한국조경학회지 54(5): 270~284, 2026. 10.
J. KILA Vol. 54, No. 5, pp. 270~284, October, 2026
pISSN 1225-1755 eISSN 2288-9566
https://doi.org/10.9715/KILA.2026.54.5.270

가로녹화 모델의 도시열섬 및 미세먼지 저감효과 분석 연구†

A Study on the Urban Heat Island and Particulate Matter Reduction Effects of Street Greening Models†

최한별*, 한봉호, 곽정인***, 박석철******
*서울시립대학교 대학원 조경학과 석사, **서울시립대학교 조경학과 교수, ***(재)환경생태연구재단 연구원, ****서울시립대학교 도시과학연구원 연구원

Choi, Han-Byeol*, Han, Bong-Ho, Kwak, Jeong-In***, Park, Seok-Cheol******
*Master, Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, University of Seoul
**Professor, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul
***Researcher, Environmental Ecology Research Foundation
****Researcher, Institute of Urban Science, Graduate School of Urban Science, University of Seoul

Received: February 2, 2026
Revised: February 19, 2026 (1st)
September 30, 2026 (2nd)
Accepted: October 1, 2026
3인익명 심사필

Corresponding author :
Seok-Cheol Park
Researcher, Institute of Urban Science, Graduate School of Urban Science, University of Seoul, Seoul 02504, Korea
Tel.: +82-2-6490-5521
E-mail: psc9987@uos.ac.kr

국문초록

본 연구는 가로녹지를 대상으로 녹지구조 및 가로구조 변경에 따른 열섬현상 완화, 미세먼지 저감 효과를 규명하고자 하였다. 단일 요소 중 녹지구조 변경 방법의 효과 평가 결과 열섬현상 저감에 가장 효과가 좋았던 요소는 중앙분리녹지 조성이었고, 그다음으로는 녹지용적이 큰 활엽수로 수종 갱신, 교목 열수 증가, 다층구조, 침엽수로 수종 갱신 순으로 효과가 있었다. 미세먼지 개선에 가장 효과가 좋았던 요소는 중앙분리녹지 조성과 다층구조 조성이었고, 그다음으로는 침엽수로 수종 갱신, 교목 열수 증가 순으로 효과가 있었다. 가로구조 변경 방법의 경우 열섬현상 저감 효과와 미세먼지 개선 효과가 동일한 경향이었다. 같은 면적을 녹지로 변경할 때 보도폭을 넓혀 다층구조를 식재하는 것보다 중앙분리녹지로 조성하는 것이 효과가 더 높았으며, 더 많은 차선수를 녹지로 변경할수록 효과가 좋았다. 복합효과 평가는 단일요소에서 효과가 가장 좋았던 중앙분리녹지를 기준으로 어떤 식재구조 변경 방법을 복합했을 때 효과를 최대화할 수 있을지 분석하고자 진행하였다. 열섬현상 저감의 경우 두 가지를 복합하면 '중앙분리녹지 + 수종 갱신(활엽수)'이 최대 −0.15℃, 세 가지를 복합하면 '중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신(활엽수)'이 최대 −0.29℃로 효과가 높았다. 미세먼지 개선의 경우 두 가지를 복합하면 '중앙분리녹지 + 다층구조'가 최대 −2.37㎍/m^3, 세 가지는 '중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조'가 −2.66㎍/m^{3}로 효과적이었다. 열섬현상 저감을 위해서는 열섬 발생지인 도로를 피복하여 지표면에 도달하는 열의 양을 감소시키고 복사열을 차단하는 것이 중요하며, 미세먼지 개선에는 발생원인 도로에서 확산되는 것을 차단하는 게 중요하다.

주제어: 가로 구조, 수종 갱신, 다층구조, 녹지용적, 중앙분리녹지

ABSTRACT

This study attempted to examine the change of green space structures and the street structure's effect on relieving the Urban Heat Island while reducing Particulate Matter. As a result of evaluating the effectiveness of the method of changing green space structures, the most effective method in reducing the Urban Heat Island was found to be the formation of a median green space. Next, renewing tree species to broad-leaved trees with large green volume, increasing tree rows, multi-layer structures, and renewing tree species to coniferous trees were effective. The factors that were most effective in improving Particulate Matter were the creation of median green spaces and the creation of multi-layered structures. These were followed by the effective ordering of the renewal of tree species and increasing the number of trees, particularly conifers. In the case of the method of changing street structures, the method of relieving the Urban Heat Island and reducing Particulate Matter tended to be the same. When changing an area to a green space, it was more effective to create a median green space than to expand the sidewalk width and plant a multi-layered structure. The composite effect evaluation was conducted to analyze which green space structure change method maximized the effect and which single element had the largest impact. In the case of reducing the Urban Heat Island, when two methods are combined, the effect of "median green space + tree renewal (broadleaf tree)" is up to −0.15℃; and when three methods are combined, the effect of "median green space + increased row of trees

†본 논문은 주저자의 2023년도 서울시립대학교 도시과학대학원 석사학위 논문 일부를 수정·보완하여 발전시킨 것임.

+ tree renewal (broadleaf tree)" is up to −0.29℃. In the case of improving Particulate Matter, when two methods are combined, "median green space + multilayer structure" is up to −2.37㎍/m³; and when three methods are combined, "median green space + increased row of trees + multilayer structure." is up to −2.66 ㎍/m³ . These results suggest that lowering road temperatures and blocking radiant heat are important for mitigating the urban heat island effect and preventing the spread of Particulate Matter.

Keywords: Street Structure, Tree Species Renewal, Multi-layer Structure, Green Space Volume, Median Green Space

1. 서론

최근 도시는 기후변화에 따른 온도 상승과 건축물 및 불투수포장 등으로 인한 열섬현상이 발생하고 있으며, 차량 및 산업단지 등에서 배출되는 오염물질로 인한 대기오염도 지속적으로 이슈가 되고 있다. 도시 환경문제는 대기오염 발생, 도시의 건조화, 열대야 및 고온열 증가, 겨울철 최저기온 상승으로 인한 냉방 전력 소비 증가로 악순환을 가져올 뿐 아니라 인체에도 악영향을 미쳐 일상생활 및 삶의 질에 악영향을 미친다. 도시 환경 문제를 해결하는 방안으로 도시녹지의 중요성이 인지되었고(이수미 등, 2019), 이에 대한 요구 또한 증가하였다. 산림청은 제2차 도시림 기본계획을 통해 도시숲의 미세먼지 저감 효과, 기후완화 효과 등 기능을 부각하며 도시숲 확대 및 질적 가치 증진의 목표를 설정하였다. 또한 2019년부터 바람길숲 조성사업을 지속적으로 추진 중이다. 바람길숲은 도시 외곽 산림의 맑고 차가운 공기를 끌어들여 공기순환을 촉진하여 대기 오염물질과 뜨거운 열기를 도시 외부로 배출하는 기능을 갖는 숲이다(산림청, 2019).

도시 속 오염원인 도로와 인접하며 도시열섬현상과 미세먼지 완화 기능이 높은 연결숲의 중요성이 강조되어 왔는데, 가로녹화에 해당되는 토지는 녹화 효과가 크고, 새로운 관리·조성기법을 도입함으로써 녹화 효과를 극대화할 수 있다(부산발전연구원, 2006; 정희은, 2014; 한봉호 등, 2014). 가로녹지는 도시 내 도로의 보도에 식재된 교목 성상의 가로수와 보도 내 띠 형태로 조성되어 관목, 초화류가 식재된 녹지이며(이경재 등, 2011), 가로수는 「도로법」 제10조에 따른 도로 등 대통령령으로 정하는 도로의 도로구역 안 또는 그 주변지역에 조성·관리하는 수목을 말한다(도시숲법 제2조 3항).

환경문제 해결과 관련된 녹지 기능에 관한 연구 경향을 살펴보면 수종(김은범, 2014), 녹지량(홍석환 등, 2005), 식재형태(김재경 등, 2020) 등 녹지의 구조에 관한 연구는 다양하나 실제 대상지를 토대로 한 효과 검증 연구는 부족한 상황이다. 선행연구를 살펴보면 주로 바람길숲 조성으로 인한 도시환경 개선 효과(김강민과 성선용, 2024), 도시 전체에서 바람길 분석 및 바람길숲 조성 대상지 선정 방법(손정민 등, 2020; 한봉호 등, 2023), 바람길숲 유형별 조성 방안 및 조성 기법(엄정희 등, 2019), 도시 가로의 보도폭-다열 식재-띠녹지 폭-층위구조-중앙분리대를 통합한 프레임 제안 연구(박주현 등, 2025) 등의 연구가 진행되었지만, 실질적인 계획기법 적용에 관한 연구는 아직 부족한 상황이다. 또한 도시숲 유형별 조성관리 지침 불이행, 도시숲 조성 효과 부족 등의 문제는 지속적으로 지적이 제기되고 있다(산림청, 2020).

