한국조경학회지 54(5): 219~236, 2026. 10.
J. KILA Vol. 54, No. 5, pp. 219~236, October, 2026
pISSN 1225-1755 eISSN 2288-9566
https://doi.org/10.9715/KILA.2026.54.5.219

공공주택지구 공원녹지의 탄소흡수 및 잠재적 배출 회피효과 분석

Analysis of Carbon Sequestration and Potential Avoided Emissions Effects for Parks and Green Spaces in Public Housing Districts

박세희*, 한봉호, 김영민**, 박찬****
*한국토지주택공사 과장, **서울시립대학교 조경학과 교수

Park, Sehui*, Han, Bongho, Kim, Youngmin**, Park, Chan****
*Assistant Manager, Korea Land & Housing Corporation
**Professor, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul

Received: July 22, 2026
Revised: August 31, 2026
Accepted: September 28, 2026
3인익명 심사필

Corresponding author :
Chan Park
Professor, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul 02504, Korea
Tel.: +82-2-6490-5520
E-mail: chaneparkmomo7@uos.ac.kr

국문초록

본 연구는 일반적으로 수목의 탄소흡수 효과에 중점을 두어 평가되던 기존 접근에서 벗어나, 공원녹지가 지니는 다원적 탄소저감 효과를 분석하고 이를 바탕으로 탄소중립형 그린인프라 조성방안을 제안하는 데 목적이 있다. 공원녹지의 탄소저감 효과는 '수목에 의한 탄소흡수 기작'과 함께 '잠재적 탄소배출 회피 기작'인 친환경 통행 유도, 미기후 조절, 우수유출 저감 효과로 구분하였으며, 수도권에 조성된 다양한 규모의 공공주택지구 4개소(시흥장현, 화성봉담2, 고양향동, 군포송정)를 대상지로 하여 저감 효과를 추정하였다. 분석 결과는 다음과 같다. 수목을 통한 연간 탄소흡수량은 시흥장현지구는 239tCO_2, 화성봉담2지구 134tCO_2, 고양향동지구 185tCO_2, 군포송정지구 51tCO_2로 나타났으며, 단위제곱미터당 평균 탄소흡수량 원단위는 연간 0.50kgCO_2/m^2으로 도출되었다. 특히 전체 수목 탄소흡수량 중 관목이 차지하는 비중은 22.30%로, 한정된 부지에서 다층 식재구조를 활용할 경우 탄소저감 효과를 극대화할 수 있음을 시사한다. 한편, 잠재적 탄소배출 회피의 세 기작을 통한 연간 잠재적 탄소회피 배출량은 기준 시나리오에서 시흥장현, 화성봉담2, 고양향동, 군포송정지구 순으로 친환경 통행 유도 기작이 408, 154, 29, 32tCO_2, 미기후 조절 기작이 295, 157, 68, 17tCO_2, 우수유출 저감 기작이 79, 29, 20, 10tCO_2으로 추정되었으며, 공원녹지 단위면적당 연간 회피 배출량은 친환경 통행 유도 기작이 0.66, 0.49, 0.15, 0.30kgCO_2/m^2, 미기후 조절 기작이 0.48, 0.50, 0.35, 0.16kgCO_2/m^2, 우수유출 저감 기작이 0.13, 0.09, 0.10, 0.10kgCO_2/m^2으로 분석되었다. 또한, 잠재적 탄소배출 회피에 따른 저감량은 모형 등을 통해 산출한 추정치이므로 민감도 분석을 통해 산정 결과의 범위를 함께 제시하였다. 이러한 결과는 기존에 공원녹지의 탄소저감 효과로 간과되었던 잠재적 탄소배출 회피 기작이 유의미한 수준의 효과가 있음을 보여준다. 또한, 공원녹지의 다원적 탄소저감 기능을 극대화하기 위해 자연기반해법(nature-based solutions)을 적용한 통합적 계획 전략의 도입이 필요하다. 이를 위해 단순히 공원녹지의 양적 확대에만 집중할 것이 아니라, 생태적 기능과 기후적 효과를 동시에 고려한 공간 설계, 투수성 확보, 공간 간 연결성 향상, 고밀도 개발지역 내 녹지 배치 등 자연기반해법을 체계적으로 적용하고, 실효성 확보를 위해 다원적 탄소저감 효과의 제도적 반영을 검토할 필요가 있다.

주제어: 탄소중립도시, 그린인프라스트럭처, 다원적 효과, 탄소저감 메커니즘, 기후완화

ABSTRACT

This study aims to quantify the multifaceted carbon reduction effects of urban parks and green spaces, including indirect effects often overlooked in conventional assessments of carbon sequestration by trees, and to suggest improvements to the carbon-neutral green infrastructure. The carbon reduction effects of urban parks and green spaces are classified into "carbon sequestration mechanisms by trees" and "potential avoided emissions mechanisms," which include pro-environmental behavior, microclimate regulation, and stormwater runoff reduction. A quantitative analysis was conducted in four public housing districts of various scales in the Seoul metropolitan area, South Korea, namely, Siheung Janghyun, Hwaseong Bongdam-2, Goyang Hyangdong, and Gunpo Songjeong. The findings of the study were as follows. Annual carbon sequestration for Siheung Janghyun, Hwaseong Bongdam-2, Goyang Hyangdong, and Gunpo Songjeong was 239, 134, 185,

and 51 tCO_2, respectively. The average annual carbon sequestration per square meter was calculated to be 0.50 $kgCO_2$, with 22.30% of the carbon sequestered being attributed to shrubs, highlighting the potential contribution of multi-layer planting in reducing CO_2 emissions in land-limited areas. The annual potential carbon emissions avoided through the three potential carbon avoidance mechanisms were estimated, under the baseline scenario, at 408, 154, 29, and 32 tCO_2 for the pro-environmental travel mechanism; 295, 157, 68, and 17 tCO_2 for the microclimate regulation mechanism; and 79, 29, 20, and 10 tCO_2 for the stormwater runoff reduction mechanism, respectively, for the Siheung Janghyun, Hwaseong Bongdam-2, Goyang Hyangdong, and Gunpo Songjeong districts. The annual carbon emission avoidance per unit area of park and green spaces was estimated at 0.66, 0.49, 0.15, and 0.30 $kgCO_2/m^2$ for the eco-friendly travel inducement mechanism; 0.48, 0.50, 0.35, and 0.16 $kgCO_2/m^2$ for the microclimate regulation mechanism; and 0.13, 0.09, 0.10, and 0.10 $kgCO_2/m^2$ for the stormwater runoff reduction mechanism, respectively, in the same four districts. Furthermore, because the estimated carbon emission avoidance was derived using regression models, model-based estimates, and coefficients from previous studies, sensitivity analysis was conducted to present the ranges of the estimates. These results confirm that the potential avoided emissions mechanisms, which were not previously considered in the carbon reduction effects of parks and green spaces, have appreciable effects. To maximize the multifaceted carbon reduction effects of urban parks and green spaces, it is necessary to introduce integrated planning strategies applying nature-based solutions. Therefore, rather than focusing solely on the quantitative expansion of parks and green spaces, Nature-based Solutions should be systematically applied, including spatial design for eco-climatic effects, permeability enhancement, spatial connectivity improvement, and strategic green space allocation in high-density areas. Furthermore, to ensure practical effectiveness, the multifaceted carbon reduction effects should be considered for potential integration into institutional frameworks.

Keywords: Carbon-neutral City, Green Infrastructure, Multi-functional Effects, Carbon Reduction Mechanisms, Climate Mitigation

1. 서론

2025년의 전 지구 평균 지표근처 온도는 1850-1900년 평균보다 1.44 ± 0.13도 높았으며 이는 176년간의 관측 기록 중 두 번째로 따뜻한 해로 보고되었다(WMO, 2026). 기후변화는 점차 심화되고 있으며 인간이 직접 경험하는 피해도 증가하고 있다. 기후변화를 유발하는 주요 원인은 급속한 도시화인 것으로 나타났으며(Allen et al., 2018), 동시에 기후변화로 인한 피해 역시 주로 도시에서 발생하고 있다. 따라서 도시를 계획하는 초기 단계부터 기후변화 대응을 고려해야 하며, 공원녹지와 같은 그린인프라는 건강과 웰빙을 위한 공공 편익을 창출함과 동시에 탄소 흡수 및 저장 기능을 수행할 수 있어 기후위기 대응의 핵심적 해결 수단으로 주목받고 있다.

자연 생태계가 기후위기의 효과적인 대응수단으로 인식되면서, '자연기반해법(nature-based solutions)' 개념이 활발히 논의되고 제안되기 시작하였다. 세계자연보전연맹은 '인간에게 웰빙과 생물다양성 혜택을 모두 제공하면서 동시에 사회적 문제를 효과적이고 적응적으로 해결하고자 자연 또는 변형된 생태계를 보호, 복원 및 지속가능하게 관리하기 위한 조치'로 정의한 결의안을 채택하였고 유럽연합집행위원회는 '비용효율적이면서 동시에 환경적, 사회적, 경제적 이점을 제공하고 복원력을 구축하는 데 도움이 되는 자연에서 영감을 얻거나 지원을 받는 해법'으로 정의하였다. 종합해볼 때, 자연기반해법은 '자연을 활용하여 다양한 환경 및 사회문제를 해결하는 접근과 방법'으로 이해할 수 있다. Pan et al.(2023)은 탄소중립 실현을 위하여 자연기반해법의 직접적·간접적 기여를 모두 통합한 도시 중심의 기후행동계획이 필요하다고 주장하였으며, 인간 행동의 변화 유도나 자원의 절약 등 일반적으로 간과되는 자연기반해법의 간접적 효과에 집중하여 탄소저감 잠재력을 평가하였다. 특히 그린인프라는 여러 경로를 통해 탄소 저감에 기여하는데 예를 들면, 수목 등을 통한 탄소 흡수, 친환경 행동 촉진, 미기후 조절 기작, 우수유출 저감 등을 통해 직간접적으로 탄소 배출을 줄이는 효과를 가질 수 있다고 주장하였다.

