

수관피복률 변화에 따른 도시숲의 기온 및 탄소 저감 효과 분석: 대구 국채보상운동기념공원 사례

임재연* · 박주현** · 엄정희***†

*경북대학교 빅데이터 기반 글로벌 Forest Science 4.0 전문인력양성센터 연구원, **경북대학교 대학원 조경학과 박사,
***경북대학교 농업생명과학대학 산림과학 조경학부 조경학전공 교수

Effects of changing tree canopy coverage on urban temperature and carbon mitigation: A case study of Gukchae-bosang Memorial Park, Daegu

Lim, Jae-yeon* · Park, Ju-hyeon** and Eum, Jeong-hee***†

*Researcher, Human Resources Development Center for Big Data-based Glocal Forest Science 4.0 Professionals,
Kyungpook National University, Daegu, Korea

**Ph.D., Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University, Daegu, Korea

***Professor, Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University, Daegu, Korea

ABSTRACT

In response to climate change, urban forests serve not only as carbon sinks but also are critical in reducing temperature and saving energy. This study proposes an efficient method for urban forest creation focused on temperature reduction and quantitatively assesses its impact using the Tree Canopy Ratio (TCR). The study was conducted in Gukchae-bosang Memorial Park, Daegu, South Korea. Eight scenarios were developed, with TCR values ranging from 0% to 70% at 10% intervals. Using ENVI-met, a microclimate simulation model, temperature changes were analyzed across scenarios, and optimal canopy coverage intervals were derived using R. The temperature reduction effects were converted into energy savings using SPSS and established energy conversion formulas. The results showed that both temperature reduction and energy savings increased with higher TCR values. Specifically, the 30% TCR scenario was found to be the most efficient in reducing temperature. Furthermore, temperature reduction at 30% TCR over six hours was equivalent to the annual carbon absorption of approximately 28.5 trees and that at 70% TCR of 56.4 trees. This study provides quantitative evidence of the climate mitigation benefits of urban forests and suggests optimal TCR levels for maximizing temperature and energy reductions. The findings offer a scientific basis for planning and designing urban forests under spatial constraints in dense urban areas.

Key words : Urban Forest, Tree Canopy Ratio, Temperature Reduction, Carbon Mitigation, ENVI-met

1. 서론

지구온난화로 인해 폭염, 한파, 가뭄, 폭설, 폭우 등 이상기후 현상이 전 세계적으로 발생하고 있다. 도시의 인공피복 면적과 고층 건물의 증가는 열환경을 악화시켰으며, 이는 냉방 수요 증가를 초래한다. 이러한 냉방에너지

사용량 증가에 따른 탄소 배출량 증가는 온실효과를 악화시켜 온난화의 악순환을 유발할 수 있다. 2024년 여름철 기후분석 결과에 따르면 여름철 전국 평균기온은 25.6℃로, 평년 평균기온 23.7℃보다 1.9℃ 높아져 1973년 이래 최고기온을 달성했으며, 폭염일수는 24일로 평년 대비 2.3배 높아졌다(Korea Meteorological Administration, 2024).

†Corresponding author : eumjh@knu.ac.kr (80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea. Tel. +82-53-950-5780)

ORCID 임재연 0009-0001-0921-1395
박주현 0009-0000-8304-8197

엄정희 0000-0001-8405-5487

국제사회는 기후변화에 대응하기 위해 평균기온 상승을 1.5°C 이내로 제한하도록 노력하고 2°C보다 아래로 제한하는 것을 목표로 하고 있으며, 대한민국은 국가 온실가스 감축목표(NDC, Nationally Determined Contributions) 달성을 위해 2030년까지 온실가스를 2018년 대비 40% 줄이고자 분야별 계획을 추진 중이다. 탄소중립을 위한 정책 및 전략에서 전환, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 수소, 흡수원, CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage)부분의 감축 정책이 제시되고 있지만, 대부분 탄소 배출 감축에 중점을 두고 있으며 흡수원의 비중은 상대적으로 적은 수준이다. 흡수원의 역할을 하는 도시 내 녹지는 탄소 흡수원으로써의 역할뿐만 아니라 수목의 증발산(Moss et al., 2019), 그늘 제공(Klok et al., 2019; Morakinyo and Lam, 2016; Rodriguez et al., 2025) 등을 통해 도시열섬을 완화한다(Coutts et al., 2016; Park et al., 2019; Sun et al., 2024). 추가적으로 녹지의 기온 저감 효과는 낮 시간 주변 지역의 냉방 에너지 사용량을 줄여(Kong et al., 2016; Ravazdezh and Rivers, 2025; Wu et al., 2025) 탄소 배출을 줄이는 이점이 있어 주요 생활권인 높은 밀도의 도시 지역에서 탄소흡수원 이상의 가치를 가진다. 이러한 이점에도 주요 정책에서 도시 내 유일한 탄소흡수원인 도시숲에 관한 전략은 구체성이 미흡하여 효과적인 도시숲 조성을 위한 세부적인 연구가 필요하다(Park et al., 2023). 해외 다수 도시에서는 기온 저감을 위해 수목량을 늘리고 수관피복률(Tree Canopy Ratio, TCR) 달성 목표를 세우는 등 수관피복률 확대를 핵심 목표로 하는 전략을 도입하고 있으며, 도시숲의 기온 및 간접적인 에너지 저감 효과를 정량화한 연구가 활발히 진행되고 있다.

선행연구들은 수관피복률(TCR) 및 수목 구조가 도시 냉각에 미치는 영향을 정량화하고 있다. Wang et al. (2023)은 UAV 원격 데이터를 활용해 지역에서의 수중에 따른 냉각 효과와 군집 규모에서의 냉각 효과를 분석하였다. 군집에서의 냉각 효과가 더 크며 수관피복률이 20% 이상일 때 냉각효율이 감소하기 시작하고 40% 이상일 때 가장 효과적임을 제시했다. Ziter et al. (2019)은 수관 피복 면적과 불투수성 표면 덮개의 도시 기온에 대한 상호작용을 정량화하였다. 수목 피복 면적이 증가함에 따라 기온이 비선형적으로 감소했으며, 주간 도시블록 규모에서 수관 피복 면적이 40% 이상일 경우 나무의 냉각 효과가 효과적이었다. 이는 수관 피복 면적이 클 때 잎면적지수가 증가하여 그림자와 음영이 증가하기 때문이라고 예상하였다. Min et al. (2022)은 도시 열섬현상 완화를 위해

다양한 도시 녹지에 세부 녹화 시나리오를 생성하여 열환경 개선 효과를 분석하였다. 교목 증가에 따른 수목 그림자의 증가는 기온 저감에 효과를 보였으며, 가로수 식재 시 수목 밀도가 높아질수록 낮 시간대에 높은 기온 저감 효과를 보였다. 하지만 교목의 양이 증가하면서 상대습도 증가 및 풍속 감소로 인해 열쾌적성에 부정적 영향도 함께 발생하기 때문에 효과적인 열쾌적성 개선을 위한 식재량의 임계치를 도출하는 연구가 필요함을 언급했다. Ouyang et al. (2020)은 냉각 효율을 분석하기 위해 도시 밀도와 TCR에 따른 TCR 2%에서 30%까지 2% 간격으로 시나리오를 분석하였다. 일반적으로 TCR을 증가시키면 더 높은 냉각 효과를 보였으며, TCR 20%에서 뚜렷한 냉각효과를 보이고 이후 냉각 잠재력이 감소하기 시작하여 최적의 TCR을 20%에서 30%로 권장하며 수목의 냉각 제공을 위한 효율적인 임계값으로 제시했다.

정책적으로도 시드니에서는 Greening Sydney Strategy를 수립하여 2050년까지 수관피복을 최소 27%에서 40%까지 녹화하는 것을 목표로 하고 있으며(City of Sydney, 2023), 멜버른에서는 Urban Forest Strategy (2012 ~ 2032)를 세워 2040년까지 공공영역의 수관피복률을 40%까지 확대하여 도시 기온을 낮추는 것을 목표로 제시하고 있다. 이 외에도 수관피복률 증가를 목적으로 뉴욕의 수관피복률 30% 달성(New York City Urban Forestry Task Force, 2021), 바르셀로나의 수관피복률 30% 달성(Ajuntament de Barcelona, 2017), 세비아의 매년 5,000그루 나무 심기(SDG Local Action, 2024), 런던의 수관피복률 22% 달성(Greater London Authority, 2025) 등 주요 도시에서도 나무 식재 및 수관 피복 면적 확대를 통해 열환경을 개선하고자 하고 있다. 앞선 연구 결과와 정책사례에 따르면 여러 도시들은 수목량 및 수관피복률 증가에 따른 수목의 냉각효과와 그림자 증가에 의한 기온 저감을 도시 열섬현상 완화를 위한 주요 해결책으로 채택하며 수관피복률(TCR)을 정책 수립의 핵심 변수로 활용하고 있다. 이에 국내 도시에도 도시열섬이 취약한 지역에 목표 수관피복률을 세워 기온을 완화하려는 노력이 필요하다.