따라서 본 연구는 실제 가로녹지를 대상으로 식재구조에 따른 열섬현상과 미세먼지 개선 효과를 검증하여 도시환경 개선에 효과적인 요인을 도출하고 가로녹지의 기능을 향상할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상지 선정

2.1.1 연구대상 도시

도시형성 특징, 토지이용 특성, 도시의 위계에 따라 도시가 발달한 모습과 환경오염 양상이 다르게 나타난다. 이를 고려하여 다양한 형태가 포함되도록 대상지를 선정하였다. 대한민국 수도로 고밀도 개발로 인한 집약적 구조를 가지는 서울특별시, 수도권 공업지대의 한 축으로서 도시개발이 활발하게 이루어져 집약적 구조와 격자형 구조가 혼합되어 나타나는 인천광역시, 대표적인 2·3차 산업도시로서 원도심이 확장되어 개발된 도시로 집약적 구조와 격자형 구조가 혼합되어 나타나는 대전광역시, 과거 농업의 중심지였으나 경공업 중심의 산업구조와 관광을 토대로 한 상업중심지가 발달한 전주시, 부산의 위성도시로 공업의 의존도가 높은 양산으로 총 5개 도시를 선정하였다.

2.1.2 도시별 세부 대상지 선정 및 유형화

도시별 세부 대상지는 고온역과 미세먼지 고농도 지역을 중첩하여 도시환경문제가 심각한 지역을 도출한 후 각 도시의 주된 토지이용(환경공간정보서비스 세분류 토지피복지도 바탕 대상지 토지이용 특성 반영)이 나타나는 곳으로 선정하였다. Landsat8 위성 영상 바탕 지표면 온도 분석은 서울과 인천의 경우 2017년 8월 26일, 대전과 전주의 경우 2021년 9월 15일, 양산의 경우 2020년 9월 4일 데이터를 사용하였다. Arcmap 10.8 raster calculator를 이용하여 방출된 복사량, 밝기온도, 정규식생지수, 초목비율 계산을 통해 지표면온도를 작성하였다. 미세먼지 고농도 지역은 에어코리아 측정소 관측값 바탕 IDW(inverse distance weighting) 보간기법으로 분석하였다. 세부 측정 자료는 2021년 미세먼지 주의보 및 경보가 많이 발생한 3월 26부터 30일까지의 데이터 평균값을 이용하여 미세먼지(PM_{10}), 초미세먼지($PM_{2.5}$) 분포지도를 작성하였다.

세부 대상지는 서울 봉천로 일대, 인천 영고개로 일대, 대전 둔산로 일대, 전주 충경로 일대, 양산 번영로 일대로 총 5개이다. 도시계획 단위를 고려하여 도로를 기준으로 블럭 단위가 포함되도록 450m × 450m의 동일한 면적으로 설정하였다(그림 1 참조).

2.2 조사분석 방법

2.2.1 현황조사 방법

토지이용 현황은 환경공간정보서비스에서 제공하는 세분류 토지피복도, 국가공간정보포털에서 제공하는 건물통합정보, 다음지도에서 제공하는 항공사진을 토대로 건축물 층고, 토지피복에 대한 현장조사를 실시하였다. 이를 토대로 Arcmap 10.8 프로그램을 통해 shp파일 형태로 건축물 층고 및 토지피복 현황 자료를 구축하였다. 또한 가로구조와 가로수 및 가로녹지 구조 파악을 목적으로 현황조사를 실시하였다. 세부 조사항목은 왕복 도로 차선수, 보도폭, 수종, 수고, 지하고, 수관폭 등 수목 규격, 식재유형, 녹지 단면구조이다. 이를 통해 가로 단면구조 작성 및 녹화 방법 설정에 활용하였다.

2.2.2 녹지구조 및 가로구조 변경 방법

녹지구조 및 가로구조 변경 방법은 토지이용 현황, 도로 차선수 및 보도폭의 가로 현황, 가로수 및 가로녹지 구조 현황 분석 결과를 바탕으로 대상지 현황에 가능한 방법을 적용하였다. 식재방법은 현재 도로 및 보도폭의 구조를 변경하지 않고 녹지구조만 변경하는 방법과 도로 차선수 감소를 통한 가로구조 변경으로 녹지 조성을 하는 방법으로 크게 두 가지로 구분하였다.

녹지구조 변경은 교목 열수 증가, 다층구조 조성, 수종 갱신, 중앙분리녹지 조성의 네 가지 방법으로 설정하였다.

토지이용	도시	세부 대상지	면적(m)	도로(차선수)	보도폭(m)	유형 구분
주거 · 상업용지	대전	둔산로 일대	450 × 450	넓음(6)	넓음 3-7, (5.0)	도로 및 보도폭이 넓은 주거 · 상업용지
	서울	봉천로 일대	450 × 450	넓음(10)	좁음 3-4, (3.5)	도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지
	전주	충경로 일대	450 × 450	좁음(4)	좁음 3, (3.0)	도로 및 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지
공업용지	인천	영고개로 일대	450 × 450	넓음(6)	넓음 3-6, (4.5)	도로 및 보도폭이 넓은 공업용지
	양산	번영로 일대	450 × 450	넓음(6)	좁음 3, (3.0)	도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지

그림 1. 세부 대상지 현황 및 유형화

교목 열수 증가의 경우 보도폭 5m 이상인 대상지에 기존 식재되어 있던 수목과 동일한 수종으로 교호식재한다고 가정하였고, 다층구조 조성의 경우 기존 식재되어 있는 교목에 보도폭에 따라 3-5m는 관목, 5m 이상은 아교목 + 관목을 계단식 배치로 추가로 식재한다고 가정하였다. 수종 갱신의 경우 대상지 특성에 따라 녹지용적이 큰 활엽수 또는 침엽수로 변경하는 경우로 세분화하였다. 활엽수의 경우 느티나무를 기준으로 하였으며, 보도폭이 협소한 경우 양버즘나무로 계획하였다. 침엽수로 변경하는 경우는 미세먼지 발생이 특히 심각한 공업용지를 대상으로 기후특성을 고려하여 겨울철 미세먼지 저감을 위해 적용하고자 하였다. 중앙분리녹지 조성은 도로 1차선에 대하여 교목 + 아교목 + 관목 구조로 느티나무 + 단풍나무 + 반송의 계단식 배치를 모델로 하였고, 공업용지는 교목에 침엽수인 소나무를 적용하였다.

가로구조 변경 방법으로는 도로 차선을 감소하여 보도 외곽에 다층구조 녹지를 조성하는 경우와 도로 중앙에 중앙분리녹지를 조성하는 경우로 구분하였다. 도로 차선수 6차선 이상인 대상지에 2차선 단위로 감소하여 도로 현황에 따라 경우의 수를 다양하게 하였으며, 최소 도로 차선수를 4차선으로 설정하였다. 다층구조와 중앙분리녹지 모두 교목 + 아교목 + 관목 구조로 느티나무 + 단풍나무 + 반송의 계단식 배치를 모델로 하였고, 미세먼지 발생이 특히 심각한 공업용지는 겨울철 미세먼지 저감을 위해 소나무 + 단풍나무 + 반송의 모델로 적용하고자 하였다.

현황 특성에 따라 대상지 유형별 식재구조 변경 방법을 설정하였다. 보도폭이 5m 이상 대상지는 교목 열수 증가, 다층구조(아교목 + 관목)를 적용하였고, 3-5m인 대상지에는 다층구조(관목)를 적용하였다. 수종 갱신의 경우 이미 녹지용적이 큰 활엽수로 식재되어 있던 인천을 제외하고 전 지역에서 가능하였으며, 공업용지에서 겨울철 미세먼지 저감을 위해 침엽수로의 수종갱신을 계획하였다. 가로구조 변경은 도로차선수가 좁은 전주를 제외한 4개 대상지를 대상으로 하였으며, 도로차선수가 가장 넓은 서울에서 변경 방법이 가장 다양하였다(표 1 참조).

2.2.3 도시환경 개선 효과 평가

ENVI-met 5.1.1을 이용하여 가로구조 및 식재구조 시나리오에 따른 도시환경 개선 효과를 분석하였다. 모든 대

표 1. 대상지 유형별 식재구조 변경 방법

구분			변경 적용	도로 및 보도폭이 넓은 주거 · 상업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지	도로 및 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지	도로 및 보도폭이 넓은 공업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지
현황 특성	대상 도시		-	대전	서울	전주	인천	양산
	토지이용	토지이용	-	업무시설, 공공시설, 고층공동주거지	주상혼합지, 공공시설, 공동주거지	상업지	대규모 공업지역	공업지역, 고층공동주거지
		건축물 층고 (m)	-	3-57	3-72	3-57	3-23	3-66
	녹지	가로수 (m)	-	1열(+띠녹지)	1열, 교목+관목 녹지	1열	1열+띠녹지	1열+띠녹지
				은행나무: H 8 W 3×3 메타세쿼이아: H 12 W 4×4 느티나무: H 8 W 4×4 중국단풍: H 7 W 3×3	은행나무: H 8 W 3×3 느티나무: H 8 W 5×5 이팝나무: H 5 W 3×3 단풍나무: H 5 W 5×5 반송: H 2 W 1×1	은행나무: H 8 W 3×3	양버즘나무: H 7 W 3×3 회화나무: H 7 W 3×3 잣나무: H 7 W 2×2 소나무: H 3 W 2×2	은행나무: H 7 W 2×2 왕벚나무: H 4 W 3×3 이팝나무: H 4 W 1×1 소나무: H 2 W 1×1 반송: H 1 W 1×1
		기타녹지	-	건축후퇴선 녹지	중앙분리녹지	-	완충녹지	중앙분리녹지
녹지 구조 변경	교목 열수 증가		보도폭 5m 이상	○	×	×	○	×
	다층구조	관목	보도폭 3-5m	×	×	○	×	×
		아교목+관목	보도폭 5m 이상	○	○	×	○	×
	수종갱신	녹지용적 큰 활엽수	-	○	○	○	×	○
		침엽수*	공업용지	×	×	×	○	○
	중앙분리녹지 조성		도로 1차선 변경	○	○	○	○	○