도시 내 탄소 저감을 위한 다양한 선행연구가 수행되었는데, 이들 연구는 도시계획요소와 탄소 간의 관계를 연구하고 주로 운송, 에너지 주요 배출원을 중심으로 한 원단위 탄소 배출량을 추정하여 시나리오별 탄소저감 효과를 모의하는 방식으로 진행되었다(김홍배와 김재구, 2010; Zubelzu et al., 2015; 이우민 등, 2016; 박원신, 2019). 또

한, 저탄소 계획요소를 도출하거나(강상준과 좌승희, 2009; 유윤진 등, 2013) 도시계획요소와 탄소배출량 간의 관계를 분석(Southworth et al., 2008; 김인현, 2011; Burgalassi and Luzzati, 2015; 조항훈과 김홍순, 2023)한 연구는 여러 계획요소가 탄소배출에 유의한 영향을 미친다고 보고하였다. 아울러, 토지이용계획 등 도시공간 구조가 탄소배출을 좌우하고(Shi et al., 2020; Hong et al., 2022; Jo and Kim, 2025) 고밀도 도시에서 자연기반해법 배치계획을 통해 탄소배출 감소를 최적화(Wang et al., 2024)하는 연구는 제한된 부지 내 종합적 도시계획의 중요성을 시사한다. 대부분의 연구에서 도시 탄소 저감을 위하여 공원녹지가 중요한 요소임을 명시하였으나 도시 인프라의 일부로서 바라본 연구는 상대적으로 부족하였다. 공원녹지의 탄소저감 효과에 초점을 맞춰 정량적 분석을 시도한 연구도 다수 존재하지만(조현길 등, 1995; 조현길과 조동하, 1998; McPherson, 1998; 이관규, 2003; 박은진과 좌승희, 2009; 조현길과 안태원, 2012; 강명수 등, 2013; 조현길 등, 2013; Abino et al., 2014; 서경원, 2015; 곽달, 2019), 대부분의 연구가 수목 및 토양의 탄소 흡수 및 저장효과 분석에 한정되어 있으며 공원녹지의 다원적 탄소저감 효과의 종합적 분석은 미비한 실정이다.

즉, 공원녹지는 탄소 저감을 위한 상당한 잠재력을 가지고 있으나 수목 및 토양을 통한 직접적 탄소 흡수 효과 외의 다양한 간접적 기여 요인은 충분히 고려되지 않고 있다. 특히, 정부의 주택공급 물량 확대 등으로 신규 도시 조성이 활발히 논의되며 도시 패러다임이 탄소중립도시 구현으로 전환되고 있는 현재, 도시계획의 초기 단계에서부터 공원녹지의 종합적 탄소저감 효과를 정량화하고 이를 기반으로 한 전략적 조성방안 마련이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 우리나라의 대표적인 공공 주도의 도시 조성방식인 공공주택지구를 대상으로 하여 공원녹지의 다원적 탄소저감 효과를 '탄소 흡수 기작'과 '잠재적 탄소배출 회피 기작'으로 분류하여 정량화하고 이를 통해 도시의 공간구조 및 세부 조성계획에 반영할 수 있는 탄소중립형 그린인프라 조성방안을 도출하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구 대상지

기상, 대중교통 등 지역별 여건 차이를 최소화하기 위하여 수도권 공공주택지구 4개소를 대상지로 선정하였다. 규모, 토지이용계획 등 주요 특성이 차이나는 지구인 대규모 1개소(시흥장현지구), 중규모 2개소(화성봉담2지구, 고양향동지구), 소규모 1개소(군포송정지구)를 대상으로 공원녹지의 탄소저감 효과를 산정하고 분석하였다.

공원녹지의 개념은 관련법규, 적용상황, 연구자 관점 등에 따라 다양하게 정의된다. 본 연구에서는 공원녹지의 범위를 '도시공원 및 녹지 등에 관한 법률' 제2조 제3호의 '도시공원' 및 제5호의 '녹지'로 한정하여 설정하였다. 공원녹지의 범위를 설정할 때는 공공주택지구의 법적 공원녹지 면적에는 하천, 공공공지, 폭 10m 이상의 보행자전용도로 등이 포함되어 넓은 범위로 인정되지만, 타 개발사업에서는 도시계획시설로 결정된 '도시공원 또는 녹지'만 법적 공원녹지 면적에 포함된다는 점을 고려하였다. 또한, 보행자전용도로 및 공공공지, 광장 등은 일반적으로 포장면적 비율이 높아 자연기반해법의 탄소저감 효과를 산정하기 적합하지 않다고 판단하였다(그림 1 참조).

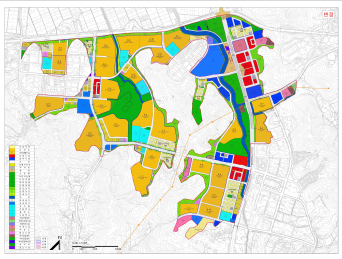
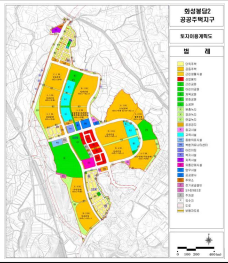
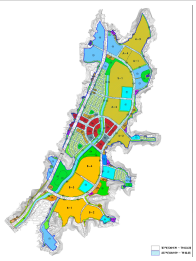
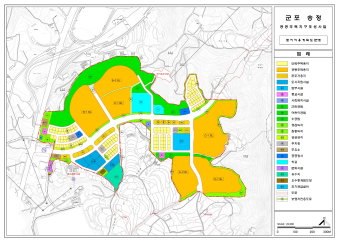
자구명	시흥장현지구	화성봉담2지구	고양향동지구	군포송정지구
토지이용 계획도				
계획인구	47,695인	28,716인	23,232인	9,993인
지구면적(m^2)	2,939,023.9	1,438,522.2	1,221,983.1	513,589.9
공원녹지면적(m^2)	614,465.6	311,440.9	194,840.2	105,985.5
지구규모	대규모	중규모	중규모	소규모

그림 1. 연구 대상지

2.2 탄소저감 효과 측정방법

공원녹지의 탄소저감 효과는 직접적 효과인 수목의 탄소흡수 효과와 간접적 효과인 잠재적 탄소배출 회피 효과로 구분하여 산정하였다. 각 지구 및 메커니즘 간 비교의 일관성을 확보하기 위하여 모든 탄소저감 효과는 이산화탄소 환산량(CO_2eq)으로 환산하여 통일된 단위로 표현하였다. 잠재적 탄소배출 회피 효과는 선행연구를 참고하여 친환경 통행 유도, 미기후 조절, 우수유출 저감의 세 기작을 통해(Pan et al., 2023) 공원녹지가 조성되지 않았을 경우(베이스라인) 대비 공원녹지를 통해 회피될 수 있는 배출량을 모델로 추정한 값으로, 실측된 감축량이 아니며 베이스라인 설정과 파라미터에 따라 범위를 갖는 추정치이다. 두 값은 산정방법과 불확실성 수준이 다르므로 본 연구에서는 이를 합산하거나 대소를 비교하지 않고 병렬로 제시하였다.

2.2.1 탄소 흡수

수목의 탄소 흡수효과는 수목의 생체량을 기반으로 분석하였다. 도시 조경수는 인위적 관리, 경합조건 등 생장환경이 자연산림과 달라, 산림수목의 상대생장식을 대용하면 오차가 발생할 수 있으므로(조현길과 조동하, 1998) 도시 조경수를 대상으로 직접수확법을 통해 탄소량을 계량화한 연구를 바탕으로 수목 탄소저감 효과를 측정하였는데, 본 연구에서는 이관규(2003)와 조현길(2020)의 계량모델을 정리하여 사용하였다. 각 지구의 도면 및 내역서 상의 수종 규격 표기 방식과 계량모델에서 요구하는 변수가 상이한 경우, 교목에 대하여 '근원직경(cm) = 흉고직경(cm) × 1.2'를 적용(국토교통부 조경설계 기준)하였고 관목의 경우 도면 및 내역서상에서 근원직경을 파악할 수 없으므로 2cm를 일괄 적용(송인주 등, 2010)하였다. 세부 계량모델이 부재한 수종은 낙엽수 및 상록수 대분류로 구분한 통합 계량모델을 적용하여 탄소저감 효과를 산정하였다(표 1 참조).

표 1. 탄소흡수 계량모델

구 분	수종	계량모델
낙엽수	느티나무	lnY= −2.8177 + 1.7715 lnDBH
	단풍나무	Y = 0.9608 + 0.1535 DBH
	산수유	lnY = −3.1622 + 1.8844 lnDAG
	살구나무	lnY = −2.8278 + 1.8824 lnDBH
	왕벚나무	lnY = −3.0939 + 1.7702 lnDBH
	은행나무	lnY = −3.6471 + 1.8287 lnDBH
	이팝나무	lnY = −2.2695 + 1.7553 lnDBH
	배롱나무	lnY = −3.2160 + 1.4833 lnDAG
	낙엽교목 전체	lnY = −2.6119 + 1.5686 lnDBH
	산철쭉	lnYs = 1.9456 + 1.6715 lnDAG
	조팝나무	lnYs = 2.2364 + 1.6422 lnDAG
	화살나무	lnYs = 1.9944 + 1.7354 lnDAG
	낙엽관목 전체	lnYs = 2.7694 + 0.9729 lnDAG × (12/44)
상록수	소나무	lnY = −2.6720 + 1.5251 lnDBH
	잣나무	lnY = −4.4881 + 2.2262 lnDBH
	전나무	lnY = −3.1386 + 1.6158 lnDBH
	주목	lnY = −4.7726 + 1.8554 lnDAG
	상록교목 전체	lnY = −3.7807 + 1.9347 lnDBH
	사철나무	lnYs = 2.1099 + 1.7444 lnDAG
	회양목	lnYs = 2.1997 + 1.6536 lnDAG
	상록관목 전체	lnYs = 2.8203 + 1.2262 lnDAG × (12/44)

DAG: 근원직경(cm), DBH: 흉고직경(cm), Y: 교목 탄소흡수량(kgC/연), Ys: 관목 탄소흡수량(gC/연)

2.2.2 잠재적 탄소배출 회피

2.2.2.1 친환경 통행 유도

개인이 배출하는 온실가스는 교통 부문에서 가장 많으므로(UNEP, 2020) 친환경 통행을 늘리는 것은 탄소중립을 위해 매우 중요한 요소이다. 공원녹지의 면적, 접근성 및 보행 연결성이 높을수록 여가 목적의 보행 및 자전거 통행량 자체가 증가하여(Sugiyama et al., 2013; Zuniga-Teran et al., 2017) 친환경 통행률이 증가할 수 있으며, 공원녹지는 다른 장소로 이동하는 통과공간으로 기능하여 여가통행뿐만 아니라 일상적인 목적 통행을 유발할 수 있어(최이명, 2013; 최지영, 2024), 보행성 지수 및 자전거 이용률 증가에도 영향을 미친다(Owen et al., 2004; Wendel-Vos et al., 2004; 이경환과 안건혁, 2008; Pinna and Saiu, 2021; Adamu et al., 2023). 공공주택지구 내 공원녹지가 친환경 통행을 촉진하는 데 미치는 영향을 측정하고자 독립변수를 '공원녹지 연결성지표', 종속변수를 '친환경 통행률(친환경 교통수단 분담률)'로 설정하여 회귀분석 모형을 구축하였다.

