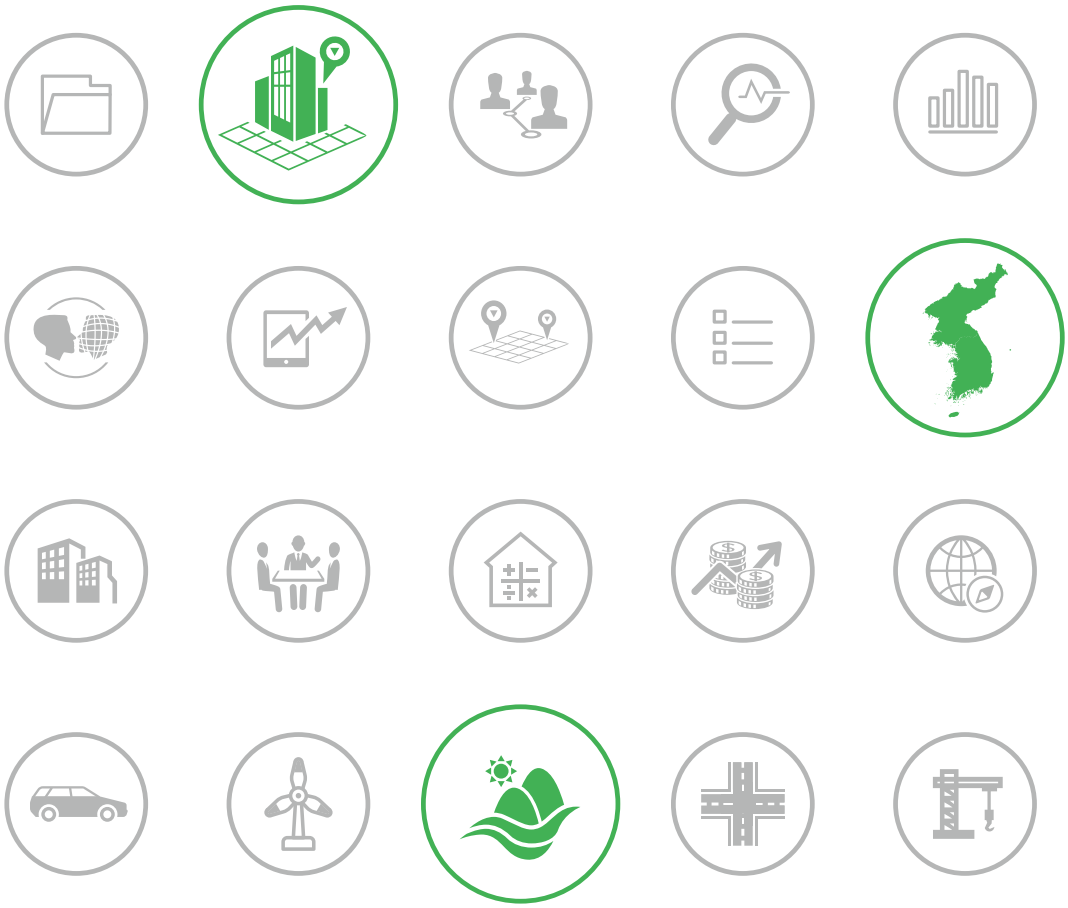


기본 | 23-06

모의실험을 통한 도시 내 온실가스 감축 방안 연구 : 탄소흡수원을 중심으로

A Study on Greenhouse Gas Reduction in Cities Using Simulation Experiments Focusing on Carbon Sink

박종순, 윤은주, 박종화, 홍나은, 김은화, 황정민, 김창현

KRIHS 국토연구원

기본 23-06

모의실험을 통한 도시 내 온실가스 감축 방안 연구 : 탄소흡수원을 중심으로

A Study on Greenhouse Gas Reduction in Cities Using Simulation Experiments Focusing on Carbon Sink

박종순, 윤은주, 박종화, 홍나은, 김은화, 황정민, 김창현

KRIHS 국토연구원

■ 저자

박종순, 윤은주, 박종화, 홍나은, 김은화, 황정민, 김창현

■ 연구진

박종순 국토연구원 국토환경·자원연구본부장(연구책임)
윤은주 국토연구원 부연구위원
박종화 국토연구원 부연구위원
홍나은 국토연구원 연구원
김은화 국토연구원 연구원
황정민 국토연구원 연구원
김창현 국토연구원 선임연구위원

■ 외부연구진

이주영 리코컨설트 대표
최지은 리코컨설트 선임연구원

■ 연구심의위원

김태환 국토연구원 부원장
조판기 국토연구원 기획경영본부장
김상조 국토연구원 도시연구본부장
박태선 국토연구원 선임연구위원
이상은 국토연구원 안전국토연구센터장
김중은 국토연구원 연구위원
안승만 국토연구원 연구위원
안연진 국토교통부 도시정책과
이영주 국토교통부 녹색도시과

주요 내용 및 정책제안

FINDINGS & SUGGESTIONS

본 연구보고서의 주요 내용

1 전세계는 탄소중립을 향해 경주 중이며, EU, 영국, 일본 등은 2050년 탄소중립을 선언
- 우리나라는 2030년에는 온실가스 총배출량을 40% 감축, 2050년에는 탄소중립 실현 발표

2 도시 내 공원녹지는 도시열섬을 완화시키는 등 미기후를 조절함으로써 주변 지역의 냉방 에너지 수요를 절감하고, 그에 따라 배출량을 간접적으로 감축하는 효과가 있음
- 우리나라의 국토·도시계획에는 도시 내 탄소흡수원 조성 및 관리에 관한 구체적인 감축 전략 및 수단이 부재

3 사례 분석 결과, 공원녹지는 지표면 온도 저감에 효과가 있으며, 이를 신규 개발지에 적용하여 온실가스 감축 효과를 정량적으로 파악함
- 공원의 규모가 클수록 냉각 효과의 공간적 범위가 넓어짐
- 절대적인 면적뿐만 아니라, 공원녹지를 공간적으로 적정하게 배치하는 것이 중요

본 연구보고서의 정책제안

국토·도시계획에 대해 조사, 작성, 평가, 모니터링 단계로 구분하여 단계별 개선 방안 제시

1 조사) 온실가스 배출·흡수 현황을 국토조사 단계 또는 기초조사 항목에 포함
- 기초조사항목에 온실가스 배출·흡수 현황을 조사하도록 광역도시계획, 도시·군관리계획에 반영

2 작성) 온실가스 배출은 최소화하고, 흡수는 최대화하는 공간계획을 수립하도록 함
- 광역도시계획) 광역 차원의 녹지의 확충·보전·연결을 고려한 공간 구상
- 도시·군기본계획) 온실가스 다배출 지역인 도심에 중형 및 대형공원을 배치하고, 도시 전체적으로 소공원을 연결하는 선형공원 조성

3 평가) 국토계획평가 시 국토·도시계획이 탄소중립 녹색성장기본계획과 정합성을 갖는지 평가
- 도시·군관리계획에서는 탄소흡수원 면적당 또는 1인당 탄소흡수량을 평가토록 함

4 모니터링) 계획 혹은 감축 수단 도입 전후의 탄소감축·흡수량의 변화를 모니터링함

요 약
SUMMARY

1. 연구의 배경 및 목적

□ EU를 주축으로 하여 전세계는 탄소중립을 향해 경주 중

- EU, 영국, 일본 등은 2050년 탄소중립을 선언하고 법제화를 추진 중임
- 중국, 러시아는 2060년 탄소중립을, 인도는 2070년 탄소중립 달성을 선언(대한민국 정책브리핑, 2021b; 환경부, 2022)

□ 우리나라는 2030년에는 2018년 대비 온실가스 총배출량을 40% 감축하고, 2050년에는 탄소중립의 실현을 발표(대한민국 정책브리핑, 2021b; 환경부, 2022)

- 향후 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 흡수원 등 7대 분야에서 감축 수단과 비중은 변경될지라도, 탄소중립의 정책 기조는 지속될 것으로 전망됨

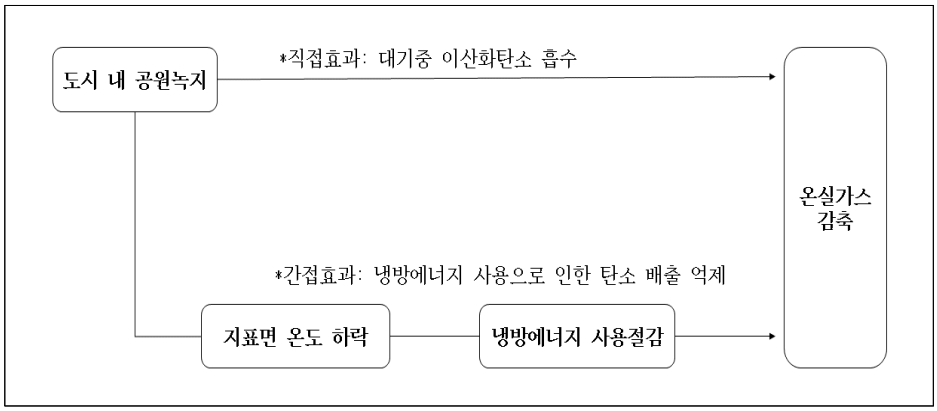
□ 탄소중립기본법이 2022년 3월 시행되었으며, 광역 및 기초지자체에서는 5년마다 탄소중립 온실가스 통계정보를 제공하고, 탄소중립 기본계획을 수립해야 함

- 탄소중립을 실현하기 위해서는 국가 차원의 부문별 정책이 마련되었으며, 도시 및 지자체 단위에서도 효율적인 감축 방안 마련에 대한 논의가 필요

□ 도시 내 공원녹지는 도시열섬을 완화시키는 등 미기후를 조절함으로써 주변 지역의 냉방에너지 수요를 절감하고, 그에 따른 배출량을 감축하는 효과가 있음

- 탄소흡수원은 2030 NDC 및 탄소중립 시나리오 등 정부의 주요 정책문건에 공통적으로 포함된 감축부문임
- 그러나, 도시 내 탄소흡수원 확충 및 관리에 관한 구체적인 전략은 제시되지 않은 실정임
- 탄소흡수원은 공기 중 온실가스를 흡수하는 동시에 미기후 조절을 통해 타 부문의 감축을 지원할 수 있으나, 국토·도시계획에 이를 어떻게 반영할 것인지는 알려져 있지 않음

그림 1 | 온실가스 감축에 관한 공원녹지의 직·간접 효과



자료: 저자 작성

□ 본 연구의 목적은 온실가스 감축에 있어 탄소흡수원의 직·간접적인 역할을 파악하여, 공간계획 관련 법제도의 개선방안을 제시하는 것임

- 도시 내 탄소흡수원을 중심으로 온실가스 감축에 대한 모의실험을 수행하고, 바람직한 탄소흡수원 조성 방안과 이를 실행하기 위한 국토·도시계획 수립 단계별 개선 방안 제시
- 본 연구에서는 국내외 사례, 선행 연구, 실증 사례 분석, 모의실험을 통해 국토·도시계획에 적용가능한 온실가스 감축 방안을 탐색함
- 국토·도시계획의 수립 과정을 '조사, 작성, 평가, 모니터링' 단계로 구분하고, 단계별 계획의 한계점과 개선 방안을 제시코자 함

2. 연구의 방법론

□ 도시 녹지조성으로 온실가스 감축 사례 분석(감축실증 연구)

- 목적) 대구시를 사례지역으로 탄소흡수원의 간접적인 온실가스 감축효과를 과학적으로 규명
- 대구시를 대상으로 공원녹지의 열섬저감 효과를 분석하고, 열섬 및 냉방에너지 사용량 간 관계성을 도출함
  - Landsat 인공위성 영상을 활용하여 지표면 온도를 구축하고, 공원녹지 유형별로 지표면 온도가 저감되는 공간적 범위와 그 폭(℃)을 도출함
  - 지표면 온도와 건물의 냉방에너지 사용량 간의 관계를 설명할 수 있는 선형회귀식을 도출함으로써, 공원녹지의 지표면 온도 저감 효과를 냉방에너지의 감축량(간접적인 온실가스 감축량)으로 변환할 수 있는 토대를 마련함

□ 신도시 대상 흡수원의 감축효과 분석(모의실험)

- 목적) 경기도에 위치한 신도시[1]를 대상으로 한 복수의 계획안에 대하여 공원녹지 배치에 따른 냉방에너지의 감축량과, 그에 따른 간접적인 온실가스 감축효과를 예측하였음
  - 공원녹지로 인한 냉방에너지 감축량을 상호 비교함으로써 공원녹지의 유형 및 입지에 대한 시사점을 도출함

□ 문헌 검토 및 전문가 자문

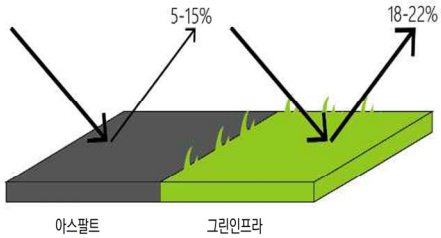
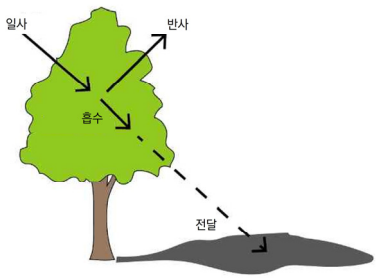
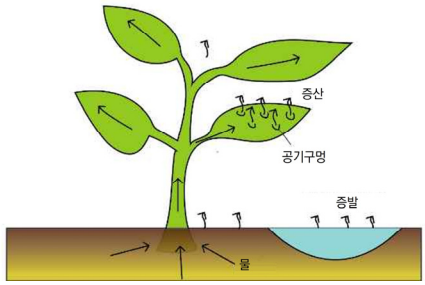
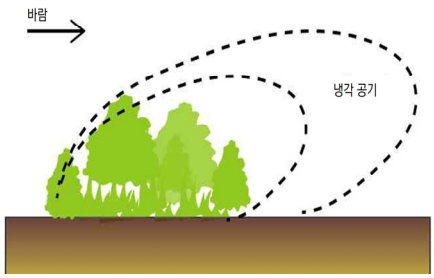
- 국토종합계획, 광역도시계획, 도시·군기본계획, 지구단위계획 등에서 다루고 있는 온실가스 감축과 관련되는 내용 검토
- 외국의 온실가스 감축 방안을 검토하여 우리나라에 적용가능한 시사점 도출

1) 경기도에 위치하고 있으며, 현재 계획 중인 신도기이기 때문에 본 연구에서 구체적인 지명은 제시하지 않음

3. 도시 내 탄소흡수원의 온실가스 감축 효과

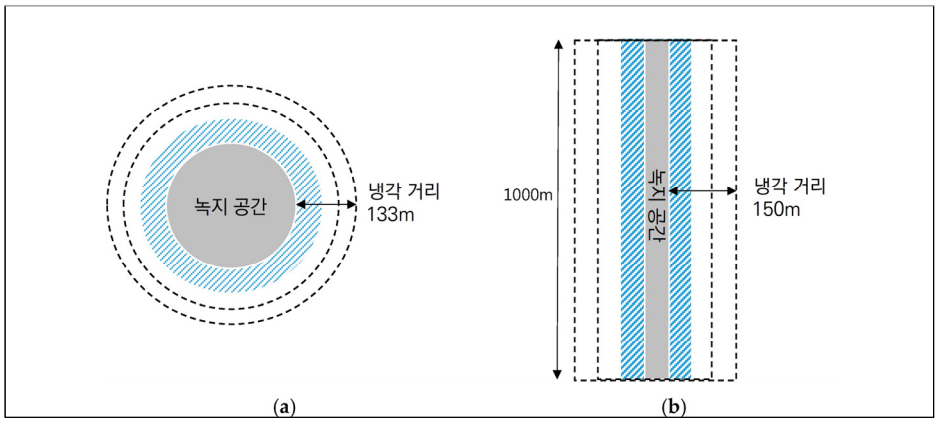
- (배출된 탄소 흡수, 직접효과) 도시 내 탄소흡수원의 하나인 공원녹지를 구성하는 식생은 공기 중 이산화탄소를 흡수하여 광합성 활동을 하며, 성장하기 때문에 이산화탄소의 격리수단임
  - 탄소중립 관련 정책문건 역시 '흡수원'으로서 정의되고 있어, 본 연구에서는 공원녹지의 '직접효과'로 정의하였음
  - 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」에서는 탄소흡수원을 "탄소를 흡수하고 저장하는 입목, 죽, 고사유기물, 토양, 목제품 및 산림바이오매스 에너지"로 정의됨
  - '2030 NDC'와 '2050 탄소중립 시나리오' 등 주요 정책문건에서는 온실가스 감축수단으로서 흡수원을 제시하고 있으며, 향후 도시 내 녹지의 확충이 필요함을 명시하고 있음
- (탄소 배출량 감축, 간접효과) 공원녹지는 도시열섬을 완화시키는 등 미기후를 조절함으로써 주변 지역의 냉방에너지 수요를 절감하고, 그에 따른 배출량을 감축시키는 효과가 있음
  - 공원녹지로 인한 주변 지역의 온도저감, 또는 에너지 절감의 효과는 이미 통계적으로 확인되었음
  - 그러나, 온실가스 인벤토리에서는 고정에너지 중 건물 부문의 성과로 집계되므로, 본 연구에서는 공원녹지의 '간접효과'로 정의하였음
  - 공원녹지의 미기후 조절효과는 기후변화 적응 부문에서의 주요 수단이기도 함