표 1. 계속

구분			변경 적용	도로 및 보도폭이 넓은 주거·상업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거·상업용지	도로 및 보도폭이 좁은 주거·상업용지	도로 및 보도폭이 넓은 공업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지
가로 구조 변경	다층 구조 조성	도로 2차선	도로 6차선 이상	○	○	×	○	○
		도로 4차선		×	○	×	×	×
		도로 6차선		×	○	×	×	×
	중앙 분리 녹지 조성	도로 2차선	도로 6차선 이상	○	○	×	○	○
		도로 4차선		×	○	×	×	×
		도로 6차선		×	○	×	×	×

*겨울철과 이른 봄 미세먼지 저감을 위해 상록수가 효과적이나 대상지에 공통적으로 적용하기 위해 침엽수로 적용

상지에 동일한 셀 크기와 공간모형 조건을 적용하고, 대상지별 도로 방향과 설정 풍향을 고려하여 시나리오별 기온, 상대습도, 풍속 및 미세먼지 변화를 비교하였다. 다만 단파복사, 장파복사 및 평균복사온도(MRT)의 수치 분석을 수행하지 않아 복사에너지의 정량적 기여도는 분석하지 못하였다. 따라서 본 연구는 기온 변화의 원인을 풍속만으로 확정하지 않고, 도로 방향, 지역풍의 유입과 통과, 식재에 따른 풍속 변화가 기온 결과에 영향을 줄 수 있는 요인으로 해석하였다.

ENVI-met 프로그램은 독일 Bochum university의 Michael Bruse 교수에 의해 1998년 개발된 3차원 미기후 모델로, 토양, 지표면, 건물, 식생, 대기모형으로 구성된다. 높은 해상도(0.5-10m)를 가지고 있으며, 도시공간의 수목과 대상지 주변 토지피복까지 상세 비교·분석이 가능(백준범, 2021)하며, 지표-식물-대기 등 상호작용을 통해 미기후에 영향을 미칠 수 있는 물리적 요소에 대해 구체적인 고려가 가능(최현정, 2016)하고, 공간적으로 좁은 영역에서의 상세한 기상정보 도출이 가능하다는 장점이 있다(오금동 등, 2019).

모든 대상지에 동일하게 셀 크기 3m, 공간모형 크기 450m × 450m, 풍속 1m/s로 설정하였으며, 풍향의 경우 국지적 바람 유동은 주변 공간지형의 특성에 더 큰 영향을 받기 때문에(서보용과 정응호, 2017) 도로를 따라 동에서 서쪽 방향으로 흐르도록 설정하였다. 여름철 열섬현상저감 효과 평가의 경우 기상자료 개방포털 측정자료를 활용하여 2022년 최고기온이 높은 날 중 누락된 온도값이 없는 2022년 7월 29일 11시부터 16시를 대상으로 시뮬레이션을 진행하였으며, 녹지의 온도저감효과가 하루중 온도가 가장 높을 때 효과적이라는 선행연구 결과에 의해(김홍순, 2012) 최고기온이 나타나는 14시를 기준으로 결과값을 분석하였다. 미세먼지의 경우 에어코리아 측정자료 데이터를 이용하였고, 오염원의 확산 모습을 파악하기 위해 도로를 중심으로 오염원을 입력하였으며, 인천, 양산의 경우에는 공업지에도 입력하였다. 분석 일시는 2022년을 대상으로 미세먼지 주의보, 경보가 많이 발생했던 날 중 누락된 미세먼지 측정값이 없는 2022년 3월 5일 7시부터 12시를 대상으로 시뮬레이션을 진행하였다. 교통량에 의해 10-11시에 미세먼지가 최대치에 도달(허창회, 2019)한다는 연구결과에 의해 서울, 전주, 대전은 10시, 새벽에 교통량이 많은 공업지 특성상 인천은 8시, 양산의 경우 공업지이나 공동주거시설이 위치한 특성상 타지역과 동일하게 10시를 기준으로 분석하였다(표 2 참조).

3. 결과 및 고찰

3.1 가로녹화 개선 단일요소 효과 평가

3.1.1 도시열섬현상 저감 효과

녹지구조 변경 방법의 열섬현상 저감 효과 최댓값을 보면 도로 및 보도폭이 넓은 주거·상업용지의 경우 중앙분리녹지 −0.15℃, 활엽수로 수종 갱신 −0.14℃, 교목 열수 증가 −0.09℃, 다층구조 −0.03℃ 순으로 효과가 있었다. 도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거·상업용지는 중앙분리녹지 −0.09℃, 활엽수로 수종 갱신 −0.07℃, 다층구조 −0.01℃, 도로 및 보도폭이 좁은 주거·상업용지는 중앙분리녹지 −0.31℃, 활엽수로 수종 갱신 −0.10℃, 다층구조 −0.08℃, 도로 및 보도폭이 넓은 공업용지는 중앙분리녹지 −0.40℃, 다층구조 −0.18℃, 교목 열수 증가 −0.12℃, 침엽수로 수종 갱신 −0.06℃, 도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지는 중앙분리녹지와 활엽수로 수종 갱신 모두 −0.02℃, 침엽수로 수종 갱신 −0.00℃의 효과가 있었다(표 3 참조).

표 2. 세부 대상지별 입력 자료

구분			서울 봉천로	대전 둔산로	인천 영고개로	전주 충경로	양산 번영로
셀 크기(m)			3	3	3	3	3
공간모형 크기(m)			450 × 450 × 130	450 × 450 × 330	450 × 450 × 130	450 × 450 × 200	450 × 450 × 200
풍속(m/s)			1	1	1	1	1
풍향(°)			120	90	120	70	30
열섬 현상 저감 효과 분석	분석 날짜		2022-07-29	2022-07-29	2022-07-29	2022-07-29	2022-07-29
	시뮬레이션 시작		11:00	11:00	11:00	11:00	11:00
	시뮬레이션 종료		15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
	11:00	온도(℃)	32.4	32.8	32.5	33.8	31.7
		습도(%)	56.2	57.7	59.5	50.8	65
		미세먼지(㎍/m^3)	22	13	24	12	24
	12:00	온도(℃)	33.7	33.9	33.7	34.9	32.4
		습도(%)	51.6	52.8	55.3	48.6	64
		미세먼지(㎍/m^3)	22	32	17	11	24
	13:00	온도(℃)	34.4	34.8	34.8	34.9	34
		습도(%)	48.3	50.7	51.6	47.3	60
		미세먼지(㎍/m^3)	20	28	22	19	29
	14:00	온도(℃)	35.5	34.7	33.5	36.1	33.2
		습도(%)	47.5	50.1	53.1	43.5	60
		미세먼지(㎍/m^3)	25	16	26	14	22
	15:00	온도(℃)	34.7	34.7	33.6	35.9	33.7
		습도(%)	48	49.4	54.2	46	58
		미세먼지(㎍/m^3)	29	32	28	14	15
미세 먼지 개선 효과 분석	분석날짜		2022-03-05	2022-03-05	2022-03-05	2022-03-05	2022-03-05
	시뮬레이션 시작		07:00	07:00	07:00	07:00	07:00
	시뮬레이션 종료		11:00	11:00	11:00	11:00	11:00
	07:00	온도(℃)	1	3.4	1	3.5	9.4
		습도(%)	33.5	35.3	33.5	54.2	41
		미세먼지(㎍/m^3)	242	145	203	167	175
	08:00	온도(℃)	1	2.9	1.5	3.6	9.1
		습도(%)	26.2	27.2	27.8	57	35
		미세먼지(㎍/m^3)	228	143	170	188	204
	09:00	온도(℃)	0.4	2.9	2.5	3.9	9.3
		습도(%)	21	23.8	24.1	50.7	34
		미세먼지(㎍/m^3)	168	143	115	178	175
	10:00	온도(℃)	1.4	3.7	3.3	4.7	9.5
		습도(%)	19.5	21	27.8	22.8	31
		미세먼지(㎍/m^3)	113	135	84	245	156
	11:00	온도(℃)	2.4	5.1	3.7	5.7	10.5
		습도(%)	20.6	20.4	24.5	27.7	24
		미세먼지(㎍/m^3)	94	117	78	162	132
기상 관측자료			관악구(411,251)	둔산동(525,172)	인천연수(512)	완산(864)	양산(257)
에어코리아 측정자료			관악구(111,251)	둔산동(525,172)	연수구(823,704) /고잔(823,671)	노송동(335,115)	삼호동(238,362)