하지만 국가별 기후 및 지리적 특성의 차이로 국내에서의 적정 수관피복률은 상이하게 나타날 수 있으며, 국내의 고밀도 도시지역에서는 도시숲을 조성하기 위한 충분한 면적이 확보되기 어려운 실정이다. 따라서 한국의 도심 특성을 반영한 도시숲의 효율적인 조성 전략을 구체화하고 적용해야 한다. 또한 기존에는 도시숲의 기온 저감이나 탄소흡수 등 개별 기능을 분석한 연구가 주를 이루었으나,

기온 저감이 간접적으로 미치는 영향을 포함하여 정량적 수치를 제시한 연구는 부족하다. 이에 기온 저감에 따른 냉방에너지 저감 잠재량을 계산하고 에너지 사용량 저감이 가져오는 탄소 저감 잠재량까지 정량적으로 분석한다면 도시숲이 가지는 종합적인 가치를 평가할 수 있다.

본 연구는 대구광역시 중구의 국제보상운동기념공원을 대상으로, 도시숲의 기온 저감 기능과 탄소 저감 효과를 연계하여 통합적으로 분석하고, 도시숲의 효과적인 조성 방안을 제안하고자 한다. 이를 위해 기온 저감을 위한 변수로 수관피복률을 선정하여 시나리오를 구축하고, 미기후 시뮬레이션을 통해 시나리오의 수평 및 수직방향의 기온 저감 효과를 분석하고, 효율적인 도시숲 조성 전략을 도출하였다. 이어서 시뮬레이션 결과를 바탕으로 에너지 저감량 및 간접적인 탄소 저감 효과를 정량적으로 평가하였다. 이러한 분석을 바탕으로 본 연구는 다음과 같은 가설을 제시하였다. 첫째, 기온저감을 위한 가장 효율적인 수관피복률이 존재할 것이다. 둘째, 도시숲은 기온 저감을 통한 에너지 저감 효과를 가질 것이다.

2. 연구설계

2.1. 연구방법

Fig. 1은 본 연구의 전체 과정을 나타낸다. 본 연구는 대구 중구에 위치한 국제보상운동기념공원을 대상으로 수관피복률(TCR) 변화에 따른 효율적인 기온 저감 구간을 도출하기 위해 8개의 시나리오를 분석하였다. 이를 위해 도시 환경에서의 수목, 녹지, 건물 등의 요소간의 상호작용을 통한 미기후 변화를 분석할 수 있는 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met을 활용하였다. ENVI-met 프로그램

실행을 위해 공간 및 기상 데이터를 구축 및 가공하였으며, 결과 비교 전 시뮬레이션 값의 검증을 실행하였다. ENVI-met 모형의 신뢰도를 확인하기 위해 시나리오 모형과 동일한 공간모형에서 실제 수목이 식재된 위치를 최대한 반영한 현황 모형을 구축하여 분석 대상지 인근의 실측자료와 값을 비교하였다. 대상지와 가장 가까운 지점인 AWS신암(860) 지점의 데이터를 실측값으로 활용하였으며 시뮬레이션에 사용된 기상자료와 동일한 기간인 2023년 7월과 8월의 강우가 없는 날의 기상자료의 시간대별 평균을 이용해 검증하였다.

이후 각 시나리오별 국제보상운동기념공원 범위에 대한 기온값을 추출하여 기온 저감 효과를 분석하였고, 각 시나리오 간 결과값의 차이가 유의한지 확인하기 위해 R version 4.5.1을 활용하여 ANOVA (분산분석) Duncan 검정을 실행하였다. 이후 분절 회귀 분석(Segmented Regression Analysis)을 실시하여 수관피복률의 변화에 따른 분절점을 찾고 기온저감에 효율적인 TCR 구간을 도출하였다. 추가적으로 TCR 변화에 따른 수직적인 기온 저감 효과를 확인하기 위해 공원 중앙을 가로지르는 수직 단면을 추출하여 기온 저감 효과를 비교하였으며, 수직적 범위의 기온 저감량은 3차원적인 기온 저감 효과를 이용한 이후의 분석과정에 사용되었다.

기온 저감 효과에 의한 간접적인 에너지 저감 효과를 정량적으로 분석하기 위해 SPSS statistics 27 프로그램을 활용하여 Kong et al. (2016)이 개발한 식 (1), 식 (2)를 계산하였다. 식 계산을 위해 분석범위의 수평 및 수직공간에서의 기온 값을 활용하여 에너지 저감량을 계산하였으며 이를 탄소 저감 잠재량으로 환산하여 비교하였다. 에너지 저감량 계산 후 탄소 저감량 환산 과정에는 환경부에서

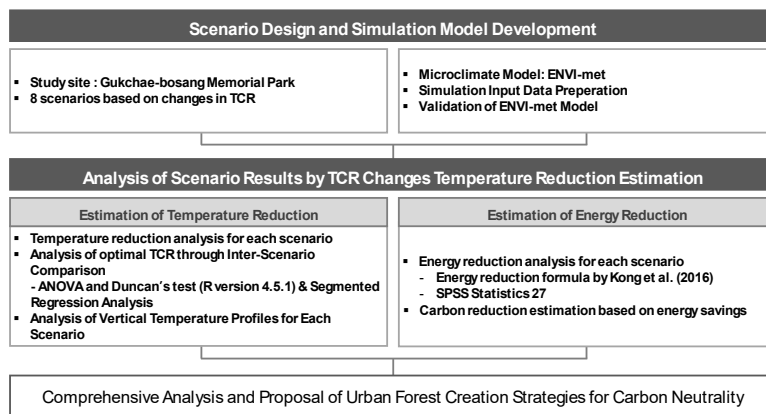


Fig. 1. Research process flowchart

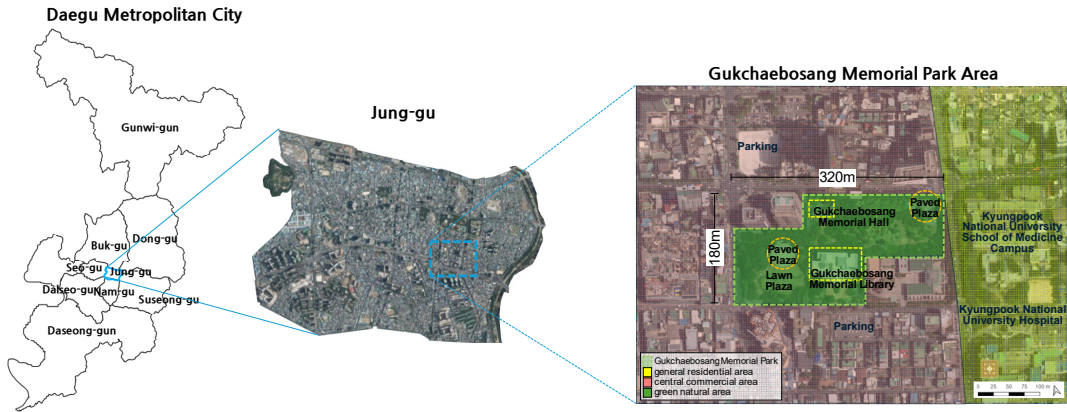


Fig. 2. Study area

제공하는 전력 배출계수 중 CO₂ 배출계수값인 0.4747을 활용하였다. Kong et al. (2016)의 연구에서 개발된 저감식은 WRF (Weather and Research Forecasting) 또는 ENVI-met 등 3D 열환경에 대한 시뮬레이션 시 녹지공간의 에너지 저감 영향을 정량화하여 분석할 수 있으며, 식 (1)과 식 (2)는 다음과 같다.

$$\Delta Th = \int_0^h [g(h) - f(h)]dh \quad (1)$$

ΔTh = 지면으로부터 h 높이까지의 평균 누적 온도 감소량(°C)

h = 분석 높이(m)

g(h) = 조성 전 시나리오 h 고도의 평균 기온(°C)

f(h) = 조성 후 시나리오 h 고도의 평균 기온(°C)

$$\Delta Qh = cm \Delta Th = cps \int_0^h [g(h) - f(h)]dh \quad (2)$$

ΔQh = 에너지 총 저감량 (J)

c = 비열 용량(1.0×10^3 J/kg°C)

m = 공기질량(kg)

p = 공기 밀도(1.29 kg/m³)

s = 건축 면적을 제외한 전체 면적(m²)

2.2. 연구대상지

본 연구의 대상지는 대구광역시 중구에 위치한 국채보상운동기념공원으로 도시 중심의 상업지역에 위치한 근린공원이다. 대구광역시는 최근 30년간 연평 평균기온이

꾸준한 상승세를 보이고 있으며, 타 지자체에 비해 여름 기온이 높은 수준이다. 또한 도로율, 건물표면적이 높아 열환경이 악화될 가능성이 높고(Eum et al., 2017) RCP 4.5 시나리오에 따르면 대구시 행정구역 중 중구의 미래 평균 기온 상승폭이 높을 것으로 전망되는 지역이다(Daegu-Gyeongbuk Development Institute, 2022). 국채보상운동기념공원의 면적은 가로 약 320m, 세로 약 180m, 42,509m²이며 공원 외부로는 서쪽과 남쪽, 북쪽에 중심상업지역이 밀집해있고 동쪽에는 캠퍼스가 위치해 있다. 공원 내부에는 국채보상운동기념관, 국채보상운동기념도서관과 불투스포장의 광장 2곳과 식재대가 존재하며, 공원 주변은 모두 건물과 도로에 인접해 있고 남·북쪽으로 도로 건너에 주차장이 있어 인공피복으로 둘러싸인 도심에 위치한 특징을 가진다(Fig. 2). 이러한 위치적 특성에 따라 국채보상운동기념공원은 유동인구가 많은 도심지역에 큰 면적의 녹지를 보충하는 중요한 역할을 하며 기온 저감 등에 효율적인 조성방법이 적용될 필요가 있다.