그림 2 | 공원녹지의 열섬저감 효과

공원녹지의 반사효과	공원녹지의 그림자효과(반사 및 흡수 후 투과)
	
공원녹지의 증발산효과	**공원녹지의 찬공기 생성효과**
	

자료: 박채연 외(2017, p.72, 74, 75) 그림 인용

그림 3 | 공원녹지 형태에 따른 온도 저감효과의 연구 사례



자료: Park·Cho(2016, p.12)
주: 공원녹지 크기가 동일한 경우, 파란색 영역은 공원녹지로부터 50m의 냉각효과를 보여주고 선형이 거리효과가 더 큼

4. 국외사례

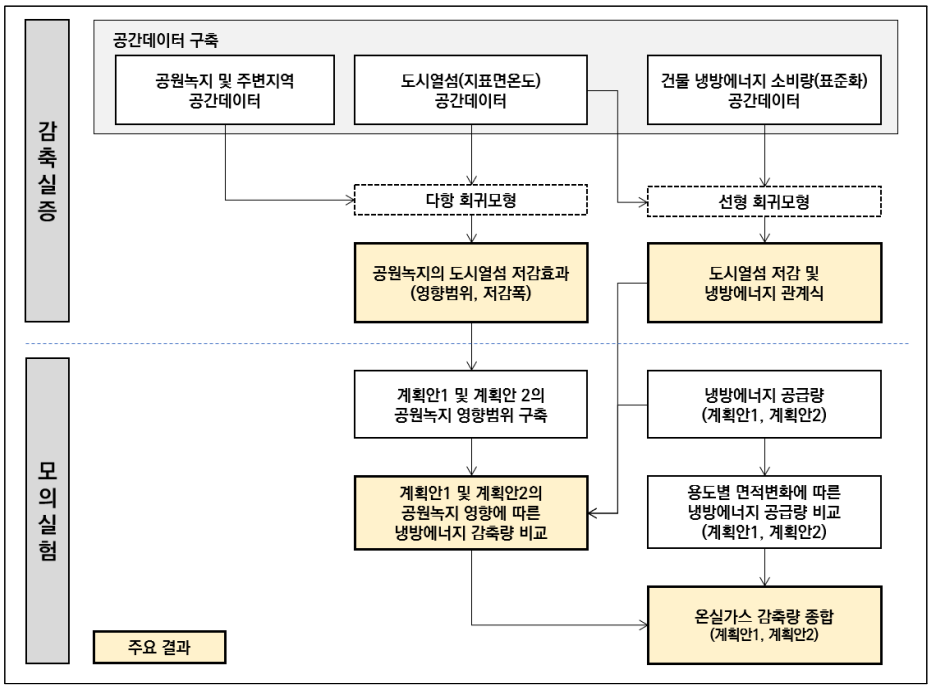
- 싱가포르는 환경보전과 도시열섬 완화를 위해 녹지조성과 나무 심는 정책 수행
  - 이러한 전략은 도시 내 탄소흡수와 온실가스 감축에 도움을 줄 수 있음
- 멜버른과 뉴욕에서 수행된 연구는 도시숲의 탄소 저장량을 추정하고 도시 내 녹지 및 숲의 탄소 흡수 역할을 인식
  - LiDAR와 같은 기술적 혁신과 데이터 분석을 활용하여 도시 내 녹화 영역을 파악하고 효율적인 조성 및 관리를 수행
  - 도시열섬 불평등 해소 및 탄소흡수원 증대에 유용
- 해외 도시 사례와 같이 국내에서도 탄소흡수원의 형태, 크기, 조성 우선순위 선정에 있어 정량적인 분석이 필요

5. 실증 및 모의실험 결과

□ 실증 및 모의실험의 흐름도

- 기존에 탄소흡수원이 조성된 지역을 대상으로 간접적인 온실가스 감축효과를 산정하는 '감축실증' 부문과, 그 결과를 활용하여 신규 도시개발사업 토지이용계획(안) 중 탄소흡수원의 직·간접적 감축효과를 예측하는 '모의실험' 부문으로 구분됨
  - 감축실증에서는 대구시를 대상으로 공원녹지 유형별로 도시열섬을 저감하는 공간적 범위와 그 폭(℃)을 분석하고, 도시열섬 저감효과 및 냉방에너지 소비량과의 관계식을 도출함
  - 모의실험의 경우, 신도시에 대한 1단계 개발지구에 대한 복수의 토지이용계획을 중심으로, 공원녹지 계획 방식에 따른 냉방에너지 감축량 및 온실가스의 간접적 감축량 변화를 고찰함

그림 4 | 실증분석 및 모의실험의 흐름도

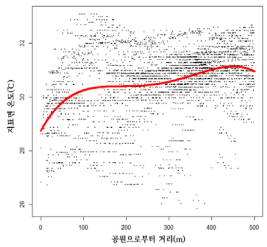
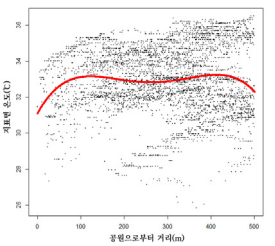
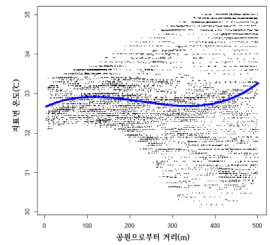


자료: 저자 작성

□ 분석의 결과

- 실증분석 결과) 도시공원은 열섬현상을 저감시키는 데 효과가 있었으며, 공원의 규모가 클수록 영향의 공간적 범위가 넓어짐
  - 대형공원인 경우는 188.4m, 중형공원인 경우는 122.0m, 소형공원인 경우는 116.5m 정도임
  - 지표면 온도 저감폭은 대형공원은 1.65℃, 중형공원은 2.07℃, 소형공원은 0.26℃로, 공원의 크기와 비례하지는 않았음
  - 이것은 공원 내 식생비율 또는 주변지역의 특성 때문으로 판단됨
  - 도시열섬 현상이 심화될 수록, 냉방에너지의 사용량이 증가함
    - 건물 용도를 구분하지 않고 도출된 결과인 지표면 온도 1℃ 상승 시, 냉방에너지 소비량 약 11.4% 증가

표 1 | 공원녹지 유형별 거리 및 지표면 온도에 대해 선정된 회귀모형 종합

구분		대형공원	중형공원	소형공원
그래프				
		x축 : 공원으로부터의 거리(m), y축 : 지표면 온도(℃)		
계수	1차	2.903e-02***	4.405e-02***	5.102e-03***
	2차	-1.854e-04***	-3.182e-04***	-2.948e-05***
	3차	4.985e-07***	8.884e-07***	4.338e-08***
	4차	-4.524e-10***	-8.371e-10***	-
상수		2.875e+01***	3.110e+01***	3.266e+01***

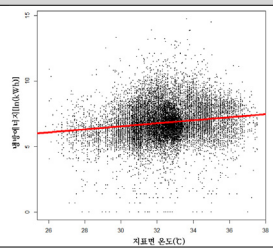
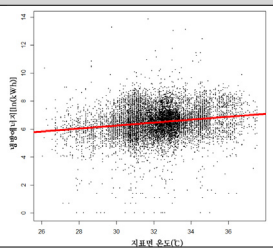
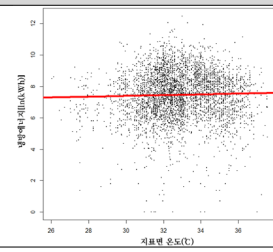
주: *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001
자료: 저자 작성

표 2 | 공원녹지 유형별 도시열섬 저감의 공간적 범위 및 수준 종합

공원녹지 유형	열섬저감 효과		비고
	공간적 범위(m)	저감 폭(℃)	
대형공원	188.4	1.65	- 중형공원의 열섬저감 폭이 가장 높은 데에는 녹지율 또는 주변 환경이 영향을 미친 것으로 판단됨
중형공원	122.0	2.07	
소형공원	116.5	0.26	

자료: 저자 작성

표 3 | 지표면 온도와 냉방에너지 소비량에 대한 회귀모형

구분	용도구분 안함	용도 구분함	
		주거용도	상업용도
그래프			
	x축 : 지표면 온도(℃), y축 : 냉방에너지 소비량		
계수	0.114291***	0.104820***	0.02349
상수	3.114434***	3.115702***	6.70013***
Adjusted R2	0.02363	0.03141	0.0005844
N	15983	11041	4208

주: *p 〈 0.05, **p 〈 0.01, ***p 〈 0.001
자료: 저자 작성

- 신도시에의 적용) 신도시의 계획2는 계획1에 비해 공원녹지의 면적이 증가하였으나 (+151,033㎡), 냉방에너지 감축량은 상대적으로 적었으며, 그에 따라 온실가스 감축량도 감소
  - 공원녹지의 절대적인 면적과 영향범위가 증가하더라도, 냉방에너지 사용량이 적은 용도가 주로 분포하는 도시 외곽 중심으로 중·대형 공원이 위치하면 온실가스 감축효과는 상대적으로 낮아짐

□ 종합 및 시사점

- 계획에의 시사점) 공원녹지의 온실가스의 간접적인 감축 효과를 높이기 위해서는 절대적인 면적을 증가시키는 것 뿐만 아니라, 공원녹지를 공간적으로 적정하게 배치하는 것이 중요
  - 중형 혹은 대형공원은 중심 사업지구가 위치한 도심에 배치하는 것이 온실가스 감축에 효과적임
  - 대형공원 사이에는 중소형 공원을 상호 연결시킨 선형공원을 조성하여 공원의 영향권을 증대시키는 것도 바람직함

6. 도시계획 관련 법·제도의 한계점 및 개선방안

□ 한계점

- (광역도시계획수립지침) 광역계획권에 따라 기초조사 항목을 포괄적으로 조사하거나 필요한 항목만 선택할 수 있으나 직접적으로 온실가스 배출·흡수와 관계있는 항목은 없음
- (도시·군기본계획수립지침) 지침개정으로 타 계획에 비해 탄소흡수원 관련 사항이 잘 반영되어 있으나, 도심에 중대형 공원을 조성하거나, 선형 공원 조성에 대한 내용 부재
- (도시·군관리계획) 도시·군기본계획수립지침과 달리 탄소중립과 관련한 내용이 반영되어 있지 않음
- (지구단위계획) 보다 상세한 공원·녹지계획을 수립할 수 있으나, 단위 구역 개발에 따른 기존 탄소 흡수량 손실과 공원녹지 조성에 따른 탄소 흡수량을 다루지 않음

□ 계획수립 단계별 개선방안

- (조사단계) 조사 단계에서는 온실가스 배출·흡수 현황을 국토조사 단계 또는 기초조사 항목에 포함하도록 함
  - 상·하위 계획 간 정합성 확보를 위해 공간 위계별 기초조사항목에 온실가스 배출·흡수 현황을 조사하도록 광역도시계획, 도시·군관리계획에도 반영하도록 해야 함
- (작성단계) 작성 단계에서는 온실가스 배출을 최소화하고 온실가스 흡수를 최대화하는 공간계획을 수립하도록 함
  - 광역도시계획에서는 에너지·탄소흡수원 등의 공간을 확보할 수 있는 방안을 마련하고, 주변 녹지의 확충·보전·연결 등을 고려
  - 도시·군기본계획에서는 온실가스가 많이 배출되는 도심에 중형 및 대형공원을 배치하고, 소공원과 연결하여 도시 전반에 선형공원을 조성
  - '지구단위계획수립지침' 상에서 개발에 따른 온실가스 발생량을 고려하여 공급을 계획하도록 하고 공원녹지 조성에 따른 탄소 흡수량을 검토하도록 함
- (평가단계) '국토계획평가에 관한 업무처리지침', '도시·군관리계획수립지침'에서 개선 방안을 제시함
  - '국토계획평가에 관한 업무처리지침' 별표 2에를 수정하여, 국토·도시계획이 탄소중립 녹색성장기본계획에 부합한 지 평가하도록 함
  - '도시군관리계획수립지침'에서는 정량적 평가를 위한 지표로 탄소흡수원 면적당 또는 1인당 탄소 흡수량을 평가하도록 하고, 정성적 평가로 탄소흡수원 확충 등의 온실가스 흡수 방안을 검토하도록 함
- (모니터링 단계) 탄소 감축·흡수량 변화를 모니터링하여, 녹지조성 등 감축수단 도입 전과 후의 계획을 비교하도록 함

차 례

CONTENTS

주요 내용 및 정책제안 ····· iii
요 약 ····· v

제1장 연구의 개요

1. 연구 배경 및 목적 ····· 3
2. 연구의 흐름도 ····· 6
3. 연구의 기대효과 ····· 8
4. 연구의 범위 및 방법 ····· 9
5. 선행연구와의 차별성 ····· 12

제2장 이론 고찰 및 선행 연구

1. 기후변화의 이해 ····· 17
2. 탄소흡수원의 역할 ····· 21
3. 시사점 정리 ····· 34

제3장 국내외 탄소중립정책

1. 국내 온실가스 배출현황 ····· 37
2. 국가 차원의 부문별 탄소중립 정책 ····· 40
3. 지자체의 탄소중립 정책 ····· 45
4. 탄소중립 실현을 위한 해외 도시별 공원녹지 정책 ····· 48
5. 시사점 ····· 62

제4장 모의실험 및 법제도 개선방안

1. 분석의 개요 ····· 65
2. 감축실증: 녹지의 간접적 감축효과 산정 ····· 68
3. 모의실험: 공간계획에 따른 감축효과 변화량 예측 ····· 77
4. 계획수립 단계별 한계점 및 개선방안 ····· 84
5. 종합 및 시사점 ····· 97

제5장 결론

1. 연구의 결과 ····· 101
2. 법제도의 개선방안 ····· 103
3. 연구의 한계 및 향후 과제 ····· 104

참고문헌 ····· 105
SUMMARY ····· 115

표차례

LIST OF TABLES

표 1-1 | 선행연구와 본 연구의 차별성(1) ····· 13
표 1-2 | 선행연구와 본 연구의 차별성(2) ····· 13
표 2-1 | 6개 도시별 최근 30년과 과거 30년 평균기온 변화 추세 ····· 19
표 2-2 | 2018년 LULUCF 분야 온실가스 배출·흡수량 ····· 21
표 2-3 | 천안시 근린공원의 식재유형별 탄소흡수 및 저장량 ····· 24
표 2-4 | 서울시 행정구역별 녹지의 흡수량 평가결과 ····· 24
표 2-5 | 주요 수종별 연간 CO_2 흡수량 ····· 26
표 2-6 | 주요 수종별 연간 CO_2 흡수량 산정식 ····· 27
표 3-1 | 국가 온실가스 통계 ····· 38
표 3-2 | 1인당 및 국내총생산(GDP) 대비 온실가스 총배출량 ····· 38
표 3-3 | 1990~2019년 국가 온실가스 부문별 배출량 ····· 39
표 3-4 | 1990~2019년 국가 온실가스 부문별 배출량 ····· 40
표 3-5 | 핀란드 헬싱키 대도시지역의 녹지관리 유형 ····· 50
표 3-6 | A와 B로 분류된 식생의 바이오매스 추정량 ····· 50
표 3-7 | 2019년 헬싱키의 ABC 범주별 탄소저장량 ····· 52
표 3-8 | 2019년 헬싱키의 ABC 범주별 탄소 유량 ····· 53
표 3-9 | 2011년과 2019년 핀란드 도시별 매년 탄소저장량 및 상대적 변화 비교 · 53
표 3-10 | 2011년과 2019년 핀란드 도시별 매년 탄소 유량 및 상대적 변화 비교 ··· 54
표 4-1 | 분석에 활용된 입력자료 ····· 68
표 4-2 | 선정된 공원녹지 7개소 ····· 70
표 4-3 | 선행연구에서의 건물의 냉방에너지 사용량 표준화 방법 ····· 71
표 4-4 | 분석모형 및 변수설정 ····· 72
표 4-5 | 공원녹지 유형별 거리 및 지표면 온도에 대한 회귀모형 비교검토(ANOVA) · 73
표 4-6 | 공원녹지 유형별 거리 및 지표면 온도에 대해 선정된 회귀모형 종합 ··· 74
표 4-7 | 공원녹지 유형별 도시열섬 저감의 공간적 범위 및 수준 종합 ····· 74
표 4-8 | 지표면 온도와 냉방에너지 소비량에 대한 회귀모형 비교검토 ····· 76