선행연구에 따르면 걷기 및 자전거 통행의 빈도는 공원녹지의 면적과 연결정도 모두에 영향을 받으므로 '공원녹지 연결성지표'의 값은 '공원녹지 면적(m^2) / 평균 연결거리(m)'로 설정하였다. '평균 연결거리'는 네트워크 내 모든 노드 쌍의 연결거리의 평균을 말하며, 도시계획시설번호에 따라 각 도시공원 및 녹지 표면상에 노드를 설정하고 노드와 노드를 링크로 연결하였을 때 연결되는 모든 링크의 길이의 평균이다. 연결거리가 짧을수록 노드는 가까운 거리로 연결되어 있고 연결성이 높다고 할 수 있으므로 평균 연결거리는 연결성지표에 반비례하는 값이다(그림 2 참조).

GIS 분석을 위한 자료는 택지정보시스템에서 제공하는 토지이용계획도 SHP파일을 사용하였으며, 종속변수인 '친환경 통행률(친환경 교통수단 분담률)'은 국가교통DB센터의 2021년 기준 개인통행실태조사자료를 기반으로 산출하였다. 친환경 통행은 비동력·무탄소 교통수단인 도보 및 자전거를 이용하는 통행으로 정의하였으며 해당 공공주택지구에 해당하는 법정동의 통행 발생량을 기준으로 분담률을 계산하고, 친환경통행 분담률은 [(도보 통행수 + 자전거 통행수) / 전체 통행수] × 100%로 설정하였다. 연구대상지인 4개 지구를 제외한 수도권 내 공공주택지구 10개소를 대상으로 표 2와 같이 친환경 통행률과 연결성지표를 산정하였다.

두 지표 간 관계를 파악하기 위해 SPSS Statistics를 활용하여 선형회귀분석을 실시하였으며, 그 결과는 표 3과 같다. 회귀모형은 유의수준 0.05에서 유의하였고(p = .035), 설명력(R^2)은 0.447로 나타났다. 다만 표본이 10개 지구에 한정되어 대중교통 접근성, 가로망 밀도, 토지이용 혼합도 등 통행수단 선택에 영향을 미치는 것으로 알려진 요인(Ewing and Cervero, 2010)을 통제변수로 투입하지 못하였으므로, 본 모형은 공원녹지 연결성과 친환경 통행률 간의 연관성을 보여주는 탐색적 모형이며 인과관계를 확정하는 것은 아니다. 모형에는 개인 선호 등 관측되지 않은 요인이 오차항(ε)으로 남아 있으나, 회귀계수(β = 0.668, p = .035)로 판단할 때 공공주택지구 내에서 공원

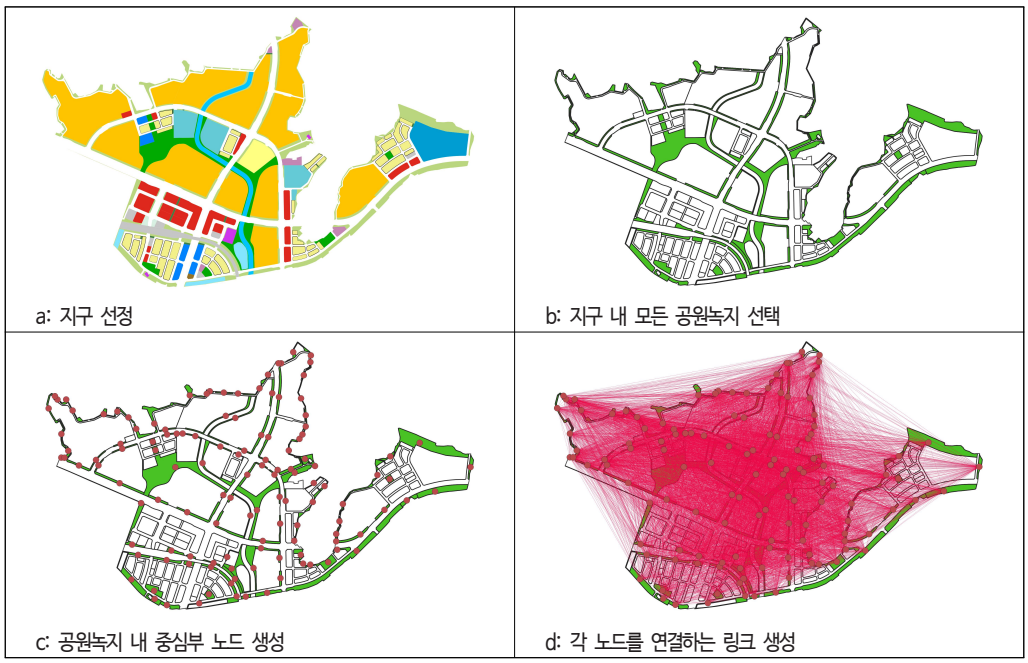


그림 2. 연결성지표 측정방법

표 2. 자구별 친환경 통행률 및 연결성지표 자료

지구	친환경 통행률(%)	연결성지표 (공원녹지 면적 / 평균 연결거리)	공원녹지면적(m^2)	평균 연결거리(m)
A	32.00	215.59	200,578.60	930.38
B	28.13	300.82	208,102.90	691.78
C	37.70	250.83	115,649.90	461.07
D	36.14	418.80	341,409.50	815.22
E	44.02	364.59	351,310.10	963.58
F	40.51	503.02	329,940.60	655.92
G	38.84	300.70	225,355.20	749.43
H	45.45	532.66	685,498.80	1,286.94
I	39.01	504.63	533,163.90	1,056.55
J	45.23	514.35	735,201.40	1,429.38

표 3. 회귀분석 결과

구분	비표준화계수		표준화계수	*t*	유의확률
	B	표준오차	베타		
상수	26.450	5.022	-	5.267	〈 .001
B	.031	.012	.668	2.541	.035
R^2	.447				

녹지 연결성지표가 높은 지구일수록 도보·자전거 통행 분담률이 높은 경향을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 이 회귀식을 이용하여 4개 대상지구의 연결성지표에 상응하는 친환경 통행률을 추정하였으며, 이 추정치는 연결성지표와 연관된 통행률 차이를 나타내는 것으로 해석하였다.

$$y = 0.0314x + 26.450 + \varepsilon,\ R^2 = 0.447 \quad \text{(식 1)}$$

y: 친환경 통행률(%), x: 공원녹지 연결성지표

공원녹지 연결성에 기인하는 친환경 통행률 증가분은, 지구 간 도시구조·교통여건 차이가 결과에 혼입되는 것을 최소화하기 위하여 표 2의 비교 표본(공공주택지구 10개소) 내부의 친환경 통행률 기준값과의 차이로 산출하였다. 비교 표본 중 친환경 통행률 최솟값(28.13%)을 기준 시나리오로 설정하였다. 이는 "동일한 공공주택지구 유형 중 친환경 통행률이 가장 낮은 지구 대비 추가로 유도된 친환경 통행"을 의미한다. 비교 표본 평균(38.70%)을 기준으로 하는 방식은 보수적 시나리오로 민감도 분석에서 함께 제시하였다. 친환경 통행 대체율은 연결성 향상에 따라 증가한 도보·자전거 통행 중 기존 자동차 등 탄소배출 통행을 실제로 대체한 비율을 의미한다. 본 연구에서 활용한 통행자료만으로는 친환경 통행 증가분의 발생 원천 및 기존 통행수단으로부터의 전환 여부를 직접 식별할 수 없으므로, 해당 대체율을 실증적으로 확정하기에는 한계가 있다. 이에 따라 기준 시나리오에서는 증가한 친환경 통행이 모두 탄소배출 통행을 대체하는 것으로 가정하되(100%), 보수적 시나리오에서는 친환경 통행 대체와 관련된 연구(Neves and Brand, 2019; Mun Ng et al., 2024)를 고려하여 대체율을 50%로 낮추어 민감도 분석을 실시하였다. 이를 통해 연결성 지표와 친환경 통행 간의 통계적 관계가 실제 탄소배출 회피로 이어지는 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 결과에 반영하였다. 특히 통행 대체율 100%의 결과는 실제 탄소저감량이라기보다 친환경 통행 증가분이 전량 탄소배출 통행을 대체한다는 가정하에서의 최대 잠재적 회피 배출량으로 해석하였다. 탄소배출 감축 원단위는 도보권 및 자전거생활권 반경(오병록, 2014)의 평균 값인 1.35km를 통행할 때 발생하는 배출량이 저감된다고 보았다. 탄소발생 교통수단을 사용하여 1km를 통행할 때 발생하는 탄소량은 수단통행 분담률(경기도교통정보센터, n.d.) 중 자전거 및 기타수단을 제외하고 탄소를 발생시키는 통행의 분담률과 탄소배출 원단위(국제에너지기구, 2023)를 활용하여 1.35km를 통행하는 데 배출되는 탄소배출량은 157.89gCO_2/인으로 도출되었다. 개인통행실

태조사자료는 통행 발생을 전제하에 개인이 하루에 행하는 모든 통행에 대한 정보 기록으로 통행빈도에 대한 데이터는 없으므로 일 1회 통행을 가정하여 연간 탄소배출 원단위를 산출(57.63kgCO_2/연)하고 식 2와 같이 친환경 통행량 증가에 따른 탄소배출 저감량을 도출하였다.

