한국조경학회지 53(1): 14~25, 2025. 2.
J. KILA Vol. 53, No. 1, pp. 14~25, February, 2025
pISSN 1225-1755 eISSN 2288-9566
https://doi.org/10.9715/KILA.2025.53.1.014

ENVI-met 시뮬레이션을 통한 도시숲 조성 시나리오별 열환경 개선 효과 분석†

Analysis on Heat Reduction Effects by Urban Forest Scenarios Using ENVI-met Simulation†

임재연*, 손정민, 박주현**, 엄정희*****
*경북대학교 대학원 조경학과 석사과정, **경북대학교 대학원 조경학과 박사수료, ***경북대학교 산림과학·조경학부 교수

Lim, Jae-Yeon*, Son, Jeong-Min, Park, Ju-Hyun**, Eum, Jeong-Hee*****
*Master's Student, Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University
**Ph.D. Student, Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University
***Associate Professor, Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

Received: December, 11 2024
Revised: December, 26 2024
Accepted: December, 26 2024
3인익명 심사필

Corresponding author :
Jeong-Hee Eum
Associate Professor, Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea
Tel.: +82-53-950-5780
E-mail: eumjh@knu.ac.kr

국문초록

본 연구는 다양한 도시숲 조성 시나리오를 작성하고, 이에 따른 열저감 효과를 정량적으로 비교하여 효과적인 도시숲 조성 시나리오를 제시하는 것을 목표로 한다. 도시 지역에서 실행될 수 있는 도시숲 조성 가능성을 감안해서, 가로수, 공원, 학교숲의 수목 밀도를 조절하는 시나리오와, 재개발예정지를 대상으로 새로운 도시숲을 조성하는 시나리오를 설계하였다. 시나리오별 열환경 분석을 위해 미기후 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met 5.1.1v 모델을 사용하였다. 분석 결과, 가로수 밀도가 증가하면서 보도를 따라 기온 및 지표면의 온도 저감 효과가 뚜렷하게 나타났다. 모든 시나리오를 14시 기준으로 현황과 비교했을 때 차도폭 10m 이상인 도로에 가로수를 증가시킨 시나리오의 경우, 기온이 0.16℃, physiological equivalent temperature(PET)가 0.91℃ 저감 되었으며, 추가로 가로수를 더 증가시킨 시나리오의 경우 기온이 0.25℃, PET가 1.67℃ 저감되어 수목 식재량이 증가할수록 기온 저감 효과가 높아짐을 보였다. 공원 및 학교숲의 식재밀도를 증가시킨 시나리오의 경우, 시나리오 적용범위 내부에서 기온 및 PET가 각각 0.04℃, 0.71℃ 저감되었다. 재개발예정지의 30%와 50% 면적을 공원으로 조성한 시나리오의 경우 현황과 비교했을 때 기온은 각각 0.03℃, 0.05℃ 감소하였으며 PET는 각각 0.26℃, 0.45℃ 감소하여 넓은 면적의 녹지가 열환경 개선에 효과적이었다. 결과를 종합했을 때 가로수를 추가로 증가시킨 시나리오가 가장 온도를 많이 저감시켜 효과적인 시나리오인 것으로 나타났으며, 가로수 추가 조성 수에 비례하여 온도저감에 가장 큰 영향을 미친 것은 대로변의 가로수 교목 밀도를 증가시킨 시나리오인 것으로 나타났다. PET의 경우 가로수 추가 시나리오가 효과적인 시나리오와 효율적인 시나리오 모두에서 가장 좋은 결과를 보였다. 본 연구는 도시 열환경 개선을 위한 다양한 도시숲 조성 사업의 근거자료뿐만 아니라 효율적인 열환경 개선을 위한 식재 전략을 수립하는 데에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

주제어: 가로수, 공원, 녹지, 미기후 분석, 도시열섬

ABSTRACT

This study aims to create various scenarios of urban forest creation and quantitatively compare their heat reduction effects to suggest an effective scenario. Scenarios were applied to urban areas by adjusting the tree density in street spaces, parks, and school forests, and creating new green spaces in redevelopment sites. A microclimate a simulation program, ENVI-met 5.1.1v, was used to analyze the thermal environment of each scenario. As a result of the analysis, the projection area of tree canopy cover increased as the density of street trees increased, and the thermal environment showed a clear reduction in the temperatures along sidewalks and the ground surface. Comparing all scenarios to the current situation at 14:00, the scenario with an increase in street trees on roads with a width of 10 meters or more reduced the temperature by 0.16℃ and PET by 0.91℃, and the scenario with an additional increase in street trees reduced the temperature by 0.25℃ and PET by 1.67℃, showing that the temperature reduction effect increases as the amount of tree planting increases. For the scenario that increased the planting density of parks and school forests, the temperature and PET were reduced by 0.04℃ and 0.71℃, respectively, within the scenario coverage area. In the scenario where

†본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2022428B10-2224-0802)의 지원을 받아 수행되었습니다.

30% and 50% of a redevelopment site was dedicated as green space, the temperature decreased by 0.03℃ and 0.05℃, respectively, and the PET decreased by 0.26℃ and 0.45℃, respectively, compared to the current situation, showing that large areas of greenery were effective in improving the thermal environment. Based on the results, the scenario that increased the number of street trees was the most effective in reducing the temperature, and the scenario that increased the density of street trees along the boulevard had the greatest impact on temperature reduction in proportion to the number of additional street trees. For PET, the scenario of adding street trees showed the best results in both effective and efficient scenarios. This study is expected to be utilized not only as a basis for various urban forestry projects to improve the urban thermal environment but also to establish planting strategies for efficient thermal environment improvement.

Keywords: Street trees, Park, Green space, Microclimate analysis, Urban heat island

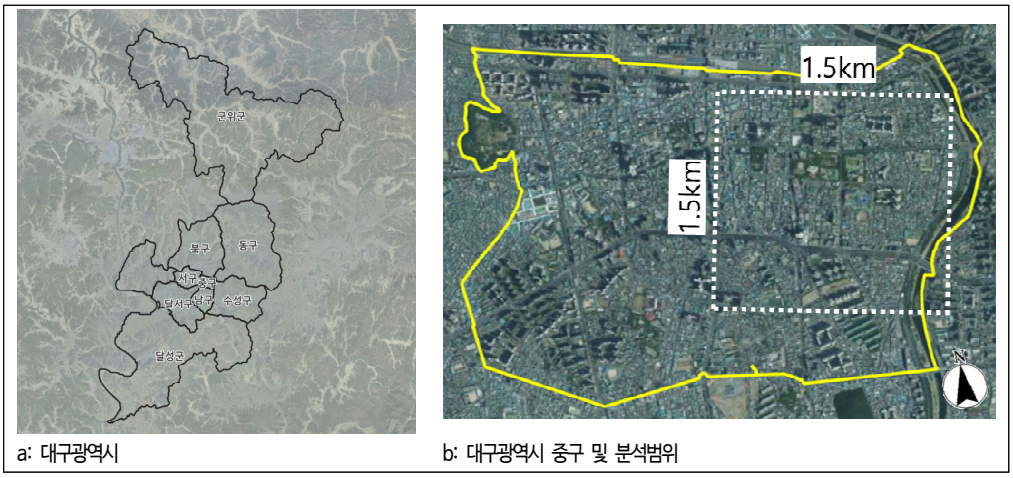
1. 서론

산업화 및 도시화 과정에서 도시 공간이 확장되고 인공 시설물이 증가하면서, 기후변화에 따른 도시 열섬현상, 생태계 파괴, 도시민 건강 저해 등의 문제가 발생하고 있다. 그중 열섬현상은 여름철 열 관련 질환자 증가 및 냉방비 증가와 같은 사회·경제적 문제에 영향을 미쳐 도시의 열환경 개선이 중요한 사회문제로 자리잡았다(오규식과 홍재주, 2005). 특히 도시화가 많이 진행된 지역의 기온 상승폭이 크게 나타났으며(김기중과 안영수, 2017), 인공구조물 및 인공포장으로 인한 지표면 온도 증가와 녹지 감소 등이 주요 원인으로 제시되고 있다(윤희천 등, 2013; 고범석 등, 2022; 이신영 등, 2024). 우리나라의 2024년 여름철 전국 평균기온은 25.6℃로 평년보다 1.9℃ 상승하여 1973년 이래 최고 기온을 달성하였으며, 이에 따라 폭염일수 및 열대야일수 또한 증가하고, 열질환자 수 또한 증가하는 추이를 보였다(https://www.weather.go.kr/kma/news/press.jsp?mode=view&num=11 94405).

