한국조경학회지 51(3): 153~165, 2023. 6.
J. KILA Vol. 51, No. 3, pp. 153~165, June, 2023
pISSN 1225-1755 eISSN 2288-9566
https://doi.org/10.9715/KILA.2023.51.3.153

유형별 녹지 시뮬레이션을 통한 아파트 단지 내 도시열섬현상 저감효과 분석†

Simulation Analysis of Urban Heat Island Mitigation of Green Area Types in Apartment Complexes†

지은주*, 김다빈*, 김유경*, 이정아**
*고려대학교 환경생태공학부 학부생, **고려대학교 환경생태공학부 부교수

Ji, Eun-Ju*, Kim, Da-Been*, Kim, Yu-Gyeong*, Lee, Jung-A**
*Undergraduate Student, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University
**Associate Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

Received: May 26, 2023
Revised: June 12, 2023
Accepted: June 12, 2023
3인익명 심사필

Corresponding author :
Jung-A Lee
Associate Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea
Tel.: +82-2-3290-3004
E-mail: archjung@korea.ac.kr

국문초록

도시 열섬현상을 완화하기 위하여 본 연구는 아파트 단지 내 바람의 흐름과 열쾌적성을 고려하여 녹지 연결성을 향상시키기 위한 효과적인 녹지 계획 시나리오를 제안하는 것에 있다. 연구의 사례 대상지는 서울특별시를 대상으로 2020년 6월부터 8월까지 수집된 온도 및 불쾌지수 자료를 비교하여 강동구 고덕동에 위치한 아파트 단지로 선정하였다. 먼저, 연구대상지 현재의 열환경과 바람환경을 분석하였다. 이를 바탕으로 녹지의 패치와 코리도 형태의 요소를 고려하여 시나리오 1(패치), 시나리오 2(코리도), 시나리오 3(패치+ 코리도)의 세 가지 시나리오를 계획하였다. 이후, 각각의 시나리오별 풍속, 풍향, 그리고 열쾌적성을 ENVI-met로 분석하여 도시 열섬현상의 완화효과를 비교하였다. 연구의 결과, 패치 형태의 녹지는 풍속의 증가 및 풍량 개선에 기여하여 예상온열감(PMV)가 31.20% 감소하는 효과를 보였으며(시나리오 1), 열쾌적성 지표(PET)가 68.59%감소하는 것으로 나타났다. 반면 코리도 형태의 녹지로 계획한 경우 바람길의 연결이 용이하여 패치 형태의 녹지 계획에 비하여 풍속이 더욱 높아지는 결과가 나타나 예상온열감(PMV)은 92.47%, 열쾌적성 지표(PET)는 90.14% 감소하였다 (시나리오 2). 녹지 패치와 녹지 코리도를 복합적으로 계획한 경우 가장 큰 풍속의 증가와 연결성을 보여 예상온열감(PMV)에서 95.75%, 열쾌적성 지표(PET)에서 95.35% 감소하는 것으로 나타났다(시나리오 3). 그러나 대상지 내에서 협소한 지역의 경우 패치형 녹지계획이 코리도형의 녹지 계획에 비하여 열쾌적성을 개선하는 데에 더 효과적으로 나타났다. 따라서, 연구의 결과에 근거하여 도시열섬현상을 효과적으로 완화하기 위해서는 패치형태의 녹지와 코리도 형태의 녹지의 계획의 복합적인 형태로 계획될 수 있도록 제안하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 도시형 아파트단지의 도시열섬현상 완화를 위한 녹지계획의 가이드를 제시하여 도시열섬현상에 따른 회복력을 향상시키기 위한 기초자료를 제시할 수 있을 것이다.

주제어: ENVI-Met, 그린 네트워크, 바람길, 예상온열감(PMV), 열쾌적성 지표(PET)

ABSTRACT

The purpose of this study is to propose effective scenarios for green areas in apartment complexes that can improve the connection between green spaces considering wind flow, thermal comfort, and mitigation of the urban heat island effect. The study site was an apartment complex in Godeok-dong, Gangdong-gu, Seoul, Korea. The site selection was based on comparing temperatures and discomfort index data collected from June to August 2020. Initially, the thermal and wind environment of the current site was analyzed. Based on the findings, three scenarios were proposed, taking into account both green patches and corridor elements: Scenario 1 (green patch), Scenario 2 (green corridor), and Scenario 3 (green patch & corridor). Subsequently, each scenario's wind speed, wind flow, and thermal comfort were analyzed using ENVI-met to compare their effectiveness in mitigating the urban heat island effect. The study results demonstrated that green patches contributed to increased wind speed and improved wind flow, leading to a reduction of 31..20% in the predicted mean vote (PMV) and 68.59% in the predicted percentage of dissatisfied (PET). On the other hand, green corridors facilitated the connection of wind paths and further increased wind speed compared to green patches. They proved to be more effective than green patches in mitigating the urban heat island, resulting in a reduction of 92.47% in PMV and 90.14% in PET. The combination of green patches and green corridors demonstrated the greatest increase in wind speed and strong connectivity within the apartment complex, resulting in a reduction of 95.75% in PMV and 95.35% in PET. However, patches in narrow areas were

†이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2021R1A6A1A10045235), 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었음.

found to be more effective in improving thermal comfort than green corridors. Therefore, to effectively mitigate the urban heat island effect, enhancing green areas by incorporating green corridors in conjunction with green patches is recommended. This study can serve as fundamental data for planning green areas to mitigate future urban heat island effects in apartment complexes. Additionally, it can be considered a method to improve urban resilience in response to the challenges posed by the urban heat island effect.

Keywords: ENVI-Met, Green Network, Wind Corridor, PMV, PET

1. 서론

1.1 연구 배경과 목적

도시열섬현상은 도시화가 진행되면서 수직적 고층 건물 위주의 고밀 개발사업의 증가, 인공포장 면적의 증대, 그리고 녹지 및 하천 면적의 감소로 도시 내 인공 열 발생과 동시에 도시의 공기 순환이 방해되어 점점 심화되고 있다(Hoffmann et al., 2012; Herath et al., 2018). 여름철 서울 도심의 기온은 산지보다 평균 2.32도 높은 것으로 측정되었으며, 건물과 도로 등에 둘러싸인 도심은 그 외 지역에 비해 명확하게 열섬현상이 나타나는 것으로 확인되었다(http://data.seoul.go.kr). 동시에 여름철 풍속은 최저로 기류 정체 현상이 가중되고 있어 도심은 산지나 강변보다 불쾌감을 일찍 느끼고 오래 지속되어 도심 내 열환경 개선에 대한 요구가 높아지고 있다. 특히, 아파트 단지는 도시 내 고밀도의 인구가 거주하는 공간으로 도시열섬현상에 대한 대응이 매우 중요한 요충지가 될 수 있다(Lee and Chung, 2017). 또한, 바람길을 고려하지 않은 무분별한 개발 및 콘크리트 등과 같은 포장 재료의 이용은 아파트 단지 내 기류의 온도 상승을 유발하여 쾌적성을 저해하고, 이는 주민들의 건강에도 밀접한 영향을 미쳐 아파트 단지 내 미기후 환경을 고려한 개발은 필수적이라 하겠다(Ryu and Ko, 2010). 미기후 환경을 개선하기 위한 노력으로 바람길을 조성하기 위해서는 풍속과 풍향, 녹지 공간 등에 대한 고려가 필요하다(Kim et al., 2004; Cha et al., 2007; Park et al., 2017). 예를 들어, 공기를 순환시킬 수 있을 정도의 낮지 않은 풍속과 바람의 흐름이 연속적으로 이어진 풍향은 체감온도 저감을 통해 쾌적성을 향상할 수 있기 때문에, 풍속과 풍향을 고려한 바람길의 조성은 정체되어 있던 뜨거운 공기의 순환을 원활하게 할 수 있는 도시 열환경 개선의 핵심 요소가 될 수 있다(Park et al., 2017; Kim and Kang, 2018). 또한, 도시 내 녹지 네트워크 형성은 녹지의 연속성을 통해 바람길의 형성과 순환에 기여하여 도시열섬현상을 완화할 수 있다(Cha et al., 2007; Sodoudi et al., 2018). 따라서, 바람길을 고려한 도시 내 녹지 네트워크의 형성은 도시 내 열환경과 바람환경에 대한 분석을 통해 도시 열섬현상에 대한 회복탄력성를 향상할 수 있는 중요한 역할을 기대할 수 있다. 도시열섬현상을 저감시키거나 완화시키기 위한 노력, 즉, 도시 열섬현상에 대한 회복력 향상을 위한 노력으로 기존의 연구들은 녹지에 의한 열환경 개선 효과를 분석한 연구들이 주를 이루어 왔으며, 대부분 열쾌적성 향상과 바람길숲 조성 효과를 분석하는 것에 초점을 두고 있다(Matzarakis et al., 1999; Ketterer and Matzarakis, 2015 2015; Jo et al., 2017).