친환경 통행 유도에 따른 연간 잠재적 회피 배출량(kgCO2/연)
= 계획인구수(인) × 친환경 통행률 증가분[지구별 친환경 통행률(%) − 기준 친환경 통행률(%)] × 탄소배출 감축 원단위(57.63kgCO2/연) × 친환경 통행 대체율(%) (식 2)

2.2.2.2 미기후 조절

현대의 도시는 인구가 상대적으로 밀집된 한정된 공간에 집중되므로 도시열섬 현상이 일어난다. 도시 공원녹지는 식생을 통해 그늘을 제공하고 도시 구조의 열 특성을 개선하며 증발산을 통해 열 냉각을 증가시키는 미기후 조절의 역할을 한다. 공원녹지를 통한 미기후 조절효과를 도출하기 위해 미국 Stanford 대학에서 개발한 열환경 모델인 InVEST Urban Cooling Model(이하 InVEST UCM)을 활용하였으며 냉방전력 사용 절감이 예상되는 6−9월을 기준으로 기온 저감효과를 도출하였다. InVEST UCM은 토지피복 자료와 그늘, 증발산량, 반사율 등의 매개변수를 사용하여 열 완화 지수(Heat Mitigation Index)를 계산한 후, 이를 통해 기온에 따른 평균 냉각용량과 공원녹지의 냉각 효과를 추정할 수 있다(Zawadzka et al., 2021). 다른 모델에 비해 비교적 간단한 자료만으로 구동이 가능하고 토지피복지도 및 기상관련 자료 등 가상조건을 설정하여 도시의 열 완화 능력 변화를 파악할 수 있어 추후 타 도시에 가이드라인으로 적용 시에도 분석이 용이하므로 적합한 모델이라고 판단하였다.

모델에 필요한 값과 구동을 위해 필요한 변수는 다음과 같이 설정하였다.

'Land Use/Land Cover'는 2023년 Vector 형식의 세분류 토지피복지도를 Raster 형식으로 변환하여 사용하였다. 'Evapotranspiration'은 Hargreaves-Samani 식을 활용하여 계산, Ra는 Hargreaves(1994)의 수식을 활용하였다. 'Area of Interest'는 공공주택지구 구역의 Vector 형식의 데이터를 사용하였다. 'Biophysical Table'은 정진욱(2024)의 연구에서 토지피복도 세분류 기준으로 정리한 값을 적용하였다. 'Reference of Temperature'은 교외지역 기온을 의미하므로 종관기상관측장비(AWS) 자료 중 경기도 내 최저기온을 보이는 지역의 평균기온을 사용하였다. 'UHI Effect'는 열섬효과의 크기를 나타내는 값으로 2021년 6−9월의 경기도 내 종관기상관측장비(AWS) 평균기온 자료(기상청, n.d.) 중 최고기온를 가진 AWS 지점의 기온과 최저기온을 나타낸 AWS 지점의 기온차를 계산하여 적용하였다. 'Maximum cooling distance'는 녹지가 가지는 냉각 효과의 최대 거리로 100m으로 적용하였으며(김병찬 등, 2020), 'Air Blending Distance'는 모델에서 제공하는 기본값 500m를 사용하였다.

모델을 구동했을 때 도출되는 결과값 T_air는 예상되는 일 평균기온 Raster 파일이며 공원녹지를 통한 기온 저감효과는 다음과 같이 도출하였다. 먼저, 공원녹지로부터 100m를 기온저감 효과 영향범위로 버퍼를 설정하여 버퍼 내 평균기온을 공원녹지 영향범위 내 평균기온 T(A), 100m 버퍼 외 최고기온을 냉각 영향이 최소화되었을 때의 기온값 T(B)로 두었으며 두 값의 차이[T(B)−T(A)]를 공원녹지를 통한 기온 저감효과로 보았다. 도시온도 1℃ 저감에 따라 전기에너지는 13.1% 저감할 수 있으므로(이수진 등, 2019) 이를 기준 시나리오로 하여 냉방전력의 저감효과를 도출하였으며 국외 15개 도시의 평균 저감률 4.6%(Santamouris et al., 2015)을 보수적 시나리오로 설정하여 민감도 분석을 실시하였다. 탄소저감량은 2021년 기준 가구당 월평균 전력사용량, 기온저감량, 전기에너지 저감률, 전력부문 이산화탄소 배출계수(0.4781kgCO_2), 공원녹지의 기온저감 영향을 받는 공동주택 계획세대수의 곱을 통해 측정하였다.

공원녹지의 냉각효과에 영향을 받는 세대수는 편의상 표 4와 같이 버퍼 내외의 면적 및 세대수를 산출하고 최대 냉각거리 버퍼(100m)에 포함되는 공동주택 면적 비율과 해당지구 공동주택 전체 세대수의 곱으로 산출하였다.

미기후 조절에 따른 연간 탄소저감량(kgCO_2/연)
= 가구당 월평균(6−9월) 전력사용량(kWh) × 기온 저감효과(℃) × 전기에너지 저감률(%) × 전력부문 이산화탄소 배출계수(0.4781kgCO_2) × 버퍼 내 공동주택 계획 세대수(호) (식 3)
가구당 월평균 전력 사용량(kWh): 6월 235, 7월 277, 8월 373, 9월 275(한국전력공사, n.d.)

2.2.2.3 우수유출 저감

급격한 도시의 확대와 팽창은 불투수면적을 증가시켜 지하수 침투 및 홍수 제어능력의 감소를 유발하는 등 물순

표 4. 버퍼 공동주택 세대수 산출

지구명	구분	공동주택 면적(m^2)	공동주택 세대수(호)
시흥장현	합계	948,441	18,340
	100m 버퍼 내	775,898	15,004
	100m 버퍼 외	172,543	3,336
화성봉담2	합계	563,033	11,169
	100m 버퍼 내	413,419	8,201
	100m 버퍼 외	149,614	2,968
고양향동	합계	375,310	8,659
	100m 버퍼 내	333,780	7,701
	100m 버퍼 외	41,530	958
군포송정	합계	191,948	3,843
	100m 버퍼 내	170,536	3,414
	100m 버퍼 외	21,412	429

환 건전성의 문제를 야기한다. 이러한 도시여건에서 공원녹지는 우수유출을 저감함으로써 이 유출량이 하수처리시설 또는 우수펌프장 등 에너지 소비시설을 거치는 경우 그 처리·이송 에너지에 상응하는 배출을 회피할 수 있다. 권태근(2020)은 잔디(식생지반), 투수블럭(투수포장), 점토블럭(반투수포장), 콘크리트포장(불투수포장)에 대하여 지하수 침투 측정실험을 통해 도출한 침투량 회귀식을 적용하여 공원녹지의 우수유출 저감량을 산정하였으며, 본 연구에서는 해당 회귀식을 우수유출 저감량을 산출하는 데 활용하였다. 권태근(2020)은 잔디, 투수블럭, 점토블럭, 콘크리트포장과 같이 각 포장유형별로 대표적인 포장재료 데이터를 통해 실험을 시행하였으나, 실제 현장에서는 이외에도 다양한 포장재료로 피복되어 있으므로 투수유형에 따라 포장재료를 네 가지로 표 5와 같이 분류하였다.

본 연구에서는 공원녹지의 침투기능에 따른 우수유출 저감량을 산정하고, 이를 하수처리 과정에서 발생하는 탄소배출량과 연계하여 잠재적 탄소회피 배출량을 추정하였다. 하수처리장은 도시 물순환의 중심시설이면서 대표적인 에너지 다소비 시설(송민수 등, 2020)이므로 우수유출 저감량 값을 이산화탄소 단위로 환산하기 위하여 침투량 회귀식을 통하여 도출한 우수유출 저감량에 하수처리시설의 연간 온실가스 집약도 0.78kgCO_2(홍이슬과 박주영, 2023)를 곱하여 탄소저감량으로 변환하였다. 강수량 데이터는 경기도 기본통계의 2021년 기준 관측지점별 방재기상관측(AWS) 데이터를 사용하였으며 포장현황 데이터는 조경공사 준공도면을 활용하였다. 이때 우수유출량 중 하수처리시설로 유입되는 비율은 지역별 우·오수관거의 분류 및 합류 여부, 초기우수 처리 여부 등에 따라 달라질 수 있으며, 합류식 하수관로를 기준값으로 설정하고 민감도 분석에서 보수적 시나리오로 분류식 하수관로인 경우를 제시하였다.

우수유출 저감에 따른 연간 탄소회피 배출량(kgCO_2)
= 지구별 우수유출 저감량(m^3) × 하수처리시설의 온실가스 집약도(0.78kgCO_2/m^3) × 하수처리 유입률(%) (식 4)

표 5. 침투량 회귀식 및 포장재료 분류

구분	회귀식 및 유출계수	포장재료 분류
식생지반	y = 0.1648x + 1.3598	잔디, 종자파종, 흙 등
투수포장	y = 0.0862x + 1.1899	인조화강석블럭(투수), 투수아스콘, 마사토, 모래, 강돌, 호박돌, 잔디블럭, 야자매트, 해미석 등
반투수포장	y = 0.0111x + 0.2157	인조화강석블럭(불투수), 콘크리트조립블럭, 사고석, 이형판석, 화강석(잔디블럭)
불투수포장	-	콘크리트, 인조잔디, 고무칩, 우레탄, 경화토, 칼라아스콘, 석재판석, 시설물구체, 건축물, 계단, 목재데크, 디딤돌, 경계석, 벤토나이트방수 등

y: 침투량(mm), x: 강수량(mm)

3. 결과 및 논의

3.1 직간접 탄소 흡수 및 저감 측정결과

3.1.1 탄소 흡수

4개 공공주택지구의 준공도면 및 내역서를 통해 구득한 식재수목 데이터를 탄소 계량모델에 적용하여 공원녹지의 연간 탄소흡수량을 표 6과 같이 도출하였다. 지구규모에 따라 수목수량에 차이가 있으므로 대규모지구인 시흥장현지구가 239tCO_2, 중규모지구인 화성봉담2지구가 134tCO_2 및 고양향동지구가 185tCO_2, 소규모지구인 군포송정지구가 51tCO_2을 흡수하는 것으로 나타났다. 중규모지구 간 흡수효과를 비교할 때 화성봉담2지구가 고양향동지구보다 교목 수량이 많지만 고양향동지구가 규격이 큰 교목 이식목이 많으며 관목 수량이 많아 탄소저감 효과가 더 높은 것으로 나타났다. 또한, 4개 지구는 평균적으로 전체 탄소저감 효과의 약 22.30%를 관목이 흡수하는 것으로 나타났다. 따라서 수목을 통한 탄소 흡수효과 제고를 위해서는 가급적 대형목 식재 또는 대형 이식수목 등을 활용하고 한정된 부지에서 단위면적당 탄소흡수량을 높이기 위한 방식으로 교목과 관목, 초화류 등을 복합적으로 배치하는 다층식재기법을 적극 도입할 필요가 있다.