이러한 문제에 대응하기 위해 열환경 개선을 위한 다양한 선행연구들이 진행되어왔으며, 도시숲이 도시 미기후 개선에 긍정적인 영향을 미친다는 사실이 관측 및 시뮬레이션 연구를 통해 입증되고 있다(Farhadi et al., 2019; 홍석환 등, 2020). 수목의 열환경 개선 매커니즘은 크게 증산작용에 의한 기온 저감 효과(조현길과 안태원, 1999; 김수봉과 김해동, 2002)와 그늘에 의한 태양복사 차단(주민진 등, 2004)으로 나눌 수 있으며, 녹지 유형별, 공간적 특징에 따라 다양한 변수들을 사용한 연구들이 진행되고 있다. Lobaccaro and Acero(2015)은 수목, 잔디 등 식물이 보행자 수준에서 열쾌적성을 개선할 수 있으며, 나무와 잔디를 함께 식재하는 경우 열쾌적성을 높이는 가장 효율적인 방법임을 확인하였다. Jia and Wang(2021)은 고밀도 도시지역을 대상으로 미기후 CFD모델 분석을 통해 가로수 시나리오가 옥상녹화, 벽면녹화, 피복 변경 시나리오에 비해 평균 복사온도와 UTCI 개선에 효과적이라고 하였다. 민진규 등(2022)은 생활권 녹지에 적용가능한 시나리오를 분석했을 때, 공원 식재 밀도가 높아질수록 기온이 낮아지며, 가로수 식재 간격이 좁을수록 높은 기온 저감 효과를 가짐을 밝혔다. 박종화와 조기혁(2016)은 공원 크기와 주변 지역의 거리별 온도저감효과를 분석하여 공원의 크기가 증가함에 따라 더 큰 지표온도 감소를 보임을 확인하였다. Aram et al.(2019)은 녹지공간의 크기, 모양 등 다양한 요인에 따라 냉각효과가 달라지며, 큰 규모의 도시공원이 작은 규모의 공원에 비해 냉각효과가 크다는 결과를 도출했다. 또한 면적 및 녹지의 품질 또한 중요한 요소임을 언급했다. Jamei and Rajagopalan(2017)은 보행자 수준에서 열쾌적성을 증진하는데 중요한 것은 수관 면적을 늘리는 것이며, 가장 더운 시간대에 공원 내부와 공원에 가까운 지역은 다른 지역에 비해 평균 온도가 낮다고 하였고, Coutts et al.(2016) 또한 여름철 나무가 도시의 열환경을 완화하며, 수관 그늘이 열스트레스 수준을 낮출 수 있음을 밝혔다.

이와 같이 연구를 검토한 결과, 녹지의 구조, 유형, 크기, 밀도 등 다양한 요소들이 열환경 개선에 영향을 미침을 확인하였다. 선행연구의 결과에서 알 수 있듯이, 도시 환경 개선에 녹지가 긍정적인 영향을 미치지만 무분별하게 확장된 도시 공간에서 녹지 조성을 위한 토지 확보가 어려우며 녹지 조성을 위한 예산 및 관리에 한계가 존재한다.

이에 본 연구는 도시숲에 적용 가능한 교목 및 지표면 피복의 변화에 따른 기온 및 열쾌적성의 차이를 정량적으로 분석하여 어떤 유형의 도시숲 시나리오가 열환경 개선에 더 긍정적인 영향을 미치는지 비교하고자 하였다. 도시공간 및 도시숲은 시민들의 직접적인 이용이 이루어지는 공간이므로, 기온과 더불어 실제 시민들이 체감하는 열스트레스정도를 비교하고자 열쾌적성을 함께 분석하였다. 이를 위해 각 도시숲 유형에 적용할 수 있는 도시에 적용가능한 시나리오를 생성하고, 미기후 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met 분석을 통하여 효과적인 도시 열환경 개선을



a: 대구광역시 b: 대구광역시 중구 및 분석범위

그림 1. 연구 대상지
범례: 중구 분석범위

위한 방법을 도출하고자 한다. 분석 결과는 실질적으로 정책의 우선순위를 결정하고 도시숲 정책 수립에 근거가 될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상지

대구광역시는 분지지형을 가지고 있어 여름철 폭염 및 열대야의 발생이 빈번한 지역이다. 그중 중구 일대는 도시의 중심지로 사람들의 이용이 많고 고층 건물 및 인공포장의 비율이 높은 지역이며, 이러한 환경은 냉방 에너지 사용량 증가 및 열 질환 증가 문제를 유발하여 열환경 개선을 위한 노력이 필요한 지역이다(조혜민 등, 2019; 김종성과 강정은, 2021).

분석을 위한 대상지는 대구시 중구에 위치한 국채보상운동기념공원을 중심으로 규모가 다른 다양한 형태의 도시숲이 포함될 수 있도록 동서방향 1.5km, 남북방향 1.5km으로, 총 면적 2.25km^{2}의 범위를 설정하였다(그림 1 참조). 대로 및 중로, 소로의 가로수, 공원 2개소, 학교숲 6개소, 재개발예정지 등 다양한 유형의 도시공간이 분포하도록 분석범위를 선정해 공간 유형별 열환경 개선 시나리오에 따른 녹지의 효과를 확인할 수 있도록 하였다.

2.2 열환경 시뮬레이션

도시숲 시나리오별 도시 열환경 개선 효과를 확인하기 위해 전산 유체 역학 기반 미기상 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met 5.1.1v을 활용하였다. ENVI-met은 건축물, 수목, 토지피복 등의 도시공간 요소의 모델링과 기온 및 습도, 풍향, 풍속 등의 기상적 요소에 따른 시간별 기온, 풍향, 풍속, 지표면 온도 및 열쾌적성에 대한 예측값을 제공하는 프로그램으로, 시나리오 적용에 따른 도시 미기후 분석에 효과적이며 전세계적으로 건물, 수목 등 도시 환경 요소를 고려한 열환경 연구에 범용적으로 활용되는 모델이다(Morakinyo et al., 2017; Ouyang et al., 2020). 본 연구는 변수를 제한하여 시나리오를 생성하고, 이에 따른 미기후 변화와 녹지의 효과를 비교·분석하는 것을 목적으로 하기에 ENVI-met 프로그램을 사용하였다. 그러나 ENVI-met은 모델링 해상도 및 구축 정밀도가 결과에 영향을 미칠 수 있으며, 분석 대상지의 면적 및 모델링 시간이 늘어날수록 분석에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다(송봉근 등, 2014; Tsoka et al., 2018).

분석 대상지를 구현하기 위한 공간 모형의 크기는 1.5km × 1.5km × 120m이며, 모형 해상도는 5m × 5m × 3m로 설정하였다. 모형 구축을 위한 건축물 정보는 국토교통부에서 제공하는 수치지형도 1:5,000(2023)을 활용하였으며, 분석범위 내부에 고층 건축물들이 다수 분포하기 때문에 모델의 안정성을 높이고 시뮬레이션 시간을 단축하기 위해 건축물 최고 높이는 70m로 제한하였다.

모델 구축 시 사용된 수목은 ENVI-met 프로그램에서 제공되는 기본 수목을 가공한 후 사용하였다(표 1 참조). 우리나라 도시의 특성에 맞는 수목규격을 적용하기 위해 현장조사와 위성지도를 활용하여 공간별 수목의 수고, 수

표 1. 수목 구축 자료

적용 공간	수고(m)	수관폭(m)	지하고(m)
달구벌대로, 신천대로	12	8	5
5m 이상 도로	10	5	4
중앙분리대	10	5	4
공원, 학교숲	5	6	2
기타 녹지	10	5	4

관폭 데이터를 수집하고, 많이 사용된 수목을 대표 수종으로 선정하여 규격 평균을 산정했다. 현장조사는 시뮬레이션 범위 내 공원에 대하여 약 3,000그루의 자료를 수집하였으며, 가로수 및 중앙분리대 등의 수목은 위성지도를 활용하여 자료를 수집하였다. 식재는 낙엽활엽교목과 일부 공간의 잔디 피복만 적용되었으며, 시뮬레이션 결과 비교의 용이성을 위해 활엽교목으로 통일하였으므로 침엽수 및 관목은 고려되지 않았다.

여름철의 상황을 시뮬레이션하기 위해 기상청 종관기상관측(ASOS) 대구지점(176)과 방재기상관측(AWS) 대구북구(845), 대구서구(846), 신암(860)의 2021년 7월, 8월 자료를 이용하였으며, 강우시의 데이터를 제외한 값을 가공하여 평균값을 사용하였다(표 2 참조). 시뮬레이션 입력조건의 날짜는 7월, 8월의 평균을 사용하였으므로 중간일자인 8월 1일로 지정하였다.