2.3. 입력자료 구축

미기후 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met 분석을 위해서는 공간데이터 구축, 수목데이터 구축, 기상데이터 구축이 필요하다. 공간데이터 구축을 위해서는 건물, 토지피복 자료 및 수목 위치정보를 수집해야하며 공간 해상도를 지정한다. 수목데이터 구축을 위해서는 가상공간에서 현실과 비슷한 형태를 반영하기 위해 수종, 수목 규격 정보가 필요하다. 기상데이터 구축을 위해서는 기온, 습도, 풍향, 풍속 데이터를 수집하였다.

먼저 공간데이터 구축을 위해 QGIS의 Geodata to ENVI-met 플러그인을 활용하였다. 국채보상운동기념공

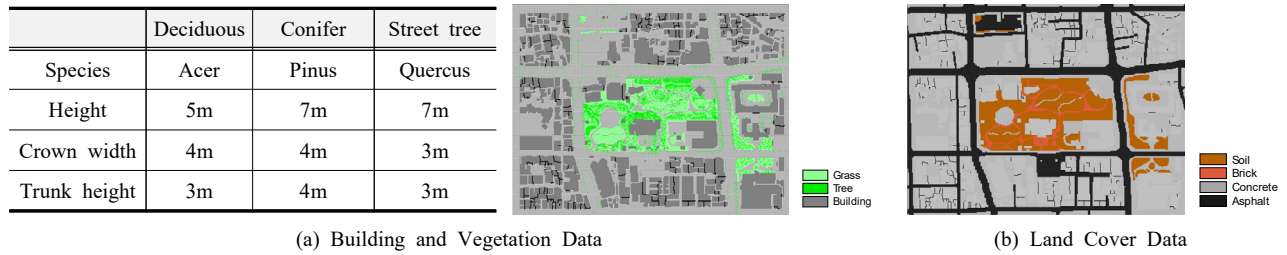


Fig. 3. Study area spatial data preparation for ENVI-met simulation

Table 1. Simulation basic input parameters

Category	Input values
Date	1/8/2023
Start time	06:00
Total simulation time (h)	14
Analysis area (m)	700 × 520
Grid size (m)	2 × 2 × 3

Table 2. Input data for meteorological simulation (Mean, July-August 2023)

Time	Temperature (°C)	Humidity (%)	Wind speed (m/s)	Wind direction (°)	Time	Temperature (°C)	Humidity (%)	Wind speed (m/s)	Wind direction (°)
00:00	25.6	80.9	1.9	110	12:00	30.8	59.6	1.9	110
01:00	25.3	82.1			13:00	31.5	56.9		
02:00	24.9	84.3			14:00	32.0	55.3		
03:00	24.6	85.8			15:00	32.3	54.2		
04:00	24.3	86.9			16:00	32.2	54.6		
05:00	24.1	87.9			17:00	31.8	56.3		
06:00	24.0	88.5			18:00	30.9	59.9		
07:00	25.0	84.7			19:00	29.9	63.9		
08:00	26.4	78.9			20:00	28.7	69.0		
09:00	27.7	73.2			21:00	27.8	72.2		
10:00	28.9	67.4			22:00	27.1	75.6		
11:00	30.1	62.8			23:00	26.5	77.9		

원 일대의 건물, 토지피복자료를 획득하기 위해 국토교통부에서 제공하는 수치지형도 1:5000(2023년), 환경부에서 제공하는 토지피복지도(2023년)를 활용하였으며 수목의 위치정보를 반영하기 위해 대구광역시에서 제공하는 가로수정보(2022년) 자료를 활용하여 Geodata to ENVI-met 플러그인 사용을 위한 형태로 가공하였다(Fig. 3(b)). 분석을 위한 전체 공간모형의 크기는 700 m × 520 m × 120 m이며 해상도는 2 m × 2 m × 3 m로 설정하였다. 이는 시뮬레이션 범위에 포함된 건물 중 가장 높은 건물을 포함하도록 하여 모델 안정성을 고려한 값이다.

수목 데이터 구축을 위해 대구 가로수정보(2022년) 데이터를 활용하였으나, 가로수의 수종, 수목유형, 수목위치, 흉고직경 등에 대한 정보는 제공되고 있지만 공원 내

부 수목에 대한 정보는 제공되지 않아 공원 내부의 수목 자료는 현장조사 실시 및 위성사진을 참고하였다. 이러한 자료를 기반으로 시뮬레이션 범위 내 대표적인 활엽수, 침엽수, 가로수 수종과 유사한 수형을 갖도록 수목 데이터를 구축하였다. 시뮬레이션 모델 구축을 위해 가공한 수목은 총 3종으로, 공원 내부의 활엽수 1종, 침엽수 1종과 공원 외부의 가로수 1종이다. 수목 규격은 대구광역시 가로수정보, 위성영상 및 공원 현장조사를 통해 조사된 공원 내부의 활엽수, 침엽수, 공원 외부 가로수의 수종 및 수목량을 바탕으로 산정되었으며 현장조사 결과 도시숲 내부에서 가장 많이 식재된 활엽수는 단풍나무, 침엽수는 소나무, 가로수는 대왕참나무였다. 관목의 경우 교목을 통한 수관피복률만을 분석하기 위해 시나리오에 고려되지

않았으며, 공원 내부 식재대의 하층식생은 잔디로 반영되었다(Fig. 3(a)).

더운 여름철의 기상을 반영하기 위해 ASOS 대구 지점의 2023년 7월 및 8월의 기온, 습도, 풍속, 풍향의 시간 단위 기상자료를 활용하였으며, 61일 중 강우일을 제외한 일자의 시간대별 평균기온 및 습도를 산정하였다. 강우일을 제외하여 더운 날의 평균적인 기상 상황을 반영했으며 24시간의 시간 단위 기상을 반영하고자 하였다(Table 1). 풍속은 기온, 습도와 동일한 기간의 평균값을 사용했으며, 건물 및 장애물이 많은 도심의 특성상 풍향이 계속해서 바뀌기 때문에 최빈풍향을 대푯값으로 선정하였다(Table 2). 총 시뮬레이션 시간은 낮시간의 결과를 포함하기 위해 06:00부터 20:00까지 총 14시간 동안 시뮬레이션을 진행하였다.

2.4. 시나리오 설계

도시숲 조성 시 기온 및 에너지 저감을 위한 효율적인

식재 방법을 제시하는 것을 목적으로 TCR (Tree Canopy Ratio)을 변수로 시나리오를 생성하였다. 국외 정책 사례의 수관피복률 달성 목표인 30~40%를 국내에 적용하고자 시나리오 변화에 따른 기온 저감 효과를 정량적으로 비교하기 위해 일정한 간격으로 TCR을 변화시켰으며, 명확한 차이를 확인하기 위해 TCR을 10% 간격으로 증가시켰다. 국채보상운동기념공원에서 수목 식재가 가능한 공간은 두 개의 불투수포장 광장과 식재대, 잔디광장, 보도 및 주차장이며, 기존 공원에서 교목이 식재되어있었던 식재대와 잔디광장으로 한정하여 교목량을 조절하였다. 이때 수관이 최대한 겹치지 않도록 수목을 배치하였으며 TCR 0%에서 TCR 60%까지 7개 시나리오가 도출되었다. 추가적으로 불투수포장 광장과 잔디광장을 교목 식재대로 변경할 경우 최대 수관피복률을 공원 면적의 70%까지 달성할 수 있어 TCR 70%를 포함하였다. 최종적으로 TCR 0%, TCR 10%, TCR 20%, TCR 30%, TCR 40%, TCR 50%, TCR 60%, TCR 70%의 총 8개 시나리오를 생성하

Table 3. Number of trees per scenario

Scenarios	Number of Trees in Urban Forest			Tree Canopy Area (Tree Canopy Ratio)
	Deciduous	Conifer	Total	
TCR 0%	0	0	0	0 m ² (0%)
TCR 10%	290	101	391	4,189 m ² (10.0%)
TCR 20%	577	195	772	8,322 m ² (20.0%)
TCR 30%	843	357	1,186	12,783 m ² (30.7%)
TCR 40%	1,219	404	1,623	16,683 m ² (40.1%)
TCR 50%	1,492	711	2,203	20,852 m ² (50.1%)
TCR 60%	2,547	821	3,368	25,055 m ² (60.2%)
TCR 70%	3,137	878	4,015	29,174 m ² (70.4%)