표 3. 녹지구조 변경 방법 도시열섬현상 저감 효과

구분		효과	도로 및 보도폭이 넓은 주거 · 상업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지	도로 및 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지	도로 및 보도폭이 넓은 공업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지
녹지 구조 변경 (℃)	교목 열수 증가	최소	0.04	-	-	0.11	-
		최대	−0.09	-	-	−0.12	-
		평균	−0.01	-	-	−0.00	-
	다층구조	최소	0.05	0.06	0.17	0.12	-
		최대	−0.03	−0.01	−0.08	−0.18	-
		평균	0.00	0.00	0.01	−0.00	-
	수종 갱신 (녹지용적이 큰 활엽수)	최소	0.02	0.01	0.11	-	0.00
		최대	−0.14	−0.07	−0.10	-	−0.02
		평균	−0.02	−0.00	−0.02	-	−0.00
	수종 갱신 (침엽수)	최소	-	-	-	0.22	0.01
		최대	-	-	-	−0.06	−0.00
		평균	-	-	-	0.00	−0.00
	중앙분리녹지	최소	−0.00	0.02	0.07	0.17	0.00
		최대	−0.15	−0.09	−0.31	−0.40	−0.02
		평균	−0.04	−0.01	−0.04	−0.04	−0.00

교목 열수 증가, 녹지용적 큰 활엽수로 수종 갱신, 중앙분리녹지는 풍속 감소로 기온이 증가하는 지역이 있으나, 대부분 감소했다. 침엽수로 수종을 갱신한 경우 일부 풍속 증가로 기온 저감에 기여했을 가능성이 있었지만 대부분 증가하거나 효과가 작았다. 다층구조 조성은 대체로 기온이 증가했는데, 풍속 감소와 관련될 가능성이 있으나, 복사환경 자료가 없어 그 영향이 지배적이었다고 단정할 수 없었다. 평균기온이 감소한 도로 및 보도폭이 넓은 공업용지는 풍향과 평행인 도로에만 조성한 결과이다. 이는 도심 내 주요 바람길로 이용되는 도로의 녹화 시 바람 유동을 고려해야 함을 의미했다. 중앙분리녹지는 기존에 녹지가 존재했던 도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지, 도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지보다 신규로 조성한 타 대상지에서의 효과가 더 높았다.

녹지구조 변경에 따른 기온 변화는 대상지의 도로 방향과 풍향, 그리고 식재구조에 따른 풍속 변화의 영향을 함께 받는 것으로 판단된다. 교목 열수 증가, 다층구조 및 중앙분리녹지는 식재 밀도와 배치에 따라 바람의 유입과 통과를 변화시킬 수 있다. 도로가 지역풍의 흐름과 평행한 경우에는 도로축을 따라 공기의 이동이 상대적으로 원활할 수 있지만, 도로가 지역풍과 수직이거나 식재가 바람의 통로를 차단하는 경우에는 풍속이 낮아져 열이 정체될 가능성이 있다.

가로구조 변경 방법에 따른 열섬현상 저감 효과는 도로 및 보도폭이 넓은 주거 · 상업용지의 경우 도로 2차선을 중앙분리녹지로 조성한 경우 −0.31℃, 다층구조로 조성한 경우 −0.27℃ 순으로 효과가 있었다. 도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지는 중앙분리녹지로 조성한 경우 도로 6차선은 −0.48℃, 도로 4차선은 −0.37℃, 도로 2차선은 −0.23℃, 다층구조로 조성한 경우 도로 6차선은 −0.35℃, 도로 4차선은 −0.24℃, 도로 2차선은 −0.15℃의 효과가 있었다. 도로 및 보도폭이 넓은 공업용지는 도로 2차선을 중앙분리녹지로 조성한 경우 −0.58℃, 다층구조로 조성한 경우 −0.52℃, 도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지는 도로 2차선을 중앙분리녹지로 조성한 경우 −0.07℃, 다층구조로 조성한 경우 −0.02℃의 효과가 있었다(표 4 참조).

다층구조 조성의 경우 보도를 중심으로, 중앙분리녹지 조성의 경우 중앙분리녹지를 중심으로 인근 지역까지 열섬현상 저감 효과가 있었다. 도로 2차선을 감소하는 방법을 비교했을 때 모든 대상지에서 보도폭을 넓혀 다층구조를 식재하는 것보다 중앙분리녹지로 조성하는 것이 효과가 더 높았다. 또한 도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지를 통해 많은 차선수를 녹지로 변경할수록 열섬현상 저감 효과가 큰 것을 확인하였다.

대상지 유형에 따른 녹지구조 변경 효과를 살펴보면 기존 녹지량이 적은 지역에서 효과가 컸다. 토지이용이 주거 · 상업용지인 세 대상지보다 도로 및 보도폭이 넓은 공업용지에서 저감 효과가 더 컸으며, 그 외에 토지이용에 따른 유의성은 크게 나타나지 않았다(그림 2 참조). 토지이용과 직접적인 관계를 규정하긴 어려우나, 도로 및 가로구조와 관련되어 적용 가능한 녹지 방법이 달라진다는 점에서 간접적인 영향을 가진다.

표 4. 가로구조 변경 방법 도시열섬현상 저감 효과

구분		효과	도로 및 보도폭이 넓은 주거 · 상업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지	도로 및 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지	도로 및 보도폭이 넓은 공업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지
가로 구조 변경 (℃)	도로 2차선 감소 및 다층구조 조성	최소	−0.02	0.03	-	0.18	0.01
		최대	−0.27	−0.15	-	−0.52	−0.02
		평균	−0.08	−0.02	-	−0.06	−0.00
	도로 4차선 감소 및 다층구조 조성	최소	-	0.01	-	-	-
		최대	-	−0.24	-	-	-
		평균	-	−0.03	-	-	-
	도로 6차선 감소 및 다층구조 조성	최소	-	0.00	-	-	-
		최대	-	−0.35	-	-	-
		평균	-	−0.05	-	-	-
	도로 2차선 감소 및 중앙분리녹지 조성	최소	−0.02	0.02	-	0.18	0.00
		최대	−0.31	−0.23	-	−0.58	−0.07
		평균	−0.08	−0.03	-	−0.07	−0.01
	도로 4차선 감소 및 중앙분리녹지 조성	최소	-	0.01	-	-	-
		최대	-	−0.37	-	-	-
		평균	-	−0.05	-	-	-
	도로 6차선 감소 및 중앙분리녹지 조성	최소	-	−0.01	-	-	-
		최대	-	−0.48	-	-	-
		평균	-	−0.07	-	-	-

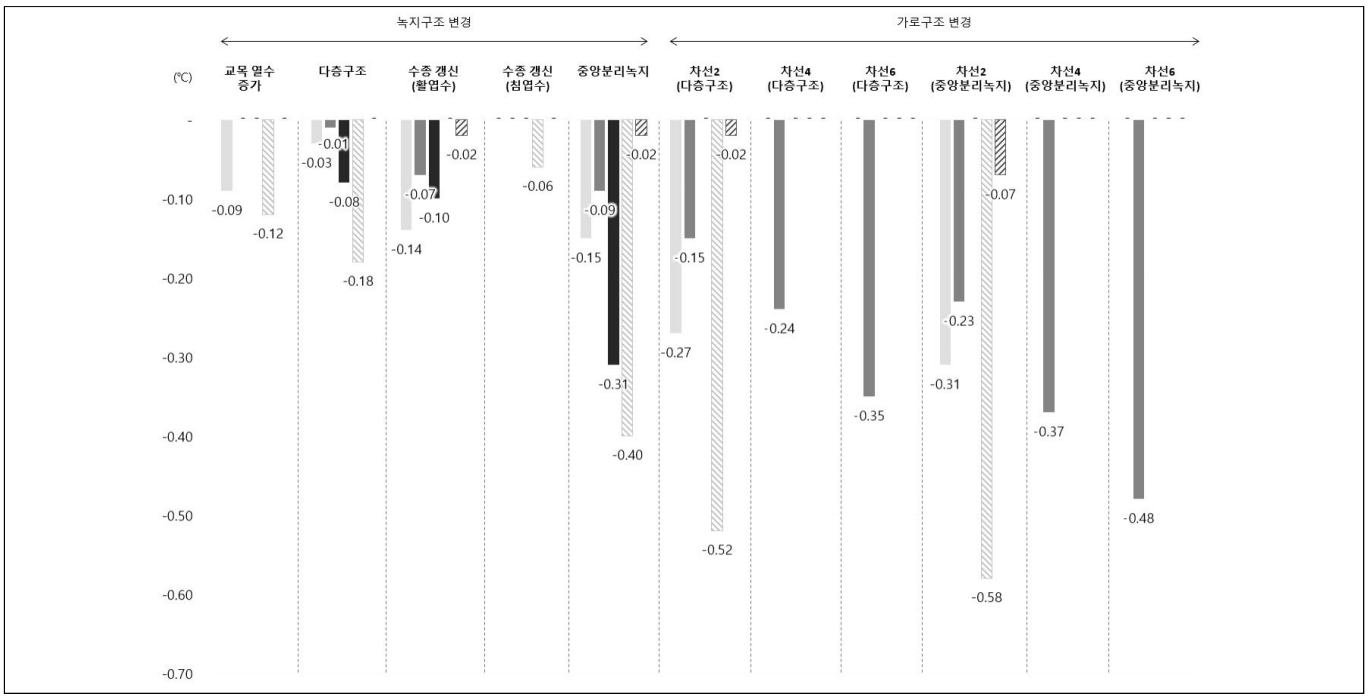


그림 2. 식재구조 변경 방법 도시열섬현상 저감 효과(최댓값)