시뮬레이션은 일출 후 누적되는 태양복사열을 반영하기 위해 오전 6시부터 10시간을 분석하였으며, 더운 낮시간 동안의 결과를 분석하기 위해 10시부터 16시까지 2시간 간격으로 데이터를 추출하였다. 시뮬레이션 결과는 기온, PET의 결과를 사람 생활권 높이인 1.5m에서 추출하여 분석하였다. PET는 독일에서 개발된 인간이 느끼는 열스트레스 강도를 분류한 열쾌적성 지표로, 기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도를 이용하여 계산된다. PET는 ENVI-met의 분석 결과 및 BIOmet 프로그램의 착의량, 신체대사율 등을 지정을 통해 계산될 수 있다.

2.3 시나리오 설계

효과적인 도시 열환경 개선을 위해 도심에 위치한 다양한 도시숲을 이용하여 밀도를 조절하거나, 신규 녹지를 조성하는 시나리오를 생성했다. 도시 지역에서 시나리오가 적용될 수 있는 공간으로 가로공간과 공원, 학교숲 등을 선정하였고, 재개발예정지를 대상으로 신규 녹지를 조성하는 시나리오를 적용하였다(그림 2, 표 3 참조). 밀도 높은 도시에서 대규모의 신규 녹지 조성은 어렵지만, 재개발예정지를 잠재적으로 공원 조성이 가능한 공간으로 판단하여 분석하였다.

S1과 S2는 가로수의 교목 밀도 증가에 따른 열환경 개선 정도를 비교하기 위한 시나리오로, S1은 차도폭 10m 이상인 가로에 교목 밀도를 증가시켰으며 다열식재가 가능한 보도는 다열식재를 적용하였다, S2는 S1에서 교목이 추가되지 않은 가로에 추가로 교목을 식재하여 더 많은 범위의 가로 열환경을 개선하고자 하였다. 교목 밀도를 증가시킨 결과, S1은 950그루가 추가 식재되어 현황 대비 약 30%의 수목이 추가되었으며, S2는 현황대비 1,747그루 추가 식재되어 현황 대비 약 55%의 수목이 추가되었다.

S3은 공원 및 학교숲의 식재면적 및 수관피복률을 증가시켜 열환경 개선정도를 확인하기 위한 시나리오로, 분석범위 내에 존재하는 공원과 학교숲의 피복을 잔디로 변경하고 교목을 추가 식재하였다. 수관피복률을 늘려 그늘을 증가시키기 위해 공원 내부 포장면적의 50%가 교목이 되도록 추가식재 하였으며, 공원의 광장부분 외 모든 지역을

표 2. 시뮬레이션 기본 입력 조건

분류	입력값
시뮬레이션 날짜	2021년 8월 1일
시뮬레이션 시작시간	6:00
총 시뮬레이션 시간(h)	10
공간모형 크기(km)	1.5 x 1.5
셀 크기(m)	5 x 5 x 3
최고기온(℃)	31.2
최저기온(℃)	22.7
풍향(°)	140
풍속(m/s)	1.7

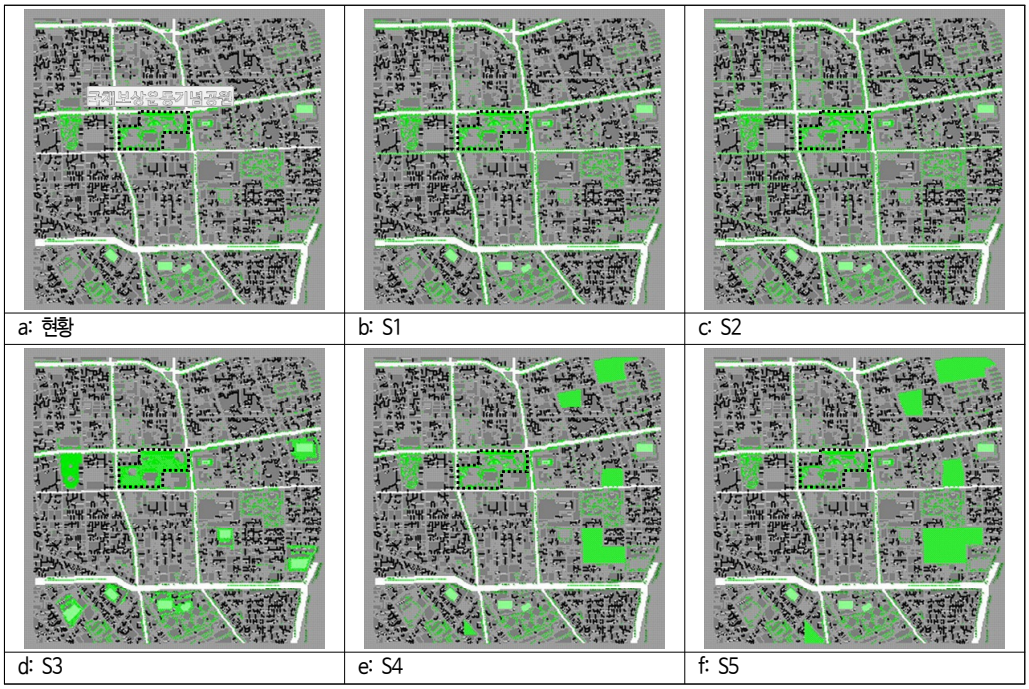


그림 2. 본 연구에 적용된 시나리오

표 3. 시나리오별 설명

시나리오	적용 도시숲	상세	수목량(개)
현황	-	현황 시나리오	3,203
S1	가로수	차도폭 10m 이상인 도로의 가로수 교목 밀도 증가	4,153
S2	가로수	S1 + 가로수 교목 추가	4,950
S3	공원, 학교숲	공원 및 학교숲의 식재면적 및 수관피복률 증가	4,535
S4	재개발예정지	재개발예정지의 30% 면적에 신규공원 조성	4,445
S5	재개발예정지	재개발예정지의 50% 면적에 신규공원 조성	5,218

잔디피복으로 변경하였다. 학교숲의 경우 모래 운동장은 잔디피복으로 변경하고 포장면적의 50%가 교목이 되도록 추가식재하였다. 시나리오 적용 결과, 현황 대비 교목이 1,332그루 증가하여 현황 대비 약 40%의 수목이 추가되었으며, 3,112m^2의 면적이 잔디피복으로 변경되었다.

S4와 S5는 재개발예정지의 일부를 공원으로 조성하여 도시의 녹지 면적을 늘리는 경우로, 추가되는 녹지 면적의 차이에 따른 열환경 개선 정도를 확인하고자 하였다. S4는 재개발예정지의 30%를 공원화했으며 S5는 재개발예정지의 50%를 공원화하도록 시나리오를 구축했다. 4개 구역의 재개발예정지를 대상으로 시나리오를 구축하였으며, S4는 현황 대비 1,242그루가 추가 식재되어 현황 대비 약 40%의 수목이 추가되었고, S5의 경우 현황 대비 2,015그루 증가하여 현황 대비 약 60%의 수목이 추가되었다.