열쾌적지표는 해당 환경의 안전성, 건강성, 쾌적성을 온열적 관점에서 판단하며, 유효온도(ET), 표준유효온도(SET), 습구흑구온도(WBGT), UTCI(Universal Thermal Climate Index), PMV(predicted mean vote), PET(physiologically equivalent temperature) 등의 다양한 지표가 개발되어 사용되고 있다(Jeong, 2016). 열쾌적성은 열환경에 영향을 미치는 6가지 요인인 기온, 평균복사온도, 풍속, 습도, 신체 대사율, 의복 수준을 반영하여 인체가 인지하는 더위와 추위에 대한 반응을 수치로 정량화한 것으로, PMV와 PET로 평가가 가능하다(Fanger, 1970). PMV와 PET는 다른 지표들과 다르게 열쾌적성에 영향을 주는 열환경 요소 외에도 착의량, 활동량의 개인적 요소까지 고려하기 때문에 다른 지표들보다 민감한 지표로 평가받고 있어 실제적인 분석이 가능하면서도, 개인적 요소 설정에 따른 부정확성이 따를 수 있다(Kim et al., 2011). PMV의 경우, 열적으로 쾌적한 상태의 범위는 -0.5-0.5이며 2.5-3.5는 강한 열적 스트레스 상태, 3.5를 초과하게 된다면 극도로 심한 열적 스트레스를 받는 상태로 분류된다(Fanger, 1970). PET는 18-23℃에 해당하면 열적으로 쾌적한 상태이며 35-41℃는 강한 열적 스트레스 상태, 41℃를 초과할 경우 극도로 심한 열적 스트레스를 받는 상태로 분류된다(Matzarakis et al., 1999). PMV와 PET의 기준을 근거로 열쾌적성을 향상하는 방안으로 원활한 공기의 흐름을 통해 도시 열환경을 개선할 수 있는 바람길숲을 제시할 수 있다.

바람길숲에 관한 선행 연구를 살펴보면, 바람길숲의 유형은 찬바람을 생성하는 도시 외곽 산림의 바람 생성숲, 도시 내 거점숲인 디딤·확산숲, 생성숲과 거점숲을 연결해주는 연결숲으로 분류된다(Eum et al., 2019). 이때 연결

숲은 선적인 녹지 공간으로, 디딤·확산숲은 면적인 녹지 공간으로 구분된다(Eum, 2019). 즉, 패치와 코리도 형태의 바람길숲은 바람의 흐름을 통해 도시 내부에서 찬바람의 생성, 이동 및 공기의 순환을 유지하고 열섬 현상을 완화하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 패치 형태의 바람길 숲은 녹지 영역이나 공원, 작은 숲 지역 등으로 형성될 수 있으며, 공기의 순환을 촉진시켜 도시 내부의 고온화를 완화시키는 효과를 가져올 수 있다(Elgamal, 2017). 이와 동시에 코리도 형태의 바람길 숲은 바람의 흐름을 유지하고 바람의 이동을 원활하게 하여 내부의 공기의 온도를 낮춰주는 역할을 할 수 있다(Cha et al., 2007; Sodoudi et al., 2018). 다시 말해, 바람의 흐름을 바람길숲을 조성하기 위해 녹지의 적절한 배치는 필수적이기 때문에, 면적인 거점지역과 선적인 연계 지역을 포함한 녹지 네트워크를 고려하여 바람길숲을 조성하는 것이 도시열섬현상 저감에 가장 효과적인 것으로 생각할 수 있다. 따라서 선행연구에서 분류한 녹지 유형과 바람길숲 유형을 참고하여, 연결숲은 선적인 녹지 공간인 코리도로 정의하고 디딤·확산숲은 면적인 녹지 공간인 패치로 정의할 수 있다.

이와 같은 도시열섬현상 저감을 위한 녹지 네트워크의 효과 검증을 위하여 열환경 및 바람환경에 대한 분석에 주로 사용하는 ENVI-met, Solweig, Rayman 등과 같은 시뮬레이션 프로그램을 이용할 수 있다(Kai, 2015; Evola et al., 2017; Aboelata and Sodoudi, 2019). 특히, ENVI-met은 공간 요소를 반영한 모델링 및 미기후 모의실험에 적합한 프로그램으로, 식물에서 대기로의 증발산 및 현열속을 포함하여 높은 수준의 조작성과 신뢰성이 있어 녹화 시뮬레이션의 미기후 효과 분석에 많이 사용되는 프로그램이다(Simon, 2016). ENVI-met 프로그램은 미시적 측면에서뿐만 아니라 거시적 측면에서도 분석이 가능하여(Sodoudi et al., 2018; Kwon et al., 2019), 가로수 식재 패턴에 따른 온도변화를 분석하는 미시적 분석이나(Kwon et al., 2019) 도시 내 선형의 녹지 네트워크 혹은 녹지 패턴에 따른 열환경 개선 효과에 대한 분석 등(Jiang et al., 2018; Sodoudi et al., 2018)이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 도시열섬현상 저감을 위한 녹지 유형을 제시하기 위한 녹지 계획 유형의 시나리오를 계획하여 그 효과를 분석하고자 하였다. 이를 위하여, 1) 패치와 코리도의 녹지 형태를 고려한 시나리오를 계획하고, 2) 시나리오별 바람길과 열쾌적성 분석을 통해 도시열섬현상 저감효과를 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 흐름

효과적인 도시열섬현상 저감을 위한 녹지 유형을 도출하기 위해 본 연구에서는 ENVI-met V4를 이용하여 현재 대상지의 열환경과 바람환경을 분석하고, 이를 바탕으로 패치와 코리도의 녹지 유형을 고려한 시나리오를 계획하였으며, 시나리오별 바람길과 열쾌적성을 분석하였다(Figure 1 참조).

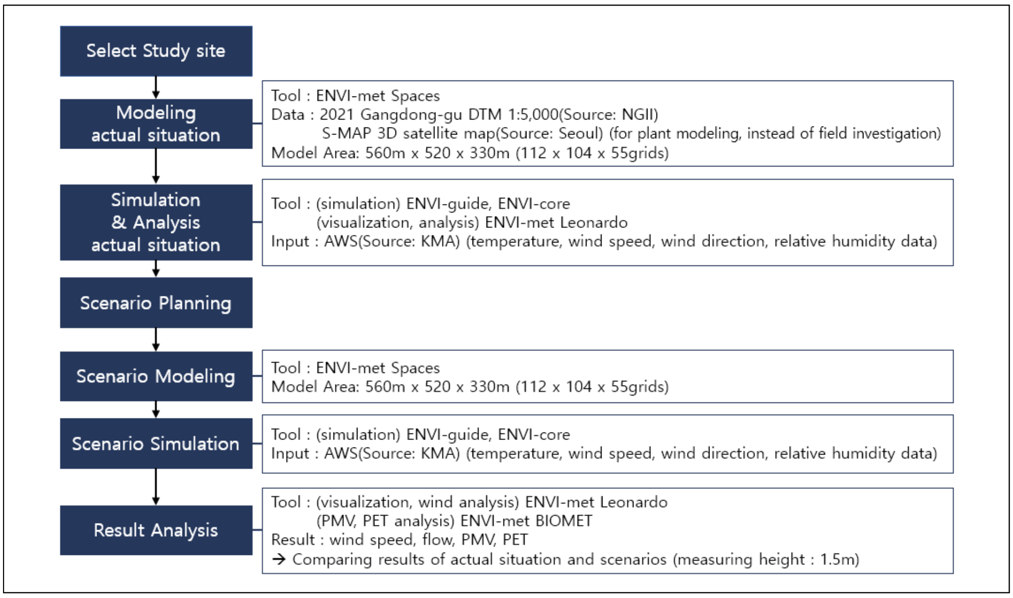


Figure 1. Flow chart

2.2 연구 대상지

본 연구를 위한 사례 대상지를 선정하기 위하여 서울특별시에서 기상청 AWS의 2020년 6-8월 기온과 불쾌지수를 비교하여 기온과 불쾌지수가 높은 지역을 탐색하였다. 기온과 습도 일극값은 기상청 AWS 자료를 이용하였으며, 기상청 날씨누리의 불쾌지수 계산기를 통해 불쾌지수를 산출하였다. 서울시 내 지역구별 총 21개 관측소의 기온 일극값과 불쾌지수를 비교한 결과, 일 최저기온과 최고기온 평균의 평균값은 25.349℃이며, 가장 높은 곳은 26.724℃를 기록한 강동구 고덕동이었다. 일 불쾌지수 평균의 평균값은 74.71%이며, 가장 높은 곳은 76.64%를 기록한 곳 또한 강동구 고덕동이었다. 2020년 6월-8월을 기준으로 강동구 고덕동의 일 최저-최고 기온 평균과 불쾌지수가 서울시 내 지역에서 가장 높아, 강동구 고덕동의 관측소와 가장 인접한 곳에 있는 아파트 단지를 사례연구의 대상지로 선정하였다(Figure 2 참조). 사례 대상지로 선정된 아파트 단지는 2016년에 준공된 아파트 단지로 35층의 51개 동의 아파트로 이루어져있으며, 총 3,658세대가 거주하고 있다. 아파트 단지는 중앙의 회전 교차로를 중심으로 3개의 단지로 구분되어 다양한 배향의 건물들로 배치되어 있으며, 대상지 인근의 주요 녹지는 북쪽의 고덕산, 남쪽의 까치근린공원이 있다. 본 연구에서는 연구의 대상지인 아파트 경계를 중심으로 560 × 520(m)의 면적으로 설정하였다.