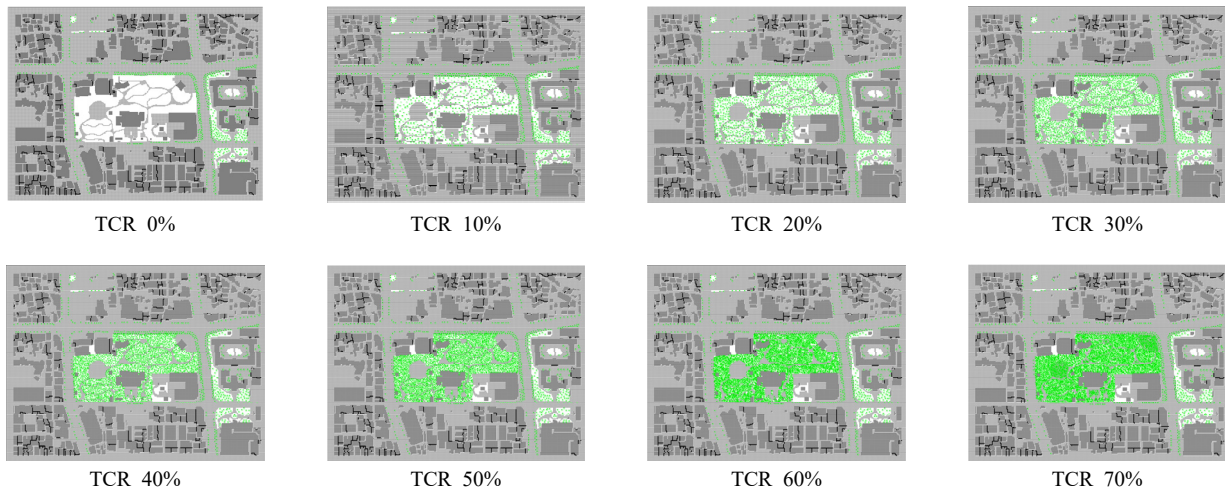


Fig. 4. Scenario-based spatial data for simulation

였다.

시나리오 적용은 도시숲 내부에 한정하여 적용되었으며, 도시숲 외부에는 활엽수 174그루, 가로수 538그루가 고정적으로 식재되었다. 수목 배치는 QGIS의 랜덤 포인트 기능을 활용하여 최대한 수관이 겹치지 않도록 무작위로 수목을 배치하였다. 최종적으로 시나리오별 수관피복률을 충족하도록 시나리오를 작성하였다(Table 3, Fig. 4).

구축한 모델의 적합성 검증을 위해, 분석 대상지 현황 모델의 시뮬레이션 기온값을 인근에서 관측된 AWS신암 기온값과 검증한 결과, RMSE 값은 0.8℃, R²값은 0.98로 나타났다. ENVI-met 모델을 활용하여 모델의 적합성을 확인한 선행연구들을 살펴보면 Morakinyo et al. (2017)에서는 R² 0.79~0.81, Haeri et al. (2023)에서 R² 0.94, RMSE 0.45, Hwang and Kim (2023)에서는 R² 0.985, RMSE 0.274의 값을 가져 적합한 모형인 것으로 판단하고 있다. 또한 Tsoka et al. (2018)에 따르면 선행연구를 종합한 결과, 허용되는 RMSE 값의 범위가 0.52에서 4.30 까지 나타났으며, R² 값은 0.60에서 0.99 사이로 나타났다. 선행연구의 수치와 비교했을 때, 본 연구에서 나타난 수치가 높은 설명력을 가지며 시나리오를 분석하기에 적합한 것으로 판단할 수 있다.

3. 연구 결과

3.1. 수관피복률(TCR) 변화에 따른 공원 내부 기온 변화

도시숲 내부 수관피복률 변화에 따른 기온 분석을 위해 시뮬레이션 결과에서 도시숲 범위에 해당하는 범위에서 사람에게 영향을 미치는 높이인 1.5 m 단면의 결과값을 추출하여 분석에 사용하였다. 12시부터 17시까지 1시간 간격으로 기온값을 추출했을 때, 모든 시나리오에서 도시숲 내부 평균기온이 가장 높았던 시간대는 15시였으며 다음으로 기온이 높게 나타난 시간대는 14시, 16시였다. 15시를 기준으로 수목이 없는 TCR 0%에서 34.75℃로 가장 높은 평균값을 가졌으며, TCR 10%에서 34.48℃, TCR 20%에서 34.17℃, TCR 30%에서 33.87℃, TCR 40%에서 33.65℃, TCR 50%에서 33.41℃, TCR 60%에서 33.22℃를 나타냈다. 수관피복률이 가장 넓은 TCR 70%에서는 33.04℃로 가장 낮은 평균기온값을 가졌으며, 시간대와 관련없이 수관피복률의 증가에 따라 기온이 감소하는 경향을 보였다. TCR 70%는 가장 더운 15시뿐만 아니라 모든 시간대에서 다른 시나리오와 비교했을 때 평균기온이

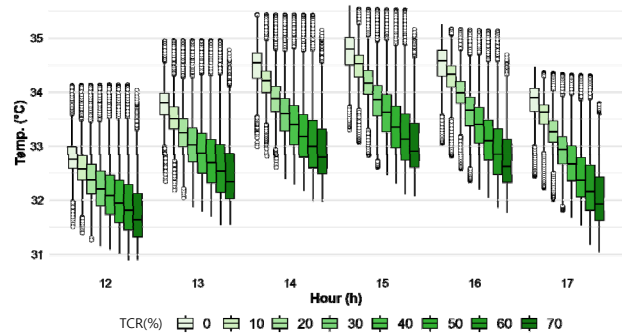


Fig. 5. Air temperature distribution by TCR scenario (12:00 ~ 17:00)

가장 낮았다.

Fig. 5에서 TCR 0%, TCR 10%, TCR 20%와 같이 수관피복률이 낮은 시나리오에서 박스 높이가 작은 경향을 보이며, TCR 70%, TCR 60%와 같이 수관피복률이 높은 시나리오에서 박스 높이가 크게 나타났다. 수관피복률이 낮은 시나리오에서는 낮은 기온의 이상치와 높은 기온의 이상치가 동시에 나타났으며, 특히 높은 기온 이상치는 모든 시나리오에서 유사한 수치로 나타났다. 8개의 시나리오 모두 공원 내부 최고 기온값이 35.16℃~35.60℃로 비슷하게 나타났는데, 이는 공통적으로 시나리오 구축 시 수목 식재와 무관한 그늘이 없는 공간에 집중되었다. 최저 기온을 보이는 공간은 수목이 식재된 공간에서 나타났으며, 공원 내부의 낮은 기온분포는 수목 식재대에 집중되어 나타나 수목 유무에 따라 그들의 효과가 기온에 큰 영향을 미침을 확인하였다(Fig. 6).

수관피복률이 낮은 시나리오에서 박스 높이가 작고 낮은 기온의 이상치가 나타난 것은 수목 그늘의 양이 적어 일부 구역에서만 기온 저감이 발생하고 공간 전반적으로 더운 환경이었기 때문이다. 반면 수관피복률이 큰 시나리오에서 박스 높이가 크게 나타난 것은 수목 그늘이 늘어남에 따라 기온이 저감되는 면적이 늘어나지만 시나리오 적용 시 수관이 증가하지 않는 고정 면적에서의 기온이 함께 나타나 공간에서의 기온 분산이 커진 것으로 해석된다.