표 4-9 | 신도시 1단계 개발지구의 총 냉방에너지 수요량 ····· 79
표 4-10 | 신도시 1단계 개발지구의 공원녹지 영향범위 면적 ····· 80
표 4-11 | 공원녹지 유형별 도시열섬 저감범위 및 저감 폭, 냉방에너지 감축률 ····· 81
표 4-12 | 신도시 1단계 개발지구의 공원녹지 유형별 냉방에너지 감축량 ····· 82
표 4-13 | 신도시 1단계 개발지구의 공원녹지 유형별 온실가스 감축량 ····· 82
표 4-14 | 신도시 1단계 개발지구의 냉방에너지 소비량 및 온실가스 증감량 종합* ·· 82
표 4-15 | 광역도시계획 중 탄소흡수원 관련 내용 ····· 86
표 4-16 | 도시·군기본계획 중 탄소흡수원 내용 ····· 88
표 4-17 | 지구단위계획 중 탄소흡수원 관련 내용 ····· 90
표 4-18 | 계획수립 단계별 관련 법령 검토항목 및 내용 ····· 91
표 4-19 | 조사단계 관련 법 개선(안) ····· 92
표 4-20 | 작성단계 관련 법 개선(안) 예시 ····· 93
표 4-21 | 평가단계 관련 법 개선(안) 예시 ····· 95
표 4-22 | 모니터링단계 관련 법 개선(안) 예시 ····· 96

그림차례

LIST OF FIGURES

그림 1-1 | 온실가스 감축에 관한 공원녹지의 직·간접 효과 ····· 5
그림 1-2 | 연구의 흐름도 ····· 7
그림 2-1 | 도시열섬 현상의 개념 및 도시열섬 관측 연구 ····· 20
그림 2-2 | 녹지의 기능, 서비스와 편익 간 관계 ····· 23
그림 2-3 | 서울시 행정구역별 탄소흡수량 비교 ····· 25
그림 2-4 | 공원녹지의 열섬저감 효과 ····· 28
그림 2-5 | 공원녹지의 지표면 냉각효과 ····· 29
그림 2-6 | 온도 저감 효과 강도(CEI)와 온도 저감 효과 거리(CED) ····· 31
그림 2-7 | 공원녹지 형태에 따른 온도 저감효과 거리(PCI effect by distance) · 32
그림 3-1 | 국가 온실가스 총배출량 및 증감률 ····· 37
그림 3-2 | 핀란드 헬싱키 지역의 유형별 녹지 분포 ····· 51
그림 3-3 | 핀란드 헬싱키의 탄소저장량과 유량 분포 ····· 52
그림 3-4 | 미국 뉴욕에서 공간에 따른 산림의 구분 ····· 55
그림 3-5 | 미국 뉴욕 자연 지역 산림의 총 탄소 축적량 및 변화 ····· 56
그림 3-6 | 미국 뉴욕 내 산림의 탄소저장량 ····· 56
그림 3-7 | 미국 뉴욕 LiDAR 지도 데이터 예시 ····· 57
그림 3-8 | 미국 뉴욕시 트리 맵 ····· 58
그림 3-9 | 싱가포르 전경 ····· 59
그림 3-10 | 파크커넥터 ····· 60
그림 3-11 | 호주 멜버른의 로얄 보타닉 가든 ····· 61
그림 4-1 | 실증분석 및 모의실험의 흐름도 ····· 66
그림 4-2 | 분석대상의 공간적 범위 ····· 69
그림 4-3 | 도시열섬 저감의 공간적 범위 ····· 75

CHAPTER 1

연구의 개요

1. 연구 배경 및 목적 ····· 3
2. 연구의 흐름도 ····· 6
3. 연구의 기대효과 ····· 8
4. 연구의 범위 및 방법 ····· 9
5. 선행연구와의 차별성 ····· 12

01 연구의 개요

1. 연구 배경 및 목적

1) 연구의 배경 및 필요성

지구온난화로 폭염·폭설·태풍·산불 등 이상기후 현상이 세계 곳곳에서 나타나고 있다. 국제사회는 기후변화 문제의 심각성을 인식하고 이를 해결하기 위해 선진국에 의무를 부여하는 '교토의정서' 채택(1997년)에 이어, 선진국과 개도국이 모두 참여하는 '파리협정'을 2015년 채택하였고, 국제사회의 적극적인 노력으로 2016년 11월 4일 파리협정이 발효되었다(대한민국 정책브리핑, 2021b).

파리협정의 목표는 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승을 2℃보다 훨씬 아래로 유지하고, 나아가 1.5℃로 억제하는 것이다(대한민국 정책브리핑, 2021b). 일반적으로 지구의 온도가 2℃ 이상 상승할 경우, 보통의 인간이 감당할 수 없는 자연재해가 발생한다고 알려져 있다(대한민국 정책브리핑, 2021b).

한편, 상승온도를 1.5℃로 제한할 경우 생물다양성·건강·식량·안보·경제에 대한 위험은 대폭 감소한다(대한민국 정책브리핑, 2021b). 이에 따라 기후변화에 관한 정부간 협의체 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2100년까지 지구 평균온도 상승폭을 1.5℃ 이내로 제한하기 위해서는 전지구적으로 2030년까지 이산화탄소 배출량을 2010년 대비 최소 45% 이상 감축하고, 2050년경에는 탄소중립(Net zero)을 달성해야 한다는 목표를 제시하였다(대한민국 정책브리핑, 2021b).

이후 유럽연합(EU)를 주축으로, 전세계는 탄소중립을 향해 경주 중이다. 유럽연합과 영국, 일본 등은 2050년에 탄소중립을 달성하겠다는 목표를 선언하고 이에 대한

법제화를 추진 중이며, 스웨덴(2017), 영국·프랑스·덴마크·뉴질랜드(2019), 헝가리(2020) 등 6개국이 탄소중립을 법제화를 완료하였다(대한민국 정책브리핑, 2021b). 미국도 2050년까지 탄소중립을 이루겠다는 목표를 공식적으로 문서화하였고, 2021년 11월에 탄소중립 달성을 위해 추진할 장기적 전략(The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050)을 발표하였다(S&T GPS, 2021). 또한 중국과 러시아는 2060년을, 인도는 2070년을 목표로 탄소중립을 달성하겠다는 목표를 선언하였다(대한민국 정책브리핑, 2021b; 환경부 2022).

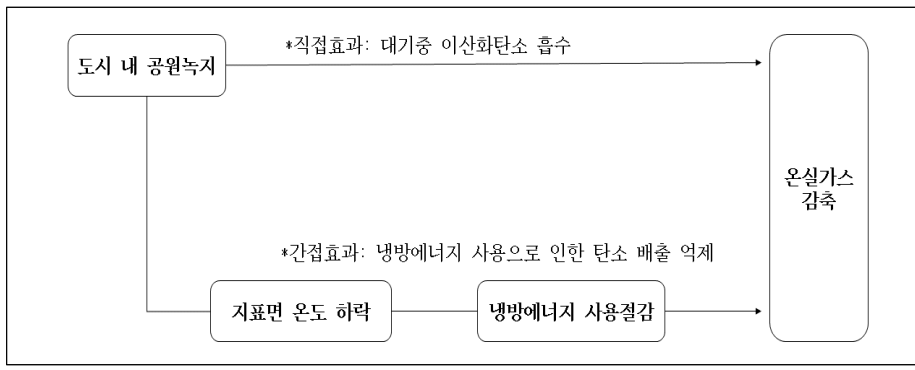
우리나라는 2020년에 '2050 탄소중립 계획'을 처음 발표하였고, 같은 해 12월에 '2050 탄소중립 추진전략'을 확정·발표하였다. 이를 통해 2030년까지 2018년 대비 온실가스 총배출량을 40% 감축하고, 2050년에는 탄소중립을 실현하는 것을 목표로 설정하였다. 향후 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 흡수원 등 7대 분야에서 감축수단과 비중은 변경될 수 있지만, 2050년을 목표로 하는 탄소중립의 정책 기조는 지속될 것으로 전망된다(대한민국 정책브리핑, 2021b; 환경부 2022).

2022년 3월, 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(약칭:탄소중립기본법)」이 시행되었다. 이 법 제10조에 따라 정부는 5년마다 20년을 계획기간으로 하는 '국가 탄소중립 녹색성장 기본계획(이하 국가기본계획)을 수립해야 하며, 광역 및 기초지자체는 제11조에 의해 5년마다 10년을 계획기간으로 하는 '시·도 탄소중립 녹색성장 기본계획(이하 시·도 계획)'을 수립해야 한다. 또한 정부는 36조를 근거로 온실가스 종합정보관리체계를 구축하고, 시·도지사 및 시장·군수·구청장은 지역별 온실가스 관련 정보 및 통계를 매년 작성하여 제출하는 등 적극 협력할 의무가 있다. 즉, 탄소중립을 실현하기 위해 국가 차원의 부문별 정책이 마련되고 있으며, 이에 따라 도시 및 지자체 단위에서도 효율적인 감축 방안을 마련하기 위한 논의가 필요한 것이다.

한편, '탄소흡수원'은 2030 NDC 및 탄소중립 시나리오 등 정부의 주요 정책문건에 공통적으로 포함된 중요한 감축부문이다. 주요 탄소흡수원인 도시 내 공원녹지는 도시 열섬을 완화시키는 등 미기후를 조절함으로써 주변 지역의 냉방에너지 수요를 절감하

고, 그에 따른 배출량을 감축하는 효과가 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 정부의 주요 정책에서 제시된 도시 내 탄소흡수원에 관한 전략은 구체성이 미흡한 실정이다. 따라서 탄소중립을 실현하기 위해서는 도시 차원에서 탄소흡수원을 확충하고 관리하는 방안을 마련하고, 이를 국토·도시계획에 반영할 필요가 있다.

그림 1-1 | 온실가스 감축에 관한 공원녹지의 직·간접 효과



자료: 저자 작성

2) 연구의 목적

본 연구의 목적은 온실가스 감축에 있어 탄소흡수원의 직·간접적인 역할을 파악하여, 공간계획 관련 법제도의 개선방안을 제시하는 것이다. 이를 위해서 도시 내 탄소흡수원을 중심으로 온실가스 감축에 대한 모의실험을 수행하고, 바람직한 탄소흡수원 조성 방안과 이를 실행하기 위한 국토·도시계획 수립 단계별 개선 방안을 제시하였다.

보다 세부적으로 본 연구에서는 국토·도시계획에 적용가능한 공원녹지 분야의 온실가스 감축 방안을 탐색하기 위하여 국내외 사례와 선행연구를 검토하고, 실증사례 분석과 모의실험을 진행하였다. 이후 국토·도시계획의 수립과정을 '조사, 작성, 평가, 모니터링'의 네 개 단계로 구분하고, 단계별 계획의 한계점과 개선방안을 제시하고자 한다.

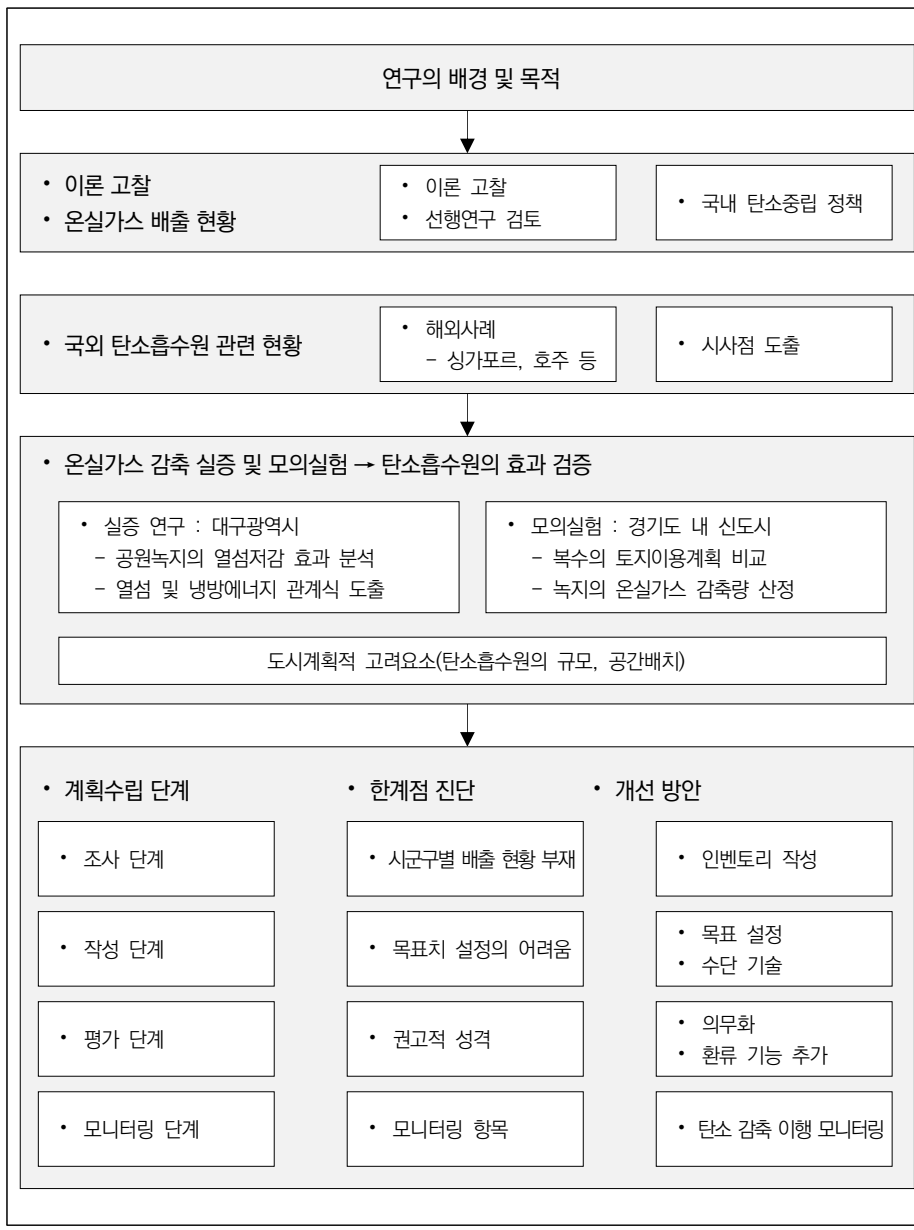
2. 연구의 흐름도

제1장에서는 전 지구적 목표인 탄소중립을 달성하기 위해 탄소흡수원 조성에 관한 전략을 국토·도시계획 반영할 필요성이 있음을 밝혔다. 제2장에서는 이론과 선행연구, 국내 온실가스 배출현황과 탄소중립 정책을 살펴봄으로써 국토·도시계획 차원의 탄소흡수원 관련 과제를 탐색하였다. 제3장에서는 탄소흡수원 확충·관리를 위한 국외 사례를 고찰하고, 국내에 적용할 수 있는 시사점을 도출하였다. 국외 사례는 싱가포르, 호주 등을 살펴보았다.

제4장에서는 온실가스 감축 실증 및 모의실험을 통해 탄소흡수원의 효과를 검증하였다. 실증연구는 대구광역시를 대상으로 진행하였고, 공원녹지의 열섬저감 효과를 분석하고 열섬 및 냉방에너지의 관계식을 도출하였다. 모의실험은 경기도 내 하나의 신도시를 대상으로 하였고[1], 복수의 토지이용계획을 비교하고 녹지의 온실가스 감축량을 선정하였다. 또한 실증연구와 모의실험 결과를 토대로 도시계획적으로 고려해야 하는 요소들을 도출하였다. 제5장에서는 현행 국토·도시계획수립 단계를 검토하여 탄소흡수원 전략에 대한 한계점을 진단하고, 개선방안을 도출하였다. 마지막 결론 부문에서는 연구의 주요 결과 기대효과를 요약하고 향후 수행해야 할 연구과제를 제시하였다.

1) 경기도 내에 위치하며, 현재 계획 중에 있어 구체적인 지명은 생략함

그림 1-2 | 연구의 흐름도



자료: 저자 작성

3. 연구의 기대효과

1) 학술적 기대효과

본 연구는 실증분석과 모의실험을 통해 탄소흡수원의 역할을 규명함으로써 탄소중립에 관한 학술분야에 기여할 수 있다. 특히 시계열적인 자료를 확보할 수 있는 사례지역으로 대구광역시와 경기도 내 하나의 신도시를 선정하였다. 이를 대상으로 공원녹지의 도시 열섬 저감 효과를 분석하고, 온실가스 감축량을 산정함으로써 탄소흡수원의 온실가스 감축에 대한 간접적 효과를 분석할 수 있었다.