3. 연구 결과

3.1 도시숲 시나리오별 열환경 변화 비교

시나리오별 분석영역 전체의 평균 기온, PET를 비교하고, 상세 분석범위를 선정하여 비교하였다. 시나리오의 낮 시간의 기온 및 PET의 경향성을 파악하기 위해, 10시부터 16시까지 2시간 간격으로 데이터를 추출한 결과는 다음과 같다(그림 3, 4, 표 4 참조). 기온의 경우 모든 시나리오에서 10시에 가장 낮은 값을, 16시에 가장 높은 값을 가졌으나, PET의 경우 10시에 가장 낮은 값을 나타내고 14시에 가장 높았다가 이후 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향에 따라 시나리오 간 비교를 위한 분석 시간은 사람이 느끼는 열스트레스가 가장 높은, PET가 가장 열악한

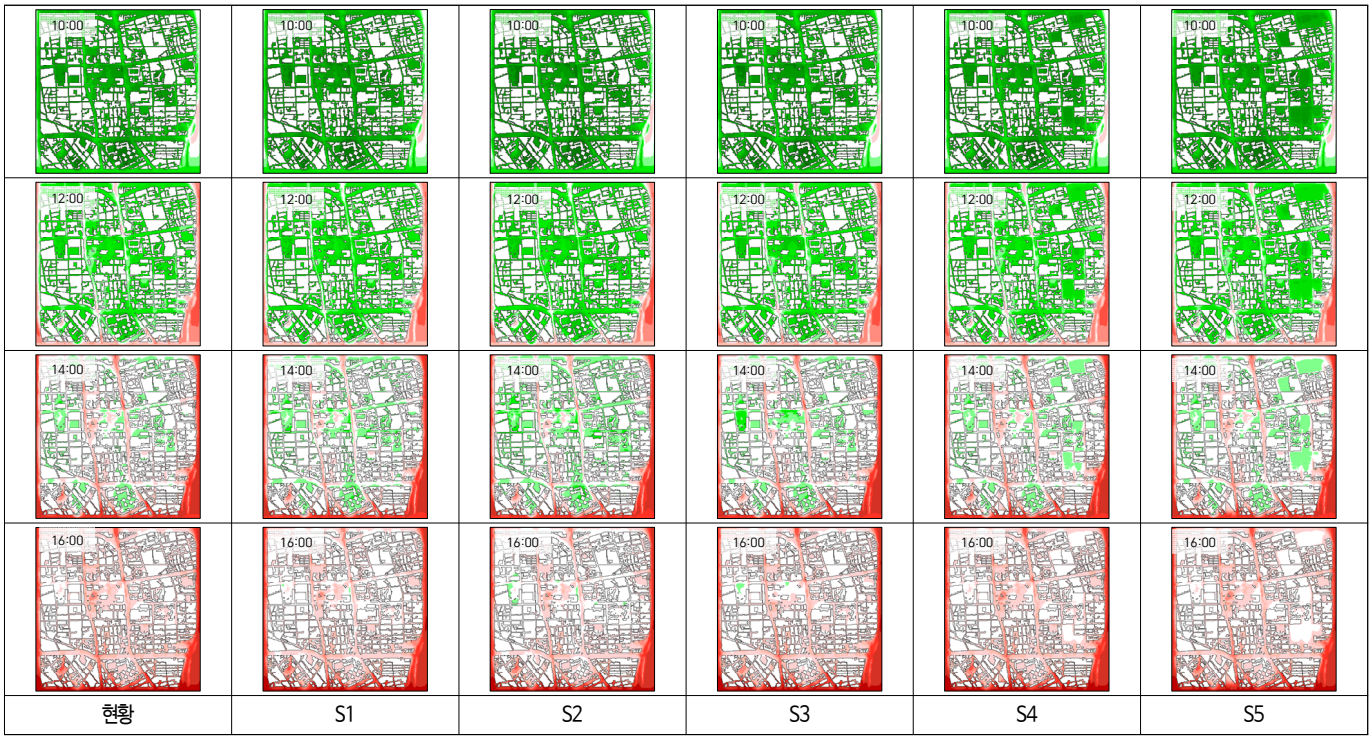


그림 3. 시나리오별 기온

범례: Above 32.10℃ / 31.7 to 32.1℃ / 31.3 to 31.7℃ / 30.9 to 31.3℃ / 30.5 to 30.9℃ / 30.1 to 30.5℃ / 29.7 to 30.1℃ / 29.3 to 29.7℃ / 28.9 to 29.3℃ / 28.5 to 28.9℃ / 28.1 to 28.5℃ / 27.7 to 28.1℃ / 27.3 to 27.7℃ / 26.9 to 27.3℃ / Below 26.90 ℃

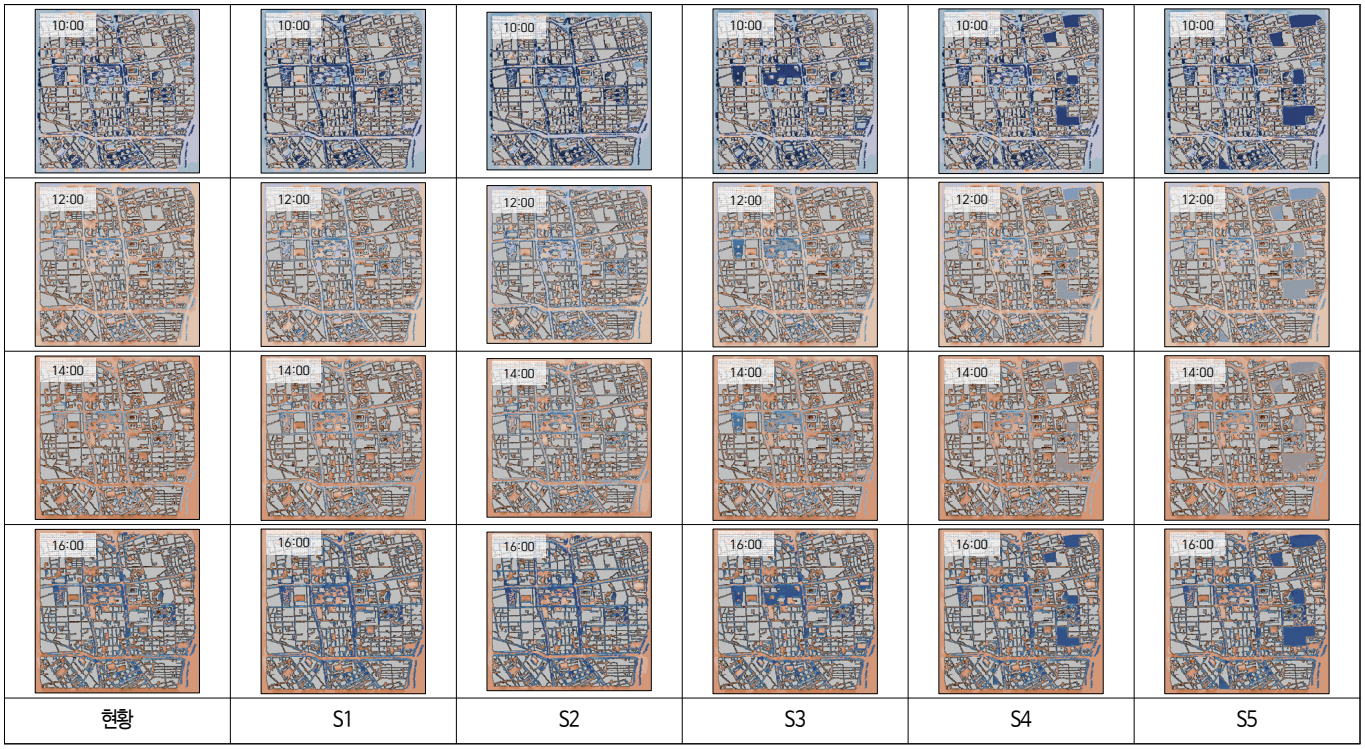


그림 4. 시나리오별 PET

범례: above 58.5℃ / 57.0℃ to 58.5℃ / 55.5℃ to 57.0℃ / 54.0℃ to 55.5℃ / 52.5℃ to 54.0℃ / 51.0℃ to 52.5℃ / 49.5℃ to 51.0℃ / 48.0℃ to 49.5℃ / 46.5℃ to 48.0℃ / 45.0℃ to 46.5℃ / 43.5℃ to 45.0℃ / 42.0℃ to 43.5℃ / 40.5℃ to 42.0℃ / 39.0℃ to 40.5℃ / 37.5℃ to 39.0℃ / 36.0℃ to 37.5℃ / 34.5℃ to 36.0℃ / 33.0℃ to 34.5℃ / 31.5℃ to 33.0℃ / below 31.5℃

표 4. 시나리오별 평균 기온 및 평균 PET(℃)

시간	현황		S1		S2		S3		S4		S5	
	평균기온	평균PET	평균기온	평균PET	평균기온	평균PET	평균기온	평균PET	평균기온	평균PET	평균기온	평균PET
10:00	27.78	42.94	27.70	42.04	27.65	41.33	27.76	42.23	27.76	42.35	27.75	41.98
12:00	29.07	46.60	28.98	45.78	28.91	45.08	29.04	45.94	29.04	46.20	29.02	45.93
14:00	29.99	48.49	29.89	47.55	29.82	46.71	29.95	47.81	29.96	48.13	29.94	47.89
16:00	30.39	46.18	30.29	45.21	30.22	44.41	30.34	45.38	30.35	45.48	30.32	45.04

14시를 기준으로 진행되었다(표 4 참조). 전반적인 기온 분포를 살펴보면, 기존에 녹지가 존재하는 부분이 도로 및 수목이 없는 공간에 비해 낮은 기온분포를 보였다. PET 또한 수목이 식재된 공간에서 낮은 값을 가졌다. 수목 및 건물이 존재하지 않는 국채보상운동기념공원 북측의 공간과 넓은 도로의 중심 부분에서 기온 및 PET가 높은 값을 가짐을 확인할 수 있다. S3, S4, S5의 경우 시나리오 적용 부분의 기온과 PET가 뚜렷하게 낮은 기온분포를 보였다. 분석 범위 외곽부분의 경우, 시뮬레이션의 원활한 구동을 위해 여유공간을 두고 공간모형을 생성하는 과정에서 높거나 낮은 값을 표출하여 그림 3의 외곽부와 같은 모습을 나타냈다.