2.3 연구 방법

2.3.1 ENVI-met 및 입력자료

공간 형태 및 종류에 따른 열환경의 변화를 확인하기 위한 도시 미기후와 인간 열환경 분석에서 전 세계적으로 가장 많이 이용되고 있는 CFD 모델은 ENVI-met이다(Tsoka et al., 2018). ENVI-met은 공간 요소의 모델링과 시뮬레이션을 실행하여 녹지의 미기후 효과를 분석할 수 있는 프로그램으로, 높은 조작성과 신뢰성이 있다(Simon, 2016). 그러나, ENVI-met은 실제 공간을 구현한 입력자료 구축과 모델링 구역을 둘러싼 주변 지역의 영향 정도를 고려하는 데에 한계가 있으며, 대상지 면적 및 모델링 시간이 늘어날수록 시뮬레이션과 열쾌적성 예측에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다(Song et al., 2014; Tsoka et al., 2018). 한편, ENVI-met은 0.5-10m 그리드의 해상도로 분석이 가능하며(Bruse and Fleer, 1998), 세밀한 미기후의 변화를 예측할 수 있어 소규모 대상지의 미기후 분석에 적합하다(Kim and Kim, 2003).

이에 본 연구에서는 ENVI-met의 모듈 중 Spaces로 모델링하고 ENVI-guide와 ENVI-core로 시뮬레이션을 실행하였으며, ENVI-met의 Leonardo를 이용하여 녹지 유형에 따른 바람길을, BIOMET을 이용하여 열쾌적성을 비교 분석하였다. 분석 해상도는 5 × 5m로 설정하였으며, 모델의 크기는 560 × 520 × 330(m)이고, 그리드는 112 × 104 × 55개로 설정하였다. 이때 Z값은 대상지 내 최대 층고의 3배에 해당하는 330m로 설정하였다. 이때 모델링 및 시뮬레이션을 위해 사용한 자료는 국토지리정보원의 축척 1:5,000인 2021년 강동구 수치지형도와 서울특별시 2020년 S-MAP 3차원 위성지도, 기상청 AWS 자료이고 시뮬레이션 입력자료는 Table 1과 같다. 입력자료의

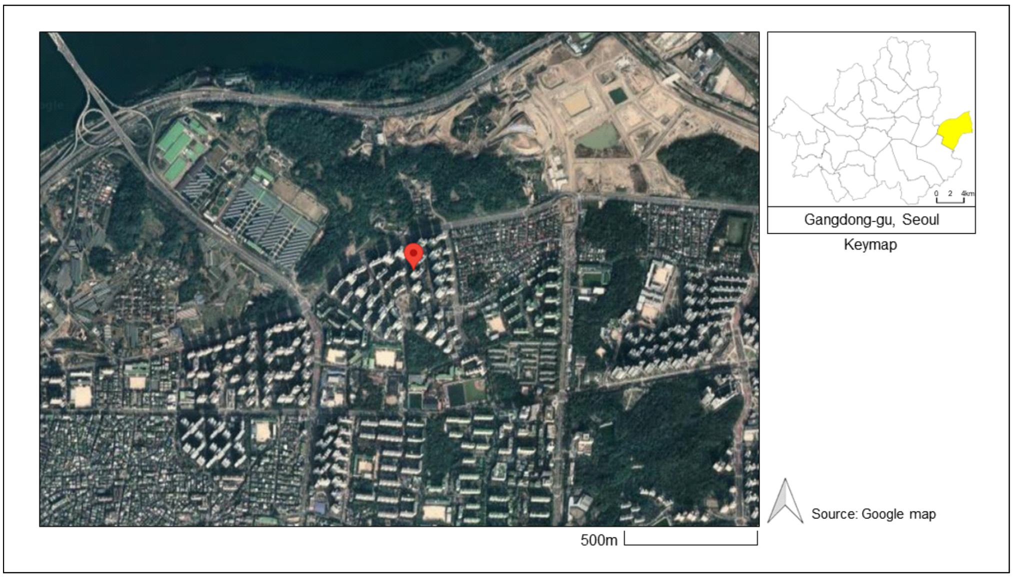


Figure 2. Study site

Table 1. Simulation input data

Date & time	Value	Weather condition settings	Value
Start date	2020.08.25	Wind speed	1.1m/s
Start time	04:00	Wind direction	113°
Total duration	24h	Maximum temperature / minimum temperature	36℃ / 24℃
Time interval	1h	Maximum relative humidity / minimum relative humidity	43% / 94%
		Roughness length	0.1m

시뮬레이션 날짜, 풍속, 풍향, 기온, 상대습도는 기상청 AWS 자료를 이용하여 설정하였다. 이때 2020년 대상지의 기온이 가장 높게 관측된 날의 변화를 보기 위해 시뮬레이션 날짜는 2020년 8월 25일, 24시간으로 설정하였다. 모델링 초기값의 영향을 최소화하기 위해 시뮬레이션 시작 시각은 소프트웨어가 대기현상을 따르도록 하는 밤이나 이른 아침이 적합하기 때문에 시뮬레이션 시작 시각은 오전 4시로 설정하였다(Salata et al., 2016). 풍속과 풍향은 초기 입력값으로 고정되기 때문에(Lim et al., 2022), 시뮬레이션 날짜의 일평균 풍속인 1.1m/s와 가장 높은 빈도의 풍향인 동남동으로 설정하였다. BIOMET을 통해 열쾌적성 산출을 위한 데이터는 환경적 요인에 해당하는 기온, 평균복사온도, 풍속, 상대습도와 개인적 요인에 해당하는 착의량, 신체 대사율을 대입하였다. 이때 사용한 환경적 요인은 2020년 8월 25일 중 가장 더운 14시를 시뮬레이션 결과 값을 대입하였고, 개인적 요인은 여름철 얇은 신사복 착의량 값인 0.6Clo와 인간이 안정된 상태에서 소모되는 열량값인 1.48Met을 대입하였다(Mun et al., 2015).

2.3.2 시나리오 계획

대상지의 바람길과 열쾌적성을 분석하기 위하여 바람길숲 중 연결숲과 디딤·확산숲의 개념을 토대로 녹지의 형태 및 역할을 구분하여 패치와 코리도 녹지 유형을 이용한 시나리오를 계획하였다. 시나리오 계획을 위한 기준시점인 2020년 8월 25일 14시에 평균 풍속은 0.45m/s이었고, 바람의 흐름은 대상지 북동쪽에 좁은 간격의 고층 건물 사이 원형의 돌풍이 발생하였고 대상지 서쪽에 풍속이 낮았다. PMV와 PET는 대상지 전체 면적의 95.42-96.49%가 강하거나 극도로 심한 열적 스트레스 상태에 해당하였다. 이와 같은 대상지의 바람환경과 열환경을 바탕으로 바람길숲 중 디딤·확산숲과 연결숲의 개념을 활용하여 Figure 3과 같이 시나리오를 작성하였다. 디딤·확산숲은 면적인 녹지 공간으로 해석하여 패치로, 연결숲은 선적인 녹지 공간으로 보고 코리도로 명명하였다. 바람의 흐름은 녹지의 분포에 따라 달라지기 때문에 현재 대상지의 바람 환경과 녹지 패턴을 고려하여 녹지를 배치해야 한다(Cha et al., 2007). 바람길숲 계획에서 패치를 이용할 때, 교목으로만 이루어진 패치는 바람의 흐름을 방해할 수 있으므로 교목과 관목의 적절한 조합이 필요하고, 최대한 넓은 면적의 녹지가 조성될 때 열환경 개선 효과가 크다(Elgamal, 2017; Herath et al., 2018). 녹지의 면적이 같은 경우에는 분산된 녹지의 분포가 온도 저감에 효과적이며, 나무의 양이 한정되면 5,000m^2 내외의 면적을 가진 녹지가 분산되어 배치되는 것이 온도 저감에 가장 효율적이다(Jiao et al., 2017; Yu et al., 2019). 이때 녹지가 균일한 패턴으로 분포할 때 온도 저감효과가 크게 나타난다(Asgarian et al., 2015). 바람길숲 계획에서 코리도를 이용할 때, 풍향에 평행한 선형 녹지는 공기의 순환을 원활하게 하고 열환경 개선 효과가 크다(Elgamal, 2017; Sodoudi et al., 2018). 이때 주거 공간과 그 주위의 공원이나 강을 연결하는 바람길 역할을 하는 코리도는 열섬 저감에 효과적이다(Hsieh and Huang, 2016). 바람길숲 계획에

a: Actual situation | b: Scenario 1(patch) | c: Scenario 2(corridor) | d: Scenario 3 (patch+corridor)

Figure 3. Actual situation and scenarios

서 패치와 코리도를 모두 이용하는 것은 열환경 개선에 대해 시너지 효과를 기대할 수 있다(Jiang et al., 2018).