2) 정책적 기대효과

본 연구는 다음과 같은 두 가지 측면에서 정책적으로 기여할 수 있다. 첫째, 탄소흡수원 부문의 도시계획적 대응방안을 마련하여, 국가적 목표인 2050년 탄소중립 달성에 기여할 수 있다. 실증연구와 모의실험을 통해 탄소흡수원의 형태와 위치에 따른 탄소감축량을 파악하고, 탄소흡수원 관련 도시계획을 수립하는 데 있어 과학적인 근거를 마련하였다.

둘째, 탄소중립 정책 및 사업 간 연계에 도움을 주어 탄소중립을 위한 정책을 보다 효과적으로 추진하는 데 기여할 수 있다. 국내 도시 공간 내에서 온실가스 감축을 다루는 법제도는 탄소중립기본법 상의 '탄소중립도시 조성사업'과 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률(이하, 국토계획법)」에 따른 '탄소중립을 고려한 도시계획 수립'으로 구분된다. 이상적인 정책방향은 이원화된 법제도의 연계 혹은 연동이며, 본 연구의 결과물을 고려하여 계획을 수립하고 사업을 시행한다면, 두 체제의 법제도는 자연스럽게 연계되어 더 큰 시너지 효과를 낼 수 있을 것으로 기대된다.

4. 연구의 범위 및 방법

1) 연구 범위

(1) 공간적 범위

본 연구의 실증 사례 분석 대상지는 대구광역시로 선정하였다. 대구광역시는 우리나라 대표적인 내륙 분지형 도시로, 도시열섬 완화와 미세먼지 저감, 기후변화대응 등의 비전을 가지고 1990년대부터 도시 녹화 사업을 꾸준히 추진하고 있다. 대표적인 사업은 1996년부터 추진중인 '푸른대구 가꾸기'로 현재 2026년을 목표로 하는 5차 사업을 통해 누적 6,000만 그루의 나무를 식재하고자 노력하고 있다(대구역사문화대전:달서구, 2023). 대구광역시는 이러한 지속적인 사업을 추진하면서 1990년부터 2019년까지 탄소흡수원 효과 분석에 필요한 온실가스 배출량 자료를 구축하였다는 점에서 사례 분석 대상지로 적합하다.

본 연구에서는 대구시의 녹지조성 사업 등에 따른 도시 내 녹지 유형 및 패턴 변화를 확인하고 이로 인한 도시 표면온도 변화 및 에너지 사용량의 변화를 분석하고자 한다.

한편, 본 연구의 모의실험 분석 대상지는 경기도 내 신도시로 선정하였다. 본 신도시는 연안지역에 위치한 신규개발 예정도시이다. 본 연구는 신규 개발지를 대상으로 이전의 계획안과 탄소감축의 관점에서 작성된 계획안을 비교하여 탄소흡수원의 온실가스 감축 효과를 정량적으로 산정하였다. 또한 대구광역시의 실증사례 분석에서 도출된 정량적인 감축 효과를 신도시에 적용하여 바람직한 토지이용 방안을 모색하였다.

(2) 시간적 범위

본 연구에서 대구광역시를 대상으로 하는 실증사례 분석은 2019년과 2020년을 기준으로 하였다. 도시열섬 분석과 건물 냉방에너지 분석은 2019년을, 공원과 녹지 현황정보는 2020년 자료를 활용하였다. 또한 신도시 계획안을 대상으로 하는 모의실험 분석은 계획의 목표 기간을 기준으로 분석하였다.

(3) 내용적 범위

첫째, 지구 온난화와 탄소중립 관련 이론을 고찰하여 온실가스 감축의 필요성과 탄소중립의 개념을 정립하고, 탄소흡수원으로 공원녹지의 온실가스 감축 효과를 다룬 선행연구를 검토함으로써 연구의 차별성을 도출하였다.

둘째, 해외국가 중 국토·도시계획 차원에서 탄소흡수원을 확충하고 관리한 사례를 조사하고 시사점을 도출하였다. 또한 우리나라의 부문별 탄소중립 정책을 고찰함으로써 국내 온실가스 배출 현황과 국가 차원의 부문별 탄소중립 정책 현황을 파악하고, 이를 기반으로 시사점과 과제를 도출하였다.

셋째, 실제 도시 녹지조성을 통한 온실가스 감축 효과를 검증하기 위해 실증사례 분석을 시행하였다. 대구광역시를 대상으로 도시열섬 현상을 완화시키는 공원녹지의 영향 범위, 도시열섬 현상지표면 온도 및 에너지 사용량 간 상호관계, 녹지 조성으로 인한 온실가스 감축량 등을 분석하였다.

넷째, 모의실험을 통해 공간단위의 온실가스 감축효과를 도출하였다. 대상지는 경기도 내에 위치한 신도시이며, 개발사업 내 탄소흡수원의 확충 및 배치 등 탄소감축 수단이 적용된 시나리오를 설정하고 이를 기존 계획안과 비교함으로써 온실가스 감축량을 분석하고, 이를 해석함으로써 실효성 있는 국토·도시계획적 탄소중립 수단을 발굴하고자 하였다

다섯째, 국토·도시계획 차원에서 탄소흡수원 관련 내용을 반영하기 위해, 현행 법령상 국토·도시계획 작성과정을 단계별로 나누어 살펴보았다. 단계는 '조사 - 작성 - 평가 - 모니터링'의 4개로 나누었고, 각 단계별 한계점과 개선사항을 정리하고 법제도상의 개선 방안을 모색하였다.

2) 주요 연구방법

(1) 도시·녹지조성의 온실가스 감축 사례 분석(실증 연구)

실증연구는 대구광역시를 사례지역으로 하며, 탄소흡수원의 온실가스 감축에 대한 역할을 규명하는데 목적이 있다. 도시 녹지조성으로 인한 온실가스 감축효과를 살펴보기 위해 대구시 내 서구와 중구의 지표면 온도 데이터, 전기 에너지 소비 데이터, 토지피복도 등의 데이터를 분석하였다. 지표면 온도는 Landsat 인공위성 영상을 활용하여 산출하였고, 2011년부터 월별 건물에너지 사용량을 도출하였다. 이를 통해 지표면 온도, 토지피복도, 전기에너지 사용량 지도를 중첩하여, 녹지의 면적과 형태, 녹지와의 거리에 따른 지표면 온도와 에너지 사용량 간의 관계를 분석하였다.

(2) 신도시 대상 흡수원의 감축효과 분석(모의 실험)

모의실험의 목적은 신도시를 대상으로 탄소흡수원의 적용 시나리오를 작성하고, 시나리오별로 직·간접적인 온실가스 감축효과를 정량적으로 평가하는데 있다. 사례 대상지에 대해 탄소중립을 크게 고려하여 작성하지 않았던 이전의 토지이용계획과 탄소중립을 고려하여 작성한 토지이용계획 도면을 확보하였고, 각 계획안에 대구시의 분석에서 도출된 녹지의 에너지 절감량을 적용함으로써 최종적인 온실가스 감축량을 산정하였다.

(3) 문헌 검토 및 전문가 자문

문헌 검토 및 전문가 자문을 통해 국토종합계획, 광역도시계획, 도시·군기본계획, 지구단위계획 등에서 다루고 있는 온실가스 감축 관련 내용을 살펴보고, 과제를 도출하였다. 외국에서 국토·도시계획 차원에서 온실가스 감축 방안을 추진하고 있는 사례를 조사하고, 관련 전문가의 자문을 받아 우리나라에 적용가능한 시사점을 제시하였다.

5. 선행연구와의 차별성

국내에서도 탄소중립에 대한 논의가 시작되면서, 온실가스 감축을 위한 국토·도시계획 작성 및 감축수단 발굴을 다룬 일부 연구가 진행되었다. 최영국 외(2008)는 지역별 온실가스 배출량을 추계하고 지역의 탄소관리 방안을 제시하였다. 이를 위해 시군구 단위 연도별·흡수원·도시인구규모별 온실가스 배출량을 산정하고, 온실가스 배출 인벤토리 작성 및 토지용도별 이산화탄소 배출원단위 산정방법을 모색하였다.

왕광익 외(2016)는 신(新)기후변화체제에 대비하기 위해 문헌조사와 해외사례 조사, 설문조사, 전문가의 자문 등의 방법을 활용하여 도시공간 차원에서의 정책방향을 도출하였다. 이정찬 외(2020)는 온실가스 감축을 위해 건물·토지공간 활용 전략을 제시했는데, 특히 공간단위 모델 구축 및 시나리오 분석을 통해 건물용도에 대한 단계별 온실가스 배출량 제한수준을 제시하고 기대효과를 도출하였다.

박종순 외(2022)는 탄소중립 실현을 위한 국토교통 분야의 중장기 추진전략과 실천과제를 발굴하였는데, 주로 건물·수송부문의 감축경로와 감축전략 및 수단을 분석하였다. 신서경 외(2022)는 국내외 탄소중립을 위한 도시정책과 도시공간조성 사례를 조사하였고, 이를 통해 도시의 부문별 탄소배출 저감방안, 제도적 추진전략, 정책 거버넌스 등을 제안하였다.

이들 선행 연구는 일부 사례지역을 분석하여 건물 및 토지를 활용한 감축 전략을 제시하거나 국내외 사례 조사를 통해 도시정책 개선 방안을 도출한 바 있으나, 도시 차원에서 공간적 접근을 통한 온실가스 감축 효과를 실증한 연구는 드물다. 이에 따라 도시공간 차원의 흡수원 부문에서 탄소감축 수단의 간접적 효과에 대한 분석이 미흡하고, 이를 구체적으로 반영한 도시계획 수립 가이드라인도 마련되어 있지 않은 실정이다.

반면에, 본 연구는 도시 혹은 지구단위 차원에서 공간적 맥락을 고려한 탄소흡수원의 역할을 규명한다는 점에서 선행연구와 차별성을 갖는다. 또한 효과적인 탄소흡수원의 공간적 배치 방향을 제시하며, 이를 국토·도시계획과 관련한 법제도에 반영할 수 있는 방안을 모색하였다(<표 1-1, 1-2> 참조).

표 1-1 | 선행연구와 본 연구의 차별성(1)

연구 내용		선행 연구					본 연구
		최영국 외('08)	왕광익 외('16)	이정찬 외('20)	박종순 외 ('22)	신서경 외('22)	
정책 방향 연구		√	√		√		√
계획 작성 및 감축 수단 발굴	인벤토리 작성	√					
	국외 사례	√	√	√	√	√	√
	탄소흡수원 공간 배치에 대한 모의실험			√			√
	제도적 개선 사항			√		√	√

자료: 저자 작성

표 1-2 | 선행연구와 본 연구의 차별성(2)

구 분		선행연구와 차별성		
		연구목적	연구방법	주요연구내용
주요 선행 연구	1	• 과제명: 기후변화에 대응한 지속가능한 국토관리 전략 (Ⅰ) 지역별 온실가스 인벤토리 구축 및 지역특성 분석 • 연구자(년도): 최영국 외(2008) • 연구목적: 지역별 온실가스 배출량 추계 및 지역 탄소 방안 제시	• 국내외 문헌조사 • 해외사례 분석 • 통계 및 계량분석 • 실증분석	• 기후변화 현황 및 정부 대응동향 분석 • 해외 기후변화정책 사례 검토 • 시군구 단위 연도별, 배출·흡수원별, 도시 인구규모별 온실가스 배출량 산정 • 온실가스 배출 인벤토리 작성 및 토지용도별 CO_2 배출원단위 산정방법 모색
	2	• 과제명: 신기후변화체제 대비한 도시공간정책 및 관리방향 연구 • 연구자(년도): 왕광익 외(2016) • 연구목적: 신(新)기후변화체제에 대비하기 위하여 도시공간 차원에서의 정책방향과 향후 지속적인 관리 운영이 가능한 방향 제시	• 문헌조사 • 해외 사례 조사 • 설문조사 • 전문가 자문	• 신(新)기후변화체제와 교토의정서와의 차이 • 교토의정서 체제에서의 도시공간 정책 및 관리방향의 동향 검토 • 신(新)기후변화체제에 대비한 도시공간의 정책방향
	3	• 과제명: 건물 분야 온실가스 감축을 위한 건물·토지공간 활용 전략 • 연구자(년도): 이정찬 외(2020) • 연구목적: 건물부문 온실가스 감축 목표 달성을 위한 전략방안 제시	• 문헌 및 이론조사 • 온실가스 관련 법제도·정책 및 배출·감축 현황 분석 • 공간단위 모델 구축 및 시나리오 분석 • 전문가 자문	• 건물부문 온실가스 배출량 방법론 및 감축 전략 관련 이론·선행연구 조사 • 국내외 건물 온실가스 배출 현황, 감축 정책 및 사례 분석 • 건물용도에 대한 단계별 온실가스 배출량 제한수준 제시 및 기대효과 분석

구 분		선행연구와 차별성		
		연구목적	연구방법	주요연구내용
	4	• 과제명: 국토교통 2050 탄소중립 추진 전략 수립 • 연구자(년도): 박종순 외(2022) • 연구목적: 국토교통 분야 2050 탄소중립 실현을 위한 로드맵 수립 및 R&D 추진전략 마련	• 문헌조사 • 통계자료 수집·분석 • 감축 잠재량 도출 및 감축 경로 분석 • 전문가 자문 및 설문조사	• 국내외 탄소중립 관련 현황 및 정책 동향 분석 • 국토교통 분야 탄소중립 중장기 추진전략 수립 및 실천과제 발굴 • 건물·수송 부문 감축경로, 감축전략 및 수단 분석 • 로드맵 정책지원방안 및 R&D 추진 방향
	5	• 과제명: 탄소중립 실현을 위한 도시정책 및 공간조성 사례 연구 • 연구자(년도): 신서경 외(2022) • 연구목적: 탄소배출 저감형 도시공간 구조 개념 정립 및 탄소배출 저감과 중립 실현을 위한 정책수단 마련	• 문헌고찰 및 관련 통계자료 분석 • 협업 및 국민참여	• 국내외 탄소중립을 위한 도시정책추진과 도시공간조성 사례 비교 • 도시의 탄소배출 부문별 저감방안 • 도시차원의 탄소중립 실현을 위한 제도적 추진전략 • 도시의 탄소중립 지속을 위한 정책 거버넌스
본 연구		• 과제명: 모의실험을 통한 도시 내 온실가스 감축 방안에 관한 연구 • 목적: 도시공간 단위를 대상으로 온실가스 감축 모의실험(흡수원 부문)을 실시하고, 우리나라에 적용가능한 감축 수단 발굴 및 도시계획 수립 단계별 개선 방안 제시	• 문헌조사 • 법제도 및 정책 분석 • 국내외 사례 • 모의실험	•국내 부문별 탄소중립정책 고찰 • 도시 녹지조성으로 온실가스 감축 사례 분석(실증 연구) • 사례 지역을 대상으로 한 공간단위 온실가스 감축 모의실험 • 국토·도시계획 작성 단계별 한계점 및 개선 방안

자료: 저자 작성

CHAPTER 2

이론 고찰 및 선행 연구

1. 기후변화의 이해 ····· 17
2. 탄소흡수원의 역할 ····· 21
3. 시사점 정리 ····· 34

02 이론 고찰 및 선행 연구

본 연구는 도시 차원에서 기후변화에 대처하는 방안을 모색하는데 목적이 있다. 이를 위해 도시의 탄소흡수원이 온실가스 감축에 어떠한 역할을 수행할 수 있는지를 파악하고, 이와 관련하여 바람직한 흡수원 조성을 위한 도시계획의 수립과정의 단계별 개선방안을 제시하고자 한다. 도시 내 흡수원의 온실가스 감축 효과를 이해하기 위해서는 우선 온실가스 감축의 필요성과 도시 탄소흡수원의 역할에 대한 이해가 필요하다. 따라서 본 장에서는 인위적인 온실가스 배출로 인한 지구온난화, 도시 열섬 현상, 기후변화 완화를 위한 도시계획적 대응 방안을 고찰하였다.

1. 기후변화의 이해

1) 기후변화의 정의 및 온실가스 배출

일반적으로 '기상'이란 단기간의 날씨를 의미하는 것으로, 기온·강수량·풍향·풍속 등으로 측정된다. 반면 '기후'란 일반적으로 30년 이상의 기간 동안 나타나는 기상의 상태를 의미한다. 기후변화협의체(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)는 기후변화를 '오랜기간 동안 지속되면서 기후의 평균 상태나 그 변동 속에서 통계적으로 의미가 있는 변동'으로 정의하고 있다(2050 탄소중립위원회, 2021b: 29). 한편 UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)[2)]

2) UNFCCC는 기후변화에 관한 국제연합기본협약의 약칭으로, 유엔기후변화협약 혹은 기후변화협약 혹은 온실 기체에 의해 벌어지는 지구온난화를 줄이기 위한 국제 협약으로 알려져있음

는 기후변화를 '전 지구 대기의 조성을 변화시키는 인간의 활동이 직접적 또는 간접적인 요인으로 일어나고, 장기간에 걸쳐 관측된 자연적인 기후변동성에 추가하여 일어나는 기후의 변화(2050 탄소중립위원회, 2021b: 14)'로 정의하고 있다.