3.2 도시숲 시나리오 특성별 열환경 변화

3.2.1 가로수 교목 밀도 증가 시나리오

14시를 기준으로, 가로수 교목 밀도 증가에 따른 두가지 시나리오를 현황과 비교하여 분석하였다(그림 5 참조). 차도폭 10m 이상인 도로의 가로수의 밀도를 증가시킨 S1의 평균기온은 29.22℃, 가로수를 추가로 식재한 S2의 평균기온은 29.15℃로 S2가 S1보다 0.07℃ 더 낮은 평균기온을 나타냈다. 현황의 기온값과 비교했을 때 S1은 평균 0.09℃(0.31%)저감, S2는 평균 0.16℃(0.54%) 저감되었다. PET 또한 기온의 경향과 유사하게 나타났다. 분석시간 전체 평균이 S2은 44.38℃, S1은 45.15℃으로 S2가 S1보다 0.76℃ 낮게 나타났으며, 현황과 비교했을 때 S1은 평균 0.91℃(3.62%), S2는 평균 1.67℃(1.97%) 저감되었다. 하지만 두 시나리오 모두 시나리오 적용 후에도 열스트레스의 단계는 극한 열스트레스를 유지했다.

시나리오 적용 공간에 대한 세부적인 분석을 위해, 가로수 밀도를 증가시킨 도로 너비에 따른 기온 저감 효과를

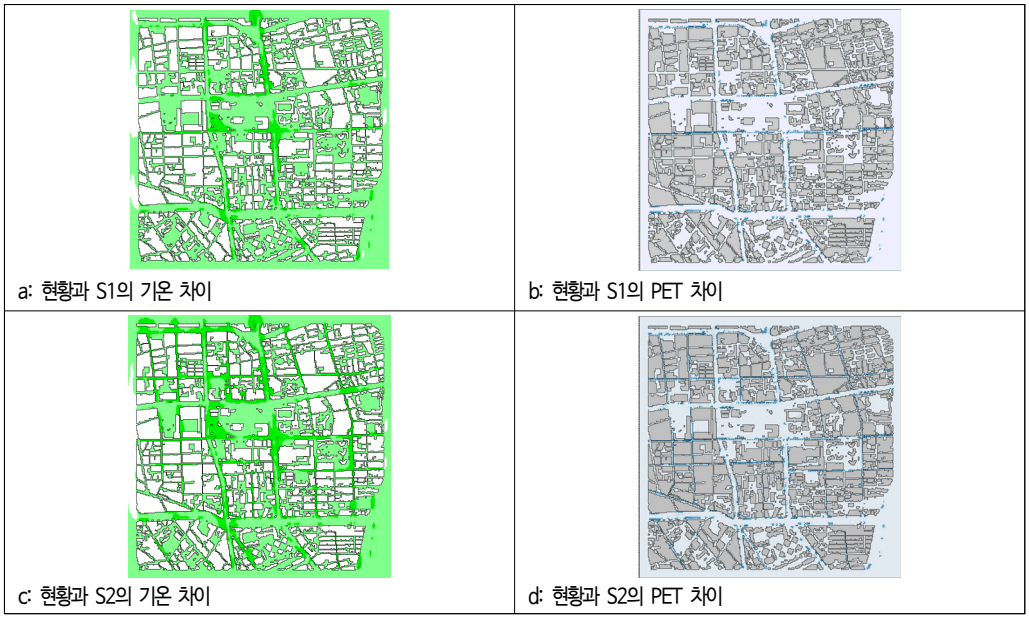


그림 5. 현황과 S1, S2 비교

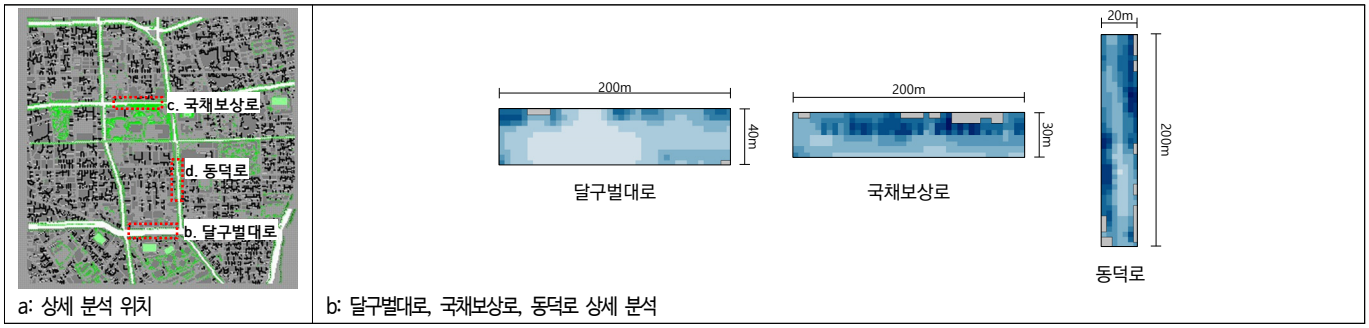
비교하였다(그림 6 참조). 상세 분석은 도로 너비 40m폭의 달구벌대로, 30m폭의 국채보상로, 20m폭의 동덕로의 200m 범위의 보도와 도로를 대상으로 하였으며, S1과 S2 시나리오간 상세 분석 범위의 교목 수의 차이가 미미하여 S1의 기온 및 PET값을 분석하였다. 현황과 S1의 기온을 비교한 결과 달구벌대로에서 평균 0.13℃, 최대 0.47℃, 국채보상로에서 평균 0.27℃, 최대 0.67℃, 동덕로에서 평균 0.29℃, 최대 0.63℃ 저감되었으며, PET의 경우 달구벌대로에서 평균 1.80℃, 최대 11.32℃, 국채보상로에서 평균 2.53℃, 최대 12.93℃, 동덕로에서 평균 2.26℃, 최대 10.72℃ 저감되었다. 국채보상로와 동덕로에서 기온 0.2℃, PET 2℃ 이상의 저감효과를 보여 달구벌대로에 비해 저감량이 크게 나타났다.

3.2.2 도시숲 식재 밀도 증가 시나리오

14시를 기준으로, 도시숲 식재 밀도 증가에 따른 시나리오를 현황과 비교하였다(그림 7 참조). S3은 평균 기온 29.27℃로 현황과 비교했을 때 0.04℃(0.12%) 저감되었다. 열쾌적성 지표인 PET는 44.38℃로 현황에 비해 0.71℃ (1.55%) 저감되었으나 열스트레스 단계는 극한 열스트레스를 유지했다.

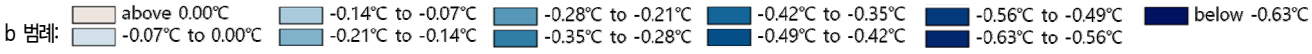
S3에서 시나리오가 적용된 공간의 기온 및 PET 변화를 분석하기 위해, 2·28기념중앙공원(이하 '2·28공원'이라 한다)과 국채보상운동기념공원을 대상으로 상세 분석을 진행하였다(그림 8b 참조). 이를 위해 2·28공원과 국채보상운동기념공원 도시숲 내부의 값과 100m 반경의 값을 현황과 비교하였다. 상세분석 대상인 두 공원의 거리가 약 200m이므로, 분석 범위를 100m 반경으로 제한하였다. 도시숲 내부의 기온 저감량은 2·28공원에서 0.35℃, 국채보상운동기념공원에서 0.41℃였으며, 도시숲이 인근 공간에도 기온 저감에 영향을 미쳐 2·28공원 100m 반경의 기온은 평균 0.13℃, 국채보상운동기념공원의 100m 반경의 기온은 평균 0.16℃ 저감되었다. PET의 경우 도시숲 내부를 기준으로 2·28공원에서 5.41℃저감, 국채보상운동기념공원에서 2.62℃의 저감효과를 보였으며, 반경 100m 범위를 기준으로 각각 1.18℃, 1.13℃ 저감되었다. 식재 밀도를 증가시킨 2·28공원의 내부는 PET 한단계를 떨어트릴 정도의 효과를 보였다.