이에 따라, 시나리오 1(패치)의 경우, 패치는 교목과 관목이 혼합된 구조로 구성하고, 직사각형으로 빈 부지에 배치하여 단지 내 녹지를 확장하였다. 패치의 면적은 배치가 가능한 공간 내에서 최소 100m^{2}부터 최대 5,000m^{2}로 조성하였다. 강한 온도 저감 효과를 위해서, 패치는 일정한 패턴으로 가장 가까운 녹지 간의 거리가 15m 이상이 되지 않도록 배치하였다. 이때 패치는 바람 흐름을 방해하지 않도록 바람이 드나드는 곳을 피하여 배치하였다. 시나리오 2(코리도)의 경우, 코리도는 길가의 녹지 폭을 최대한 확장하고, 풍향의 수평 방향으로 교목을 배치하여 녹지를 연결 및 확장하였다. 기존 주거단지 내의 공기 흐름이 단지 인근 공원과 연결되도록 기존에 공기 흐름이 적은 곳은 코리도를 배치하여 새로운 바람길을 만들었다. 시나리오 3(패치+코리도)의 경우, 패치와 코리도의 시너지 효과를 위해 시나리오 1, 2를 혼합하여 바람길의 순환이 원활하게 하였다.

2.3.3 분석 항목 및 기준점 설정

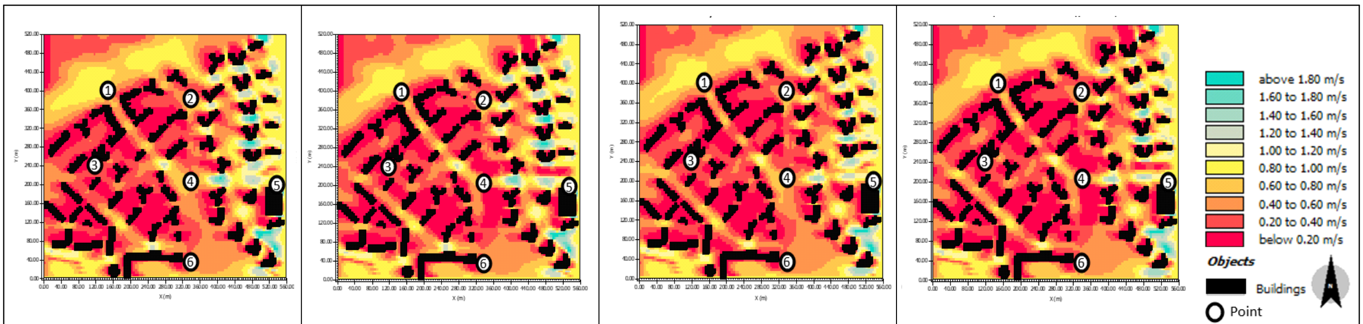
시나리오별 도시열섬현상 저감효과를 파악하기 위해 바람길을 평가하는 지표는 풍속과 바람의 흐름을, 열쾌적성을 평가하는 지표는 PMV, PET를 설정하였다. 풍속은 단지 내 풍속이 빠를수록, 바람의 흐름은 바람 흐름 벡터의 분포가 연속적이고 일정할수록 바람길이 원활한 것으로 보았다. PMV, PET는 수치가 낮을수록, PMV, PET 수치의 감소면적비율이 높을수록 도시열섬현상 저감효과가 탁월한 것으로 보았다. PMV와 PET는 열환경의 환경적 요인에 해당하는 기온, 평균복사온도, 풍속, 습도와 개인적 요인에 해당하는 신체 대사율, 의복 수준을 수식에 대입하여 열환경 요인이 인간에게 미치는 영향을 정량 수치화해 평가하였다. 이때 PMV가 3.5를 초과하거나 PET가 41℃를 초과하면 극도로 심한 열적 스트레스에 해당한다.

시나리오를 분석하기 위한 기준은 2020년 8월 25일 14시로 설정하였으며, 이 시점은 1년 중 대상지의 최고 기온의 시점이며, 측정 높이는 사람에게 미치는 영향력을 고려하여 1.5m로 설정하였다(Lim et al., 2022). 이때 풍속, 바람 흐름, PMV, PET는 모두 1.5m 높이의 전체 보행권 면적을 대상으로 도시열섬현상 저감효과를 평가하였으며, 풍속은 상세한 비교를 위해 특정 지점 6곳에서 추가로 도시열섬현상 저감효과를 평가하였다. 풍속의 변화를 파악하기 위한 기준으로 Jiang et al.(2018)의 연구에 근거하여, 대상지 내 y자 도로의 중심부 1곳, 도로 각 갈래의 종점 3곳, 각 아파트 단지 내 건물의 영향이 가장 적은 지점 2곳으로 총 6개 지점을 선정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 바람길을 통한 열섬저감효과 분석

각 시나리오는 ENVI-met의 Leonardo를 이용하여 풍속과 바람의 흐름에 따른 미기후 시뮬레이션 결과를 추출하였다. 평균 풍속은 시나리오 1(패치)은 2.54m/s, 시나리오 2(코리도)는 2.55m/s, 시나리오 3(패치+코리도)은 2.63m/s로, 대상지 현 상태의 평균 풍속인 0.45m/s보다 증가하였다. Figure 4, Figure 5와 같이 시나리오에 따른 지점별 풍속의 변화를 본 결과, 시나리오 1(패치)의 풍속은 지점 2와 4를 제외한 나머지 지점에서 현 상태보다 증가했지만, 3개의 시나리오 중 풍속이 가장 느렸다. 시나리오 2(코리도)의 풍속은 지점 2와 4를 제외한 나머지 지점에서 시나리오 1(패치)보다 증가하였다. 시나리오 3(패치+코리도)의 풍속의 경우, 지점 2와 4를 제외한 나머지 지점에서 3개의 시나리오 중 가장 빨랐다. 특히 시나리오 3(패치+코리도)은 도로의 양 끝점인 지점 3과 5의 풍속이 증가했고 평균 풍속이 2.63m/s로 가장 높았기 때문에, 대상지의 바람길이 전체적으로 개선되었다.



a: Actual situation | b: Scenario 1(patch) | c: Scenario 2(corridor) | d: Scenario 3(patch+corridor)