범례: 도로 및 보도폭이 넓은 주거·상업용지, 도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거·상업용지, 도로 및 보도폭이 좁은 주거·상업용지, 도로 및 보도폭이 넓은 공업용지, 도로 및 보도폭이 좁은 공업용지

3.1.2 미세먼지 개선 효과

도로 및 보도폭이 넓은 주거 · 상업용지의 경우 다층구조 −2.10㎍/m^3, 중앙분리녹지 −1.80㎍/m^3, 교목 열수 증가 −1.43㎍/m^3, 활엽수로 수종 갱신 −0.46㎍/m^3 순으로 효과가 있었다. 도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지는 중앙분리녹지 −1.15㎍/m^3, 다층구조 −0.68㎍/m^3, 활엽수로 수종 갱신 −0.18㎍/m^3, 도로 및 보도폭이 좁은 주거 · 상업용지는 다층구조 −2.52㎍/m^3, 중앙분리녹지 −2.21㎍/m^3, 활엽수로 수종 갱신 −0.02㎍/m^3, 도로 및 보

도폭이 넓은 공업용지는 중앙분리녹지 −1.69㎍/m³, 침엽수로 수종 갱신 −1.51㎍/m³, 다층구조 −0.67㎍/m³, 교목 열수 증가 −0.65㎍/m³, 도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지는 중앙분리녹지 −1.52㎍/m³, 침엽수로 수종 갱신 −1.10㎍/m³, 활엽수로 수종 갱신 −0.01㎍/m³의 효과가 있었다(표 5 참조).

교목 열수 증가 및 다층구조 조성, 중앙분리녹지 조성의 경우 풍속 감소로 미세먼지가 증가하는 지역이 있었으나, 대부분 감소했다. 녹지용적이 큰 활엽수(낙엽수)로 수종 갱신한 경우 일부 미세먼지가 감소했으나 대부분 증가하였고, 침엽수로 수종 갱신한 경우 일부 미세먼지가 증가했으나 대부분 감소했고, 이는 겨울철 미세먼지 개선을 위해 상록수가 효과적이라는 선행 연구 결과와 동일하였다.

가로구조 변경 방법에 따른 미세먼지 개선 효과 최댓값은 도로 및 보도폭이 넓은 주거·상업용지의 경우 도로 2차선을 중앙분리녹지로 조성한 경우 −3.57㎍/m³, 다층구조로 조성한 경우 −2.61㎍/m³ 순으로 효과가 있었다. 도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거·상업용지는 중앙분리녹지로 조성한 경우 도로 6차선은 −7.74㎍/m³, 도로 4차선은 −5.68㎍/m³, 도로 2차선은 −3.56㎍/m³, 다층구조로 조성한 경우 도로 6차선은 −5.20㎍/m³, 도로 4차선은 −3.41㎍/m³, 도로 2차선은 −1.67㎍/m³의 효과가 있었다(표 6 참조).

다층구조 조성의 경우 보도를 중심으로, 중앙분리녹지 조성의 경우 중앙분리녹지를 중심으로 인근 지역까지 미세먼지 개선 효과가 있었다. 도로 2차선을 감소하는 방법을 비교했을 때 모든 대상지에서 보도폭을 넓혀 다층구조를 식재하는 것보다 중앙분리녹지로 조성하는 것이 효과가 더 높았다. 또한 도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거·상업용지를 통해 많은 차선수를 녹지로 변경할수록 미세먼지 개선 효과가 큰 것을 확인하였다.

대상지 유형에 따른 녹지구조 변경 효과를 살펴보면 기존 녹지량이 적은 지역에서 효과가 컸다. 가로구조 변경에서 토지이용이 주거·상업용지인 세 대상지보다 도로 및 보도폭이 넓은 공업용지에서 개선 효과가 더 컸으며, 그 외에 토지이용에 따른 유의성은 크게 나타나지 않았다(그림 3 참조). 토지이용과 직접적인 관계를 규정하긴 어려우나, 도로 및 가로구조와 관련되어 적용 가능한 녹지 방법이 달라진다는 점에서 간접적인 영향을 가진다.

3.2 가로녹화 개선 복합요소 효과 평가

3.2.1 복합요소 평가 식재방법

녹지구조 변경 안 중 효과가 가장 높았던 중앙분리녹지 조성을 토대로 어떤 요소를 복합했을 때 효과를 최대화할 수 있을지 분석하고자 복합요소 효과 평가를 진행하였다. 모든 녹지구조 변경이 가능한 도로 및 보도폭이 넓은 주거·상업용지를 대상으로 하였다. 복합요소 식재방법은 중앙분리녹지 조성 + 교목 열수 증가, 중앙분리녹지 조성

표 5. 녹지구조 변경 방법 미세먼지 개선 효과

구분		효과	도로 및 보도폭이 넓은 주거·상업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거·상업용지	도로 및 보도폭이 좁은 주거·상업용지	도로 및 보도폭이 넓은 공업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지
녹지 구조 변경 (㎍/m³)	교목 열수 증가	최소	0.04	-	-	0.01	-
		최대	−1.43	-	-	−0.65	-
		평균	−0.22	-	-	0.04	-
	다층구조	최소	0.02	0.01	0.04	0.01	-
		최대	−2.10	−0.68	−2.52	−0.67	-
		평균	−0.44	−0.05	−0.19	−0.01	-
	수종 갱신 (녹지용적 큰 활엽수)	최소	1.31	0.25	1.51	-	1.32
		최대	−0.46	−0.18	−0.02	-	−0.01
		평균	0.18	−0.01	0.06	-	0.02
	수종 갱신 (침엽수)	최소	-	-	-	0.01	0.01
		최대	-	-	-	−1.51	−1.10
		평균	-	-	-	−0.09	−0.05
	중앙분리녹지	최소	0.03	0.06	0.04	0.07	0.03
		최대	−1.80	−1.15	−2.21	−1.69	−1.52
		평균	−0.37	−0.07	−0.17	−0.11	−0.08

표 6. 가로구조 변경 방법 미세먼지 개선 효과

구분		효과	도로 및 보도폭이 넓은 주거·상업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거·상업용지	도로 및 보도폭이 좁은 주거·상업용지	도로 및 보도폭이 넓은 공업용지	도로가 넓고 보도폭이 좁은 공업용지
가로 구조 변경 ($\mu g/m^3$)	도로 2차선 감소 및 다층구조 조성	최소	0.03	0.03	-	0.08	0.15
		최대	−2.61	−1.67	-	−2.07	−3.00
		평균	−0.67	−0.14	-	−0.20	−0.35
	도로 4차선 감소 및 다층구조 조성	최소	-	0.05	-	-	-
		최대	-	−3.41	-	-	-
		평균	-	−0.29	-	-	-
	도로 6차선 감소 및 다층구조 조성	최소	-	0.06	-	-	-
		최대	-	−5.20	-	-	-
		평균	-	−0.45	-	-	-
	도로 2차선 감소 및 중앙분리녹지 조성	최소	0.04	0.06	-	0.11	0.11
		최대	−3.57	−3.56	-	−3.18	−4.51
		평균	−0.73	−0.25	-	−0.23	−0.36
	도로 4차선 감소 및 중앙분리녹지 조성	최소	-	0.06	-	-	-
		최대	-	−5.68	-	-	-
		평균	-	−0.42	-	-	-
	도로 6차선 감소 및 중앙분리녹지 조성	최소	-	0.08	-	-	-
		최대	-	−7.74	-	-	-
		평균	-	−0.61	-	-	-