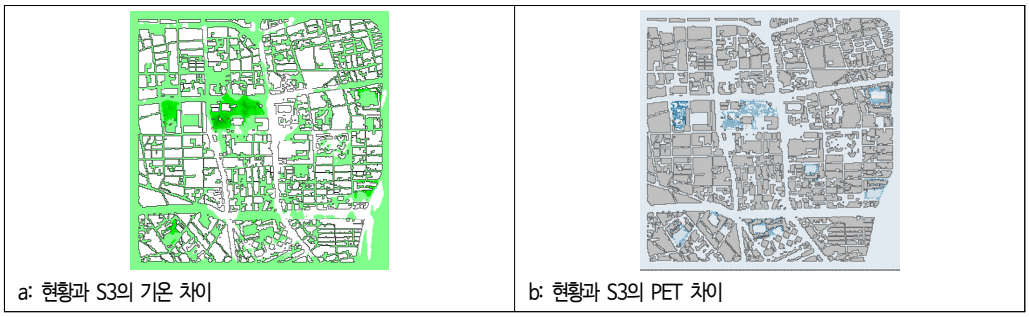
추가적으로 상세 분석 대상지에 대한 인근 공간으로의 영향을 단면 분석을 통해 확인하였다(그림 8a 참조). 분석 단면은 두 대상지를 함께 분석할 수 있도록 동서방향 단면을 선정했다(그림 8c 참조). 2·28공원은 수목 식재밀



a: 상세 분석 위치 b: 달구벌대로, 국채보상로, 동덕로 상세 분석

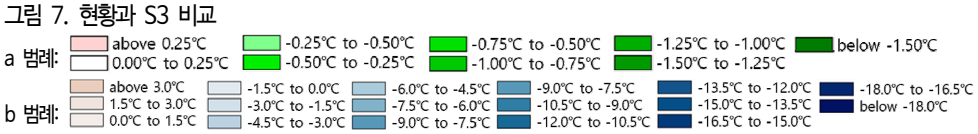
그림 6. 현황과 S1 비교 상세 분석





a: 현황과 S3의 기온 차이 b: 현황과 S3의 PET 차이

그림 7. 현황과 S3 비교



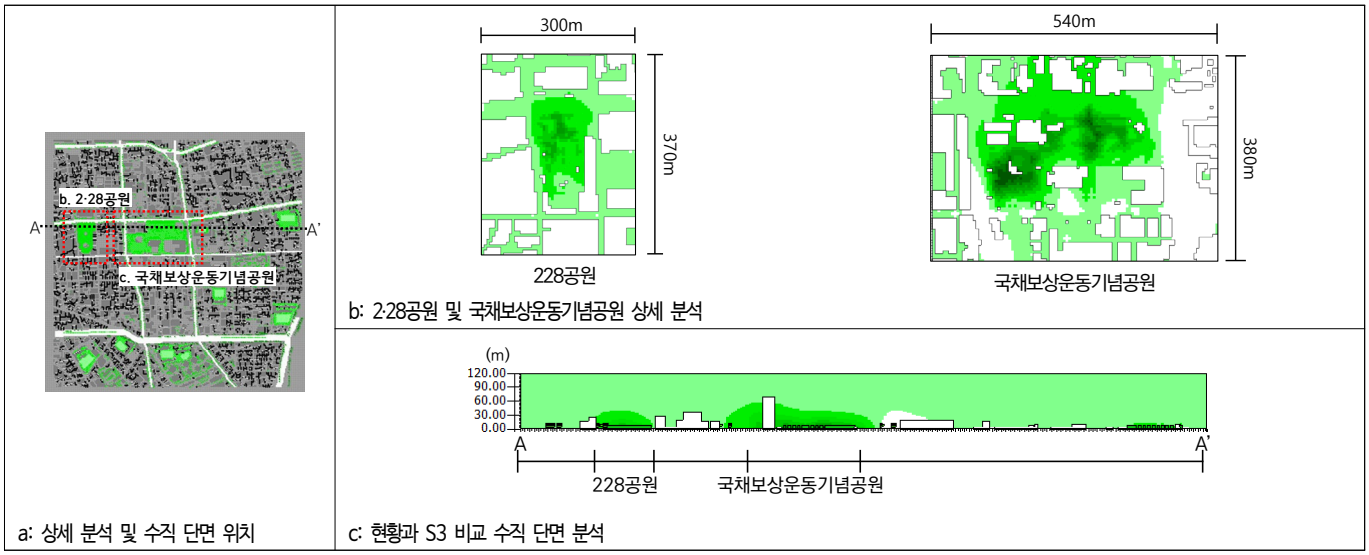
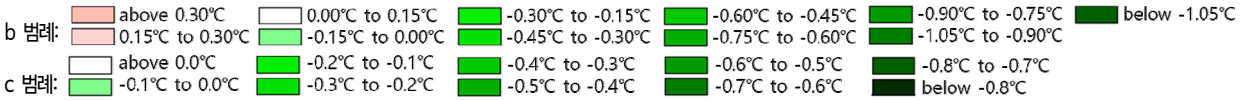


그림 8. 현황과 S3 비교 상세 분석



도 증가 후 수평 최대 65m까지 0.1℃, 30m까지 0.2℃, 수직단면을 잘랐을 때 최대 54m까지 0.1℃, 27m까지 0.2℃ 저감효과를 보인 부분이 존재했다. 국채보상운동기념공원은 식재밀도 증가 후 수평방향으로 최대 170m까지 0.1℃, 90m까지 0.2℃, 수직단면을 잘랐을 때 최대 60m까지 0.1℃, 36m까지 0.2℃ 저감효과를 보였다.

3.2.3 신규 녹지 조성 시나리오

14시를 기준으로, 신규 녹지 생성에 따른 시나리오의 기온 평균값을 분석하였다. 재개발지역의 30%를 녹화한 S4의 평균기온은 29.28℃로 현황 대비 0.03℃(0.10%) 저감되었으며, 재개발지역의 50%를 녹화한 S5의 경우 평균기온이 29.26℃로 현황 대비 0.05℃(0.17%) 저감되었다. 녹화 면적이 더 넓은 S5 시나리오가 S4 시나리오에 비해 기온이 0.02℃ 더 낮게 나타났다. PET의 경우 S4에서 45.54℃, S5에서 45.21℃의 값을 가져 현황 대비 각각 0.26℃(1.12%), 0.45℃(1.84%)의 저감을 보였다.

신규 녹지 생성에 따른 인근 공간으로의 영향을 분석하기 위해 3개의 시나리오 적용지역을 포함하는 남북단면을 선정했다. 추가적으로 녹지 생성 면적에 따른 기온 변화량의 차이를 확인하였다(그림 9 참조).

현황과 S4, S5를 비교한 결과, S4의 단면a에서는 수평범위에서 최대 110m까지 0.1℃ 이상, 최대 5m까지 0.2℃ 이상의 저감 효과를 보였으며, 수직으로 최대 66m까지 0.1℃ 이상, 42m까지 0.2℃ 이상의 기온 저감 효과를 가졌다. S5의 단면a에서는 수평으로 최대 140m까지 0.1℃ 이상, 45m까지 −0.2℃ 이상의 기온 저감 효과를 보였으며, 수직으로 최대 90m까지 0.1℃ 이상, 60m까지 0.2℃ 이상의 기온이 저감되었다. 단면b에서도 S4는 수평으로 최대 30m까지 0.1℃ 이상의 기온 저감 효과를 보였으며, S5에서는 수평으로 최대 140m까지 0.2℃ 이상, 15m까지 0.1℃ 이상의 기온이 저감되었다. 신규 식재된 녹지 면적이 넓고 증가된 수목량이 많은 S5의 기온 저감 범위 및 효과가 더 크게 나타났다.

3.3. 결과 종합 및 고찰

시뮬레이션 결과를 PET가 열악한 14시를 기준으로 분석했을 때, 도시의 가로수 교목 밀도를 증가시킨 S1, S2가 도시숲 식재 밀도 증가 및 신규 녹지 조성의 S3, S4, S5보다 상대적으로 높은 기온 저감량을 나타냈다. 이는 분석 대상지 내에 교목의 추가 범위가 도로를 따라 넓은 범위에 분포되어있는 S1, S2 시나리오가 수목의 그늘 생성 및 증발산 효과를 통한 기온 저감 영향을 미칠 수 있는 범위가 넓기 때문인 것으로 판단되었다(Jamei and Rajagopalan, 2017; Coutts et al., 2016). 또한 S3, S4, S5에서의 기온 저감량이 상대적으로 작게 나타난 것은 시나리오 적용 범위가 분석 대상지 전체 범위에 비해 좁은 범위에 적용되었기 때문인 것으로 보인다.