3.1.2 잠재적 탄소배출 회피

3.1.2.1 친환경 통행 유도

위에서 도출한 수식에 4개 지구의 공원녹지 연결성지표 값을 대입하여 각 지구의 친환경 통행률을 도출하였으며 이를 친환경 통행 유도에 따른 연간 탄소회피 배출량 수식에 대입하여 탄소배출을 수반하는 교통수단이 감소하면서 저감되는 탄소량을 추정 산출하였다(표 7 참조). 시흥장현의 공원녹지를 통한 친환경통행 증가율은 14.84%로 연간 408tCO_2의 탄소를 저감할 수 있고, 화성봉담2지구는 9.29%만큼 공원녹지를 통한 친환경 통행률이 증가하여 약 154tCO_2를 회피할 잠재력이 있는 것으로 추정된다. 고양향동지구는 2.20%의 친환경 통행률이 증가하여 이를 통해 약 29tCO_2를 회피할 수 있는 것으로 추정되며, 군포송정지구는 5.47%의 친환경 통행률이 증가하여 약 32tCO_2를

표 6. 지구별 수목 탄소흡수량

지구명	구분	수목수량(주)	탄소흡수량(kgCO_2)
시흥장현	교목	18,387	195,466
	관목	533,185	43,757
	합계	551,572	239,224
화성봉담2	교목	10,204	119,937
	관목	183,950	14,538
	합계	194,154	134,474
고양향동	교목	7,038	116,728
	관목	239,245	68,112
	합계	246,283	184,840
군포송정	교목	5,896	41,213
	관목	129,699	9,450
	합계	135,596	50,663

표 7. 친환경 통행 증가에 따른 탄소회피 배출량

지구명	친환경통행률(%)	친환경통행 증가율(%)	탄소회피 배출량(kgCO_2)
시흥장현	42.97	14.84	407,925.01
화성봉담2	37.42	9.29	153,791.88
고양향동	30.33	2.20	29,396.10
군포송정	33.60	5.47	31,525.60

저감할 수 있는 것으로 추정하였다. 따라서 공원녹지 연결성을 높여 탄소배출 회피 효과를 증대시키는 데 기여할 수 있다. Ngo et al.(2018)은 그린웨이로부터 300m 내에 거주하는 주민들은 교통수단으로 인한 온실가스 배출량을 21% 줄였음을 보고하였는데, 이는 공원녹지 면적이 넓고 잘 연결된 구조이며 그린인프라와 근거리에 거주하는 주민들이 많을 경우 달성 가능한 수치로 판단된다.

3.1.2.2 미기후 조절

각 지구별로 6-9월의 InVEST UCM을 구동한 결과는 그림 3과 같으며 미기후 조절에 따른 연간 탄소회피 배출량 수식에 각 값을 대입하여 도출한 결과값은 표 8과 같다. 미기후 조절을 통한 연간 탄소회피 배출량은 시흥장현지구가 295tCO$_2$, 화성봉담2지구가 157tCO$_2$, 고양향동지구가 68tCO$_2$, 군포송정지구가 17tCO$_2$으로 지구규모 순으로 많은 회피배출량을 보였다. InVEST UCM은 면적 2ha 이상의 대규모 공원녹지의 냉각효과를 반영하므로 대규모 녹지가 많을수록 기온 저감효과가 크게 나타나며, 기온저감 효과에 따른 에너지 저감량을 버퍼지역 내의 공동주택 세대수로 곱하여 산출하였으므로 공동주택 세대수가 많을수록, 버퍼지역에 건축물이 밀집한 지역일수록 탄소저감량이 높은 것으로 나타났다. 이상문(2012)은 화성봉담2지구의 1.2배 지구면적을 가진 부천고강지구를 대상으로 바람길을 도입하였을 때 냉방에너지 저감에 따른 탄소저감량이 연간 477tCO2로 예측하였다. 이는 본 연구의 결과값보다 크게 나타나는데, 해당연구에서 바람길 도입으로 하절기(6월 말-9월 중순) 평균온도가 1.5℃ 하강하며 지

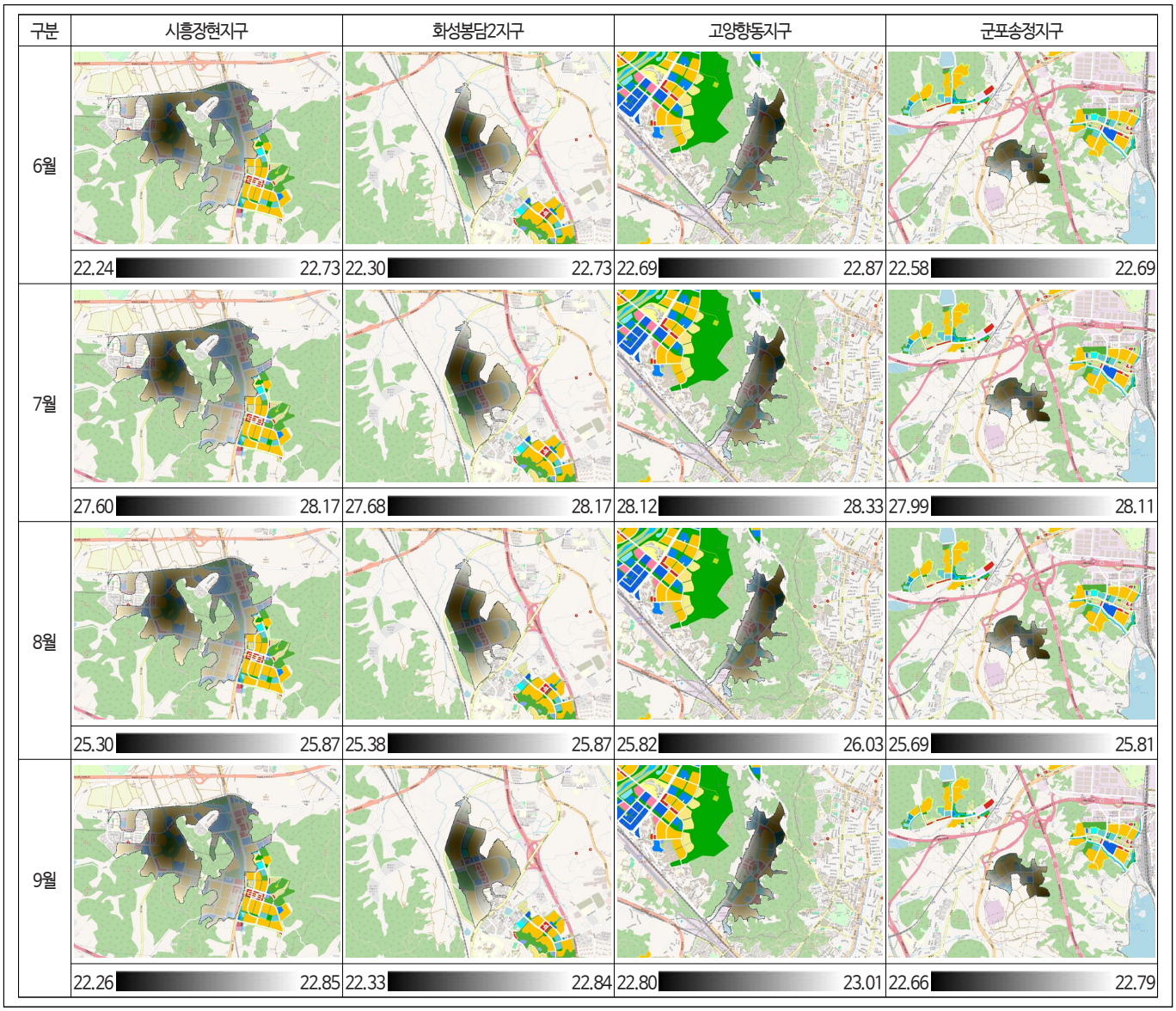


그림 3. 월별 기온분포지도

표 8. 미기후 조절에 따른 탄소회피 배출량(단위: $kgCO_2$)

지구명	시흥장현	화성봉담2	고양향동	군포송정
6월	53,262.20	28,297.60	12,196.91	3,067.46
7월	71,538.58	38,006.48	16,383.23	4,120.70
8월	96,329.35	51,177.39	22,038.37	5,548.21
9월	73,889.15	39,256.26	16,903.67	4,254.75
계(연간)	295,019.30	156,737.70	67,522.19	16,991.12

구 내 모든 세대가 이러한 영향을 받는 것으로 가정하여 더 크게 산출된 것으로 판단된다. 연구결과를 통해 공원녹지의 미기후 조절에 따른 탄소배출 회피 효과를 증대시키기 위하여 냉난방 수요가 큰 건축물이 밀집된 지역에 공원녹지를 배치시키는 것이 효율적임을 시사한다. 따라서 토지이용계획 시 주거동 등 냉각효과가 필요한 공간과의 관계를 고려하여 녹지를 배치할 필요가 있다.

3.1.2.3 우수유출 저감

각 지구별 공원녹지 포장현황을 식생지반, 투수, 반투수, 불투수포장으로 분류하여 면적을 산정하고 회귀식을 통해 침투량을 산출하여 탄소회피 배출량을 도출하였다(표 9 참조). 해당 메커니즘은 공원녹지 내 투수가능한 면적이 넓을수록 높은 저감효과를 보인다. 시흥장현지구는 $79tCO_2$, 화성봉담2 $29tCO_2$, 고양향동 $20tCO_2$, 군포송정지구가 연간 $10tCO_2$의 저감효과를 보이는 것으로 나타났다. 중규모 지구를 비교하면, 화성봉담2지구는 공원녹지 비율이 약 21.65%, 고양향동지구는 15.94%로 공원녹지 비율이 큰 화성봉담2지구의 우수유출 저감효과가 약 1.5배나 높게 나타났다. 따라서, 우수유출 저감에 따른 잠재적 탄소배출 회피 가능성을 고려하여 녹지 및 투수성 공간을 확대하고, 불투수 포장의 비율을 줄이는 방향으로 계획할 필요가 있다. 공원녹지 단위 제곱미터당 4개 지구 평균 우수유출 저감량은 $0.14m^3$으로 Zhang et al.(2012)의 연구에서 베이징 녹지 $1m^2$당 $0.25m^3$의 잠재 유출이 감소시킬 수 있는 결과와 차이를 보이는데, 보존림을 포함한 다양한 녹지형태를 대상으로 하여 국내 도시 공원녹지에 비해 유출계수가 낮은 영향으로 판단된다.