Figure 4. Wind speed of actual situation & scenarios

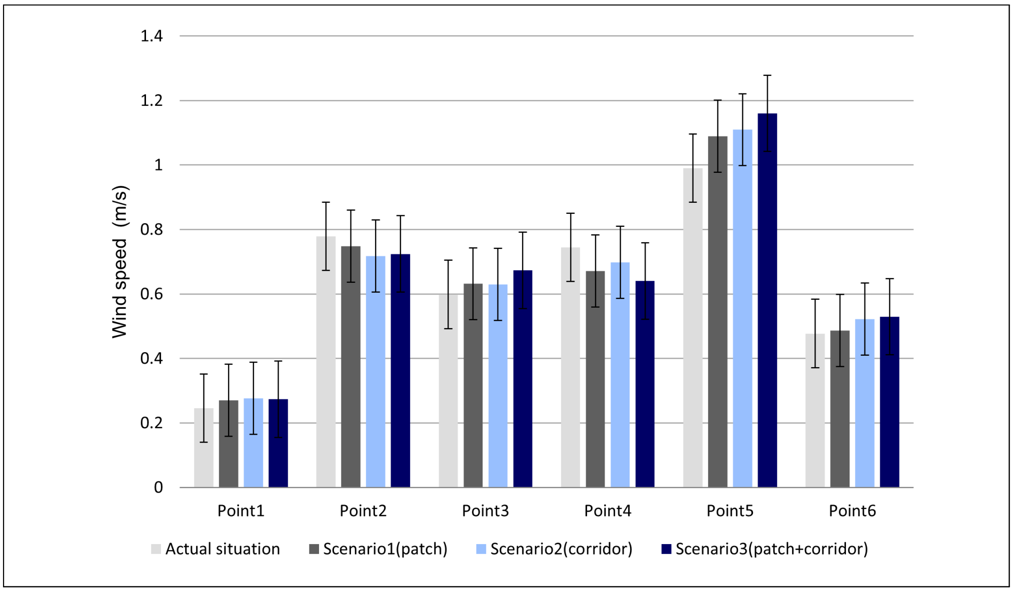


Figure 5. Comparison of wind speed at Point 1-6 of actual situation & scenarios

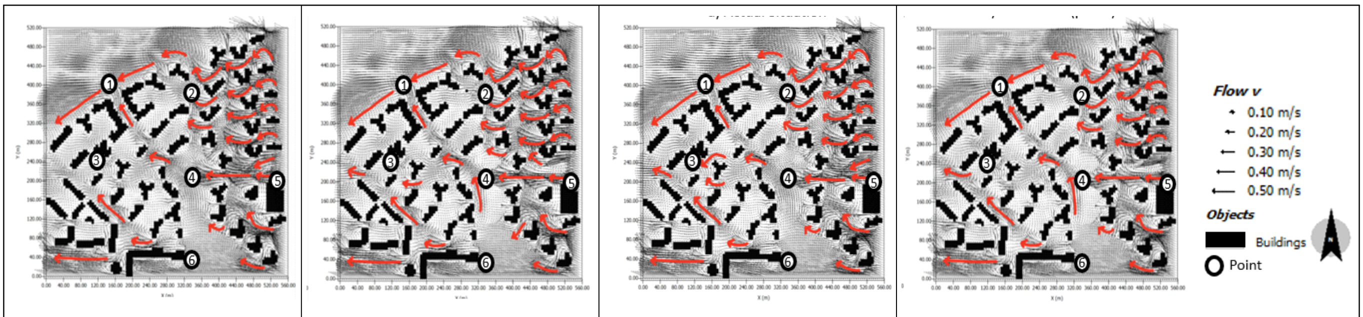
바람의 흐름의 경우(Figure 6 참조), 시나리오 1(패치)의 바람 흐름은 패치를 중심으로 바람이 여러 방향으로 분산되었다. 시나리오 2(코리도)는 단지 내부까지 바람길이 연장되었으며, 도로와 단지 사이에 바람길이 연결되었다. 시나리오 3(패치+코리도)은 두 유형의 바람길숲 영향으로 인해 단지 내부까지 바람길이 강하게 연결되었다. 추가로 모든 시나리오에서 풍속이 느려진 지점인 지점 2와 지점 4의 풍속 감소 원인은 바람 흐름을 통해 분석하였다. 지점 2는 북동쪽 단지로, 밀집한 고층 건물들 사이에서 부는 돌풍으로 인해 지점 2의 바람의 순환이 원활하지 않았다. 지점 4는 Y자 형태 도로의 중심부로, 바람이 도로에서 단지 내로 분산되었기 때문에 풍속이 느려졌다.

3.2 열쾌적성을 통한 열섬저감효과 분석

3.2.1 PMV 분석

현 상태(actual situation)의 PMV 평균값은 4.45로 극도로 심한 열적 스트레스에 해당한다. 시나리오 1(패치)의 PMV 최소값은 2.23, 최대값은 5.74로, 평균값이 4.14였다. 시나리오 2(코리도)의 PMV 최소값은 2.19, 최대값은 5.64로, 평균값이 4.01이었다. 시나리오 3(패치+코리도)의 PMV 최소값은 2.14, 최대값은 5.5로, 평균값이 3.80이었다. PMV 평균값은 현 상태, 시나리오 1, 시나리오 2, 시나리오 3에서 4.45, 4.14, 4.01, 3.80으로 감소하였다(Table 2, Figure 7 참조). PMV 감소를 통해 녹지가 열쾌적성에 기여함을 확인하였다.

현 상태와 시나리오의 PMV 비교는 PMV 감소 면적을 통해 확인하였다. 유의미한 감소량은 0.2부터인 것으로 보았다. 현 상태와 비교했을 때 시나리오별 PMV 감소 면적은, 시나리오 1(패치)에서 31.20%, 시나리오 2(코리도)에서 92.47%, 시나리오 3(패치+코리도)에서 95.75%로 증가하였다(Figure 8 참조). PMV 기준에 따른 면적은 현 상태와 시나리오 1(패치), 시나리오 2(코리도), 시나리오 3(패치+코리도)의 PMV구간별 면적(%)을 비교하였다(Figure 8 참조).

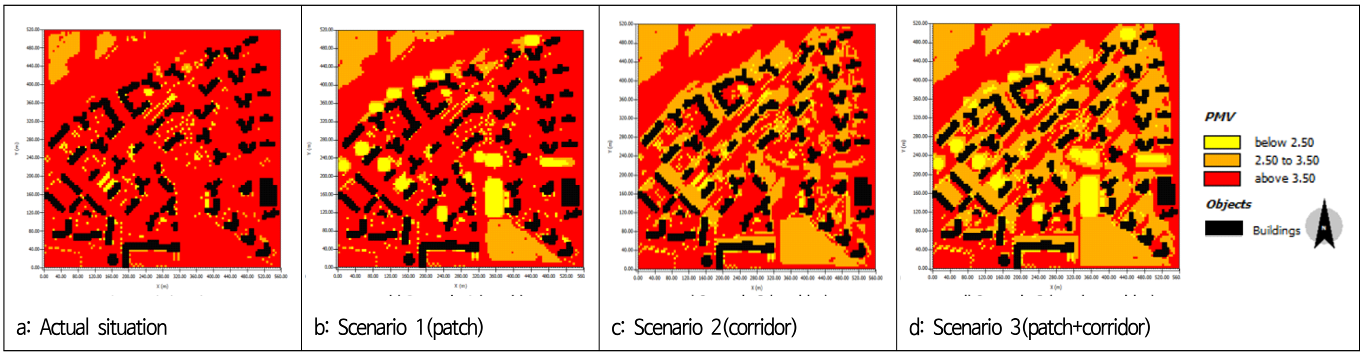


a: Actual situation | b: Scenario 1(patch) | c: Scenario 2(corridor) | d: Scenario 3(patch+corridor)

Figure 6. Wind vector of actual situation & scenarios

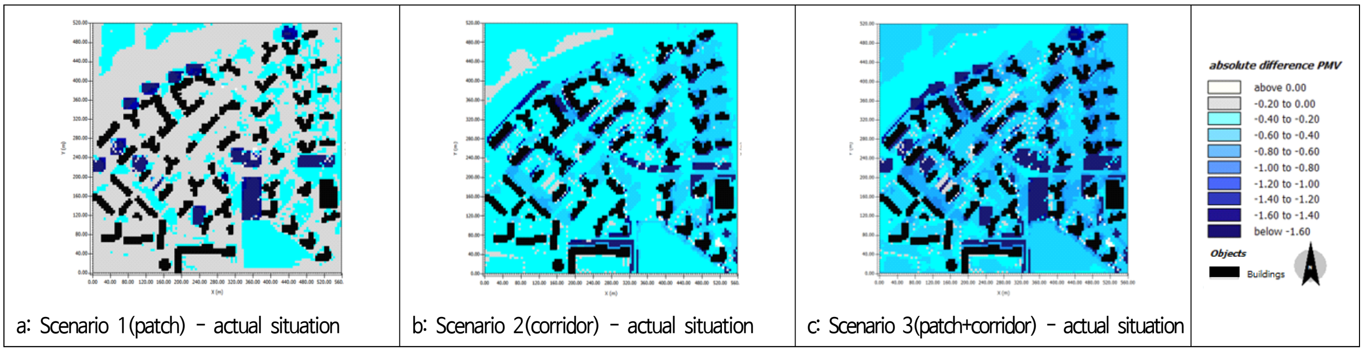
Table 2. PMV of actual situation & scenarios

	Minimum	Maximum	Average
Actual situation	2.42	6.67	4.45
Scenario 1 (patch)	2.23	5.74	4.14
Scenario 2 (corridor)	2.19	5.64	4.01
Scenario 3 (patch+corridor)	2.14	5.50	3.80



a: Actual situation b: Scenario 1(patch) c: Scenario 2(corridor) d: Scenario 3(patch+corridor)

Figure 7. PMV of actual situation & scenarios



a: Scenario 1(patch) - actual situation b: Scenario 2(corridor) - actual situation c: Scenario 3(patch+corridor) - actual situation