기후변화의 원인은 자연적인 원인(대규모 화산활동, 긴 주기의 태양활동 변화 등)과 산업혁명 이후 온실가스 배출이 많아지면서 생기는 인위적인 원인으로 나누어 볼 수 있다. 온실가스들은 지구의 표면 가까이에 열을 가두는 온실효과[3]를 발생시키고, 이로 인해 지구의 온도를 지속적으로 상승시킨다.

온실가스의 종류는 지구의 공기[4]에 포함되어 있는 이산화탄소를 비롯한 메타인(CH4), 아산화질소(N20)등으로 알려져 있으며, 우리나라 「탄소중립기본법」에서는 온실가스를 '이산화탄소(CO_2), 메테인(CH4), 아산화질소(N2O), 불화탄소(PFC), 주소화불화탄소(HFC), 육불화유황(SF6)으로 규정하였다. 2050 탄소중립위원회(2021b, p. 41)에 따르면 2019년 기준 온실가스 중 이산화탄소가 차지하는 비율은 배출량을 기준으로 73%에 달하며, 다음으로 메테인(CH4)이 19%의 높은 비중을 차지하였다. 이산화탄소는 주로 산업화에 의한 화석연료의 사용으로 발생되며, 메테인은 농축산 부문과 폐기물 부문에서 발생되는 것으로 알려져 있다.

전 세계에서 온실가스를 가장 많이 배출하는 국가는 중국(26%), 미국(13%), EU(9.3%), 일본(2.8%) 등이며, 우리나라는 전 세계 온실가스 총 배출량의 약 2%를 차지한다(UNEP, 2020. p.5). EU와 미국 등 선진국들은 1990년대 중반부터 기후변화에 큰 관심을 갖고 관련 정책을 추진하고 있으며, 이에 따라 지속적으로 온실가스 배출량이 줄어들고 있다. 우리나라의 경우, 2005년까지 온실가스 배출량이 증가했으나 2010년 이후부터는 정체하거나 감소하고 있다(온실가스종합정보센터, 2019, p.5).

이 기후변화협약은 1992년 6월 브라질의 리우데자네이루에서 체결되었고, 이산화탄소를 비롯하여 각종 온실 기체의 방출을 제한하고 지구온난화를 막는 데 주 목적이 있음

3) 지구가 반사하는 태양에너지보다 흡수되는 에너지양이 많을 때 발생하는 것으로 알려져 있음

4) 지구의 공기는 질소 78%, 산소 21%, 이산화탄소 0.2% 등으로 구성되어 있음

2) 도시와 기후온난화

전체 온실가스 배출량의 상당수는 도시에서 배출된다. 우리나라에서는 광역지자체 단위별로 온실가스 통계가 수집되며, 행정구역 내 농축산 부분 등이 포함되어 있어 도시 공간에서만의 정확한 배출량을 파악하는데는 한계가 있다. 이처럼 현재 도시에 대한 명확한 경계를 정하고, 이에 대한 국가의 온실가스 인벤토리가 작성되는 것은 아니기 때문에 도시 공간의 정확한 온실가스 배출량을 파악할 수는 없지만, 일반적으로 전체 배출량의 70% 가량이 도시에서 발생하는 것으로 알려져 있다(Science Based Targets, 2020, p. 3).

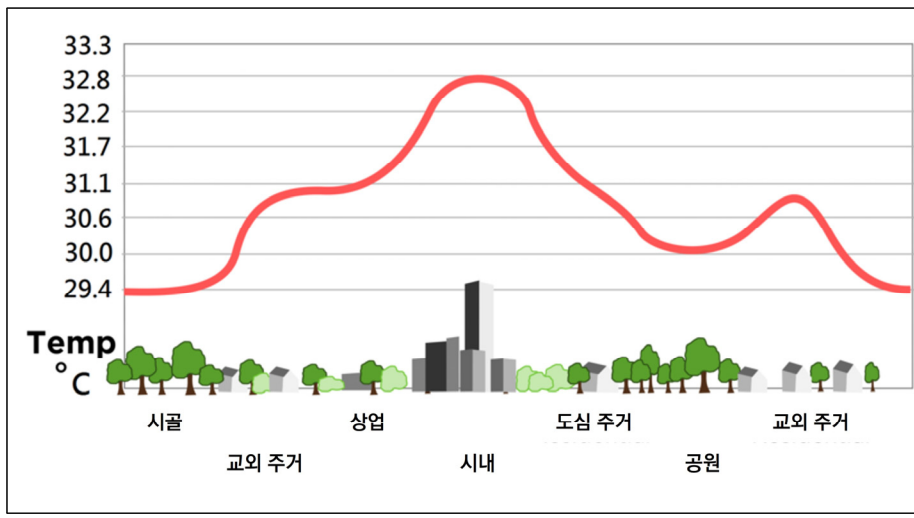
최근 도시화 혹은 도시적 토지이용이 증가함에 따라 도시가 주변 농촌지역보다 평균온도가 높은 현상이 발생되고 있다(환경부, 2022, p. 44). 기상청 보도자료(2021. 04. 28., p. 2)에 따르면 서울, 인천, 대구 등 대도시의 경우 최근 30년 평균기온이 과거 30년의 평균기온보다 높게 나타났다. 이에 비해 상대적으로 목포, 강릉 등 중소도시의 온난화 정도는 낮은 수준이다. 또한 도시 내부에서는 도시지역이 주변지역보다 온도가 높은 ' 도시열섬 현상 ' 이 나타나고 있다. 평균적으로는 도시가 주변지역에 비해서 약 2℃ 정도 기온이 높으며 도시의 규모가 크거나 시가화 건조지역의 수직적 발달 규모가 클수록 도시와 교외의 기온편차가 심한 편이다(안승만 외, 2016, p. 21).

표 2-1 | 6개 도시별 최근 30년과 과거 30년 평균기온 변화 추세

연평균기온(℃)	서울	인천	목포	대구	부산	강릉	평균
과거 30년	10.9	10.8	13.2	12.4	13.5	11.9	12.1
최근 30년	12.8	12.5	14.0	14.4	15.0	13.5	13.7
최근 30년~과거 30년	+1.9	+1.7	+0.8	+2.0	+1.5	+1.6	+1.6

주: 10년당 기온상승률: 대구 +0.26℃ 〉 서울 +0.24℃ 〉 인천·강릉 +0.2℃ 〉 부산 +0.18℃〉 목포 +0.1℃
자료: 기상청 보도자료(2021.04.28., p.2)

그림 2-1 | 도시열섬 현상의 개념 및 도시열섬 관측 연구



자료: U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2008, and refined by graphic artist The New Phobia, 검색일: 2022.08.23., https://www.crh.noaa.gov

2. 탄소흡수원의 역할

1) 탄소흡수원의 이해

자연의 탄소흡수원 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 산림으로, 지구의 산림면적은 육지의 33% 정도이며 매년 약 26억 톤의 이산화탄소를 흡수하여 기후변화 대응에 기여하고 있다(이우균, 2021, p. 58). 국제사회에서는 구체적으로 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타 토지를 온실가스 흡수원으로 보고 이들을 '토지이용, 토지 이용변화 및 임업(LULUCF: Land Use, Land Use Change and Forestry)' 범주로 묶어 온실가스 산정체계에 포함한다(이우균, 2021, p. 57). 우리나라는 아직 도시 내 흡수원 산정을 별도로 수행하고 있지 않고, 지목상 임야에 포함되는 필지를 탄소흡수원으로 보고 온실가스 흡수량을 산정하고 있다.

우리나라의 탄소흡수원은 2018년 기준 흡수원 부문 약 100만 톤이며, 흡수량은 점점 감소할 것으로 예상된다(2050 탄소중립위원회, 2021a, p. 45). 우리나라의 치산녹화 사업은 1973년에 시작되었고, 1970-1980년대 집중적으로 조림사업이 진행되었다. 이에 따라 숲의 나이가 증가하면서 순흡수량이 감소할 것으로 전망된다.

표 2-2 | 2018년 LULUCF 분야 온실가스 배출·흡수량 **(단위: 백만톤CO_2eq)**

분야	부문				배출·흡수총량		순흡수량
	산림지	농경지*	초지	습지*	배출	흡수	
LULUCF	- 45.6	4.0	- 0.02	0.3	4.3	- 45.6	- 41.3

* 음수는 흡수, 양수는 배출. 농경지와 초지에서는 배출하는 것으로 나타남
자료: 온실가스종합정보센터(2020, p.87)

현재 도시의 공원녹지, 하천숲, 학교숲, 가로수, 조경수 등은 온실가스 인벤토리 작성 시 탄소흡수원에 포함되지 않으므로 새로운 흡수원을 면적으로 확충해야 한다. 도시재개발이나 신규 택지조성사업, 신도시 개발 등을 추진할 때도 충분한 녹지를 확충

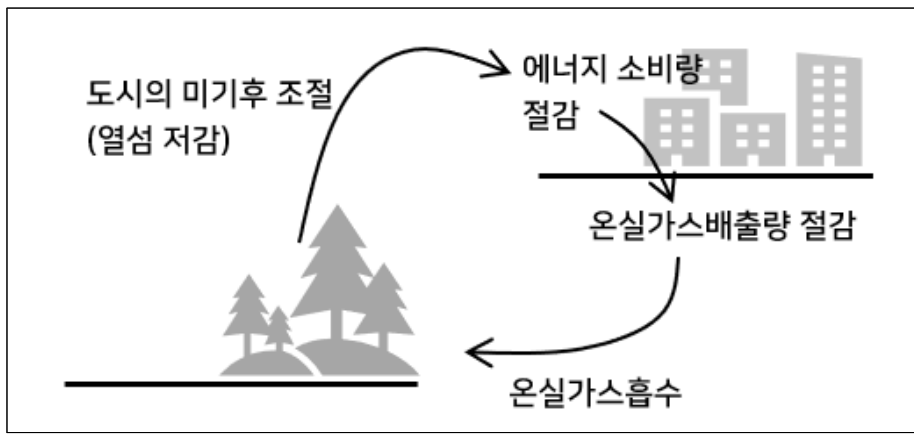
해야 하며, 도시 내 조림이 가능한 공간을 확보한 후에는 탄소흡수 능력이 높은 수종을 선택하여 식재하여 도시의 탄소흡수원을 최대한으로 확보할 필요가 있다(환경부, 2022, p. 166).

2) 공원녹지의 온실가스 감축 효과

공원녹지는 탄소중립을 달성하기 위한 두 가지 주요 접근법 ① 배출된 온실가스의 흡수, ② 온실가스의 감축 모두 활용할 수 있는 효과적인 수단이다. 먼저 본 연구는 배출된 탄소의 흡수를 공원녹지로 인한 온실가스 감축의 '직접효과'로 정의하였다. 공원녹지를 구성하는 식생은 공기 중 이산화탄소를 흡수하여 광합성 활동을 하며 성장하기 때문에, 이산화탄소의 격리수단으로 알려져 있다. 탄소중립 관련 정책문서 역시 공원녹지를 '흡수원'으로 정의하고 있다. 예를 들어 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」은 '탄소흡수원'을 "탄소를 흡수하고 저장하는 입목, 죽, 고사유기물, 토양, 목제품 및 산림바이오매스 에너지"로 정의하며, '2030 NDC'와 '2050 탄소중립 시나리오' 등 주요 정책문건에서는 온실가스 감축수단으로서 흡수원을 제시하고 있으며, 향후 도시 내 녹지의 확충이 필요함을 명시하였다.

두 번째로 탄소 배출량의 감축은 공원녹지의 간접효과로 볼 수 있다. 공원녹지는 도시열섬을 완화시키는 등 미기후를 조절함으로써 주변 지역의 냉방에너지 수요를 절감하고 그에 따른 배출량을 감축하는 효과가 있다. 공원녹지로 인한 주변지역의 온도저감, 또는 에너지 절감의 효과는 이미 통계적으로 확인되었으나, 온실가스 인벤토리에서는 고정에너지 중 건물 부문의 성과로 집계되므로, 본 연구에서는 공원녹지로 인한 온실가스 감축의 '간접효과'로 정의하였다. 또한 공원녹지의 미기후 조절효과는 기후변화 적응 부문의 주요 수단이기도 하다. 최근 유럽의 자연기반해법(Nature based Solution) 등에서는 공원녹지를 포함한 자연자원이 미기후조절, 탄소흡수 외에도 기후변화의 완화 및 적응에 필요한 다양한 기능이 있음을 강조하면서 '공편익(co-benefit) 효과'를 제시하였다.

그림 2-2 | 녹지의 기능, 서비스와 편익 간 관계



자료: 국토교통부(2022, p.5) 그림1-2 인용

3) 공원녹지로 인한 온실가스 감축의 직접효과

(1) 탄소 흡수·저장 효과

공원녹지는 탄소를 흡수·저장하며 온실가스를 직접적으로 감축하는 효과를 갖는다. 한미경 외(2014), 이동근 외(2010), 김경순 외(2016)는 공원녹지의 탄소 흡수 및 저장 효과를 실증하였다. 한미경 외(2014)는 천안시의 근린공원을 대상으로 식재유형별로 수목의 흉고직경, 근원직경, 수고, 식재면적, 개체수 및 식재면적 당 식재밀도 등을 조사하고, 해당 정보를 상대생장식에 적용함으로써 탄소흡수 및 저장량을 평가하였다. 식재유형은 크게 소나무 식재림, 상수리나무 군락, 상수리-아까시나무 식재림, 아까시나무 식재림의 4가지로 구분되는데(한미경 외, 2014, p.144), 상수리-아까시나무 식재림이 면적당 탄소흡수 및 저장량 각각의 비중이 42.5%, 48.5%로 가장 높았고, 소나무 식재림은 6.4%, 7.8%로 가장 낮게 나타났다(한미경 외, 2014, p.146).

표 2-3 | 천안시 근린공원의 식재유형별 탄소흡수 및 저장량

식재유형	기본 정보				단위면적당 흡수 및 저장량	
	평균 흉고직경(cm)	수목 개체수	수고(m)	식재면적(㎡)	저장량 (tC/ha)	연간흡수량 (tC/ha)
소나무	14.7	36	3-8.8	627	17.36	1.04
상수리나무	43.4	19	15-21	1,604	88.63	2.12
상수리-아까시나무	24.8	49	9-20	611.0	115.19	6.45
아까시나무	21.3	43	13-14	358.4	45.95	3.21

자료: 한미경 외(2014, p.146)의 자료를 활용하여 저자 작성

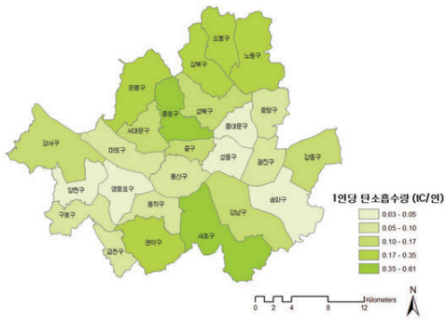
이동근 외(2010)는 서울시의 도시생태현황도의 정보와 상대생장식을 활용하여 탄소흡수량과 저장량을 평가하였다. 1인당 탄소흡수량, 행정구역 면적당 흡수량 등을 저탄소사회 구현을 위한 지표로 제안하였으며(이동근 외, 2010, p. 611), 도시 녹지의 면적을 평면 기준이 아닌 토지의 굴곡 등을 반영한 입체적 면적으로 산정하였고, 계획 등에 활용 가능한 지표를 제시하였다는 점에서 차별성이 있다.