도시숲이 없는 곳에 도시숲을 조성했을 때의 시나리오별 기온 저감 효과를 확인하기 위해 수목이 없는 경우인 TCR 0% 시나리오와 수목이 있는 7개 시나리오 간의 기온 변화를 비교하였다. TCR 0%와 비교했을 때 전반적으로 수관피복률이 증가할수록 기온 저감 효과 또한 증가하였으며, 15시~17시에서 다른 시간대에 비해 기온 저감 효과가 크게 나타났다. 15시를 기준으로 TCR 0%와 비교

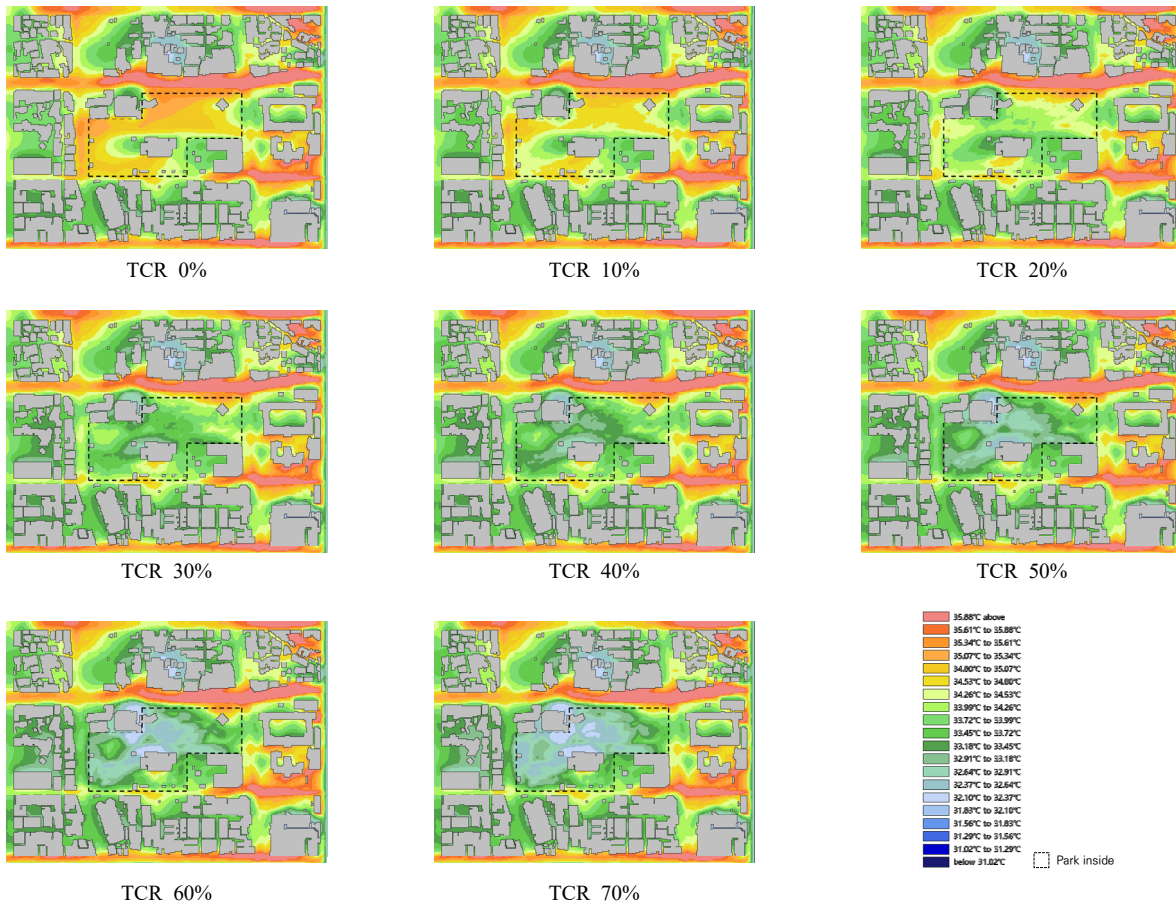


Fig. 6. Temperature by TCR scenario in the Gukchaebosang Memorial Park Area (15:00)

Table 4. Temperature reduction area ratio compared to 0% scenario (15:00)

	10% ~ 0%	20% ~ 0%	30% ~ 0%	40% ~ 0%	50% ~ 0%	60% ~ 0%	70% ~ 0%
above 0°C	0.60%	0.24%	0.12%	0.04%	0.04%	0.03%	0.03%
-1°C ~ 0°C	99.40%	92.65%	57.16%	41.50%	29.71%	24.06%	18.94%
-2°C ~ -1°C	0.00%	7.11%	42.73%	56.71%	57.07%	45.90%	41.62%
-3°C ~ -2°C	0.00%	0.00%	0.00%	1.75%	13.18%	30.01%	39.42%

했을 때 1.5 m에서의 도시숲 내부 기온변화를 살펴보면 TCR 10%, TCR 20%에서 -1°C ~ 0°C 저감된 면적이 각각 99.40%, 92.65%로 가장 크게 나타났다. TCR 30%에서는 -1°C ~ 0°C 저감된 면적이 57.16%로 가장 컸지만 -2°C ~ -1°C 저감된 면적이 42.73%까지 증가하였으며, TCR 40%, TCR 50% -2°C ~ -1°C 저감된 면적이 각각 56.71%, 57.07%로 가장 크게 나타났다. TCR 60%, TCR 70%에서는 -2°C ~ -1°C 저감된 면적이 각각 45.90%, 41.62%로 가장 컸지만 -3°C ~ -2°C 저감된 면적 또한 30% 이상을 차

지했다(Table 4). 수관피복률이 증가함에 따라 기온 저감 강도가 커지고 영향을 미치는 범위가 넓어지는 것은 그늘 범위의 증가 영향인 것으로 해석된다.

앞선 분석에서 TCR 변화에 따라 기온 저감의 강도가 커짐을 확인하였으며, 실제로 수관피복률(TCR) 증가에 따른 평균 기온의 차이가 존재하는지 확인하기 위해 일원 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였다. 그 결과 TCR 수준에 따라 평균 기온은 통계적으로 유의한 차이를 보였으며($F = 12.82, p < 0.001$), TCR이 증가할수록 평균 기온

Table 5. Results of simulated date and ANOVA test

Scenario	<i>n</i>	Average	SD	<i>F</i>	Duncan
TCR 10%	18	33.85°C	0.658	12.82***	TCR 10% ^a > TCR 20% ^{ab} > TCR 30% ^{bc} > TCR 40% ^{cd} > TCR 50-60% ^{de} > TCR 70% ^c
TCR 20%	18	33.57°C	0.615		
TCR 30%	18	33.30°C	0.567		
TCR 40%	18	33.10°C	0.534		
TCR 50%	18	32.90°C	0.502		
TCR 60%	18	32.73°C	0.480		
TCR 70%	18	32.54°C	0.481		

* *p* < 0.05, ** *p* < 0.01, *** *p* < 0.001

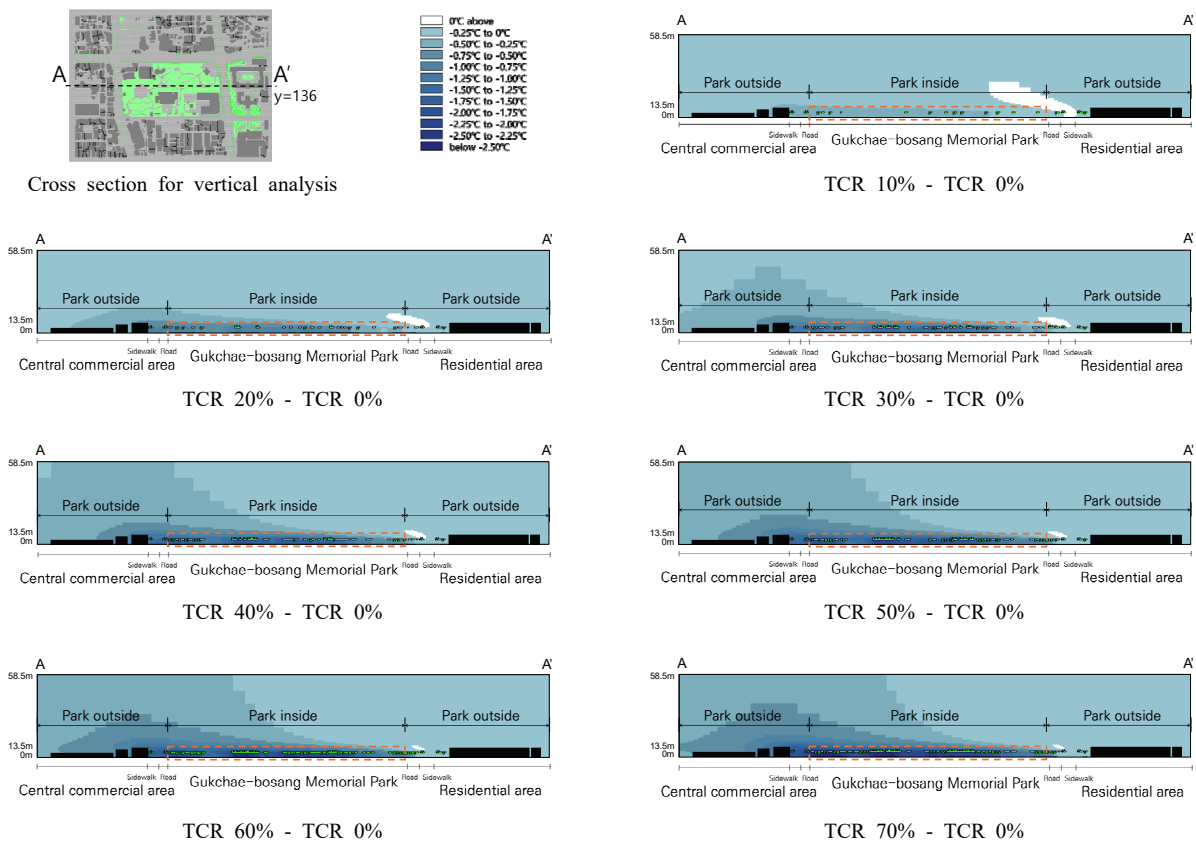
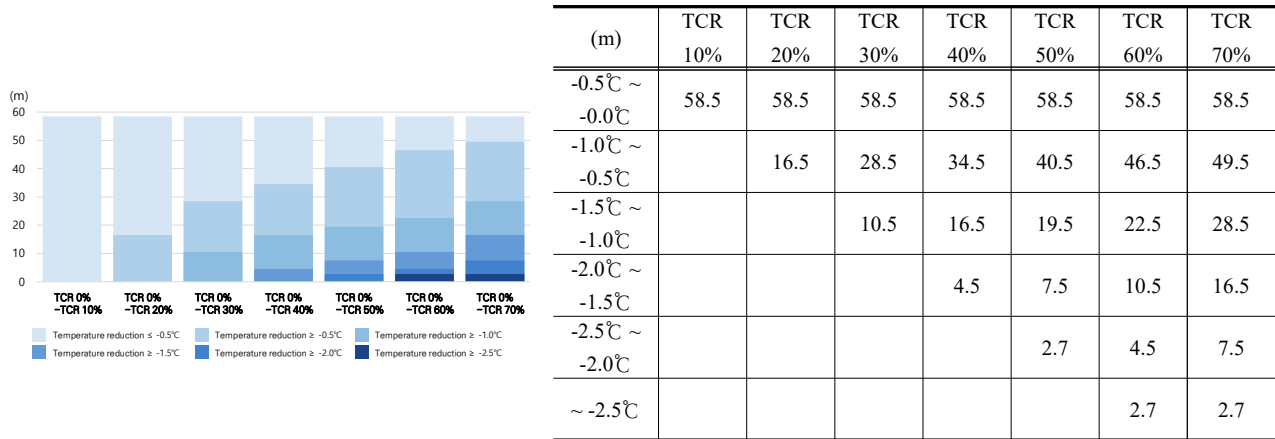