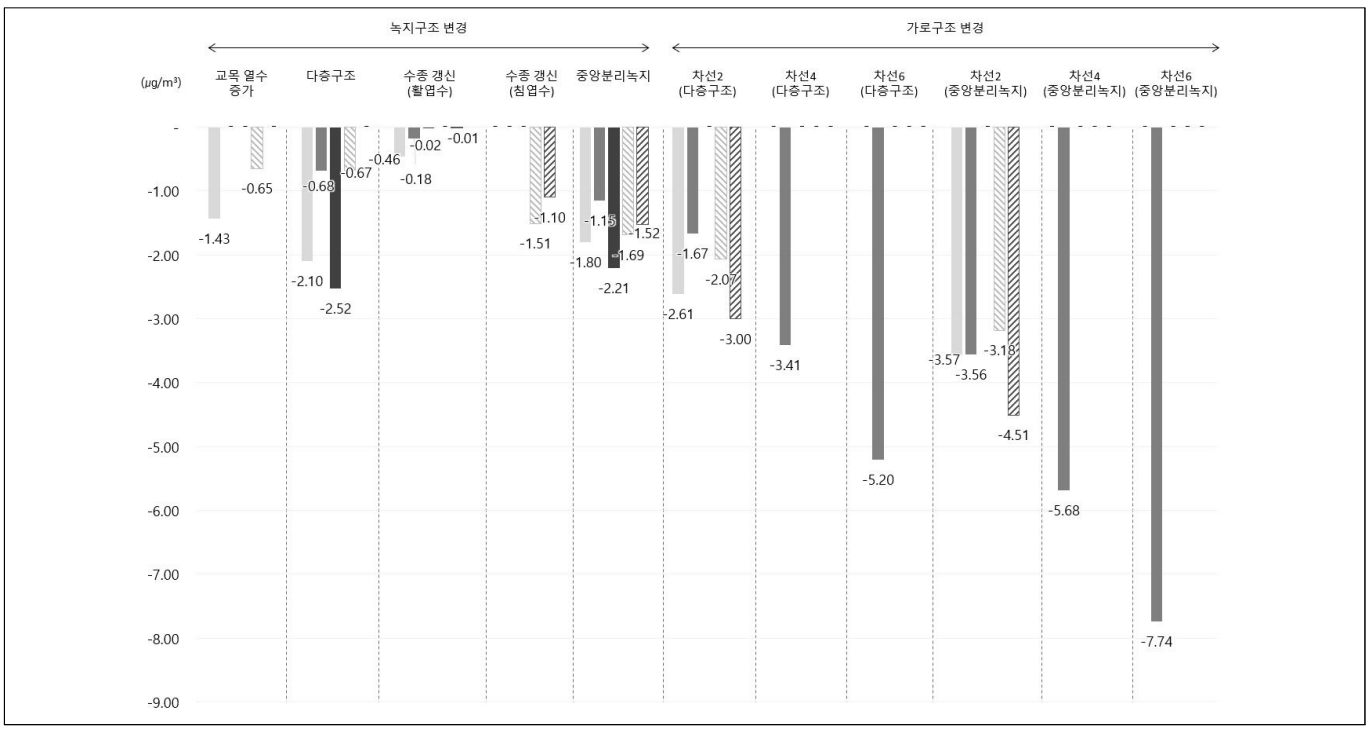


그림 3. 식재구조 변경 방법 미세먼지 개선 효과(최댓값)

범례: ▒ 도로 및 보도폭이 넓은 주거·상업용지, ▒ 도로가 넓고 보도폭이 좁은 주거·상업용지, ■ 도로 및 보도폭이 좁은 주거·상업용지, ▨ 도로 및 보도폭이 넓은 공업용지, ▨ 도로 및 보도폭이 좁은 공업용지

+ 다층구조 조성, 중앙분리녹지 조성 + 수종 갱신으로 두 가지 요소를 복합한 경우, 중앙분리녹지 조성 + 교목 열수 증가 + 다층구조 조성, 중앙분리녹지 조성 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신, 중앙분리녹지 조성 + 다층구조 조성 + 수종 갱신으로 세 가지 요소를 복합한 경우, 중앙분리녹지 조성 + 교목 열수 증가 + 다층구조 조성 + 수종 갱신로 4가지 요소를 모두 복합한 경우로 총 7개로 계획하였다.

3.2.2 도시열섬현상 저감 효과

복합요소의 열섬현상 저감 효과를 중앙분리녹지만 조성했을 경우와 비교하여 효과를 분석하였다. 두 가지 요소를 복합했을 때, 교목 열수 증가를 복합한 경우 +0.02에서 −0.13(−0.02)℃의 열섬현상 저감 효과가 있었고, 다층구조 조성의 경우 +0.04에서 −0.03(−0.00)℃, 수종 갱신은 +0.01에서 −0.15(−0.02)℃이었다. 세 가지 요소를 복합한 경우 교목 열수 증가와 다층구조 복합의 경우 +0.02에서 −0.15(−0.02)℃의 저감 효과가 있었고, 교목 열수 증가와 수종 갱신은 −0.00에서 −0.29(−0.05)℃, 다층구조와 수종 갱신의 경우 +0.01에서 −0.15(−0.02)℃이었다. 모든 요소를 복합한 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조 + 수종 갱신의 경우 −0.01에서 −0.30(−0.05)℃ 효과가 있었다. 두 가지 요소를 복합한 경우 복합한 요소의 단일요소 계획과 유사한 온도저감 효과가 있었다(표 7 참조).

도시열섬현상 저감 효과를 종합해보면 두 가지 요소를 복합한 경우 중앙분리녹지 + 수종 갱신, 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가, 중앙분리녹지 + 다층구조 순으로 효과가 높았으며, 수종 갱신과 교목 열수 증가의 경우 효과가 비슷하였다. 세 가지 요소를 복합한 경우 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신이 효과가 가장 높았으며, 그 다음으로 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조와 중앙분리녹지 + 다층구조 + 수종 갱신은 비슷하였다. 네 가지 요소를 모두 복합한 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조 + 수종 갱신은 효과가 가장 높았으나, 세 가지 요소를 복합한 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신과 효과차이가 크지 않아 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신이 더 효과적인 것으로 판단되었다.

녹지 단면구조를 조사한 지역에서의 열섬현상 저감 효과를 나타낸 그림을 보면(그림 4 참조) 업무시설 서측에 비해 동측의 효과가 높은데 설정 풍향과 공간구조에 따른 풍속 분포와 관련될 가능성이 있다. 업무시설 동측으로 두 가지 요소를 복합한 경우 수종 갱신, 교목 열수 증가, 다층구조 순으로 세 가지 요소를 복합한 경우 교목 열수 증가 + 수종 갱신, 다층구조 + 수종 갱신, 교목 열수 증가 + 다층구조 순으로 효과가 높았다. 서측은 두 가지 요소를 복합한 경우 교목 열수 증가, 수종 갱신, 다층구조, 세 가지를 복합했을 땐 교목 열수 증가 + 수종 갱신, 교목 열수 증가 + 다층구조, 다층구조 + 수종 갱신 순이었다. 이는 단일요소 계획과 유사한 경향이었다.

복합 식재요소의 수가 증가할수록 효과가 반드시 선형적으로 증가한다고 보기는 어렵다. 식재요소는 그늘과 증발산을 통해 열환경을 개선할 수 있는 반면, 식재 밀도가 높아지면 바람의 통과를 방해할 수 있다. 따라서 본 연구의 복합요소 결과는 대상지의 도로 방향과 풍환경을 고려한 상대적 비교 결과로 해석하였다.

3.2.3 미세먼지 개선 효과

중앙분리녹지만 조성했을 경우와 비교하여 복합요소의 미세먼지 개선 효과를 분석하였다. 두 가지 요소를 복합했을 때, 교목 열수 증가를 복합한 경우 +0.03에서 −1.54(−0.16)㎍/m^{3}의 미세먼지 개선 효과가 있었고, 다층구조 조성의 경우 +0.02에서 −2.37(−0.32)㎍/m^3, 수종 갱신의 경우 +1.38에서 −.050(+0.12)㎍/m^{3}이었다. 세 가지 요소를 복합한 경우 교목 열수 증가와 다층구조 복합의 경우 +0.04에서 −2.66(−0.46)㎍/m^{3}의 개선 효과가 있었고, 교목 열수 증가와 수종 갱신은 +1.26에서 −1.20(+0.05)㎍/m^3, 다층구조와 수종 갱신의 경우 +0.68에서 −2.31(−0.22)㎍/m^{3}이었다. 모든 요소를 복합한 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조 + 수종 갱신의 경우 +0.54에서 −2.70

표 7. 복합요소 식재방법 도시열섬현상 효과 분석

구분	중앙분리 녹지 + 교목 열수 증가	중앙분리 녹지 + 다층구조	중앙분리 녹지 + 수종 갱신	중앙분리 녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조	중앙분리 녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신	중앙분리 녹지 + 다층구조 + 수종 갱신	중앙분리 녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조 + 수종 갱신
최소(℃)	0.02	0.04	0.01	0.02	−0.00	0.01	−0.01
평균(℃)	−0.02	−0.00	−0.02	−0.02	−0.05	−0.02	−0.05
최대(℃)	−0.13	−0.03	−0.15	−0.15	−0.29	−0.15	−0.30