Figure 8. Comparison of PMV of scenarios with actual situation

강한 열적 스트레스 상태인 PMV 2.5-3.5에 해당하는 면적은 현 상태는 4.64%, 시나리오 1은 12.95%, 시나리오 2는 34.25%, 시나리오 3은 45.29%이었다. 따라서 PMV 2.5-3.5에 해당하는 면적은 시나리오 1(패치), 시나리오 2(코리도), 시나리오 3(패치+코리도) 순으로 갈수록 증가하였다. 극도로 심한 열적 스트레스 상태인 PMV 3.5 초과에 해당하는 면적은 현 상태는 91.85%, 시나리오 1은 78.35%, 시나리오 2는 62.23%, 시나리오 3은 46.88%이었다. 따라서 PMV 3.5 초과에 해당하는 면적은 시나리오 1(패치), 시나리오 2(코리도), 시나리오 3(패치+코리도) 순으로 갈수록 감소하였다. 이때 절대적으로 열적으로 쾌적한 상태는 없었기 때문에 강한 열적 스트레스 상태인 PMV 2.5-3.5 구간이 극도로 심한 열적 스트레스 상태인 PMV 3.5 초과 구간에 비해 상대적으로 쾌적한 열환경으로 보았다. 따라서 3개의 시나리오 모두 현 상태에 비해 상대적으로 쾌적한 상태의 면적이 증가하였고 극도로 심한 열적 스트레스 상태의 면적은 감소하였다. 또한 시나리오 1(패치), 시나리오 2(코리도), 시나리오 3(패치+코리도) 순으로 쾌적한 상태 면적의 증가량과 극도로 심한 열적 스트레스 상태 면적의 감소량이 증가하였다. 추가로 패치와 코리도의 영향은 시나리오 1(패치)과 시나리오 2(코리도)의 PMV 감소량과 상대적으로 쾌적한 면적 비교를 통해 분석하였다(Figure 9 참조). 패치가 위치한 곳은 시나리오 2보다 시나리오 1에서 PMV 감소량이 크고, 시나리오 1은 PMV 1.5-2.5 면적이 3개의 시나리오 중 가장 크기 때문에 전체적으로는 코리도가 패치보다 효과적이지만 좁은 범위에서는 패치가 효과적이었다.

3.2.2 PET 분석

현 상태의 PET 평균값은 45.34℃로 극도로 심한 열적 스트레스 상태에 해당한다. 시나리오 1(패치)의 PET 최소

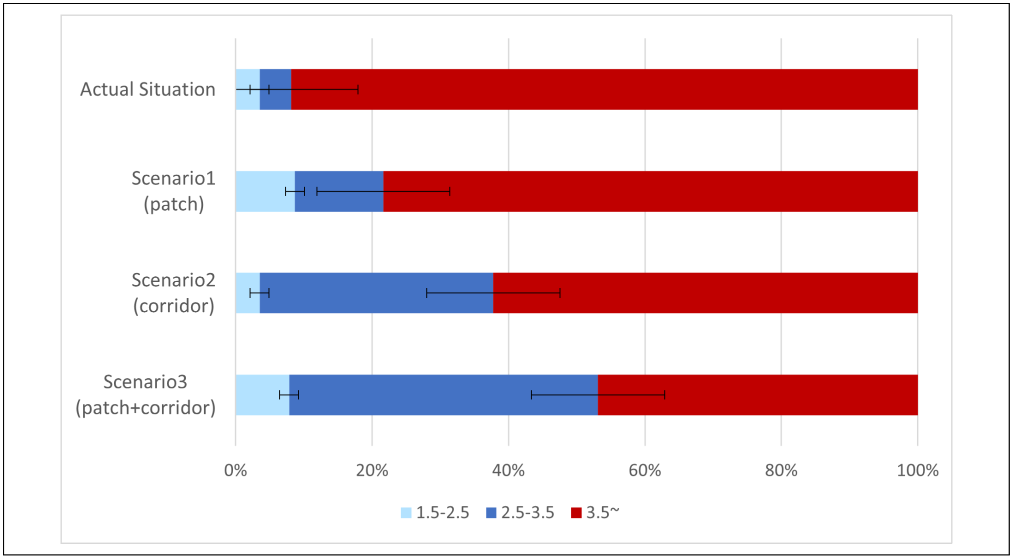


Figure 9. Comparison of PMV of actual situation & scenarios

값은 31.86℃, 최대값은 62.52℃로, 평균값은 43.00℃였다. 시나리오 2(코리도)의 PET 최소값은 31.65℃, 최대값은 58.76℃로, 평균값은 42.08℃였다. 시나리오 3(패치+코리도)의 PET 최소값은 31.40℃, 최대값은 57.87℃로, 평균값은 40.77℃였다. PET 평균값은 현 상태, 시나리오 1, 시나리오 2, 시나리오 3에서 45.34℃, 43.00℃, 42.08℃, 40.77℃로 감소하였다(Table 3, Figure 10 참조). PET 감소를 통해 녹지가 열쾌적성에 기여함을 확인하였다.

현 상태와 시나리오의 PET 비교는 PET 감소 면적을 통해 확인하였다. 이때 유의미한 감소량은 1.0℃부터인 것으로 보았다. 현 상태와 비교했을 때 시나리오별 PET 감소 면적은, 시나리오 1(패치)에서 16.78%, 시나리오 2(코리도)에서 64.25%, 시나리오 3(패치+코리도)에서 77.31%로 증가하였다(Figure 11 참조). PET 기준에 따른 면적은 actual situation과 시나리오 1(패치), 시나리오 2(코리도), 시나리오 3(패치+코리도)의 PET 구간별 면적(%)을 비교하였다(Figure 11 참조). 이때 절대적으로 열적으로 쾌적한 상태는 없었기 때문에 강한 열적 스트레스 상태인 PET 35-41℃에 해당하는 구간은 극도로 심한 열적 스트레스 상태인 PET 41℃ 초과 구간에 비해 상대적으로 쾌적한 열환경으로 보았다. 모든 시나리오에서 현 상태에 비해 상대적으로 쾌적한 상태의 면적이 증가하였고 극도로 심한 열적 스트레스 상태의 면적은 현 상태는 69.38%, 시나리오 1은 51.81%, 시나리오 2는 44.28%, 시나리오 3은

Table 3. PET of actual situation & scenarios

	Minimum (℃)	Maximum (℃)	Average (℃)
Actual situation	32.30	62.52	45.34
Scenario 1 (patch)	31.86	61.25	43.00
Scenario 2 (corridor)	31.65	58.76	42.08
Scenario 3 (patch+corridor)	31.40	57.87	40.77

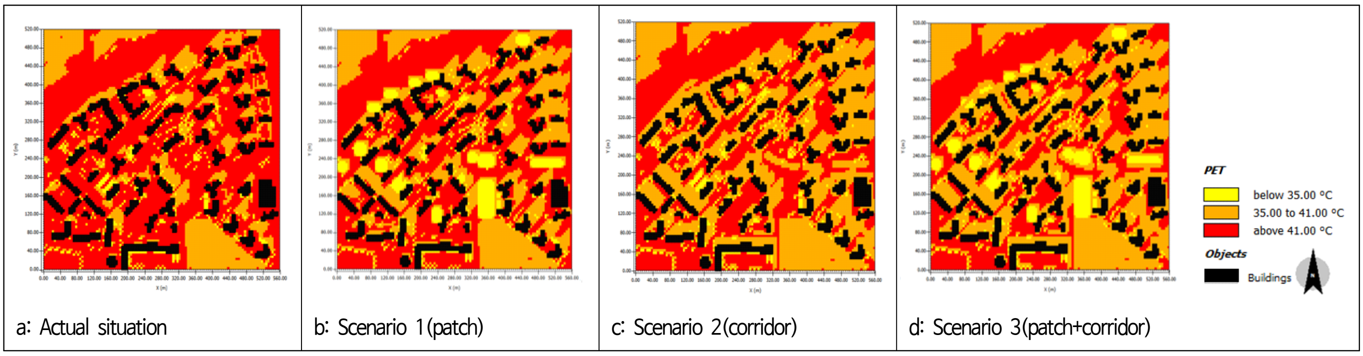
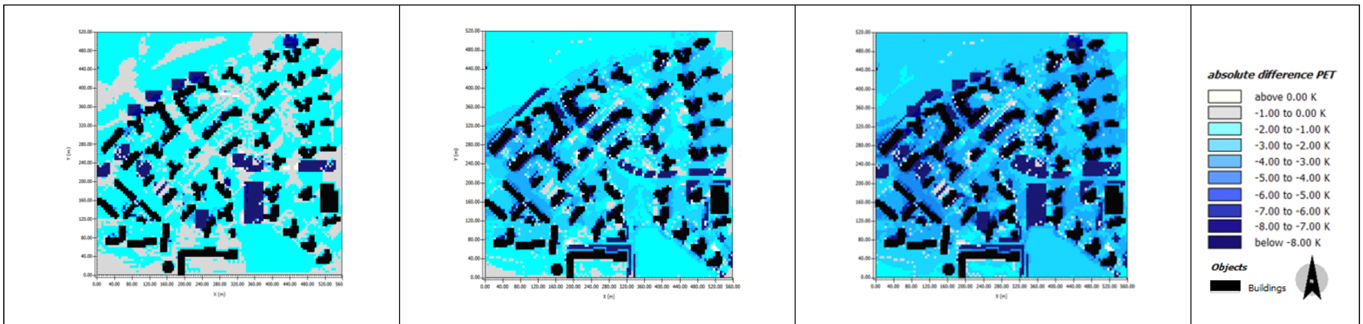