표 9. 지구별 우수유출 저감에 따른 탄소회피 배출량

지구명	구분	면적(m^2)	침투량(m^3)	탄소회피 배출량($kgCO_2$)
시흥장현	식생지반	583,115.64	101,118.67	
	투수	2,679.40	244.31	
	반투수	16,890.88	199.38	
	불투수	11,779.68	0.00	
	합계	614,465.60	101,562.37	79,218.65
화성봉담2	식생지반	252,328.18	34,587.28	
	투수	28,246.89	2,038.73	
	반투수	3,953.64	36.99	
	불투수	26,912.19	0.00	
	합계	311,440.90	36,663.01	28,597.15
고양향동	식생지반	146,742.93	24,951.09	
	투수	2,142.20	191.55	
	반투수	8,454.33	97.87	
	불투수	37,500.75	0.00	
	합계	194,840.20	25,240.49	19,687.59
군포송정	식생지반	85,836.78	13,145.10	
	투수	1,856.30	149.58	
	반투수	13,086.80	136.61	
	불투수	5,205.62	0.00	
	합계	105,985.50	13,431.28	10,476.41

3.2 탄소 흡수 및 잠재적 배출 회피효과 종합

지구별로 측정한 수목의 탄소 흡수 효과와 우수유출 저감, 친환경 통행 유도, 미기후 조절 메커니즘에 따른 잠재적 탄소배출 회피 효과를 종합한 결과는 표 10과 같다. 수목의 탄소흡수 기작을 통해 시흥장현지구는 239tCO_2, 화성봉담2지구가 134tCO_2, 고양향동지구가 185tCO_2, 군포송정지구가 51tCO_2의 탄소를 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 잠재적 탄소배출 회피의 세 기작을 통한 연간 잠재적 탄소회피 배출량은 기준 시나리오에서 시흥장현, 화성봉담2, 고양향동, 군포송정지구 순으로 친환경 통행 유도 기작이 408, 154, 29, 32tCO_2, 미기후 조절 기작이 295, 157, 68, 17tCO_2, 우수유출 저감 기작이 79, 29, 20, 10tCO_2으로 추정되어 공원녹지는 수목의 탄소흡수 효과뿐만 아니라 간접적 효과로 간과되어 온 다양한 메커니즘을 통해 탄소를 저감할 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 밝혔다. 지구규모가 유사한 지구인 화성봉담2지구와 고양향동지구의 경우 지구면적은 화성봉담2지구가 1.2배 크고 공원녹지 면적은 1.6배 큰 현황을 가지는데, 탄소흡수 효과는 고양향동지구가 약 1.4배 큰 것으로 도출되어 그린인프라 계획에 따른 탄소저감 효과의 차이를 보여준다. 또한, 잠재적 탄소배출 회피 효과의 경우 각 지구별로 동일 기작이 우세하게 나타나지 않은 것으로 보아 지구의 공간구조와 이용 특성에 따라 작동하는 기작의 상대적 중요성이 달라질 수 있음을 보여준다. 이를 통해 유사한 규모의 도시라도 그린인프라가 어떤 형태와 구조를 가지고 있는지에 따라서 탄소저감 효과에 차이가 나타날 수 있음을 확인하였다.

탄소중립형 도시계획 기초자료 등으로 활용하기 위하여 공원녹지 단위제곱미터당 탄소저감 효과를 표 11과 같이 도출하였다. 지구마다 편차는 있으나 수목 탄소흡수 효과는 최소 0.39kgCO_2에서 최대 0.95kgCO_2를 저감할 수 있으며, 4개 지구의 평균적으로 단위제곱미터당 연간 0.50kgCO_2의 탄소를 흡수할 수 있는 것으로 나타났다. 이 값은 개발사업지구 공원녹지 원단위(강명수 등, 2013)의 범위와 비교할 때 도시공원의 원단위보다는 낮고 시설녹지의 원단위와는 유사한 수준으로 나타났으며, 본 연구는 공원과 녹지를 합산하여 원단위를 산출하였고 각 지구마다 식재수종, 규격 밀도 등에 차이가 있어 나타난 결과로 보여진다.

단위제곱미터당 잠재적 탄소회피 배출량은 친환경 통행 유도 기작은 최소 0.15 – 최대 0.66kgCO_2 저감할 수 있으며, 미기후 조절 기작이 최소 0.16 – 최대 0.50kgCO_2를, 우수유출 저감 기작은 최소 0.09 – 최대 0.13kgCO_2의 탄소배출을 회피할 수 있는 것으로 도출되었다.

3.3 민감도 분석

잠재적 탄소배출 회피에 따른 저감량은 회귀모형, 시뮬레이션 모델 및 선행연구 계수를 조합한 추정치로, 주요

표 10. 지구별 탄소저감 효과 종합(단위: kgCO_2)

지구명	탄소메커니즘			
	탄소 흡수	잠재적 탄소배출 회피		
		친환경 통행 유도	미기후 조절	우수유출 저감
시흥장현	239,224	407,925	295,019	79,219
화성봉담2	134,474	153,792	156,738	28,597
고양향동	184,840	29,396	67,522	19,688
군포송정	50,663	31,526	16,991	10,476

표 11. 공원녹지 단위제곱미터당 탄소저감 효과(단위: kgCO_2/m^2)

지구명	탄소메커니즘			
	탄소 흡수	잠재적 탄소배출 회피		
		친환경 통행 유도	미기후 조절	우수유출 저감
시흥장현	0.39	0.66	0.48	0.13
화성봉담2	0.43	0.49	0.50	0.09
고양향동	0.95	0.15	0.35	0.10
군포송정	0.48	0.30	0.16	0.10

파라미터의 설정에 따라 결과가 달라진다. 이에 기작별 핵심 파라미터를 문헌 및 제도적으로 타당한 범위 내에서 변화시켜 결과의 민감도를 검토하였다(표 12 참조). 친환경 통행 기작에서는 기준 친환경통행률과 통행 대체율을, 미기후 조절 기작에서는 기온 1℃당 전력 절감계수를, 우수유출 저감 기작에서는 하수처리 유입율을 파라미터로 설정하여 보수적 시나리오와 기준 시나리오로 범위를 세분화하여 적용하였다. 친환경 통행 유도 기작에서는 기준 시나리오의 기준 친환경 통행률을 28.13%, 보수적 시나리오는 38.70%로 설정하였는데 보수적 시나리오의 경우 '지구별 친환경 통행률-기준 친환경통행률'이 음수인 경우에는 탄소회피 배출량을 0으로 산정하였다. 통행 대체율은 관련연구를 고려하여 50%를 보수적 시나리오로 설정하였으며 미기후 조절 기작의 경우 전력 절감계수와 관련된 국내외 연구를 종합하여 시나리오를 설정하였다. 우수유출 저감 기작에서는 하수처리 유입율을 파라미터로 설정하고, 분류식인 경우 하수처리장으로 유입되는 우수가 없다고 가정한 보수적 시나리오(0%)과 합류식인 경우의 기준 시나리오(100%)을 설정하였다. 주요 파라미터에 대한 민감도 분석 결과는 다음과 같다.

기준 친환경 통행률을 기준 시나리오의 28.13%에서 38.70%로 증가시킨 경우, 친환경 통행 유도에 따른 잠재적 회피 배출량은 시흥장현에서 117-408tCO_2, 화성봉담2에서 0-154tCO_2, 고양향동에서 0-29tCO_2, 군포송정에서 0-32tCO_2의 범위로 나타났다. 이는 단순히 공원녹지의 연결성이나 면적이 증가한다고 해서 동일한 수준의 탄소배출 회피효과가 발생하는 것으로 해석하기보다는, 연결성과 친환경 통행 간의 통계적 관계를 바탕으로 추정한 잠재효과가 기준 통행률의 설정에 따라 크게 달라질 수 있음을 보여준다.

통행 대체율을 변화시킨 경우에는 보다 명확한 선형적 차이가 나타났다. 통행 대체율을 기준 시나리오의 100%에서 50%로 낮추었을 때 시흥장현은 204-408tCO_2, 화성봉담2는 77-154tCO_2, 고양향동은 15-29tCO_2, 군포송정은 16-32tCO_2로 나타나, 모든 대상지에서 대체율 감소에 따라 회피 배출량이 약 절반 수준으로 감소하였다. 이는 친환경 통행 증가분이 실제 자동차 등 탄소배출 통행의 감소로 이어지는 정도가 최종 탄소회피 배출량에 직접적인 영향을 미침을 의미한다.

미기후 조절의 경우 전력 절감계수를 13.1%/℃에서 4.6%/℃로 낮추어 분석한 결과, 잠재적 회피 배출량은 시흥장현 104-295tCO_2, 화성봉담2 55-157tCO_2, 고양향동 24-68tCO_2, 군포송정 6-17tCO_2의 범위로 나타났다. 전력 절감계수가 감소함에 따라 모든 대상지에서 회피 배출량이 감소하였으며, 이는 미기후 조절에 따른 탄소배출 회피효과가 적용한 전력 절감계수의 크기에 직접적으로 영향을 받음을 보여준다. 특히 기준 시나리오와 비교하여 보수적 계수를 적용하더라도 미기후 조절에 따른 회피배출효과가 일정 수준 유지되는 것으로 나타나, 해당 기작의 효과가 특정 단일 계수에만 의존하여 나타난 결과는 아님을 확인하였다. 다만 전력 절감계수는 기후조건, 건축물 특

표 12. 민감도 분석 시나리오 및 결과

기작	파라미터	보수적 시나리오	기준 시나리오	지구별 결과 변동폭(tCO_2)	
친환경 통행 유도	기준 친환경 통행률 (%)	38.70	28.13	시흥장현	117-408
				화성봉담2	0-154
				고양향동	0-29
				군포송정	0-32
	통행 대체율 (%)	50	100	시흥장현	204-408
				화성봉담2	77-154
				고양향동	15-29
				군포송정	16-32
미기후 조절	전력 절감계수 (%/℃)	4.6	13.1	시흥장현	104-295
				화성봉담2	55-157
				고양향동	24-68
				군포송정	6-17
우수유출 저감	하수처리 유입률 (%)	0	100	시흥장현	0-79
				화성봉담2	0-29
				고양향동	0-20
				군포송정	0-10

성 및 냉방수요 등에 따라 달라질 수 있으므로, 본 결과 역시 적용 계수에 따른 불확실성을 포함하는 것으로 판단된다.