Fig. 7. Scenario cross-section images (entire cross-section & inside the urban forest, 15:00)

이 낮아지는 경향을 나타냈다(Table 5). TCR 증가에 따른 기온 저감량의 변화 추이를 파악하고 효율적인 TCR 구간을 도출하기 위해 분절 회귀분석(segmented regression analysis)을 수행한 결과, TCR 약 31.66%에서 회귀 기울기의 변화가 통계적으로 유의하게 나타났다. Davies 검정 결과(*p* = 0.0045)를 통해 수관피복률(TCR) 증가에 따른 기온 저감량의 관계에서 기울기 변화가 유의미함을 확인

하였으며, 이는 TCR과 평균 기온 저감량 간에 뚜렷한 분절점이 존재함을 시사한다.

분절점 이전 구간에서는 TCR이 증가할수록 기온 저감량이 뚜렷하게 증가하였으며(기울기 = -0.0274, *p* < 0.001), 분절점 이후에는 기온 저감량 증가율이 완만해지는 경향을 보였으나 통계적으로 유의하지는 않았다(기울기 = -0.0187). 이는 수관피복률 약 30%까지 기온 저감 효율이



(a) Vertical distribution of temperature reduction by TCR scenarios

(b) Maximum height across temperature reduction ranges

Fig. 8. Maximum height ranges of temperature reduction by TCR scenarios

상대적으로 높으며 그 이후로는 단위 면적당 추가적인 저감 효과는 감소하지만 전체적인 기온 저감 효과는 여전히 지속됨을 의미한다.

3.2. 수관피복률(TCR) 변화에 따른 수직적 기온 분포

사람의 생활권인 1.5 m 높이에서의 분석뿐만 아니라 수관피복률 증가에 따른 수목량 증가가 수직방향으로 도시 공간에 미치는 효과를 확인하기 위해 단면을 분석하였다. 도시숲 외부로의 영향은 도로 및 기타 외부요소의 영향을 최소화하기 위해 공원에서 도로를 건너지 않고 인접한 건물의 최고높이인 수직 58.5 m까지와 도시숲 내부에서의 영향을 분석하기 위한 공원 내부 건물의 최고높이인 수직 13.5 m까지를 분석 범위로 선정하였다. 단면은 공원의 비정형적인 형태에서 공원내부를 가장 많이 포함하는 y = 136 단면에 대하여 시나리오를 비교하였다(Fig. 7).

단면에서 수직 범위 13.5 m는 도시숲의 영향을 가까이서 받는 범위로, 15시를 기준으로 각 시나리오와 TCR 0%를 비교했을 때 평균 기온 저감량이 TCR 10%에서 -0.30℃, TCR 20%에서 -0.61℃, TCR 30%에서 -0.94℃, TCR 40%에서 -1.17℃, TCR 50%에서 -1.38℃, TCR 60%에서 -1.59℃, TCR 70%에서 -1.75℃로 나타났다.

공원 외부를 포함하는 58.5m 높이의 수직 범위에서 TCR 0% 대비 시나리오별 기온 저감 높이를 비교했을 때 (Fig. 8(b)), 수관피복률 증가에 따라 저감 강도와 수직 확산 범위가 풍향과 같은 방향으로 점진적으로 확대되는 경향이 나타났다(Fig. 8(a)). TCR 10%는 대부분 -0.5℃ 이

하의 미미한 수준이었으나, TCR 20%에서는 -0.5℃ 이상 저감 범위가 최대 16.5 m까지 형성되었다. TCR 30%에서는 -0.5℃ 이상 저감 범위가 28.5m, -1℃ 이상 저감 범위가 최대 10.5 m로 나타났으며, TCR 40%에서는 -0.5℃ 이상 저감 범위가 34.5 m, -1℃ 이상 저감 범위가 최대 16.5 m, -1.5℃ 이상 저감 범위는 4.5 m까지 나타났다. TCR 50%에서는 -1.5℃ 이상 저감 범위가 7.5 m, -2℃ 이상 저감 범위가 2.7 m까지 나타났으며 TCR 60~70%에서는 2.7 m 범위까지 -2.5℃ 이상의 기온 저감을 보였다. 이러한 결과는 수관피복률이 증가할수록 기온 저감의 강도와 범위가 단계적으로 확대되며, 특히 TCR 50% 이상에서 -2℃ 이상의 뚜렷한 저감 효과가 나타남을 보여준다.

단면 결과를 종합했을 때 TCR이 증가할수록 기온이 저감되는 경향을 보였으며, 특히 수목 아래 그늘에서의 기온 저감 효과가 크게 나타났다. 또한 TCR 증가에 따라 기온 저감의 높이와 범위가 수직방향과 바람 방향으로 넓게 퍼짐을 확인하였다(Fig. 7).

3.3. 수관피복률(TCR) 변화에 따른 에너지 및 탄소저감량 분석

수목이 없는 TCR 0%를 기준으로 시나리오별 기온 저감량을 에너지 저감 잠재량으로 산정하여 도시숲의 탄소저감 효과를 알아보기 위해 식 (1), 식 (2) 및 탄소배출계수를 활용하였다. 식의 적용을 위해서는 수평 및 수직범위의 기온 결과가 필요하여 본 연구에서는 도시숲과 같은 블록에 있는 건물 중 최고 높이를 고려한 58.5 m (h = 58.5)

Table 6. Energy and carbon reduction (h = 58.5 m)