Figure 10. PET of actual situation & scenarios



a: Scenario 1(patch) - actual situation | b: Scenario 2(corridor) - actual situation | c: Scenario 3(patch+corridor) - actual situation

Figure 11. Comparison of PET of scenarios with actual situation

39.51%로 감소하였다. 따라서 시나리오 1(패치), 시나리오 2(코리도), 시나리오 3(패치+코리도) 순으로 열쾌적성이 향상되었다. 추가로 패치와 코리도의 영향은 시나리오 1(패치)과 시나리오 2(코리도)의 PET 감소량과 상대적으로 쾌적한 면적 비교를 통해 분석하였다(Figure 12 참조). 패치가 위치한 곳은 시나리오 2보다 시나리오 1에서 PET 감소량이 크고 시나리오 1은 PET 29-35℃에 해당하는 면적이 3개의 시나리오 중 가장 크기 때문에 전체적으로는 코리도가 패치보다 효과적이지만 좁은 범위에서는 패치가 효과적이었다.

3.3 고찰

본 연구에서는 아파트 단지 내 녹지 유형에 따른 열섬현상 저감효과의 차이를 비교분석을 하였다. 바람길에 관하여 풍속과 바람의 흐름에 따른 미기후 변화를 분석한 결과, 현 상태의 평균 풍속은 0.45m/s이고 바람의 흐름이 원활하지 않아 아파트 단지 내 바람길이 연결되어 있지 않았으며, 바람길을 고려한 녹지 조성 시의 평균 풍속은 2.54-2.63m/s로 현 상태의 평균 풍속보다 증가한 것으로 나타났으나, 패치, 코리도를 이용한 녹지 유형별 시나리오에 따른 풍속 차이는 거의 없었다. 이는 녹지 조성을 통하여 단지 내 바람이 최대한 이동할 수 있는 통로를 만들어 주는 역할을 통해 열섬효과의 완화에 일조할 수 있음을 설명하는 결과이다. 이와 같은 의미로 풍향에 평행한 코리도는 패치보다 지점별 풍속이 높고 바람길이 원활한 것으로 보여져, 아파트 단지 내 녹지 계획 시 여름철 단지 내 환기를 위해 주 풍향을 고려한 코리도를 계획을 제시할 수 있다. 일례로, Sodoudi et al.(2018)의 연구에서는 풍향에 평행한 선형의 녹지가 풍향에 수직한 선형의 녹지나 면적인 녹지보다 더 많은 공기 흐름이 가능하여 환기 상태가 좋아졌다는 것을 살펴볼 수 있다. 특히, 고층 아파트가 밀집한 아파트 단지의 경우는 원형의 돌풍이 발생할 수 있어서 풍속이 높더라도 바람의 흐름은 원활하지 않고 바람길이 단지 내부 및 외부와 연결되지 않는 경우가 있다. 따라서 여름철에는 아파트 단지 내 환기가 중요하므로 열섬저감을 위한 아파트 단지 녹지 계획 시 풍속뿐만 아니

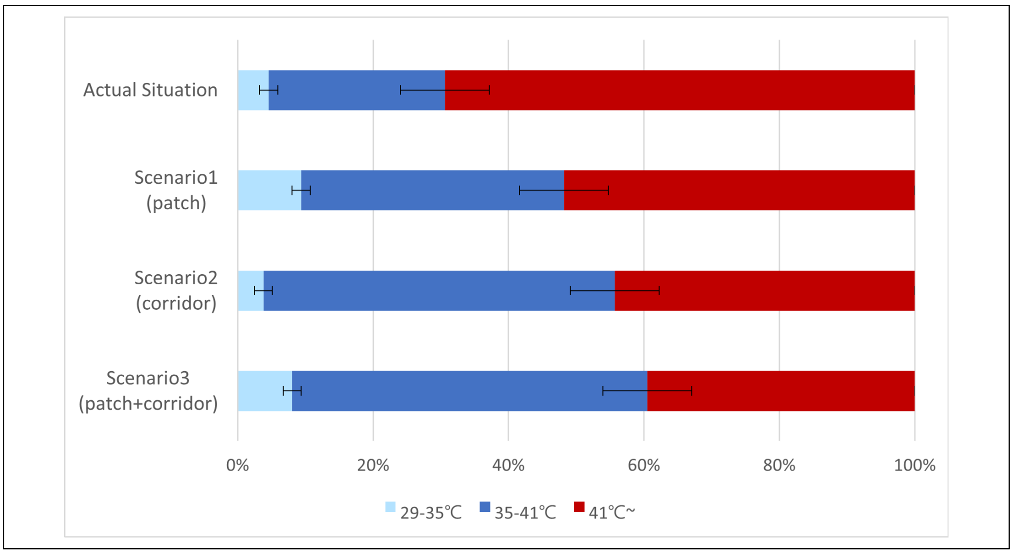


Figure 12. Comparison of PET of actual situation & scenarios

라, 바람의 흐름도 같이 고려해야 한다. 본 연구는 열섬현상이 심한 여름철을 대상으로 하였기 때문에 여름철의 아파트 단지 내 원활한 바람길에 초점을 두었다. Elgamal(2017)의 연구에서 여름철과 겨울철 환기의 차이를 고려하여 도시 환기를 계획해야 함을 강조하고 있다. 따라서 여름철의 환기뿐만 아니라, 겨울철 추위 등의 문제를 고려한 바람길을 계획할 필요성이 있다.

열쾌적성에 관하여 PMV와 PET의 변화를 분석한 결과, PMV와 PET 감소 면적이 패치보다 코리도가 넓었다. 본 연구와 같이, Jiang et al.(2018)의 연구에서도 열섬저감효과를 온도 변화를 통해 분석하였는데, 패치보다 코리도가 온도 저감 면적이 더 넓었다. 본 연구에서 대상지 전체적으로는 코리도가 패치보다 열섬저감에 효과적이었지만 좁은 범위에서는 패치가 더 효과적이었다. 이는 패치 내에 식재가 집중되어 그림자 효과를 통해 패치가 좁은 범위에 집중적으로 온도를 저감하였기 때문이다. 풍향에 평행하게 계획한 코리도는 바람길을 원활하게 하여 아파트 단지 내 전체적인 열섬저감에 효과적이었다. Lim et al.(2022)과 Elgamal(2017)의 연구에서도 풍향에 수직한 수목 식재는 오히려 온도를 증가시켰고 풍향에 평행한 수목 식재가 온도를 감소시켰다. 패치와 코리도를 따로 식재했을 때보다 패치와 코리도를 혼합했을 때가 PMV와 PET 감소 면적이 더 넓었다. 이처럼 Herath et al.(2018)의 연구에서도 단일 유형의 녹지보다 다양한 녹지 유형의 조합이 온도 저감효과가 더 컸다. 따라서 아파트 단지 내 효과적인 열섬저감을 위해서, 좁은 범위에 집중적인 온도 저감이 필요한 지역은 패치를 배치하고 아파트 단지의 전체적인 환기를 위한 지역은 코리도를 배치하여 다양한 녹지 유형의 조합을 조성해야 한다.

하지만 본 연구에서 ENVI-met을 통한 분석에 있어 한계점이 존재한다. 녹지의 유형을 경관생태학의 패치와 코리도로 구분하고 이를 이용하여 대상지 모델링 및 시나리오 계획이 이루어졌다. 따라서 실제 현장의 식재 종류나 구조에 대한 조사가 이루어지지 못해 실제 해당 아파트 단지를 정확히 구현해내지 못하였다. 또한 시뮬레이션은 신뢰성을 확보하고 유용한 정보를 얻기 위해 현장 실측 자료를 기반으로 검증이 이루어져야 한다(Oke et al., 2017). 따라서 시뮬레이션을 통한 분석 시, 실측자료와 시뮬레이션 결과 사이의 검증이 반드시 진행되어야 하고, 이에 관한 추가 연구가 반드시 필요하다고 하겠다.