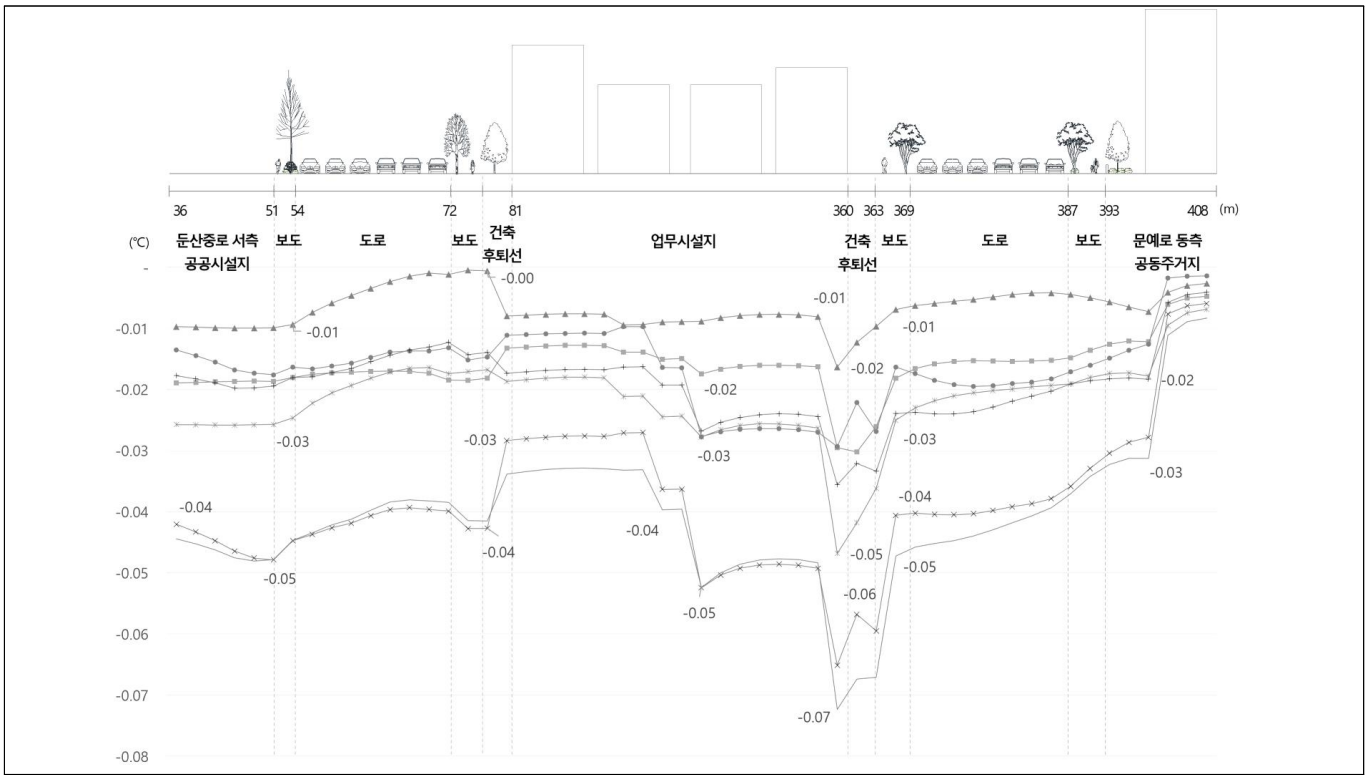


그림 4. 도복합요소 식재방법 주요 지점 도시열섬현상 효과

범례: 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가, 중앙분리녹지 + 다층구조, 중앙분리녹지 + 수종 갱신, 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조, 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신, 중앙분리녹지 + 다층구조 + 수종 갱신, 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조 + 수종 갱신

(−0.29)㎍/m^{3}의 효과가 있었다. 두 가지 요소를 복합한 경우 복합한 요소의 단일요소 계획과 유사한 개선 효과가 있었다(표 8 참조).

미세먼지 개선 효과를 종합해보면 두 가지 요소를 복합한 경우 중앙분리녹지 + 다층구조, 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가, 중앙분리녹지 + 수종 갱신 순으로 효과가 높았다. 세 가지 요소를 복합한 경우 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조, 중앙분리녹지 + 다층구조 + 수종 갱신, 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신 순이었다. 모든 요소를 복합한 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조 + 수종 갱신의 경우 최대효과가 가장 높았으나 효과 증가 폭이 크지 않았고, 평균효과 및 최소효과는 세 가지 요소를 복합한 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조보다 낮았다.

녹지 단면구조를 조사한 지역에서의 미세먼지 개선 효과를 보면(그림 5 참조) 업무시설 서측에 비해 동측의 효과가 높은데 설정 풍향과 공간구조에 따른 풍속 분포와 관련될 가능성이 있다. 두 가지 요소를 복합한 경우 업무시설 동측으로 교목 열수 증가, 다층구조, 수종 갱신 순으로, 서측으로 다층구조, 교목 열수 증가, 수종 갱신 순으로 효과가 높았다. 세 가지 요소를 복합한 경우에는 둔산중로 동측으로는 교목열수 증가 + 다층구조, 다층구조 + 수종 갱신, 교목 열수 증가 + 수종 갱신, 서측으로는 다층구조 + 수종 갱신, 교목 열수 증가 + 다층구조, 교목 열수 증가 + 수종 갱신 순이었다. 단일요소 효과와 유사한 경향이었다.

표 8. 복합요소 식재방법 주요 지점 미세먼지 효과 분석

구분	중앙분리 녹지 + 교목 열수 증가	중앙분리 녹지 + 다층구조	중앙분리 녹지 + 수종 갱신	중앙분리 녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조	중앙분리 녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신	중앙분리 녹지 + 다층구조 + 수종 갱신	중앙분리 녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조 + 수종 갱신
최소(㎍/m^3)	0.03	0.02	1.38	0.04	1.26	0.68	0.54
평균(㎍/m^3)	−0.16	−0.32	0.12	−0.46	0.05	−0.22	−0.29
최대(㎍/m^3)	−1.54	−2.37	−0.50	−2.66	−1.20	−2.31	−2.70

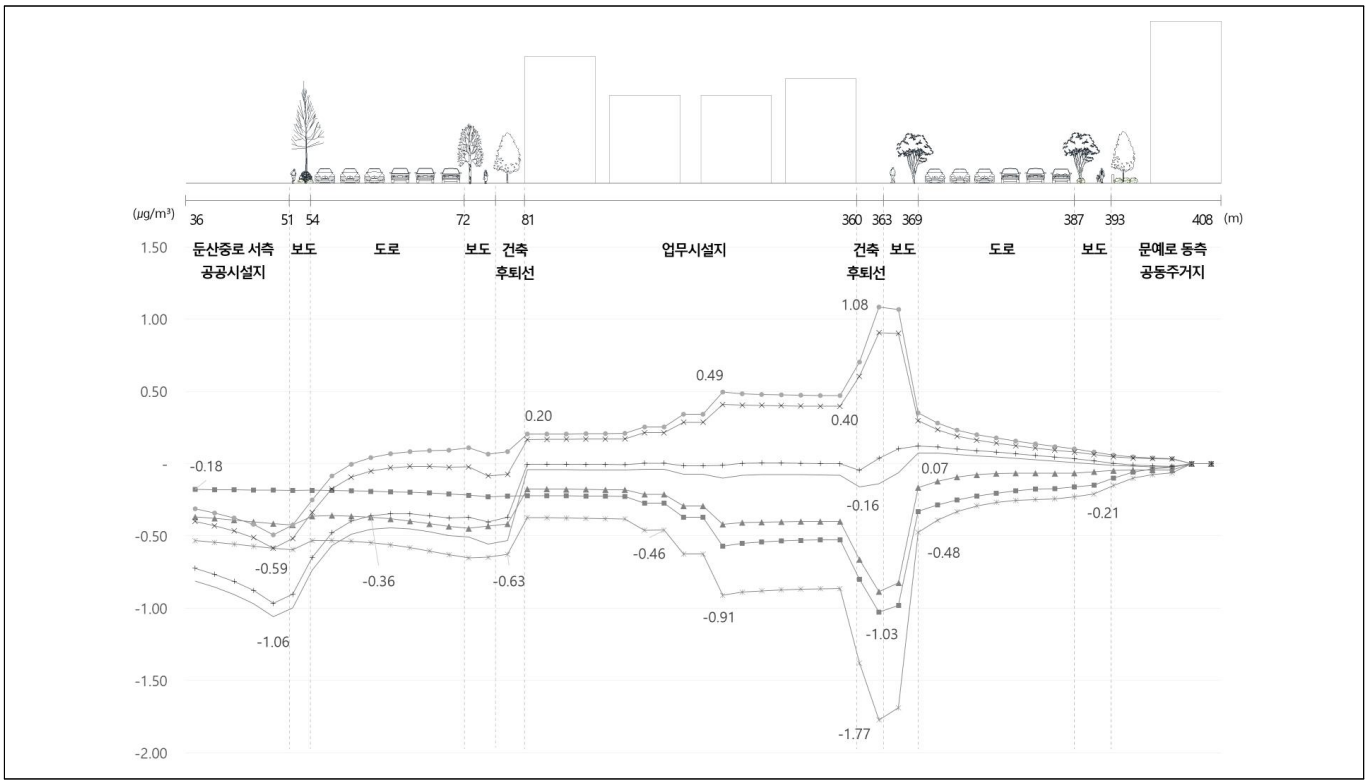


그림 5. 복합요소 식재방법 주요 지점 미세먼지 효과

범례: 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가, 중앙분리녹지 + 다층구조, 중앙분리녹지 + 수종 갱신, 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조, 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신, 중앙분리녹지 + 다층구조 + 수종 갱신, 중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조 + 수종 갱신

3.3 종합 및 고찰

단일요소 녹지구조 변경 효과의 경우 열섬현상 저감에는 열섬 발생지의 피복이 중요하기 때문에 중앙분리녹지, 녹지용적이 큰 활엽수로 수종 갱신, 교목 열수 증가, 다층구조 순으로 효과가 높았다. 미세먼지 개선은 발생원에서의 확산 차단이 중요하기 때문에 중앙분리녹지 또는 다층구조, 침엽수로의 수종 갱신, 교목 열수 증가, 활엽수로 수종 갱신 순으로 효과가 높았다. 공통적으로 중앙분리녹지 조성의 효과가 높았다.