Time	Scenario	Regression Model	Energy Reduction (kWh)	Carbon Reduction	
				kg/CO ₂	kgCO ₂ /ha
12:00	TCR 10%	$0.00087x^2 - 0.0998x + 32.707$	45.58	21.64	4.61
	TCR 20%	$0.00077x^2 - 0.0913x + 32.518$	89.80	42.63	9.08
	TCR 30%	$0.00069x^2 - 0.0840x + 32.356$	129.16	61.31	13.06
	TCR 40%	$0.00063x^2 - 0.0788x + 32.238$	159.91	75.91	16.17
	TCR 50%	$0.00057x^2 - 0.0737x + 32.123$	188.46	89.46	19.05
	TCR 60%	$0.00051x^2 - 0.0689x + 32.009$	220.24	104.55	22.27
	TCR 70%	$0.00043x^2 - 0.0615x + 31.835$	266.16	126.35	26.91
13:00	TCR 10%	$0.00097x^2 - 0.1105x + 33.632$	70.06	33.26	7.08
	TCR 20%	$0.00085x^2 - 0.0997x + 33.382$	133.09	63.18	13.46
	TCR 30%	$0.00075x^2 - 0.0904x + 33.166$	190.24	90.31	19.23
	TCR 40%	$0.00067x^2 - 0.084x + 33.013$	232.23	110.24	23.48
	TCR 50%	$0.00060x^2 - 0.0777x + 32.867$	270.98	128.63	27.4
	TCR 60%	$0.00054x^2 - 0.0721x + 32.729$	310.98	147.62	31.44
	TCR 70%	$0.00046x^2 - 0.0647x + 32.552$	359.49	170.65	36.35
14:00	TCR 10%	$0.00107x^2 - 0.1188x + 34.296$	85.02	40.36	8.6
	TCR 20%	$0.00092x^2 - 0.1057x + 33.987$	166.69	79.13	16.85
	TCR 30%	$0.00079x^2 - 0.0943x + 33.713$	242.20	114.97	24.49
	TCR 40%	$0.00071x^2 - 0.0865x + 33.524$	295.84	140.44	29.91
	TCR 50%	$0.00062x^2 - 0.0788x + 33.338$	347.99	165.19	35.18
	TCR 60%	$0.00055x^2 - 0.0724x + 33.178$	395.50	187.74	39.99
	TCR 70%	$0.00047x^2 - 0.0651x + 33.001$	445.03	211.26	44.99
15:00	TCR 10%	$0.00110x^2 - 0.1207x + 34.582$	76.43	36.28	7.73
	TCR 20%	$0.00095x^2 - 0.1072x + 34.264$	161.45	76.64	16.32
	TCR 30%	$0.00081x^2 - 0.0944x + 33.953$	248.22	117.83	25.1
	TCR 40%	$0.00071x^2 - 0.0851x + 33.726$	313.30	148.72	31.68
	TCR 50%	$0.00060x^2 - 0.0753x + 33.489$	380.48	180.61	38.47
	TCR 60%	$0.00051x^2 - 0.0673x + 33.290$	438.95	208.37	44.38
	TCR 70%	$0.00042x^2 - 0.0594x + 33.100$	491.97	233.54	49.74
16:00	TCR 10%	$0.00103x^2 - 0.1111x + 34.364$	69.77	33.12	7.05
	TCR 20%	$0.00089x^2 - 0.0979x + 34.052$	153.78	73	15.55
	TCR 30%	$0.00074x^2 - 0.0845x + 33.729$	245.30	116.44	24.8
	TCR 40%	$0.00062x^2 - 0.0745x + 33.485$	315.72	149.87	31.92
	TCR 50%	$0.00050x^2 - 0.0635x + 33.221$	391.51	185.85	39.58
	TCR 60%	$0.00040x^2 - 0.0546x + 33.001$	456.44	216.67	46.15
	TCR 70%	$0.00030x^2 - 0.0460x + 32.793$	514.99	244.47	52.07
17:00	TCR 10%	$0.00088x^2 - 0.0926x + 33.637$	73.14	34.72	7.39
	TCR 20%	$0.00072x^2 - 0.0787x + 33.317$	157.29	74.67	15.9
	TCR 30%	$0.00056x^2 - 0.0649x + 32.991$	246.24	116.89	24.9
	TCR 40%	$0.00045x^2 - 0.0548x + 32.757$	310.94	147.6	31.44
	TCR 50%	$0.00032x^2 - 0.0437x + 32.495$	383.54	182.07	38.78
	TCR 60%	$0.00023x^2 - 0.0356x + 32.303$	438.33	208.08	44.32
	TCR 70%	$0.00012x^2 - 0.0261x + 32.080$	498.67	236.72	50.42

^aEnergy reduction amount was calculated based on g (h) with TCR 0% and h = 58.5 as the reference

까지를 분석 높이로 정했다. 시간대별 각 시나리오에 따른 0 m ~ 58.5 m 범위에서의 회귀식 및 이를 활용한 에너지 저감량과 탄소 저감량은 Table 6과 같다.

가장 기온이 높았던 15시 기준으로 소비전력 2.8 kWh 에어컨을 TCR 10%에서 27.3대, TCR 20%에서 57.7대, TCR 30%에서 88.6대, TCR 40%에서 111.9대, TCR 50%에서 135.9대, TCR 60%에서 156.8대, TCR 70%에서

175.7대 가동한 것과 동일한 저감 효과가 나타났다. 또한 시나리오별 에너지 저감량을 국제보상운동기념공원 내부 건물의 7 ~ 8월 평균 일 전기사용량 3,240.71 kWh와 비교한 결과, TCR 10%는 4.6%, TCR 20%는 9.5%, TCR 30%는 14.3%, TCR 40%는 17.9%, TCR 50%는 21.6%, TCR 60%는 24.9%, TCR 70%는 28.4%의 간접적인 에너지 저감 효과에 해당한다. TCR 증가에 따라 저감 효과 또한 증

가하며 이러한 결과는 TCR 증가가 도시숲 내부의 열환경 개선뿐 아니라 주변 건물의 냉방 에너지 수요 절감에도 기여할 수 있음을 시사한다.

TCR 증가에 따른 에너지 저감량을 탄소 저감량으로 환산했을 때 낮 6시간 동안의 총 탄소 저감량은 수고 평균 7.1m, 흉고직경 평균 16.6 m인 단풍나무의 탄소흡수량인 21.68 kgCO₂/y (Park and Kang, 2010)와 비교했을 때, TCR 30%에서는 28.5그루의 단풍나무가 1년동안 흡수하는 탄소의 양과 동일하며, TCR 70%에서는 56.4그루의 단풍나무가 1년동안 흡수하는 탄소의 양과 같다. 또한 탄소 저감량을 공원 면적대비 저감량인 원단위값으로 환산했을 때 모든 분석 시간대에서 TCR의 증가에 따라 탄소 저감 원단위값이 증가함을 확인하였다. TCR 10%와 TCR 30%의 탄소 저감 원단위를 비교했을 때 12시에서 17시까지 평균적으로 TCR 30%에서 3배 많은 탄소 저감 능력을 가졌으며, TCR 70%와 비교했을 때는 TCR 70%에서 6.1 배 더 많은 탄소 저감 능력을 가졌다.

4. 결론

본 연구는 탄소중립을 위한 도시숲의 효율적인 조성을 위해 수관피복률을 변수로 미기후 시뮬레이션 분석을 진행하였다. 이를 통해 기온 저감을 위한 효율적인 수관피복률을 도출하고, 도시숲의 기온 및 에너지 저감에 따른 분석을 진행하였으며, 이에 따른 도시숲의 탄소 저감 효과를 제시하고자 하였다. TCR (Tree Cover Ratio)을 변수로 하여 미기후 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met을 활용하여 TCR 0%에서 70%까지 10% 간격으로 8개의 시나리오를 생성하고 분석을 수행하였다. TCR 변화에 따른 공원의 기온 저감 효과를 비교하기 위해 1.5 m 높이의 기온과 공원을 가로지르는 수직적인 기온 분포를 추출하여 분석하였으며, 기온 결과에 대하여 ANOVA 분석과 분절 회귀분석을 실시해 기온 저감에 효율적인 TCR 구간을 확인하였다. 또한 Kong et al. (2016)의 에너지 저감량 계산식을 활용하여 공원의 영향범위에 대한 잠재적인 에너지 저감 효과를 계산하고 이를 탄소 저감량으로 환산하여 도시숲의 탄소 저감 효과를 정량적으로 제시하였다.

공원 내부의 1.5m 높이의 기온을 분석한 결과 도시숲 내부의 평균기온이 가장 높았던 시간대는 15시였으며, TCR이 증가함에 따라 기온 저감량과 큰 폭의 기온 저감이 나타나는 면적 또한 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 15시뿐만 아니라 모든 시간대에서 동일하게 나타

났다. 모든 시나리오에서 TCR 변화의 영향을 받지 않으면서 그들이 없는 공간에서 최고 기온을 나타냈으며, 수목이 식재되어있는 공간에서 최저 기온 및 낮은 기온 분포를 보였다. 그들의 차양효과로 인해 지표면에 도달하는 태양복사에너지가 감소하였기 때문인 것으로 판단되며 이러한 결과를 통해 도시숲 내부 수목이 없는 공간과 수목이 있는 공간의 기온 분포를 통해 수목 그들의 중요성을 확인할 수 있다.

ANOVA 분석 결과 TCR 증가에 따른 기온 저감이 유의미한 차이를 가짐을 알 수 있었으며, 분절 회귀분석에서 TCR 31.66%를 기점으로 기온 저감량 증가율이 감소하여 TCR 약 30%까지의 기온 저감 효율이 상대적으로 좋음을 알 수 있다. 이러한 결과는 다양한 위·경도에서 진행된 Wang et al. (2023)의 40%, Ziter et al. (2019)의 40%, Ouyang et al. (2020)의 20~30% 등의 연구결과와 유사한 수치를 나타내며, 현재 국외에서 수관피복률 달성 목표로 언급되는 시드니의 27~40% 달성, 뉴욕의 30% 달성, 바르셀로나의 30% 달성, 멜버른의 40% 달성 등과 유사한 범위의 결과임을 알 수 있다. 이는 도시의 수관피복률 30% 달성 목표가 국내에도 충분히 적용될 수 있음을 의미한다.

하지만 TCR이 증가함에 따라 기온이 지속해서 감소하는 경향이 관찰되었기 때문에 예산과 식재 가능한 면적이 확보된다면 30% 이상의 TCR을 고려하는 것이 기온 저감에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 또한 과도한 수목 밀도 증가로 인해 개별 수목의 생육 상의 문제를 유발할 수 있어 탄소흡수 측면에서 부정적인 영향을 줄 수 있으므로 적절한 식재 밀도 유지와 체계적인 관리가 필요하다.