우수유출 저감의 경우 하수처리 유입률을 100%에서 0%로 변화시켜 분석한 결과, 시흥장현지구는 0-79tCO_2, 화성봉담2 0-29tCO_2, 고양향동 0-20tCO_2, 군포송정지구는 0-10tCO_2의 범위로 나타났다. 하수처리 유입률이 감소함에 따라 회피 배출량도 감소하였으며, 하수처리 유입률을 0%로 가정할 경우 해당 기작의 탄소배출 회피효과가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 우수유출 저감량 자체뿐만 아니라 해당 유출수가 실제로 에너지 소비가 발생하는 하수처리 과정으로 유입되는지 여부가 결과에 중요한 영향을 미친다는 것을 의미한다. 따라서 공원녹지에서 저감된 우수유출량이 모두 하수처리시설로 유입된다는 기준 시나리오는 최대 잠재효과를 산정하기 위한 가정으로 해석할 필요가 있으며, 실제 적용 시에는 대상지의 우·오수 배제체계 및 우수처리시설의 운영특성을 고려할 필요가 있다.

종합하면, 민감도 분석 결과 본 연구에서 산정한 기작별 탄소회피 배출량은 일부 주요 가정에 따라 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 특히 친환경 통행 유도는 친환경 통행 증가분 중 실제 탄소배출 통행을 대체하는 비율에, 우수유출 저감은 하수처리시설 유입 여부에 따라 결과가 크게 달라지는 것으로 확인되었다. 반면 미기후 조절 역시 전력 절감계수의 변화에 따라 결과가 달라졌으나, 보수적 계수를 적용한 경우에도 일정 수준의 회피 배출량이 산정되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 기작별 탄소회피 배출량은 확정적인 탄소저감량으로 해석하기보다는, 파라미터에 대한 가정을 바탕으로 산정한 잠재적 효과의 범위로 이해할 필요가 있다.

3.4 자연기반해법 기반 도시탄소중립 정책 방향 제언

본 연구 결과는 한정된 토지 조건에서 도시를 계획할 때 공원녹지의 단순한 면적 확대를 넘어, 탄소저감 효과를 극대화하기 위한 전략적 접근이 필요함을 시사한다. 일반적으로 공원녹지의 양적 확대는 탄소저감 효과를 증가시키지만, 공공택지와 같이 가용부지가 제한된 상황에서는 무한정 확대가 어려우므로 효율 중심의 계획 전환이 요구된다. 이에 따라 자연기반해법(nature-based solutions)을 적용한 통합적 그린인프라 계획이 중요하며, 생태적 기능과 기후적 효과를 동시에 고려한 공간 설계, 투수성 확보, 공간 간 연결성 강화, 고밀도 개발지역 내 녹지의 적정 배치 등 구조적 접근이 필요하다. 식재 전략 측면에서는 탄소흡수 능력이 높은 수종을 활용하고, 교목과 함께 관목을 포함한 다층식재 구조를 도입함으로써 제한된 공간에서도 탄소흡수 효과를 극대화할 수 있다. 더 나아가 공원녹지의 연결성과 배치 위치를 고려한 네트워크형 계획은 미기후 조절과 물순환 개선 등 간접적인 배출저감 효과를 증대시키며, 도시 전체의 탄소저감 성능을 향상시키는 데 기여한다. 특히 공공택지 개발에서는 동일 면적의 그린인프라라도 구조와 배치 방식에 따라 탄소저감 효과가 크게 달라질 수 있으므로, 이를 반영한 정교한 계획 전략이 요구된다.

본 연구를 토대로 공원녹지를 매체로 탄소중립도시를 실현하기 위해 이를 정책적으로 활용할 수 있는 방향을 제안하고자 한다. 첫째, 온실가스배출권 거래시장에서 공원녹지의 다원적 감축 성과를 크레딧으로 인정받는 정책을 고려할 수 있다. 현재 유사한 크레딧으로는 산림 외부사업 거래제가 있으나 이는 '도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률'에서 정의하는 도시숲, 생활숲 및 가로수 조성사업을 대상으로 하며 개체목 생장법을 통한 순탄소흡수량을 감축량으로 산정하고 있어 간접적 탄소저감 효과는 인정되지 않는다. 공원녹지의 다원적 저감효과를 측정하는 구체적인 방법론을 선행적으로 구축하고 크레딧으로 인정받는다면 도시를 조성하는 사업시행자의 탄소중립 동기를 고취시킬 수 있다. 둘째, ESG 경영공시에서 다원적 탄소저감 효과를 인정하는 방안이 있다. 국내 공공기관은 경영공시가 의무화 되어 있으며, 온실가스 감축량을 포함한 ESG 운영도 공시항목에 포함된다. 다원적 탄소저감 효과를 정량적으로 산정하고 검증할 수 있는 방법론을 마련한 후 공원녹지의 다원적 탄소저감 효과를 탄소감축량으로 인정받아 공시한다면 ESG 관련 공시에서 환경성과를 나타내는 지표로 활용할 가능성을 검토할 수 있으며 도시를 조성하는 주체인 지자체, 공공기관, 민간 등의 경영전략에 탄소중립도시를 위한 실질적인 경영방침이 반영될 수 있다. 셋째, 기후변화영향평가의 온실가스 감축방안 중 하나로 활용할 수 있도록 다원적 탄소저감 효과의 산정방법론을 검토하는 것이다. '기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법' 시행에 따라 100만m^2 이상의 도시의 개발사업 시행 시 평가서에는 온실가스 감축 및 기후위기 적응방안이 포함되어야 한다. 현재 녹지 조성 계수는 식재하는 임종별, 임령별 흡수계수를 적용하도록 되어있으나, 이는 배출저감 효과를 배제하고 수목의 직접적인 탄소흡수량의 증가만을 유도한다. 따라서 여러 메커니즘을 고려하여 종합적인 측면에서 탄소 저감을 촉진하기 위해서는 계수 적용방법의 변화가 필요하다. 이와 같이 탄소중립을 위한 그린인프라 조성을 촉진하기 위해서는 관련법규 개정 등을 통해 공원녹지 탄소의 다원적 저감효과를 인정하는 방법을 검토할 수 있다. 다만, 공원녹지는 도시 조성사업 내에 포함된 시설이기 때문에 감축사업이 시행되지 않은 기존상태인 베이스라인을 명확히 규정하고 추가성이 입증되는

감축성과에 대하여 인정하여야 한다. 또한, 본 연구에서 간접적 탄소저감 효과에 대한 측정값은 모델, 선행연구 등을 통해 설정한 방법론에 따른 추정치이므로 객관적인 산정방법론과 측정·보고·검증(MRV) 체계를 구축하고 현장자료를 활용한 실증적 검증을 수행하는 단계적 접근이 필요하다. 이를 통해 베이스라인, 추가성, 중복계상 및 불확실성 등에 대한 기준이 충분히 마련된다면, 향후 배출권거래제, ESG 경영공시 및 기후변화영향평가 등 다양한 탄소중립 관련 제도에서 공원녹지의 다원적 탄소저감 효과를 활용할 수 있는 제도적 기반을 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 수도권 4개 공공주택지구를 대상으로 공원녹지의 탄소기여를 수목의 직접적인 탄소흡수와 친환경 통행, 미기후 조절 및 우수유출 저감에 따른 잠재적 탄소배출 회피로 구분하여 분석하였다. 공공주택지구의 탄소저감 효과를 다원적으로 측정한 결과 수목의 직접적 탄소흡수 효과는 지구별로 연간 51-239tCO_2, 간접적 효과인 잠재적 배출 회피효과는 기준 시나리오에서 친환경 통행 유도 기작이 지구별로 연간 29-408tCO_2, 미기후 조절 기작이 17-295tCO_2 우수유출 저감 기작이 10-79tCO_2의 효과를 가지는 것으로 추정되었다. 본 연구의 주요 시사점은 개별 수목의 흡수량에 국한되어 온 공원녹지의 탄소저감 효과를 배출 회피 기작까지 확장하고, 각 기작의 산정 절차와 파라미터, 녹지의 연결성, 녹지와 공동주택의 공간적 관계 및 투수성에 따라 서로 다른 탄소기여 잠재력이 나타날 수 있음을 확인하였다는 점이다. 이는 공공주택지구 계획단계에서 공원녹지의 면적 기준을 충족하는 데 그치지 않고, 목표로 하는 탄소저감 기작에 대응하는 계획요소를 선택적으로 강화하는 전략이 필요함을 시사한다. 정책적 측면에서는 잠재적 회피 배출량이 베이스라인·추가성·중복계상 방지·MRV의 조건을 충족하는 방법론으로 정립되고 실증된 이후에 배출권거래제 외부사업, ESG 공시, 기후변화영향평가 등에서 단계적으로 활용될 수 있음을 제안하였다. 다만, 본 연구는 수도권 내 4개 공공주택지구를 대상으로 한 사례연구로서 기후·교통여건·개발유형이 다른 지역이나 민간개발·재개발 지구로의 일반화에는 제약이 있고 회피 배출량은 회귀모형, InVEST UCM 및 선행연구 계수에 기반한 추정치이므로 제도에 즉시 활용하기에는 불확실성을 지니고 있다. 따라서 후속연구를 통해 다양한 도시 및 개발유형으로 대상지를 확대하고 현장 모니터링 등을 통해 각 탄소저감 기작을 검증하며 자연기반해법 계획요소별 탄소저감 효과를 구체화함으로써 다원적 탄소저감 효과에 대한 인증체계나 활용에 대한 제도적 방안을 마련할 필요가 있다.