표 2-4 | 서울시 행정구역별 녹지의 흡수량 평가결과

구분		성북구	중구	구로구	강서구	마포구	중랑구
인구수(만명)		48	6	17	58	39	17
행정구역 면적(ha)		2,438	1,005	1,983	4,281	2,463	1,794
녹지면적(ha)		847	176	469	1,224	434	571
흡수량 (tC)	수목	26,621	6,001	14,348	9,545	12,082	9,738
	토양	56,781	11,686	27,350	64,008	17,712	30,265
	계	83,402	17,687	41,698	73,553	29,794	40,003
1인당 녹지면적(㎡/인)		17	13	10	21	11	13
1인당 탄소흡수량(tC인)		0.17	0.13	0.09	0.13	0.07	0.09

자료: 이동근 외(2010, p.612)의 자료를 활용하여 저자 작성(본 연구와의 연계성이 낮은 순위변화량, 녹지면적 증가율, 주요녹지 평균 식피율, 수목 평균 흉고직경의 정보를 제외함)

그림 2-3 | 서울시 행정구역별 탄소흡수량 비교

서울시 구별 1인당 탄소흡수량(tC/인)	서울시 구별 면적대비 탄소흡수량(tC/㎡)
	

자료: 이동근 외(2010, p.612-613) 그림 인용

김경순 외(2016)은 전형적인 도시공원의 모습을 보이는 서울시 노해근린공원 및 상계근린공원과 자연지역에 위치한 불암산에 대해 식생의 순생태계 생산량(Net Ecosystem Production: NEP)[5] 등을 평가 및 비교하였다. 상계 근린공원과 노해근린공원의 식생지역에 한정한 순생태계 생산량은 0.2~1.4 tC/ha 이며, 기존에 알려진 아파트단지 내 녹지 수준과 유사한 것으로 나타났다(김경순 외, 2016, p.58). 그러나 근린공원 단위에서 식생이 없는 나지 지역까지 포함하는 경우 순생태계 생산량이 -1.1~0.6 tC/ha로서 흡수 효과가 미미하거나 배출원이 되는 결과가 도출되었다(김경순 외, 2016, p.58). 반면, 불암산의 신갈나무군락의 순생태계 생산량은 2.3t tC/ha로, 청주지역 또는 남산지역의 신갈나무 군락과 유사한 수준으로 나타났다(김경순 외, 2016, p.58).

김경순 외(2016)은 분석결과를 토대로 도시공원의 탄소흡수능을 향상시키기 위한 세 가지 전략을 제시하였다(김경순 외, 2016, p.58). 첫째, 다층식재는 탄소저감뿐만 아니라 대기오염 정화, 물순환 및 생물다양성 유지 등에 기여하므로 우선적으로 고려할 필요가 있다. 둘째, 양버즘나무, 백합나무 등의 속성수, 그 외 외래종은 탄소저감

5) 식생에 의한 탄소 흡수량에서 토양의 종속영양생물의 호흡에 의한 탄소의 배출량을 제외한 수치

및 장기적인 종 다양성 등을 위해 지양하는 것이 바람직하다. 셋째, 식생을 도입할 때 인공조림 보다는 자연복원의 관점에서 접근하는 것이 필요하다.

(2) 수종에 따른 탄소흡수량

일반적으로 탄소흡수량을 평가하는 방법은 크게 국립산림과학원에서 구축하여 배포하는 '산림수종의 표준 흡수량'을 활용하는 방법과 이관규(2003) 및 산림청(2020) 등에서 개발한 '흡수량 산정모델'을 활용하는 방법 두 가지가 있다. 먼저 국립산림과학원(2019)의 산림수종의 표준 흡수량은 '면적 단위(ha)', '그루 단위'로 제시되며, 강원지방 소나무, 중부 지방 소나무, 잣나무, 낙엽송 등의 연간 CO_2 흡수량 정보를 제공한다(국립산림과학원, 2019, p. 13). 만일 흡수량을 산정하고자 하는 수종의 정보가 제공되지 않는 경우, 유사한 수종의 평균값으로 대체하는 경우가 많다.

표 2-5 | 주요 수종별 연간 CO_2 흡수량 (단위 : 톤/ha/년)

수종	임령												
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
강원지방 소나무	7.5*	9.6	10.1	10.0	9.6	9.0	8.2	7.5	6.7	6.0	5.4	4.7	4.2
중부지방 소나무	3.5*	5.2*	6.9*	15.8	12.4	9.0	6.4	4.6	3.3	2.4	1.8	1.4	1.1
잣나무	5.4*	10.6	11.8	11.6	10.8	9.9	9.1	8.3	7.6	7.0	6.5	6.1	5.7
낙엽송	9.1*	9.4	10.5	10.0	9.5	8.9	8.5	9.1	7.9	7.6	7.5	7.3	7.2
리기다 소나무	4.5*	10.5	13.9	13.8	12.4	10.5	8.7	7.1	5.8	4.8	4.1	3.5	3.1
편백	5.2*	8.0	8.8	8.8	8.2	7.4	6.6	5.8	5.2	4.6	4.1	3.7	3.4
상수리 나무	11.2*	13.1*	15.9	14.9	14.0	13.1	12.3	11.6	10.9	10.4	9.8	9.3	8.9
신갈나무	8.6*	11.9*	15.0	11.8	9.3	9.1	8.4	7.9	7.5	7.1	6.8	6.5	6.3

*임분수확표에 없는 자료로 추정치를 적용;
자료: 국립산림과학원(2019, p.13)

이관규(2003)의 흡수량 산정식은 크게 중부지방, 남부지방에 대해 각각 제시하며, 산림청(2020)은 소나무, 전나무, 느티나무, 단풍나무, 왕벚나무, 이팝나무 등 수종별 산정식 뿐만 아니라 교목낙엽 및 고목상록에 대한 정보를 제공한다. 한편, 도시수목은 산림수목과 비교할 때, 개방 생장에 따른 경합이 감소하고 연간 관리에 의한 생장환경이 양호하기 때문에 동일 규격의 산림수목 대비 탄소흡수량이 다소 높은 특징이 있다.

표 2-6 | 주요 수종별 연간 CO_2 흡수량 산정식

		산정식	비고
수종	소나무	lnY=-2.6720+1.5251*lnDBH	lnY : 연간 탄소흡수량 (kg/tree/y) Y : 연간 탄소흡수량(kg/tree/y) DBH : 흉고직경(cm)
	전나무	lnY=-3.1386+1.6158*lnDBH	
	느티나무	lnY=-2.8177+1.7715*lnDBH	
	단풍나무	lnY=-0.9608+0.1535*DBH	
	왕벚나무	lnY=-3.0939+1.7702*lnDBH	
	이팝나무	lnY=-2.2695+1.7554*lnDBH	
분류군	교목(낙엽)	lnY=-2.6119+1.5686*lnDBH	
	교목(상록)	lnY=-3.7807+1.9347*lnDBH	

자료: 산림청(2020, p.40-41)

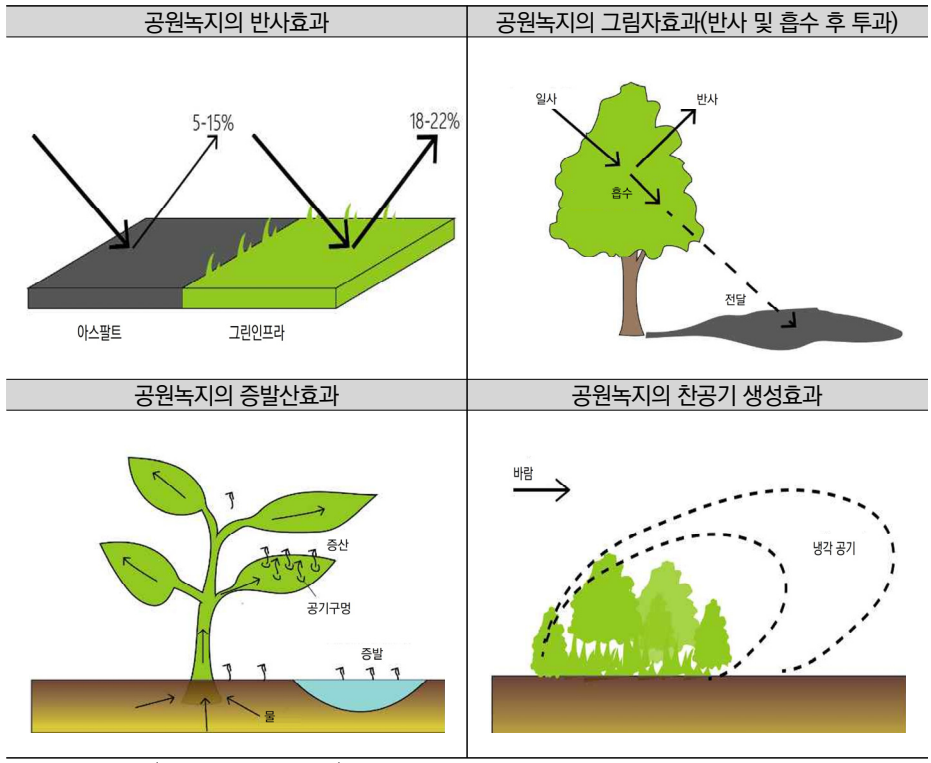
4) 공원녹지로 인한 온실가스 감축의 간접효과

(1) 도시열섬 완화 효과

공원녹지는 복사열을 아스팔트보다 더 높은 비율로 반사하고 그 외 20~40% 정도는 흡수하여 잠열로 변환한다. 이는 '그림자 효과(shading effect)'로 불린다(박채연 외, 2017, p. 71-73). 공원녹지의 높은 반사율은 상대적으로 표면온도가 낮아지는 효과와

연계되며, 잠열의 비중을 높이는 것은 현열을 저감하여 대기 온도를 낮추고 열 쾌적성을 높이는 것과 연계될 수 있다.

그림 2-4 | 공원녹지의 열섬저감 효과



자료: 박채연 외(2017, p.72, 74, 75) 그림 인용

문주연 외(2015, p. 122)에 따르면 동대문구 근린공원 중 하나인 배봉산의 대기온도 저감 효과를 측정한 결과, 배봉산과 그 인근지역의 온도차이는 최소 1~2도에서 최도 3도 이상이며, 배봉산에서 500m 반경까지는 기온저감 효과가 있는 것으로 나타났다(문주연 외, 2015, p. 123). 한편 김병찬 외(2020)가 서울시의 공원녹지와 지표면 온도를 인공신경망 모형을 통해 분석한 결과, 유의미한 관계가 있는 것을 발견하였다.

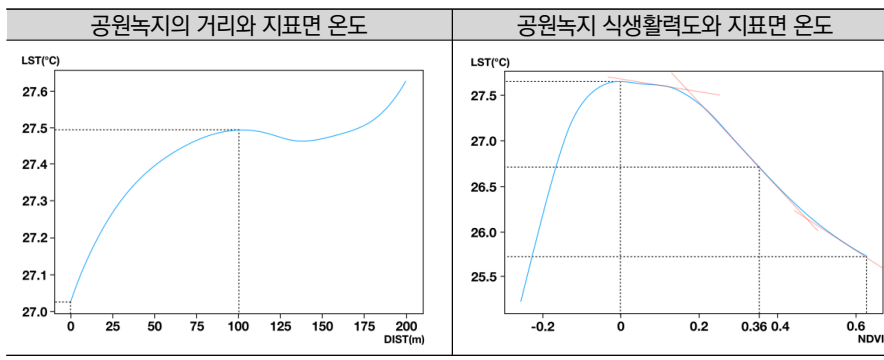
공원녹지 경계선에 가까울수록 지표면 냉각효과가 높아지며, 100m 지점(약 0.5℃ 저감) 이후부터는 녹지의 냉각효과는 나타나지 않았다(김병찬 외, 2020, p.24). 또한 공원녹지의 식생활력도(NDVI)도 냉각효과에 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 공원녹지의 식생활력도(NDVI)가 높을수록 냉각효과가 높아지며, 공원녹지의 평균 식생활력도는 0.36, 평균 냉각효과는 1℃ 정도였다(김병찬 외, 2020, p.25).

(2) 주변지역 온도저감 효과

상대적으로 낮은 온도를 갖는 공원녹지는 주변 지역의 온도저감에도 영향을 미쳤다. 이와 관련한 연구들은 공원녹지가 주변지역에 미치는 냉각효과강도(Park Cooling Intensity, PCI)를 산출하고 공원녹지 내부와 외부 간 온도 차이를 대기온도 또는 지표면 온도를 사용하여 거리효과(Park Cooling Distance, PCD)를 정의하였다(Oliveira et al, 2011; Jaganmohan et al, 2016).

Oliveira et al.(2011)은 녹지가 주변 공기 온도에 미치는 PCI를 조사한 결과 녹지 중심에서 260m까지 PCI 효과가 나타났으며, Jaganmohan. et al.(2016)은 독일 라이프치히의 62개 도시공원과 도시숲의 냉각효과를 분석한 결과 도시숲의 냉각효과가 더 크게 나타났으며 최대 거리효과는 공원이 391m, 도시숲은 469m로 추정하였다.

그림 2-5 | 공원녹지의 지표면 냉각효과



자료: 김병찬 외(2020, p.24-25) 그림 인용

국내의 경우 서울시의 공원녹지와 지표면 온도를 인공신경망 모형을 통해 분석한 결과, 녹지 경계선에 가까울수록 냉각효과가 컸으며 100m 지점(약 0.5℃의 저감) 이후부터는 녹지의 거리효과가 없는 것으로 나타났다(김병찬 외, 2020, p.24).

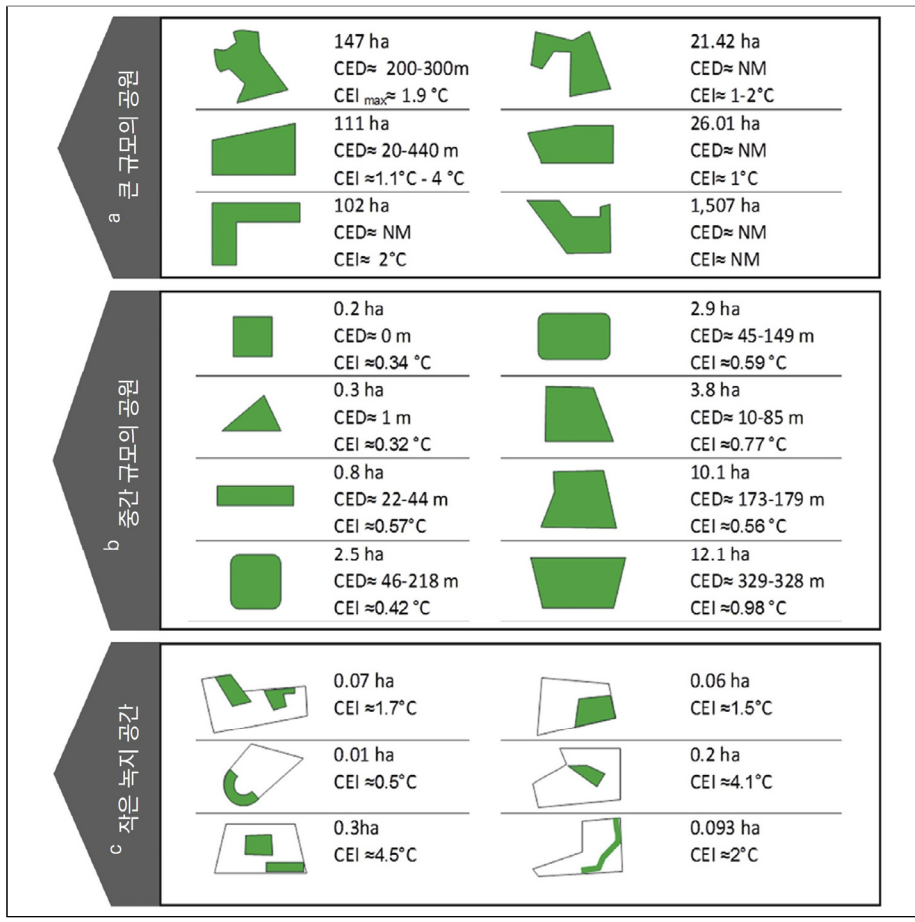
□ 공원녹지 크기에 따른 온도저감 효과

선행연구들은 공원녹지의 크기가 클수록 냉각효과강도가 더 크게 나타났고 거리효과에서는 크기가 클수록 반드시 더 먼 곳까지 냉각효과가 나타나지는 않았다.

고양시 일산을 대상으로 한 연구에서는 알베도(Albedo), 정규식생지수(NDVI), 정규시가화지수(NDBI), 토지이용특성, 고도 등을 통제 후 공원 크기에 따른 주변온도저감 효과를 다중회귀분석을 통해 분석하였다. 분석 결과 100,000㎡ 이상 공원(대형)이 가장 낮은 지표온도를 보였으나 6,000㎡ ~ 100,000㎡ 공원(중형)에 비해 30m당 지표온도 상승폭이 0.3℃ 더 높게 나타나 중형공원이 더 효과적임을 밝혔고 6,000㎡ 미만(소형) 크기의 공원에서는 의미있는 온도저감 효과를 기대하기 어려웠다(박종화·조기혁, 2016). 김병찬 외(2020, p.25)연구에서는 정규식생지수(NDVI), 정규시가화지수(NDBI), 건폐율을 외부요인으로 고려하여 분석하였고 공원의 면적이 커질수록 냉각효과가 높아지지만 일정 규모 이상이 되면 공원의 냉각효과가 일정해지므로, 0.85~1.2㎢의 공원이 가장 효율적인 것으로 나타났다.

