2018) “올해 폭염, 산림제외 모든 인프라에서 열스트레스 높아”,
보도자료

통계청 (2016) “2016 인구주택 총조사”, 보도자료

Bröde, P., D. Fiala, K. Blázquez, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz and G. Havenith (2012a) Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (UTCI). *International Journal of Biometeorology* 56: 481-494.

Bröde, P., E. L. Krüger, F. A. Rossi and D. Fiala (2012b) Predicting urban outdoor thermal comfort by the universal thermal climate index UTCI—a case study in southern Brazil. *International Journal of Biometeorology* 56: 471-480.

Höppe, P. (1999) The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* 43: 71-75.

Jeong, E (2012) A Study on the Impact on Thermal Environments around Urban River Restorations. Master thesis, Keimyung University.

Jeong, D, K. Park, B. Song (2016) A Comparison between In-situ PET and ENVI-met PET for Evaluating Outdoor Thermal Comfort. *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment* 16(1): 11-19.

Jo, S (2018) Analysis of the Influence of Street tree and Single tree on Human Thermal Sensation in Summer. Master thesis, Jeju National University.

Kim, C., E. Jung, D. Kim and J. Cha (2009) Analysis of Microclimate in Apartment Complex by Age. Korean Housing Association 2: 104-109.

Kim, D., E. Jung and J. Cha (2013) Simulation of Changes in Nearby Thermal Environment According to Green Roof in Low-Rise Residential Area of Daegu Journal of the Korean Housing Association 24(3): 45-53.

Moon, S. and D. Jang (2012) A Study on the thermal comfort change according to the Planting Type in housing complex. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment 12(2): 65-76.

Middel, A., K. Häb, A. Brazel, C. Martin and S. Guhathakurta (2014) Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. Landscape and Urban Planning 122: 16-28.

Park, K., S. Lee, Y. Shin and H. Hwang (2011) Analysis on the Mitigation Effects of Urban Heat Island through Creation of Water Space. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment 11(5): 13-18.

Park, S. (2011) Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model. PhD dissertation, University of Victoria, Victoria, B. C., Canada.

Park, S., S. Tuller and M. Jo (2014) Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments. Landscape and Urban Planning 122: 146-155.

Song, B., K. Park and S. Jung (2014) Validation of ENVI-met Model with In Situ Measurements Considering Spatial Characteristics of Land Use Types. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 17(2): 156-172.

Salata, F., I. Golasi, R. Vollaro and A. Vollaro (2016) Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. Sustainable Cities and Society 26: 318-343.