References

1. 강명수, 김종림, 김남정(2013) 개발사업지구의 공원, 녹지 유형별 탄소효과 원단위 산정에 관한 기초연구. 한국환경복원기술학회지(환경복원기술) 16(5): 71-81.
2. 강상준, 좌승희(2009) 탄소저감을 위한 친환경 공간구성 방안. 경기연구원 기본연구.
3. 곽달(2019) 도시녹지 내 토양유기물 함량과 탄소저장량 변화에 관한 연구. 성균관대학교 석사학위논문.
4. 국토교통부, 조경설계기준(KDS 34 00 00). 국토교통부고시 제2024-743호.
5. 권태근(2020) 토지피복 유형별 유출계수 산정을 통한 도시공원의 물수지 개선방안. 단국대학교 박사학위논문.
6. 김병찬, 강재우, 박찬, 김현진(2020) 심층신경망 모형을 이용한 서울시 도시공원 및 녹지공간의 열섬저감효과 분석. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 48(4): 19-28.
7. 김인현(2011) 탄소배출량과 도시형태 요소 관계 분석에 관한 연구: 서울시를 사례로. 한양대학교 박사학위논문.
8. 김홍배, 김재구(2010) 도시 내 탄소발생량 산정과 저탄소도시 개발의 핵심부문에 관한 연구. 국토계획 45(1): 35-48.
9. 박원신(2019) 신도시 개발계획 수립 시 적용가능한 탄소저감 계획요소 도출 및 탄소배출에 미치는 효과 분석: 화성 동탄신도시를 대상으로. 서울시립대학교 석사학위논문.
10. 박은진, 좌승희(2009) 도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안. 경기연구원 기본연구.
11. 서경원(2015) 도시녹지 유형별 토양탄소 저장량 추정 연구. 고려대학교 박사학위논문.
12. 송민수, 김형호, 배효관(2020) 에너지 생산형 하수처리장을 위한 가용 기술과 통합관리 방안. 한국물환경학회지 36(1): 55-68.
13. 송인주, 최유진, 김채련, 김시정(2010) 저탄소 도시관리를 위한 온실가스 평가지표 개발 및 활용방안. 서울연구원 정책과제연구보고서.

14. 오병록(2014) 가구통행실태조사 자료를 이용한 통행특성 분석과 생활권 기준 설정 연구: 서울시를 중심으로. 서울도시연구 15(3): 1-18.
15. 유윤진, 손세형, 김도년(2013) 저탄소 녹색도시 구현을 위한 물 계획 요소에 관한 연구. 서울도시연구 14(4): 43-59.
16. 이경환, 안건혁(2008) 지역 주민의 보행 활동에 영향을 미치는 근린 환경 특성에 관한 실증 분석: 서울시 12개 행정동을 대상으로. 대한건축학회 논문집-계획계 24(6): 293-302.
17. 이관규(2003) 아파트단지의 녹지 지속가능성 지표 개발. 서울대학교 석사학위논문.
18. 이상문(2012) 저탄소 도시계획 요소별 탄소감축량 산정방법 연구. 환경논총(Journal of Environmental Studies) 51: 145-161.
19. 이수진, 김기중, 이승일(2019) 연립방정식을 이용한 도시온도와 건물에너지 소비의 상호영향관계 실증 분석: 서울시를 중심으로. 서울도시연구 20(1): 33-44.
20. 이우민, 박효숙, 천춘근, 이경환(2016) 교통부문 탄소배출 저감을 위한 토지이용계획 기법 개발 및 탄소저감 효과검증: 아산탕정지구를 대상으로. 한국산학기술학회논문지 17(1): 638-645.
21. 정진욱(2024) InVEST Urban Cooling Model을 이용한 부산광역시의 열 완화 평가. 국립부경대학교 석사학위논문.
22. 조항훈, 김홍순(2023) 도시특성이 건축물의 탄소배출에 미치는 영향에 관한 연구: 서울시 424개 행정동에 대한 공간회귀분석의 적용. 토지주택연구 14(3): 77-92.
23. 조현길, 윤영활, 이기의(1995) 도시녹지에 의한 대기 CO_2의 흡수-춘천시를 대상으로. 한국조경학회지 23(3): 80-93.
24. 조현길, 조동하(1998) 도시 주요조경수종의 연간 CO_2 흡수. 한국조경학회지 26(2): 38-53.
25. 조현길, 안태원(2012) 도시 낙엽성 조경수종의 탄소저장 및 흡수. 한국조경학회지 40(5): 160-168.
26. 조현길, 김진영, 박혜미(2013) 도시 상록 조경수의 탄소저장 및 흡수: 소나무와 잣나무를 대상으로. 한국환경생태학회지 27(5): 571-578.
27. 조현길(2020) 신기후체제 대응을 위한 생활권 도시림의 탄소흡수원과 다원편익 증진을 위한 조성·관리·평가 모델 및 기술개발. 산림청 보고서.
28. 최이명(2013) 근린지역 내 동네형태특성과 보행생활권 형성. 서울대학교 박사학위논문.
29. 최지영(2024) 생활권 선형공원의 일상적 보행유형과 특성: 서울 서초구 길마중길을 사례로. 서울대학교 박사학위논문.
30. 홍이슬, 박주영(2023) 국내 도시 물 시스템의 온실가스 배출량 분석: 파주시 사례를 중심으로. 대한환경공학회지 45(8): 357-370.
31. Abino, A. C., J. A. A. Castillo and Y. J. Lee(2014) Species diversity, biomass and carbon stock assessments of a natural mangrove forest in Palawan, Philippines. Pak. J. Bot. 46(6): 1955-1962.
32. Adamu, Z., O. Hardy and A. Natapov(2023) The Impact of Greenspace, Walking, and Cycling on the Health of Urban Residents during the COVID-19 Pandemic: A Study of London. International Journal of Environmental Research and Public Health 20(14): 6360.
33. Allen, M., O. P. Dube, W. Solecki, F. Aragon-Durand, W. Cramer, S. Humphreys and M. Kainuma(2018) Special report: Global warming of 1.5 C. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
34. Burgalassi, D. and T. Luzzati(2015) Urban spatial structure and environmental emissions: A survey of the literature and some empirical evidence for Italian NUTS 3 regions. Cities 49: 134-148.
35. Ewing, R. and R. Cervero(2010) Travel and the built environment: A meta-analysis. Journal of the American Planning Association 76(3): 265-294.
36. Hargreaves, G. H.(1994) Defining and using reference evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 120(6): 1132-1139.
37. Hong, S., E. C. M. Hui and Y. Lin(2022) Relationship between urban spatial structure and carbon emissions: A literature review. Ecological Indicators 144: 109456.
38. Jo, H. and H. Kim(2025) The influence of urban spatial structure on building carbon emissions at the neighborhood scale considering spatial effect. Building and Environment 276: 112888.

39. McPherson, E. G.(1998) Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. Arboriculture & Urban Forestry (AUF) 24(4): 215-223.
40. Mun Ng, K., C. Wah Yuen, C. Chuen Onn and N. Ibtishamiah Ibrahim(2024) Urban mobility mode shift to active transport: Sociodemographic dependency and potential greenhouse gas emission reduction. Sage Open 14(1): 21582440241228644.
41. Neves, A. and C. Brand(2019) Assessing the potential for carbon emissions savings from replacing short car trips with walking and cycling using a mixed GPS-travel diary approach. Transportation Research Part A: Policy and Practice 123: 130-146.
42. Ngo, V. D., L. D. Frank and A. Y. Bigazzi(2018) Effects of new urban greenways on transportation energy use and greenhouse gas emissions: A longitudinal study from Vancouver, Canada. Transportation Research Part D: Transport and Environment 62: 715-725.
43. Owen, N., N. Humpel, E. Leslie, A. Bauman and J. F. Sallis(2004) Understanding environmental influences on walking: review and research agenda. American Journal of Preventive Medicine 27(1): 67-76.
44. Pan, H., J. Page, R. Shi, C. Cong, Z. Cai, S. Barthel, P. Thollander, J. Colding and Z. Kalantari(2023) Contribution of prioritized urban nature-based solutions allocation to carbon neutrality. Nature Climate Change 13(8): 862-870.
45. Pinna, F. and V. Saiu(2021) Greenways as integrated systems: A proposal for planning and design guidelines based on case studies evaluation. Sustainability 13(20): 11232.
46. Santamouris, M., C. Cartalis, A. Synnefa and D. Kolokotsa(2015) On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings? A review. Energy and Buildings 98: 119-124.
47. Shi, K., T. Xu, Y. Li, Z. Chen, W. Gong, J. Wu and B. Yu(2020) Effects of urban forms on CO2 emissions in China from a multi-perspective analysis. Journal of Environmental Management 262: 110300.
48. Southworth, F., A. Sonnenberg and M. A. Brown(2008) The transportation energy and carbon footprints of the 100 largest US metropolitan areas. Ivan Allen College, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
49. Sugiyama, T., B. Giles-Corti, J. Summers, L. du Toit, E. Leslie and N. Owen(2013) Initiating and maintaining recreational walking: A longitudinal study on the influence of neighborhood green space. Preventive Medicine 57(3): 178-182.
50. UNEP(2020) Emissions Gap Report 2020.
51. Wang, M., X. Zhong, H. Yuan, D. Zhang, L. Cheng and J. Zhang(2024) Integrating carbon and water footprint into nature-based solution (NBS) for urban planning in a highly built-up area in Guangzhou, China. Science of the Total Environment 951: 175505.
52. Wendel-Vos, G. C., A. J. Schuit, R. de Niet, H. C. Boshuizen, W. H. Saris and D. A. A. N. Kromhout(2004) Factors of the physical environment associated with walking and bicycling. Medicine and Science in Sports and Exercise 36(4): 725-730.
53. WMO(2026) State of the global climate report 2025 update for COP30.
54. Zawadzka, J. E., J. A. Harris and R. Corstanje(2021) Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data. Landscape and Urban Planning 214: 104163.
55. Zhang, B., G. Xie, C. Zhang and J. Zhang(2012) The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China. Journal of Environmental Management 100: 65-71.
56. Zubelzu, S., R. Alvarez and A. Hernandez(2015) Methodology to calculate the carbon footprint of household land use in the urban planning stage. Land Use Policy 48: 223-235.
57. Zuniga-Teran, A. A., B. J. Orr, R. H. Gimblett, N. V. Chalfoun, S. E. Marsh, D. P. Guertin and S. B. Going(2017) Designing healthy communities: Testing the walkability model. Frontiers of Architectural

Research 6(1): 63-73.
58. https://bigdata.kepco.co.kr/cmsmain.do?scode=S01&pcode=000171
59. https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do;jsessionid=vTeYcc1QFbSGSHL20aMsCRie1fzqa5Y0ncWc3kHjipkakxdkTfqGXRU4JdfCZwMf.was02_servlet_engine6
60. https://gits.gg.go.kr/gtdb/web/trafficDb/travelShare/travelShareByWay.do
61. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/well-to-wheel-ghg-intensity-of-motorised-passenger-transport-modes-2022