Gao et al.(2022)에서는 미국의 5개 도시 내 384개 공원을 대상으로 냉각효율(Park Cooling Efficiency, PCE)를 분석한 결과 공원면적 당 냉각효율(PCE)은 오스틴이 2.37℃, 시카고는 1.34℃으로 나타나 더 작은 공원면적이 효율이 더 높은 것으로 나타났으며, 공원과 주변 환경의 공간적 특성에 따라 공원 조성전략(e.g. 시카고와 포틀랜드는 공원면적이, 오스틴과 로스앤젤레스는 녹지율이 중요)이 다를 수 있음을 보였다. Aram et al.(2019)는 선행연구그룹의 결과를 통해 20ha 이상(대형), 0.1ha~12ha(중형), 0.1ha 미만(소형)으로 공원 크기를 구분하였고 10ha 이상의 공원이 평균 냉각효과강도(Cooling Effect Intensity; CEI)와 거리효과(Cooling Effect Distance; CED)가 가장 높다고 결론지었으며 이는 공원 경계로부터 350미터 거리에 걸쳐 1~2°C의 저감효과를 보여주었다.

그림 2-6 | 온도 저감 효과 강도(Cooling Effect Intensity, CEI)와 온도 저감 효과 거리(Cooling Effect Distance, CED)



자료: Aram et al.(2019, p.19)

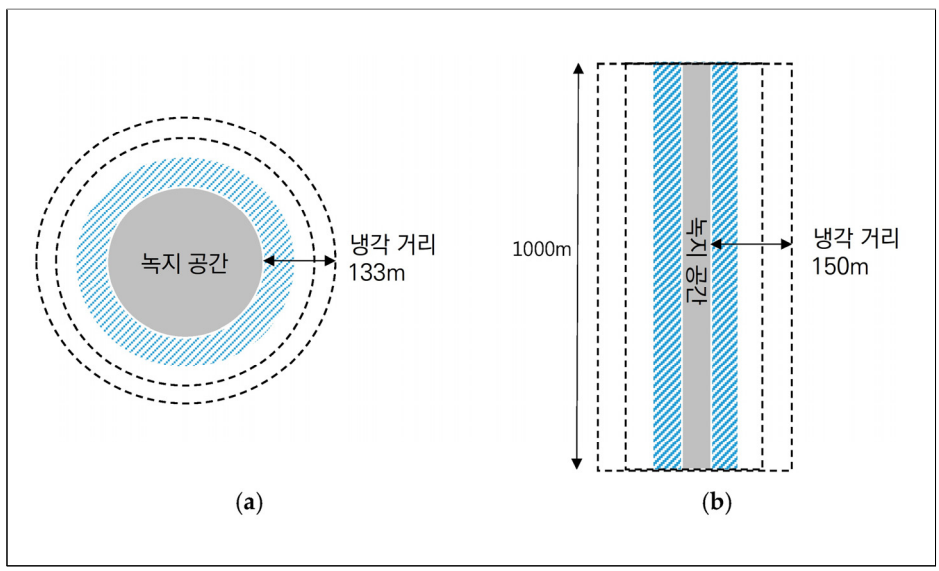
□ 공원녹지 형태에 따른 온도저감 효과

공원녹지의 형태는 크기와 함께 고려되었으며 공원녹지 둘레를 통해 정형(원형), 비정형, 선형 등으로 구분하여 주변 온도저감 효과를 평가하였다.

에티오피아 내 21개 공원의 냉각 효과를 조사한 Feyisa et al. (2014, p. 87)에서는

최대 6.72℃의 냉각강도, 최대 거리효과가 240m으로 나타났으며 불규칙적이고 긴 형태가 규칙적이고 조밀한 형태보다 더 높은 냉각효과가 있음을 밝혔다. 인도의 대도시 벵갈루루에 조성된 262개의 도시공원에 대한 냉각효과를 조사한 Shah et al. (2021)는 공원의 녹지율, 크기, 형태가 거리별 지표온도에 미치는 영향을 다중회귀분석하여 최소 318m에서 최대 376m까지 거리효과가 있었으며 공원의 형태가 원형과 비교했을 때 비정형 형태가 0.33℃ 더 큰 냉각효과가 있음을 보여주었다. 울산광역시 내 30개 공원녹지를 분석한 연구는 냉각효과가 미치는 거리가 평균 120m 내에서 관찰되었으며 냉각효과가 동일한 경우 원형의 조밀한 형태보다 선형이 더 긴 거리효과를 보여주었다(Park·Cho, 2016)

그림 2-7 | 공원녹지 형태에 따른 온도 저감효과 거리(Park Cooling Intensity(PCI) effect by distance)



자료: Park·Cho(2016, p.12)
주: 공원녹지 크기가 동일한 경우, 파란색 영역은 공원녹지로부터 50m의 냉각효과를 보여주고 선형이 거리효과가 더 큼

□ 공원녹지의 건물 에너지 소비 절감 효과

공원녹지가 주변지역 온도저감에 긍정적인 효과가 나타남에 따라 일부 연구는 공원녹지가 도시공간의 열환경을 개선함으로써 간접적으로 건물 에너지 소비에도 영향을 미칠 것으로 보고 공원녹지로부터 반경 내 지표온도와 전기에너지를 활용하여 에너지 소비 절감 효과를 분석하였다.

캘리포니아를 대상으로 한 연구는 녹지가 있는 지역은 연간 약 2.5% 정도의 냉방에너지 사용량이 절약되며 최대 10%까지 절약될 수 있음을 밝혔으며(McPherson·Simpson, 2003), Zhang et al.(2014)은 베이징 내 녹지의 냉각효과로 인해 에어컨 수요가 3.09×108kWh 감소되었고 전체 평균 에너지 소비량(Net cooling energy usage)과 비교하여 60%가 절약되었다는 것을 확인하였다. 또한 절약한 전기에너지는 발전소에서 발생하는 이산화탄소(CO_2) 배출량을 24.3만톤 감소시킬 것으로 예상하였다. Kong et al.(2016) 연구는 실측자료와 ENVI-met을 활용하여 캠퍼스 내 녹지 공간 포함 여부에 따른 시나리오를 비교한 결과, 녹지공간으로 인한 온도 감소 효과가 약 -0.5℃이며 전기에너지 감소량은 약 1.3×104 kWh로, 356대의 에어컨을 사용한 전기에너지와 동일한 양을 절약할 수 있음을 보여주었다

반면에 국내 연구는 건물의 용도를 구분하여 공원녹지의 간접효과를 분석하였다. 김기중 외(2018)은 주거 및 상업용 건물에 따라 공원으로 인한 건물에너지 소비 저감효과가 다르다는 것을 밝혔다. 그 결과 공동주택 지역은 공원크기와 무관하게 에너지 절감효과가 나타나지 않았고 상업용 건물에 한해 근린공원에서 영향범위가 최대 324.3m까지 효과가 있음을 보여주었다. 다만, 공원 주변의 에너지 소비에 직접적으로 영향을 미치는 건물 특성, 고도 등 외부요인을 회귀분석모델에 반영하지 못하여 공원 주변 지역의 에너지 소비 절감 효과를 밝히는데 한계점을 보였다. 또 다른 연구는 연립방정식을 활용하여 기온과 건물 에너지 소비의 영향 관계를 밝혔다(이수진 외, 2019). 서울시를 대상으로 필지별 전력소비량과 평균 기온에 영향을 미치는 건물용도 및 특성, 녹지율 등을 고려하여 분석한 결과, 상업용 건물이 주거·업무용 건물보다 건물에너지 소비량이 훨씬 많은 것으로 나타났으며 공원녹지에 인접한 건물들은 오히려 건물에너지 소비량이 많은 것으로 나타났다.

3. 시사점 정리

탄소흡수원의 하나인 공원녹지는, 탄소중립의 관점에서는 공기 중 탄소를 흡수하는 '직접 효과'와 도시 열섬완화를 통해 건물 부문의 배출량을 감축하는 '간접효과'로 구분이 가능하였다. 탄소중립도시를 구현하고자 공원녹지를 계획할 때에는 탄소중립에 대한 공원녹지의 기여도를 계량화하는 것이 중요한 데, 이 때 직접효과(탄소 흡수)와 간접효과(도시열섬 조절)를 통합적으로 다룰 필요가 있다.

직접효과(탄소 흡수)의 경우에는 공간적 분포보다는 공원녹지 내 식생면적의 비율, 식생을 구성하는 수종, 식재의 방식, 토양의 관리방식 등에 따라 흡수량이 달라진다는 점에 주안점을 둘 필요가 있다. 간접효과(도시열섬 조절)의 경우에는 같은 면적의 공원녹지더라도 크기와 형태에 따라서 냉각효과가 다르게 나타났으며 주변지역의 공간적 특성에 따라서 냉각효과가 미치는 거리(e.g. 100m~500m)가 다름을 확인할 수 있었다.

또한 공원녹지가 주변지역 온도저감에 긍정적인 효과가 나타남에 따라 일부 연구는 공원녹지 주변의 건물 에너지 소비에도 영향을 미칠 것으로 보았다. 녹지의 냉각효과는 에너지 사용을 줄여 탄소배출도 감소시킬 수 있을 것으로 보았다. 결과적으로 공원녹지는 주변지역의 온도를 저감시켜 간접적으로 건물 에너지의 절감에도 효과적일 수 있음을 보였으나, 도시환경과 기상조건 등에 따라서 다를 수 있어 공원녹지의 특성과 주변 공간적 특성 고려가 필요하다.

CHAPTER 3

국내외 탄소중립정책

1. 국내 온실가스 배출현황 ····· 37
2. 국가 차원의 부문별 탄소중립 정책 ····· 40
3. 지자체의 탄소중립 정책 ····· 45
4. 탄소중립 실현을 위한 해외 도시별 공원녹지 정책 ···· 48
5. 시사점 ····· 62

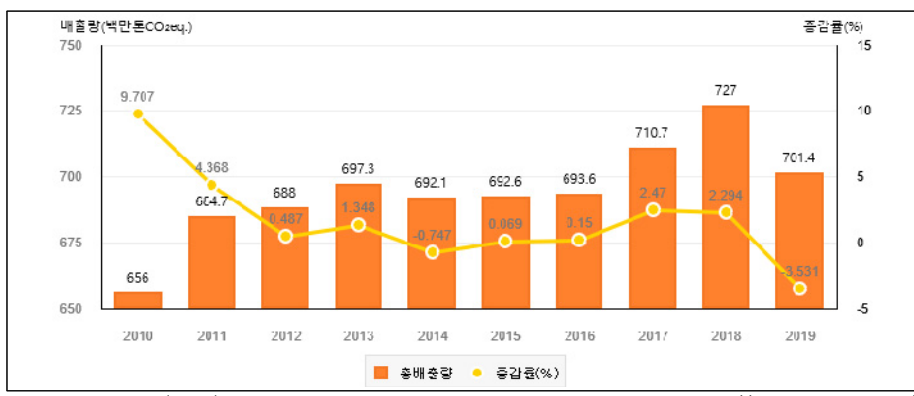
03 국내외 탄소중립정책

본 연구는 도시 내 탄소흡수원을 중심으로 도시 내 온실가스 감축 모의실험을 실시하고 관련 법제도의 개선방안을 제시하는 것을 목표로 한다. 이를 위해서는 먼저 국내 탄소중립정책 고찰을 통해 국내 온실가스 배출 현황, 국가 차원의 부문별 탄소중립 정책, 지차제의 탄소중립 정책부문을 다룬다. 그리고 해외 주요 도시들이 도시열섬 완화 및 온실가스 감축을 위해 추진한 도시공원녹지 조성 정책사례를 조사하여 우리나라에 적용가능한 시사점을 도출하고자 한다.

1. 국내 온실가스 배출현황

2019년 기준 우리나라의 온실가스 총배출량은 701.4백만tCO$_2$eq.으로 산정되었다. 1990년도 총배출량 292.2백만tCO$_2$eq.에 비해 140.1% 증가하였고, 2018년도 총배출량 727.6백만tCO$_2$eq.보다 3.5% 감소하였다(<그림 3-1> 참조). 2019년 순배출량(LULUCF 포함)은 661.8백만tCO$_2$eq.으로 1990년도 순배출량 254.4백만tCO$_2$eq.보다 160.1% 증가하였고, 2018년 순배출량 686.3백만tCO$_2$eq.보다 3.4% 감소하였다(<표 3-1> 참고).

그림 3-1 | 국가 온실가스 총배출량 및 증감률



자료: e-나라지표(2022), 국가 온실가스 배출현황 그래프, 검색일: 2022.3.28., https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1464

표 3-1 | 국가 온실가스 통계

분야	온실가스 배출량(단위: 백만tCO₂ eq.)						1990년 대비 증감률	2018년 대비 증감률
	1990년	2000년	2010년	2015년	2018년	2019년		
총배출량	292.1	502.7	656.0	692.6	727.0	701.4	140.1%	-3.5%
순배출량	254.4	443.7	601.3	647.0	685.0	661.8	160.1%	-3.4%

자료: e-나라지표(2022), 국가 온실가스 총배출량 및 증감률, 검색일: 2022.03.28., https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1464 자료를 활용하여 저자 작성

2019년 인구 1인당 온실가스 총배출량은 13.6tCO₂eq.으로 1990년도 대비 106.9% 증가하였으며, 2018년 대비하여 3.7% 감소하였다. 국내 총생산액(GDP) 10억원 당 온실가스 배출량(2019년 기준)은 379톤으로 1990년도 대비 41.1% 줄었고, 2018년 401.6톤에 비해 5.6% 감소하였다(<표 3-2> 참고).

표 3-2 | 1인당 및 국내총생산(GDP) 대비 온실가스 총배출량

분야	온실가스 배출량						1990년 대비 증감률	2018년 대비 증감률
	1990년	2000년	2010년	2015년	2018년	2019년		
1인당 총배출량 (tCO₂ eq.)	6.8	10.7	13.2	13.6	14.1	13.6	106.9%	-3.7%
GDP 당 총배출량 (tCO₂ eq./10억원)	643.4	556.5	460.1	417.7	401.6	379.0	-41.1%	-5.6%

자료: 온실가스종합정보센터(2020, p.59) 및 환경부 보도자료(2021.12.31., p.11)를 활용하여 저자 작성

기후변화협의체(IPCC) 지침에 따라 부문별로 국가 온실가스 배출량을 살펴보면, 2019년 기준으로 에너지 부문은 총 배출량의 87.2%로 가장 많은 비중을 차지하였다. 다음으로 산업공정 부문 7.4%, 농업 부문 3.0%, 폐기물 부문 2.4%이며, LULUCF 부문은 -39.6백만톤을 차지한다(환경부 보도자료, 2021.12.31., p.7-10). 부문별로 2018년 대비 2019년 온실가스 배출 증감량을 살펴보면 에너지 부문은 21.1백만tCO₂ eq.(3.3%), 산업공정 부문 3.8백만tCO₂eq.(6.8%), 농업 부문 0.1백만tCO₂

eq. (0.8%), 폐기물 0.6백만$tCO_2eq.$ (3.7%), LULUCF 부문은 2.5백만tCO_2 eq. (6.0%) 감소하였다(환경부 보도자료, 2021.12.31., p.11).

표 3-3 | 1990~2019년 국가 온실가스 부문별 배출량

(단위: 백만$tCO_2eq.$)

분야	1990년	2000년	2010년	2015년	2018년	2019년	1990년 대비 증감률	2018년 대비 증감률
에너지	240.3	411.6	565.7	600.7	632.6	611.5	154.5%	-3.3%
산업공정	20.4	50.9	52.9	54.3	55.8	52.0	154.3%	-6.8%
농업	21.0	21.4	22.1	21.0	21.1	21.0	-0.03%	-0.8%
폐기물	10.4	18.9	15.4	16.6	17.5	16.9	60.4%	-3.7%
LULUCF	-37.7	-59.0	-54.8	-44.4	-42.1	-39.6	5.0%	-6.0%

자료: 환경부 보도자료(2021.12.31., p.11)의 자료를 활용하여 저자 작성

2. 국가 차원의 부문별 탄소중립 정책

우리나라는 2021년 9월 24일 「기후위기 대응을 위한 탄소중립 녹색성장 기본법」을 제정하였고, 같은 해 10월에는 2030년 국가 온실가스감축목표(NDC; Nationally Determined Contribution)의 목표를 상향하였다. 새로 조정된 목표는 2018년 온실가스 배출량(686.3 백만톤CO_2eq)의 40%를 감축하는 것으로, 기존 26.3%에서 크게 조정되었다(<표 3-4> 참고). 목표연도까지 연평균 감축률은 우리나라가 4.17%로 주요국(EU 1.98%, 미국 2.81%, 영국 2.81%, 일본 3.56%) 대비 높은 편이다(대한민국 정부, 2021).