가로수 식재 밀도 증가 시나리오의 세부 분석에서도 차도폭이 좁은 국채보상로와 동덕로가 달구벌대로에 비해

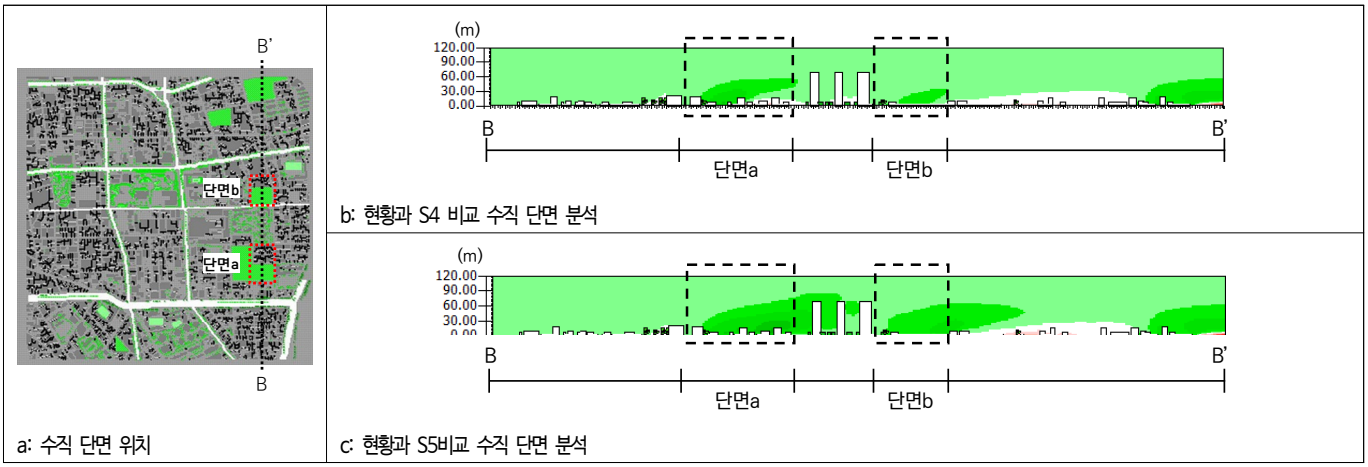


그림 9. 현황과 S4, S5 비교 수직 단면 분석

b, c 범례: above 0.0℃ / -0.1℃ to 0.0℃ / -0.2℃ to -0.1℃ / -0.3℃ to -0.2℃ / -0.4℃ to -0.3℃ / -0.5℃ to -0.4℃ / -0.6℃ to -0.5℃ / -0.7℃ to -0.6℃ / -0.8℃ to -0.7℃ / -0.9℃ to -0.8℃ / -1.0℃ to -0.9℃ / -1.1℃ to -1.0℃ / below -1.1℃

낮은 기온 및 PET값을 나타냈는데, 이는 좁은 도로일수록 가로수의 수관이 제공하는 그늘 면적이 증가함에 따라 분석 범위 내에서 태양복사에너지가 투영되는 비율이 감소했기 때문으로 판단되며 이는 관측기반의 선행연구와 유사한 결과를 보였다(손정민과 엄정희, 2024).

도시숲 식재 밀도 시나리오의 경우, 식재 밀도가 증가했을 때 현황 대비 기온 및 PET가 개선된 것으로 보아 녹지의 유무 뿐만 아니라 수목밀도와 같은 세부적인 식재 방법 또한 고려되어 조성될 필요가 있음을 시사한다(Aram et al., 2019). 또한 시나리오 내에서 동일한 밀도로 증가된 두 공원을 대상으로 상세 분석을 진행한 결과, 기온의 경우 크기가 큰 국채보상운동기념공원의 저감 효과가 더 컸으며, 인근 공간으로의 영향 범위 또한 더 넓게 나타났다. PET의 경우 2·28공원의 저감 효과가 더 크게 나타났다. 신규 녹지 조성 시나리오의 녹지 면적에 따른 차이를 비교했을 때는 녹화 면적이 넓은 시나리오에서 기온과 PET에서 모두 큰 저감 효과를 보였으며, 주변으로의 영향 범위 또한 넓게 나타났다. PET의 경우 기온뿐만 아니라 습도, 풍속 등 여러 요소에 영향을 받아 이러한 차이가 생긴 것으로 보인다.

추가적으로 시나리오별 기온 및 PET 결과를 종합하여 열환경 개선 효과가 크게 나타난 효과적인 시나리오와 현황 대비 증가한 수목량 대비 열환경 개선 효과가 높은 효율적인 시나리오를 제시하고자 한다. 14시를 기준으로 기온 측면에서 가장 효과적인 시나리오는 S2>S1>S5>S3>S4 순으로 나타났으며 PET 또한 동일하게 나타났다. S1과 S2가 현황과 비교했을 때 각각 −0.10℃, −0.17℃의 효과를 가졌으며, S3, S4, S5에서는 0.03℃-0.05℃의 효과를 가져 가로수 밀도를 증가시킨 시나리오가 비교적 큰 저감효과를 나타냈다. 효율적인 시나리오는 14시를 기준으로 기온 측면에서 S1>S2>S3>S5>S4 순으로 나타났으며, PET 측면에서는 S2>S1>S3>S5>S4 순으로 나타났다. 기온 측면에서 수목 증가량 대비 S1이 S2보다 효율적인 것으로 나타났으나, PET 측면에서는 S2가 S1보다 효율적으로 열쾌적성을 개선할 수 있었다. S1과 S2는 사람의 보행환경과 밀접한 시나리오이며 효과적인 시나리오와 효율적인 시나리오 모두에서 높은 열환경 개선 효과를 가짐에 따라, 도시의 가로수 밀도를 증가시키고, 가로수가 없는 도로에 교목을 식재하는 것은 도시의 열환경 개선에 큰 역할을 할 것으로 사료된다.

종합하였을 때, 분석 대상지 전체에 대한 시나리오 간의 비교 결과 도시 전반의 기온 및 열쾌적성 개선 측면에서는 가로수의 밀도를 증가시키는 것이 효과적이었다. 특히 차도폭이 좁은 도로에서의 열환경 개선 효과가 큰 것으로 보아 그늘이 뚜렷한 영향을 미친 것으로 판단된다. 그늘면적의 증가가 열환경 개선에 긍정적인 영향을 미친다는 결과는 선행연구들과 유사하게 나타났다(Coutts et al., 2016). 도시숲 식재 밀도 증가 및 신규 녹지 생성 시나리오에서는 도시숲의 면적이 넓고, 밀도가 높을수록 인근 공간으로의 기온 및 열쾌적성의 개선효과가 더 큰 것을 확인하였으며, 넓은 면적의 공원의 열환경 개선효과가 뛰어나다는 기존 연구와 같은 결과를 보였다(Aram et al., 2019; 박종화와 조기혁, 2016). 하지만 시뮬레이션 분석범위가 넓고 모형의 안정성을 위해 낮은 해상도에서 분석이 진행되어 도시숲 인근으로의 영향에 대한 효과가 긍정적임을 확인하였으나, 식재 밀도에 따른 습도 증가와 풍속 감소에 따른 PET의 부정적인 효과에 대한 결과는 확인이 어려웠으며 추가적으로 상세한 해상도의 연구가 필요할 것으로 사료된다(민진규 등, 2022).

4. 결론

본 연구는 대구광역시 중구에 위치한 다양한 유형의 도시숲인 가로수, 공원, 학교숲 및 녹지화 가능한 재개발예정지를 대상으로 녹지 밀도 및 면적을 증가시켜 시나리오 적용 유형별 도시숲 열환경 개선 영향을 정량적으로 도출하고자 하였다. 이를 위해 도시숲의 밀도를 증가시키고 신규 녹지를 추가하는 시나리오를 생성하였으며, 미기후 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met을 활용하여 시나리오별 열환경 개선 효과를 비교·분석하였다.