복합요소의 효과는 같은 개수의 요소를 조합할 경우 단일 요소에서 효과가 높은 방법을 복합하는 게 효과가 좋았다. 열섬현상 저감에 있어 두 가지 요소 복합에는 '중앙분리녹지 + 수종갱신(활엽수)', 세 가지 요소 복합은 '중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신(활엽수)'가 효과적이었다. 미세먼지 개선에 있어 두 가지 요소 복합에는 '중앙분리녹지 + 다층구조', 세 가지 요소 복합은 '중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조'가 효과적이었다. 더 많은 요소를 복합할수록 열섬현상 및 미세먼지 저감 효과가 좋지만, 세 가지 요소 복합에서 네 가지 요소 복합으로 추가했을 때 효과 증가폭이 미미하여 세 가지 요소를 복합하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단되었다.

본 연구의 적용 모델은 녹지유형의 우열을 모든 대상지에 일반화하는 기준이라기보다, 유사한 도로 및 보도 폭과 공간구조를 가진 대상지에서 우선 검토할 수 있는 계획 방향으로 이해해야 한다. 실제 설계에서는 주풍향, 도로축, 건물 배치, 식재 높이와 밀도, 보행공간의 일사 노출을 함께 검토할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 가로녹지를 대상으로 녹지구조 및 가로구조 변경에 따른 열섬현상 저감, 미세먼지 개선 효과를 검증하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 단일 요소 중 녹지구조 변경 방법의 효과 평가 결과 열섬현상 저감은 중앙분리녹지 조성 〉 녹지용적이 큰 활엽수로 수종 갱신 〉 교목 열수 증가 〉 다층구조 〉 침엽수로 수종 갱신 순으로 효과가 있었다. 다층구조 조성의 경우 풍속 감소로 온도가 증가하는 경향이 있어, 도심 내 주요 바람길로 이용되는 도로의 녹화 시 바람 유동을 고려해야 했다. 미세먼지 개선에는 중앙분리녹지 조성 또는 다층구조 조성 〉 침엽수로 수종 갱신 〉 교목 열수 증가 순으로 효과가 좋았다. 열섬현상과 미세먼지 현상 공통적으로 중앙분

리녹지 조성의 효과가 높았다. 가로구조 변경 방법의 경우 열섬현상 저감 효과와 미세먼지 개선 효과가 동일한 경향이었다. 같은 면적을 녹지로 변경할 때 보도폭을 넓혀 다층구조를 식재하는 것보다 중앙분리녹지로 조성하는 것이 효과가 더 높았으며, 더 많은 차선수를 녹지로 변경할수록 효과가 좋았다.

둘째, 식재 구조 변경 방법을 복합했을 때, 열섬현상 저감의 경우 두 가지를 복합하면 '중앙분리녹지 + 수종 갱신(활엽수)', 세 가지를 복합하면 '중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 수종 갱신(활엽수)'이 효과적이었다. 미세먼지 개선의 경우 두 가지를 복합하면 '중앙분리녹지 + 다층구조', 세 가지는 '중앙분리녹지 + 교목 열수 증가 + 다층구조'가 효과적이었다. 이는 단일 요소의 효과 경향과 유사하다.

연구 결과를 토대로 도시열섬현상 저감을 위한 가로녹지 모델과 미세먼지 개선을 위한 가로녹지 모델에 적용할 수 있다. 열섬현상 저감을 위한 가로녹지 조성 모델은 다음과 같다. 보도폭 3m 미만인 경우 녹지용적이 큰 활엽수 식재, 보도폭 3m 이상 5m 미만인 경우 '녹지용적이 큰 활엽수 + 교목-관목 띠녹지 조성', 보도폭 5m 이상인 경우 '녹지용적이 큰 활엽수 + 교목 열수 증가'가 효과적이다. 도로 차선수 기준으로 왕복 5차선 이상일 경우 중앙분리녹지 조성, '보도폭 5m 이상 + 도로 5차선 이상'의 경우 '중앙분리녹지 + 녹지용적이 큰 낙엽활엽수 + 교목 열수 증가'의 모델을 제시할 수 있다. 미세먼지 개선을 위한 가로녹지 조성 모델은 다음과 같다. 보도폭 3m 미만인 경우 상록수 식재, 보도폭 3m 이상 5m 미만인 경우 '상록수 + 교목-관목 띠녹지 조성', 보도폭 5m 이상인 경우 '상록수 + (교목 - 아교목 - 관목의 다층구조 조성)'이 효과적이다. 도로 차선수 기준으로 왕복 5차선 이상일 경우 중앙분리녹지 조성, '보도폭 5m 이상 + 도로 5차선 이상'의 경우 '상록수 + 중앙분리녹지 + 다층구조'의 모델을 제시할 수 있다.

본 연구는 도시환경 개선을 위한 방안으로 가로녹지를 대상으로 녹화 방안에 따른 효과를 분석하고 그 기능을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 특히 실제 보도 폭(3m 미만, 3-5m, 5m 이상)과 도로 차선수(왕복 5차선 이상 등)의 가로 구조의 물리적 조건에 따른 구체적 녹화 모델을 제시한 점에 의미가 있다.

본 연구의 한계는 시뮬레이션 결과를 기온, 풍속 및 미세먼지 중심으로 분석하고 복사환경 변수와 실측자료를 함께 검증하지 못한 점이다. 향후 단파복사, 장파복사, 평균복사온도(MRT)를 동일 시각과 동일 지점에서 추출하고 현장 관측자료와 비교하여, 식재에 따른 풍환경 변화와 복사환경 변화가 기온 저감에 미치는 상대적 영향을 검증할 필요가 있다. 마지막으로 국내 도시 유형별 가로 환경의 사례를 보완하여 실질적인 유형별 녹화 방안을 제시할 필요가 있으며, 가로녹화 사업 및 모니터링을 통한 도심 미기후의 개선 효과를 검증하는 후속 연구가 병행되어야 한다.

References

1. 김강민, 성선용(2024) 대구광역시 수성구 도시바람길숲 조성사업의 열섬저감효과 실효성 분석. 휴양및경관연구 18(4): 29-37.
2. 김은범(2014) 열섬현상을 고려한 가로녹지의 적정 수종 선정 연구. 단국대학교 대학원 석사학위논문.
3. 김재경, 김원희, 김은일(2020) 캠퍼스 내 녹지공간의 온도분석 및 온도영향요인 규명 실험. 한국산학기술학회논문지 21(2): 511-520.
4. 박주현, 엄정희, 손정민(2025) 보행 공간의 열환경 향상을 위한 가로녹지 조성체계 연구: 보도폭과 도로폭에 따른 가변 기준을 중심으로. 한국조경학회지 53(6): 110-129.
5. 백준범(2021) 폭염과 미세먼지 저감을 위한 도시 바람길숲조성방안. 경북대학교 대학원 석사학위논문.
6. 부산발전연구원(2006) 부산광역시 가로녹지 증진방안.
7. 산림청(2019) 제2차 도시림 기본계획.
8. 산림청(2020) 도시 바람길숲의 조성원리와 제도화를 위한 연구.
9. 서보용, 정응호(2017) 도시 열 환경 개선을 위한 공간 지형적 특성에 따른 바람길유동 비교분석. 한국지리정보학회지 20(2): 75-88.
10. 손정민, 엄정희, 성욱제, 백준범, 김주은, 오정학(2020) 도시 여건 분석을 통한 바람길숲 조성방향 제시. 한국지리정보학회지 23(4): 101-119.
11. 엄정희, 오정학, 손정민, 김권, 백준범, 이채연(2019) 바람길숲의 유형별 분석방안. 한국지리정보학회지 22(4): 12-23.
12. 오금동, 이준호, 윤성환(2019) ENVI-met을 이용한 중국 베이징 아파트 하절기미기후 특성 분석. 대한건축학회 35(8): 169-176.
13. 이경재, 한봉호, 조우, 최송현, 오충현, 권전오, 이수동, 김정호, 김종엽, 홍석환, 최인태, 김지석, 최진우, 기경석,

곽정인, 김선희, 강현경, 장종수(2011) 환경생태학. 광일문화사.
14. 이수미, 권일, 김용진(2019) 도시 환경이 온열질환 발생에 미치는 영향에 관한 연구. 한국콘텐츠학회논문지 19(12): 84-92.
15. 정희은(2014) 서울 도심 가로수 및 가로녹지의 기온 저감 효과와 기능 향상 연구. 서울시립대학교 대학원 석사 학위논문.
16. 최현정(2016) 미기상도시모델(ENVI-met.)을 이용한 도시 내 열환경안정도 연구. 한국건축친환경설비학회 10(6): 416-427.
17. 한봉호, 곽정인, 박석철, 허지연(2014) 도시녹지 네트워크 강화를 위한 가로녹지 조성계획 연구. 한국환경생태학회지 28(2): 128-141.
18. 한봉호, 박석철, 박수영(2023) 도시환경 개선을 위한 바람길숲 조성 계획기법 개발 연구. 한국조경학회지 51(2): 28-41.
19. 허창회(2019) 서울시 미세먼지 저감 정책의 효과: 차량 배출량 관점. 기상기술정책 29: 69-80.
20. 홍석환, 이경재, 한봉호(2005) 시가화지역토지이용 및 녹지구조에 따른 온도변화 연구. 한국환경생태학회지 19(4): 375-384.