수목의 수직적인 기온분포 또한 TCR의 증가에 따라 수목 아래에서 특히 기온 저감 강도가 커졌고 공원 상층으로의 기온 저감 범위가 넓어지는 경향을 보였다. 공원의 외부로의 기온 저감 효과는 도시숲이 도시공간의 기온저감에 영향을 미칠 수 있음을 의미하며, 이러한 결과를 바탕으로 TCR의 증가에 따른 간접적인 에너지 저감 및 탄소 저감량을 추정하였을 때 에너지 저감은 탄소 배출 저감과 밀접한 연관이 있으며, TCR의 증가는 탄소 저감량 증가에 영향을 미침을 확인하였다. 더불어 도시숲 조성 시 탄소흡수에 유리한 수종을 사용한다면 수목의 탄소흡수 효과 또한 강화할 수 있을 것이다.

결론적으로, 도시숲 조성 시 기온 저감 효율을 위한 적정 TCR은 약 30%로 나타났으며, 도시숲이 기온 저감과 에너지 저감 효과를 가짐을 수치적으로 확인하였다. 본

연구는 기존 연구들이 주로 탄소중립을 위한 도시숲의 흡수원 기능에 초점을 맞춘 것과 달리 기온 저감 효과와 이에 따른 에너지 저감 효과를 정량적으로 분석하여 탄소 저감 효과를 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 또한 분석 결과를 토대로 기온 및 에너지 저감에 효율적인 TCR을 제안함으로써, 기후변화 대응과 탄소중립 달성을 위한 도시숲 계획 및 가이드라인 수립의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

하지만 시뮬레이션 기반의 분석이기 때문에 실제 수목의 수종 및 규격까지 상세하게 반영되지 못하였다는 점과 시나리오의 변수를 수관피복률로 제한하였다는 점에서 한계를 가지며, 관목, 야교목 등 다층구조에 대한 상세한 공간 변화에 따른 결과도 비교되어야 할 것이다. 또한 낮 시간의 분석을 통해 결과를 도출하였으므로 야간 열대야를 고려한 추가적인 분석이 필요하다.

사사

이 연구는 “RS-2024-00354391(기후대응 도시를 위한 도시그늘 네트워크 구축 기술 및 이용자 중심의 그늘네트워크 활용 기법 개발)”의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- Ajuntament de Barcelona. 2017. Trees for life: Master plan for Barcelona's trees, 2017-2037. Barcelona, ES: Àrea d'Ecologia Urbana.
- City of Sydney. 2023. Urban forest strategy.
- Coutts AM, White EC, Tapper NJ, Beringer J, Livesley SJ. 2016. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theor Appl Clim* 124(1): 55-68. doi: 10.1007/s00704-015-1409-y
- Daegu-Gyeongbuk Development Institute. 2022. The 3rd detailed implementation plan for climate change adaptation in Daegu Metropolitan City. Daegu, Korea: Daegu-Gyeongbuk Development Institute. [accessed 2025 Oct 15]. https://www.daegu.go.kr/env/index.do?menu_id=00938051&menu_link=/icms/bbs/selectBoardArticle.do&bbsId=BBS_02190
- Eum JH, Kwon OS, Lee SB, KIM K, Son JM, Son YH, Seok JH, Seok JW, Choi ES. 2017. Formulation of the basic plan for urban heat island mitigation in daegu for climate change adaptation: Degec Green Environment Center. Research report (17-04-01-90-94). Greater London Authority (GLA). 2025. London urban forest plan 2025: Actions update (REV1). London, UK: Greater London Authority. [accessed 2025 Oct 13]. https://www.london.gov.uk/sites/default/files/2025-02/London_Urban_Forest_Plan_2025_Actions_Update_REV1.pdf
- Haeri T, Hassan N, Ghaffarianhoseini A. 2023. Evaluation of microclimate mitigation strategies in a heterogenous street canyon in Kuala Lumpur from outdoor thermal comfort perspective using envi-met. *Urban Clim* 52: 101719. doi: 10.1016/j.uclim.2023.101719
- Hwang MS, Kim HK. 2023. Changes in microclimate and thermal comfort in summer after creating the New Gwanghwamun Square (in Korean with English abstract). *J Urban Des Inst Korea Urban Des* 24: 23-41. doi: 10.38195/judik.2023.02.24.2.23
- Klok L, Rood N, Kluck J, Kleerekoper L. 2019. Assessment of thermally comfortable urban spaces in amsterdam during hot summer days. *Int J Biometeorol* 63(2): 129-141. doi: 10.1007/s00484-018-1644-x
- Kong F, Sun C, Liu F, Yin H, Jiang F, Pu Y, Cavan G, Skelhorn C, Middel A, Dronova I. 2016. Energy saving potential of fragmented green spaces due to their temperature regulating ecosystem services in the summer. *Appl Energy* 183: 1428-1440. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.09.070
- Korea Meteorological Administration. 2024. Summer climate characteristics for 2024; [accessed 2025 Aug 27]. <https://www.kma.go.kr/kma/news/press.jsp?mode=view&num=1194405>
- Min JK, Eum JH, Sung UJ, Son JM, Kim JE. 2022. Scenario-based analysis on the effects of green areas on the improvement of urban thermal environment (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Landscape Archit* 50(6): 1-14. doi: 10.9715/KILA.2022.50.6.001

- Morakinyo TE, Kong L, Lau KK-L, Yuan C, Ng E. 2017. A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Build Environ* 115: 1-17. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.01.005
- Morakinyo TE, Lam YF. 2016. Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. *Build Environ* 103: 262-275. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.04.025
- Moss JL, Doick KJ, Smith S, Shahrestani M. 2019. Influence of evaporative cooling by urban forests on cooling demand in cities. *Urban For Urban Greening* 37: 65-73. doi: 10.1016/j.ufug.2018.07.023
- New York City Urban Forestry Task Force. 2021. NYC urban forest agenda. New York, NY: City of New York; [accessed 2025 Oct 15]. <https://forestforall.nyc/wp-content/uploads/2021/06/NYC-Urban-Forest-Agenda-.pdf>
- Ouyang W, Morakinyo TE, Ren C, Ng E. 2020. The cooling efficiency of variable greenery coverage ratios in different urban densities: A study in a subtropical climate. *Build Environ* 174: 106772. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106772
- Park CY, Lee DK, Krayenhoff ES, Heo HK, Hyun JH, Oh K, Park TY. 2019. Variations in pedestrian mean radiant temperature based on the spacing and size of street trees. *Sustainable Cities Soc* 48: 101521. doi: 10.1016/j.scs.2019.101521
- Park EJ, Kang, KY. 2010. Estimation of C storage and annual CO₂ uptake by street trees in Gyeonggi-do (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Ecol* 24: 591-600.
- Park JS, Yoon EJ, Park JH, Hong NE, Kim EH, Hwang JM, Kim CH. 2023. A study on greenhouse gas reduction in cities using simulation experiments focusing on carbon sink. Korea Research Institute for Human Settlements. Report No. 23-06.
- Ravazdezh F, Rivers N. 2025. Quasi-experimental evidence that the urban tree canopy reduces residential energy consumption. *Energy Build* 344: 115992. doi: 10.1016/j.enbuild.2025.115992
- Rodriguez A, Wood S, Carmeliet J, Kubilay A, Derome D. 2025. Local impact of trees on thermal comfort of pedestrians in streets. *Urban Clim* 61: 102417. doi: 10.1016/j.uclim.2025.102417
- SDG Local Action. 2024. Webinar “Targeting urban heat: the experiences of Miami-Dade and Seville”; [accessed 2025 Oct 15]. <https://sdglocalaction.org/targeting-urban-heat/>
- Sun T, Chen L, Sun R. 2024. Cooling effects in urban communities: Parsing green spaces and building shadows. *Urban For Urban Greening* 94: 128264. doi: 10.1016/j.ufug.2024.128264
- Tsoka S, Tsikaloudaki A, Theodosiou T. 2018. Analyzing the envi-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities Soc* 43:55-76 doi: 10.1016/j.scs.2018.08.009
- Wang C, Ren Z, Chang X, Wang G, Hong X, Dong Y, Guo Y, Zhang P, Ma Z, Wang W. 2023. Understanding the cooling capacity and its potential drivers in urban forests at the single tree and cluster scales. *Sustainable Cities Soc* 93: 104531. doi: 10.1016/j.scs.2023.104531
- Wu Y-C, Lu C-L, Lin T-P. 2025. Evaluating the effectiveness of tree canopy and building shade in urban heat mitigation using solar radiation transmittance. *Urban Clim* 62: 102522. doi: 10.1016/j.uclim.2025.102522
- Ziter CD, Pedersen EJ, Kucharik CJ, Turner MG. 2019. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proc Natl Acad Sci* 116(15): 7575-7580. doi: 10.1073/pnas.1817561116