시뮬레이션 결과, 도시의 가로수 교목 밀도를 증가시킨 S1, S2가 상대적으로 높은 기온 저감 효과를 보였으며, 차도폭 10m 이상의 도로 및 기타 도로에 가로수를 추가한 S2가 현황 대비 기온 0.16℃ 저감, PET 1.67℃ 저감으로 가장 큰 저감효과를 보였다. 가로수 증가 시나리오에 대한 상세 분석을 위해 S1 시나리오를 기준으로 도로폭 40m인 달구벌대로, 30m인 국채보상로, 20m인 동덕로의 기온 저감량을 확인한 결과, 국채보상로에서 −0.27℃, 동덕로에서 −0.29℃의 효과를 보여 달구벌대로의 저감량 −0.13℃보다 약 2배 이상의 효과를 보였다.

S3에서는 도시숲의 식재 밀도가 증가하였을 때 공원 반경 100m 내에서의 기온 저감량을 분석한 결과, 2·28공원과 국채보상운동기념공원 모두에서 0.1℃ 이상의 저감이 나타나 식재 밀도 증가가 인근 지역에까지 기온 저감 영향을 미쳤음을 확인하였다. 동일한 밀도로 증가시킨 2·28공원과 국채보상운동기념공원의 기온 저감 영향 범위를 단면 분석을 통해 비교한 결과, 면적이 넓은 국채보상운동기념공원의 영향이 수평·수직방향으로 더 큰 저감효과를 가졌으며, 특히 수평방향으로 저감된 범위가 2배 이상 차이를 보였다. S4, S5에서 또한 재개발 예정지에 더 넓은 녹지를 생성한 S5 시나리오의 기온 및 PET가 더 큰 저감량을 가졌으며, 시나리오 적용지역의 단면을 비교한 결과, 수평·수직방향으로 더 큰 저감효과를 나타냈다.

이러한 결과에 따라 기온 및 열쾌적성 측면에서 가로수의 밀도를 증가시킨 시나리오가 도시 열환경 개선에 좋은 효과를 보이는 것으로 나타났으며, 가로수가 식재된 도로가 늘어날수록 도시 열환경 개선에 효과적이었다. 상대적으로 일정 공간에 집중되어 식재된 공원 및 학교숲, 신규 녹지 조성 시나리오의 경우 분석 대상지 전체 면적 대비 기온 및 PET 저감량은 적은 수준이었으나, 인근 공간으로의 열환경 개선 효과가 존재하였고 넓은 면적일수록 더 큰 기온 저감 효과를 보였다. 본 연구는 도시의 일부에서 시나리오를 적용했을 때의 결과를 제시한 것으로, 시나리오가 미적용된 지역의 분석값까지 함께 고려되어 시뮬레이션 분석의 평균값은 소수단위로 제시되었다. 이러한 결과는 도시숲의 효과가 국지적으로 영향을 미쳐 전체 범위에 비해 효과가 작은 수치로 나타난 것으로 판단된다. 하지만 정책적으로 어떤 시나리오가 적합한지 판단하고자 하는 측면에서는 넓은 도시지역을 대상으로 분석한 결과가 근거가 될 수 있다. 또한 PET에 대한 분석을 포함함으로써 시민 중심의 열환경 개선 전략을 제시하는데 기여할 수 있어 넓은 범위의 지역에서 효과적인 전략을 도출하기 위한 자료가 될 수 있다.

본 연구의 결과에서는 도시 전반적인 넓은 분포의 녹지 확충이 도시의 열환경 개선에 효과적이고 효율적인 영향을 미치며, 녹지 조성 시 면적이 넓고 높은 녹지율을 가지는 것이 유리함을 정량적으로 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 또한 기후 완화를 위해 시행되는 도시숲 전략 및 녹화전략들에 대하여 효과 및 효율에 대한 우선순위를 나열해보았다는 점에서 도시 열환경 개선을 위한 참고자료로 사용될 수 있을 것으로 기대한다. 하지만, 본 연구에서 사용된 시뮬레이션 모델이 실제 현실을 완벽히 반영할 수 없으며, 모델 해상도로 인해 상세한 밀도 조절에 한계가 있다는 점에서 한계가 있다. 또한 다양한 도시숲 유형을 담기 위해 넓은 범위의 분석범위를 설정해 낮은 해상도로 분석이 진행되어 PET에 영향을 미치는 상세한 풍속, 습도 등을 분석할 수 없었던 점을 고려하여 추가적인 연구를 진행할 필요가 있으며, 시나리오 간 열환경 개선 효과의 비교뿐만 아니라 온도 차에 대한 통계적 분석을 통한 다각적인 고찰이 진행될 필요가 있다.

References

1. 고범석, 박정은, 황태연(2022) 공공건물 벽면녹화에 따른 폭염저감 및 건물에너지절감 효과분석. 차세대융합기술학회논문지 6(4): 632-640.
2. 김기중, 안영수(2017) 도시열섬 지역에 대한 정의 및 구분 방법론에 관한 비교연구. 지역연구 33(2): 47-59.
3. 김수봉, 김해동(2002) 도시의 수목이 기온의 조절에 미치는 영향. 한국조경학회지 30(3): 25-34.
4. 김종성, 강정은(2021) 도시 열환경 개선을 위한 취약지역 선정 및 바람길 조성 방안: 창원시를 대상으로. 환경영향평가 30(4): 187-202.
5. 민진규, 엄정희, 성욱제, 손정민, 김주은(2022) 녹지 조성 시나리오에 따른 도시 열환경 개선 효과 분석. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 50(6): 1-14.

6. 박종화, 조기혁(2016) 공원 크기에 따른 공원의 온도저감 효과 분석: 일산 신도시를 대상으로: 일산 신도시를 대상으로. 국토계획 51(5): 247-261.
7. 손정민, 엄정희(2024) 가로수 식재 특성에 따른 도시 열환경 개선 효과-대구광역시 가로수 온습도 관측을 바탕으로. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 52(4): 32-44.
8. 송봉근, 박경훈, 정성관(2014) 토지이용 유형별 공간특성을 고려한 ENVI-met 모델의 현장측정자료 기반의 검증. 한국지리정보학회지 17(2): 156-172.
9. 오규식, 홍재주(2005) 도시공간 구성요소와 도시열섬현상의 관련성 연구. 한국도시설계학회지 도시설계 6(1): 47-63.
10. 윤희천, 김민규, 정갑용(2013) 도시열섬 완화를 위한 녹지증가에 따른 온도변화 분석. 한국측량학회지 31(2): 143-150.
11. 이신영, 김용성, 이남규(2024) 도시 열섬 현상 완화를 위한 입체녹화의 기온 저감 효과 분석. 한국공간디자인학회논문집 19(7): 481-496.
12. 조현길, 안태원(1999) 도시녹지에 의한 미기후개선의 기능. 한국조경학회지 27(4): 23-28.
13. 조혜민, 하재현, 이수기(2019) 서울시 도시열섬현상 지역의 물리적 환경과 인구 및 사회경제적 특성 탐색. 지역연구 35(4): 61-73.
14. 주민진, 이춘석, 류남형(2004). 도심 녹음수의 체감온도지수 (WBGT) 조절효과. 한국조경학회지 32(3): 51-59.
15. 홍석환, 톈완팅, 안로사(2020) 가로녹지 및 건물 높이가 미세먼지 농도에 미치는 영향. 한국환경생태학회지 34(5): 466-482.
16. Aram, F., E. H. García, E. Solgi and S. Mansournia(2019) Urban green space cooling effect in cities. Heliyon 5(4).
17. Coutts, A. M., E. C. White, N. J. Tapper, J. Beringer and S. J. Livesley(2016). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. Theoretical and applied climatology 124: 55-68.
18. Farhadi, H., M. Faizi and H. Sanaieian(2019) Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. Sustainable Cities and Society 46: 101448.
19. Jamei, E. and P. Rajagopalan(2017) Urban development and pedestrian thermal comfort in Melbourne. Solar Energy 144: 681-698.
20. Jia, S. and Y. Wang(2021) Effect of heat mitigation strategies on thermal environment, thermal comfort, and walkability: A case study in Hong Kong. Building and Environment 201: 107988.
21. Lobaccaro, G. and J. A. Acero(2015) Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. Urban Climate 14: 251-267.
22. Morakinyo, T. E., L. Kong, K. K. L. Lau, C. Yuan and E. Ng(2017) A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. Building and Environment 115: 1-17.
23. Ouyang, W., T. E. Morakinyo, C. Ren and E. Ng(2020) The cooling efficiency of variable greenery coverage ratios in different urban densities: A study in a subtropical climate. Building and Environment 174: 106772.
24. 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.
25. https://www.weather.go.kr/kma/news/press.jsp?mode=view&num=1194405