4. 결론

본 연구는 도심지 내 아파트 단지 일대를 대상으로 녹지 유형에 따른 바람길 및 열쾌적성 분석을 수행한 것이다. 연구 결과, 심한 열적 스트레스 상태인 대상지의 바람길 및 열쾌적성을 개선할 수 있는 녹지 유형을 제시하였다. 패치의 강화는 바람을 분산시키고 풍속을 증가시켰으며, PMV와 PET 감소 면적이 31.20%, 68.59%였다. 코리도의 강화는 단지 내 바람길을 연장하고 지점별 풍속을 패치보다 증가시켰으며, PMV와 PET 감소 면적이 92.47%, 90.14%로 패치보다 열섬현상 완화에 효과적이었다. 패치와 코리도를 혼합한 경우, 풍속은 더욱 증가하였고 단지 내부까지 바람길이 원활하게 연결되었고 PMV와 PET 감소 면적이 95.75%, 95.35%로 혼합하지 않은 경우보다 더 컸다. 이를 바탕으로 바람길숲 유형은 시나리오 1(패치) 〈 시나리오 2(코리도) 〈 시나리오 3(패치+코리도) 순으로 도시열섬현상 완화에 효과적임을 확인하였다. 본 연구의 결과는 아파트 단지 내 패치 및 코리도 형태의 디딤・확산숲을 조성하고 선형의 녹지 연결을 통해 바람길숲을 조성함으로써 도시 열섬현상에 대한 회복력 강화 방안을 제안하였다. 이는 아파트 단지와 같이 건물의 배치와 구조에 따라 우선적으로 바람길을 형성하는 공간에서도 녹지의 구성 형태에 따라 바람길 및 열쾌적성 개선에 일조할 수 있음을 시사하는 결과라 하겠다. 이와 같은 연구 결과는 향후 도심지 아파트 단지 내 바람길숲 조성계획 수립 시 바람길숲 유형에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 본 연구는 패치, 코리도의 유형 중 일부만을 선별하여 분석하였기 때문에 다양한 경우의 수를 고려한 추가 연구가 필요하며, 식재의 형태 외 건물의 구조와 배치에 따라 달라지는 바람의 환경과 열환경에 관한 연구가 복합적으로 이루어질 필요가 있다. 또한, 하나의 연구대상지의 상황 내에서 시나리오를 작성하여 분석한 결과를 제시하였기 때문에 도시계획적 측면에서 도시 전체를 다루는 시각으로 확장 하여 계획할 때 실효성 측면에서 그 한계가 있다.

References

1. Aboelata, A. and S. Sodoudi(2019) Evaluating urban vegetation scenarios to mitigate urban heat island and reduce buildings' energy in dense built-up areas in Cairo. Building and Environment 166: 106407.
2. Asgarian, A., B. J. Amiri and Y. Sakieh(2015) Assessing the effect of green cover spatial patterns on urban land surface temperature using landscape metrics approach. Urban Ecosystems 18(1): 209-222.
3. Bruse, M. and H. Fleer(1998) Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a

three dimensional numerical model. Environmental Modelling & Software 13(3-4): 373-384.
4. Cha, J. G., E. H. Jung, J. W. Ryu and D. W. Kim(2007) Constructing a green network and wind corridor to alleviate the urban heat-island. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 10(1): 102-112.
5. Elgamal, N. F.(2017) Impact of Street Design on Urban Ventilation in Hot Dry Climate Using Envi-Met, Case of Greater Cairo Region. In 1st International Conference on Towards a Better Quality of Life.
6. Eum, J. H.(2019) Analysis and utilization strategies of ventilation corridor characteristics in Jeon-Ju area. Korean Journal of Environment and Ecology 33(3): 366-374.
7. Eum, J. H., J. H. Oh, J. M. Son, K. Kim, J. B. Baek and C. Y. Yi(2019) Analysis schemes of wind ventilation forest types -A case study of Daegu metropolitan city-. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 22(4): 12-23.
8. Evola, G., A. Gagliano, A. Fichera, L. Marletta, F. Martinico, F. Nocera and A. Pagano(2017) UHI effects and strategies to improve outdoor thermal comfort in dense and old neighbourhoods. Energy Procedia 134: 692-701.
9. Fanger, P. O.(1970) Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering. Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering.
10. Herath, H. M. P. I. K., R. U. Halwatura and G. Y. Jayasinghe(2018) Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. Urban Forestry & Urban Greening 29: 212-222.
11. Hoffmann, P., O. Krueger and K. H. Schlunzen(2012) A statistical model for the urban heat island and its application to a climate change scenario. International Journal of Climatology 32(8): 1238-1248.
12. Hsieh, C. M. and H. C. Huang(2016) Mitigating urban heat islands: A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation. Computers, Environment and Urban Systems 57: 130-143.
13. Jeong, D. I.(2016) Comparison of Outdoor Thermal Comfort Using the *in-situ* Measurements and Microclimate Modeling. Dissertation, Changwon Univ.
14. Jiang, Y., D. Song, T. Shi and X. Han(2018) Adaptive analysis of green space network planning for the cooling effect of residential blocks in summer: A case study in Shanghai. Sustainability 10(9): 3189.
15. Jiao, M., W. Zhou, Z. Zheng, J. Wang and Y. Qian(2017) Patch size of trees affects its cooling effectiveness: A perspective from shading and transpiration processes. Agricultural and Forest Meteorology 247: 293-299.
16. Jo, S. M., C. J. Hyun and S. K. Park(2017) Analysis of the influence of street trees on human thermal sensation in summer. Journal of the Korean Institute of Landscape 45(5): 105-112.
17. Kai, Z.(2015) SOLWEIG-Impacts of vegetation on mean radiant temperature in Singapore.
18. Ketterer, C. and A. Matzarakis(2015) Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. International Journal of Biometeorology 59(9): 1299-1309.
19. Kim, B. S., Y. K. Min, B. C. Min and J. H. Kim(2011) The changes of psychological and physiological emotional responses according to change of the index of predicted mean vote (PMV) due to air conditioning types. Science of Emotion and Sensibility 14(4): 645-652.
20. Kim, G. H., S. B. Kim and E. H. Jung(2004) A study on green net-work construction for urban heat island mitigation in Dalseo district, Daegu metropolitan city. Journal of Environmental Science International 13(6): 527-535.
21. Kim, J. S. and J. E. Kang(2018) Effects of compact spatial characteristics on the urban thermal environment. Urban Design Institute of Korea 19(1): 21-36.
22. Kim, W. S. and H. Y. Kim(2003) Impact analysis of tall apartment buildings on microclimate using computer-based simulation technique. Urban Design Institute of Korea 12(3): 21-37.
23. Kwon, Y. J., D. K. Lee and S. K. Ahn(2019) Urban street planting scenarios simulation for micro-scale urban heat island effect mitigation in Seoul. Journal of Environmental Impact Assessment 28(1): 23-34.
24. Lee, C. H. and J. H. Chung(2017) A study on development of the housing guidelines for climate change

response -Focused on extreme heat and heat island effect-. Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design 33(4): 77-89.
25. Lim, H. W., S. M. Jo and S. K. Park(2022) Analysis of thermal environment modification effects of street trees depending on planting types and street directions in summertime using ENVI-Met simulation. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 50(2): 1-22.
26. Matzarakis, A., H. Mayer and M. G. Iziomon(1999) Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. International Journal of Biometeorology 43(2): 76-84.
27. Mun, G. W., S. G. Jeong, G. H. Park, B. G. Song, C. G. Jang and J. Y. Sin(2015) 도시녹화가 열쾌적성 개선에 미치는 효과 분석. In Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference (pp. 73-74).
28. Oke, T. R., G. Mills, A. Christen and J. A. Voogt(2017) Urban Climates. Cambridge University Press.
29. Park, C. Y., D. K. Lee, E. G. Kwon and M. J. Her(2017) Green-infra strategies for mitigating urban heat island. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology 20(5): 67-81.
30. Ryu, B. R. and E. A. Ko(2010) Wind simulation and optimal building allocation using Envi-met 3-D model. Journal of the Korean Society for Environmental Technology 11(4): 207-215.
31. Salata, F., I. Golasi, R. de Lieto Vollaro and A. de Lieto 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.
32. Simon, H.(2016) Modeling urban microclimate: Development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met. Doctoral Dissertation, Mainz, Univ., Diss.
33. Sodoudi, S., H. Zhang, X. Chi, F. Muller and H. Li(2018) The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. Urban Forestry & Urban Greening 34: 85-96.
34. Song, B. G., K. H. Park and S. G. 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.
35. Tsoka, S., A. Tsikaloudaki and T. Theodosiou(2018) Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications -A review. Sustainable Cities and Society 43: 55-76.
36. Yu, Z., G. Yang and H. Vejre(2019) How to (quantitatively) use the smallest green patch to achieve the best cooling effect in urban climate adaptive planning? AGU Fall Meeting.
37. http://data.seoul.go.kr