표 3-4 | 1990~2019년 국가 온실가스 부문별 배출량

(단위 : 백만톤CO_2 eq)

구분	부문	'18년	2030 NDC 상향안	최종본		비고
				A안	B안	
배출량		686.3	436.6	0	0	'18년 대비 감축률 △40%
배출	전환	269.6	149.9	0	20.7	‣ (A안) 화력발전 전면중단 ‣ (B안) 화력발전 중 LNG 일부 잔존 가정
	산업	260.5	222.6	51.1	51.1	
	건물	52.1	35.0	6.2	6.2	
	수송	98.1	61.0	2.8	9.2	‣ (A안) 도로부문 전기·수소차 등으로 전면 전환 ‣ (B안) 도로부문 내연기관차의 대체연료(e-fuel 등) 사용 가정
	농축수산	24.7	18.0	15.4	15.4	
	폐기물	17.1	9.1	4.4	4.4	
	수소	-	7.6	0	9	‣ (A안) 국내생산수소 전량 수전해 수소(그린 수소)로 공급 ‣ (B안) 국내생산수소 일부 부생·추출 수소로 공급
	탈루	5.6	3.9	0.5	1.3	
흡수 및 제거	흡수원	-41.3	-26.7	-25.3	-25.3	
	CCUS	-	-10.3	-55.1	-84.6	
	국외감축	-	-33.5	-	-7.4	‣ 포집 탄소는 차량용 대체연료로 활용 가정

자료: 관계부처 합동(2021, p.3) 인용

1) 에너지 전환

탄소중립을 달성하기 위해서 재생에너지의 비중을 높이고, 건물·수송·산업의 전력 수요를 감축·분산하는 등 정책적 지원을 다각화하고 있다. 정부는 친환경 전원으로 전환을 가속화하고 2030 NDC를 달성하기 위해 '9차 전력수급기본계획을 수립(2020. 12. 28.)' 하였고(산업통상자원부 보도자료, 2020), 재생에너지 공급비율 목표를 단계적으로 확대하여 2022년에는 발전 비중의 10%, 2030년에는 20%를 달성하도록 하였다. 2012년에는 재생에너지 보급을 의무화하기 위해 '신재생에너지 공급의무화(RPS)' 제도를 도입하였고, 한시적으로 소규모 재생에너지 사업자들에게 안정적인 수익 보장을 위해 발전차액지원(FIT)제도를 도입하였다(대한민국 정부, 2020, p. 36).

에너지 수요관리 정책은 산업(전체 전력소비량의 50%), 상업(30%), 주택(10%)의 에너지 소비를 줄여 이익이 되도록 하는 것이다. 동시에 에너지 가격 및 효율이 높은 기기의 가격 규제 정책을 통해 에너지 소비 단위를 줄이도록 하고 고효율 기기의 사용을 늘리는 등 간접적 효과를 유도하고 있다. 현재는 당장 화석에너지를 대체할 수 있는 수단이 부재하고 기술개발 등이 미흡하여 저탄소 원료 대체, 공장의 스마트화 등과 함께 산업구조 전환을 이뤄가며 단기간에 탄소중립을 달성해야 하는 상황이다. 또한 우리나라는 지리적, 계절적으로 불리한 자연조건을 가져 신재생에너지 비중을 높이는 데 제한이 있다. 따라서 수소에 기반한 연료전지나 무탄소 가스터빈 등의 대안적인 기술개발이 함께 이뤄질 필요가 있다.

2) 산업 부문

산업부문의 온실가스 감축은 원료·연료 전환을 통해 직접적인 에너지 사용을 줄이고, 배출량을 줄일 수 있도록 공정 과정을 개선하는 방법에 주목하고 있다. 이를 위해 '배출거래제', '목표관리제', '에너지 절약 전문기업 제도' 등을 추진하고 있다. '배

출거래제'는 온실가스 감축을 목표로 온실가스의 배출 권리를 시장을 통해 매매하게 하는 제도로 기업별 배출량에 따라 배출권 잉여업체와 부족업체 간 거래를 자유롭게 허용하는 것이다(국가온실가스 종합관리시스템, 2022). 이는 EU, 스위스 등에서도 시행 중인 제도이며 우리나라는 2012년「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」을 제정하여 제도적 기반을 마련하였다(대한민국 정부, 2020, p. 33-34). 2019년 12월에는 2030 NDC 목표 이행을 최우선으로 하는 제3차 계획기간(2021년~2025년)에 대한 배출거래제 기본계획을 수립한 바 있다(대한민국 정부, 2020, p. 35).

'목표관리제'는 배출거래제와 달리 비교적 온실가스 배출량이 적은 업체(3년간 평균 5만톤CO_2eq. 이상 업체)를 대상으로 하는 직접 규제방식의 제도로, 정부와 업체 간 협의를 통해 목표를 설정하는 방식이다. '에너지 절약 전문기업 제도'는 에너지효율을 높이기 위한 다양한 정책을 실시하고, 기업이 에너지 절약 및 수요관리를 체계적인 시스템으로 유도할 수 있는 에너지경영시스템을 구축하는 것으로, 정부 차원에서 1993년부터 2017년까지 2조 9천억 원, 총 4,358건을 지원하였다(대한민국 정부, 2020, p. 37). 2018년에는 에너지공급자 효율향상 의무제도(EERS, Energy Efficiency Resource Standard)를 시범사업으로 실시하여 에너지 수요자가 아닌 공급자에게 에너지 판매량에 비례한 에너지 절감 목표를 제시하게 하였다(대한민국 정부, 2020, p. 37). 우리나라의 산업구조는 제조업 중심의 에너지 다소비형으로 온실가스 감축에 한계가 있으며 규제와 함께 탄소저감 시설 투자 등에 대한 인센티브 개발도 필요할 것으로 보인다.

3) 건물 부문

주거 환경과 밀접한 관계가 있는 건물 부문에서는 건축물 에너지 사용을 최소화하고, 에너지 효율을 높이기 위한 제도적 기반을 마련하는 데 중점을 두어 정책을 시행하고 있다(환경부, 2022, p. 147). 신 건축물을 대상으로 하는 '제로에너지건축물 정책'은 2020년부터 연면적 1,000㎡ 이상의 공공건축물에 대해 시행되었던 제로에너지건축

물 인증을 2023년 1월부터는 연면적 5백㎡ 이상의 공공건축물과 30세대 이상 공공 분양·임대 공동주택 등으로 의무대상을 확대하고자 한다(2050 탄소중립위원회, 2021b, p. 77).

기존 건축물을 대상으로 하는 '그린리모델링 정책'은 노후된 건축물의 단열, 설비 등의 성능을 개선하여 에너지효율을 높이고 온실가스를 감축하는 건물 개량 사업이다. 그린리모델링 의무화 대상선정을 위해 2024년까지 관련 제도적·기술적 인프라를 구축할 예정이다(대한민국 정책브리핑, 2021a). 이외에 건물 에너지 사용을 효율화하기 위하여 스마트에너지 관리 정책으로 '에너지 이용 최적제어 통합관리시스템(HEMS·BEMS)'을 활용하고 저탄소·청정 에너지 보급 및 저온 지역난방 확대로 온실가스를 감축하고자 한다(환경부, 2022, p. 148-150). 하지만 건물 부문의 에너지효율을 확보하는 것이 탄소배출을 얼마나 감축시킬 수 있는지에 대해서는 아직 연구가 더 필요한 상황이다. 만약 효율성이 부족하거나 없다면 재생에너지 설비용량의 증가로만 이어질 우려가 있다.

4) 수송 부문

환경규제가 강화됨에 따라 수송 부문의 온실가스 배출을 줄이기 위해 친환경 교통수단의 전환, 수요관리강화 관련 정책이 시행되고 있다. 자동차 산업 분야에서는 온실가스를 배출하지 않는 전기, 수소차 등 무공해차로 전환을 가속하는 추세이다(2050 탄소중립위원회, 2021a, p. 64). 우리나라도 '한국판 뉴딜 종합계획(2020. 7.)'에 따라 2025년까지 수소차 20만 대와 전기차 113만 대를 보급하고자 하며, 보조금·충전인프라 구축·세금 혜택 등을 지원하고 있다(2050 탄소중립위원회, 2021b, p. 74). 환경부는 '자동차 평균 온실가스 관리제도'를 시행 중이며 산업부는 '자동차 평균 연비 관리제도'를 통해 자동차의 평균 배출량 감축과 연비 향상을 유도하고 있다(환경부 보도자료, 2020. 08. 30.).

수요관리 차원에서는 대중교통 및 개인 모빌리티 이용 확대, 공유 차량 이용 확대

등으로 2050 승용차 통행량을 2018년 대비 15% 감소시키는 것을 목표로 설정하였다(2050 탄소중립위원회, 2021a, p. 63). 이외에도 철도, 해운, 항공에 사용되는 화석연료를 바이오연료, LNG, 무탄소 동력을 이용하는 전기, 수소 등으로 전환하는 것을 계획하였다. 현재까지 승용차 이용을 대중교통 등 대체 수단의 이용으로 전환하는 데는 한계가 있으므로, 전기차, 수소차 중심의 자동차 산업의 개편에 따른 충전 인프라 구축 등 수송 부문의 탄소중립 전환생태계 구축이 요구되는 상황이다(환경부, 2022, p. 156).

5) 흡수원 부문

탄소중립을 실현하기 위해서는 온실가스 배출을 줄이는 것과 함께 온실가스의 흡수능력을 제고하는 것도 중요하다. 이에 따라 토지이용에 따른 온실가스 배출을 줄이고 산림의 이산화탄소 흡수를 확대하는 계획이 필요하다.

흡수원을 확보하는 수단으로 산림과 도시지역 녹지를 활용하는 방안이 제시되고 있다. 숲 가꾸기를 추진할 때 탄소흡수 능력과 생태계 영향 등을 종합적으로 고려하여 미래수종을 선정한다면 숲의 지속가능성을 증진시킬 수 있다. 또한 유휴토지에 숲을 조성하거나 도시숲을 늘려가는 등 신규 조림을 확대하고 조성한 숲을 잘 관리한다면 탄소흡수원 확충에 기여할 수 있다. 마지막으로 높은 영급의 나무를 베고 어린나무를 새로 심는 동시에, 벌목한 목재를 활용한 목재산업 활성화를 추진하여 탄소저장량을 증대할 수 있다.[6] 즉, 산림 이외에도 도시지역의 녹지를 활용하여 탄소흡수원을 확충·관리하는 것이 중요하며, 이를 위해 초지의 불법 전용을 방지, 초지의 보전 및 확대, 각종 도시 관련 사업 진행 시 녹지를 보전·조성·복원하는 노력이 필요하다.

6) 기후변화협의체(IPCC) 기준으로 제재목은 35년, 합판·보드류는 25년간 탄소를 저장한다. 탄소저장 실적으로 인정되는 것은 자국산 목재에 한정된다. 정부는 '2050 탄소중립정책'에 산림과 국산 목재 활용을 통한 '탄소흡수안'을 담았다. 그 일환으로 산림청은 2050년까지 30억그루의 나무를 심어 매년 탄소 3400만t을 줄이는 사업을 추진 중이다. 이 과정에서 고령화된 나무를 베고, 벌목된 나무를 활용한 목재산업 활성화를 추진하며 자급률을 30%까지 올리는 것이 목표임(대한경제, 2021.07.14.)

3. 지자체의 탄소중립 정책

「탄소중립기본법」은 탄소중립과 관련한 의무와 책임에 비례하여 지방자치단체체의 역할을 직접적인 사업 주체로서 강조하였다. 국내 지자체는「탄소중립기본법」제11조(시·도 계획의 수립 등), 제12조(시·군·구 계획의 수립 등) 및 동법 시행령 제6조, 제7조에 따라 10년을 계획기간으로 하는 '탄소중립 녹색성장 기본계획'을 5년마다 수립·시행해야 할 의무가 있다. 또한 탄소중립 실현을 위해 탄소감축 기술 및 흡수 계획 등을 공간적으로 종합하는 '탄소중립도시'를 구현할 수 있는 제도적 기반을 마련하였다. 국가와 지자체는「탄소중립기본법」제29조(탄소중립 도시의 지정 등)에 따라 탄소중립 관련 계획 및 기술 등을 적극 활용하여 탄소중립을 공간적으로 구현하는 도시(탄소중립도시)를 조성하기 위한 정책을 수립·시행하여야 하며, 정부는 직접 또는 지자체의 요청을 받아 탄소중립도시를 지정할 수 있다. 행정안전부 보도자료(2021. 12. 09.)에 따르면 이러한 제도적 기반 하에 최근 지자체는 탄소중립 추진체계 구축, 탄소중립 생태계 전환, 탄소중립 생활 실천 등 지역 탄소중립 이행체계를 선도적으로 구축하고, 부문별 감축을 유도하고 있다.

1) 지역 주도 탄소중립 실천 사례 – 탄소중립 추진체계 구축

대구광역시와 광주광역시는 탄소중립 추진체계를 구축하기 위한 정책을 추진 중이다. 대구광역시는 '250만 시민중심 탄소중립 선도도시 대구'를 슬로건으로 민·관·산·학 청년이 중심이 되어 시민이 주도하는 탄소중립 실천 운동을 추진 중이다(대구광역시, 2021). '탄소줄이기 1110 시민 생활 신천 운동'(2021년 11월)을 통해 시민 1명이 연간 온실가스 1ton을 줄이기 위한 10가지 실천 행동*을 발표하였다. 대표적인 실천행동은 디지털 탄소 발자국 줄이기, 저탄소 밥상 차리기, 비우고 헹구고 분리하기 등으

로, 일상생활에서 손쉽게 실천할 수 있는 것들을 담고 있다.

광주광역시는 '2045년 탄소중립 에너지 자립도시'를 선언(2020년 7월)하고 탄소중립추진위원회를 발족을 통해 시민햇빛발전소 및 인공지능 에너지 인프라를 조성하였다(건축공간연구원, 2021). 자치구별 '에너지전환마을' 거점센터를 조성하여 에너지 전환 실천운동을 주도하고 있다.

2) 지역 주도 탄소중립 실천 사례 – 탄소중립 생태계 전환

울산광역시, 충청남도 당진시, 경상남도 합천군은 탄소중립 생태계로 전환하기 위해 노력하는 지자체이다. 울산광역시는 기존 화석연료 중심의 에너지를 풍력과 수소를 활용한 친환경 에너지로 전환하기 위해 '부유식 해상풍력 및 수소산업 육성' 정책을 추진하고 있다(서울경제, 2021. 05. 06.). 2030까지 세계 최대 6GW 부유식 해상풍력 단지를 조성함으로써 일자리 21만개를 창출하고, 온실가스 930만 톤 감축, 576만 세대 전력공급, 그린수소 8. 4만톤 생산을 목표로 설정하였다.

충청남도 당진시는 단계적 화력발전소 폐쇄에 대비하여 '시민 중심의 지속가능한 탄소중립 전환'을 목표로 신재생에너지 설비 지원사업을 추진 중이다(당진시 보도자료, 2021. 12. 16.). 단독·공동주택 및 마을회관, 공공기관, 복지지설 등 총 583개소에 신재생에너지 설비를 설치하기 위해 37억을 투자할 계획이다. 이 외에도 지역기업과의 협업을 추진하여 에너지 부문의 신재생에너지 설비 투자를 확대하고, 자발적으로 배출권을 상쇄하기 위한 협약을 추진하고 있다.

경상남도 합천군은 지역 자원인 합천댐 내 수상 태양광 설치를 주민 참여형 사업으로 추진하여 발전수익을 공유하고 재생에너지를 보급하고자 한다(경남신문, 2021. 11. 24.). 주민참여를 통한 추가 REC(재생에너지공급인증서)를 통해 주민 투자 수입 최대 10%를 지급하도록 하였으며 2만 가구가 사용가능 한 전력을 생산할 계획이다.

3) 지역 주도 탄소중립 실천 사례 – 탄소중립 생활실천

대전광역시 대덕구, 경기도 광명시는 탄소중립 생활실천을 추진하고 있다. 대전광역시 대덕구는 '주민과 함께 만드는 탄소중립도시 대덕'을 목표로 교육 및 홍보를 통해 탄소 감축을 위한 행동 실천을 유도한다(대한민국도지사협의회, 2022, p. 13-16). 대덕구 5개 주체가 콜라보하여 만들어낸 에너지전환 플랫폼으로 친환경제품 사용, 1회용품 사용 금지 등을 추진 중이다.

경기도 광명시는 아파트 비중이 80%에 달하는 지역 특성을 반영하여 시민의식 개선 및 실천 운동을 중점적으로 추진하고자 1.5℃ 기후의병대를 결성하였다(광명시 기후에너지센터, 2022). 소등 모니터링 자원봉사단(광명 별빛지기) 50명을 위촉하였고, 청소년 620명을 대상으로 '찾아가는 기후변화 시민교육'을 5회 시행하였고, 기후에너지 동아리를 육성하고 있다. 또한 경력 단절 주민을 기후에너지 강사로 양성하여 '광명Bee에너지 학교'에서 강의할 수 있는 기반을 마련 중이다. 실제 2020년부터 2021년까지 47명의 인력을 배출하였다.

4. 탄소중립 실현을 위한 해외 도시별 공원녹지 정책

1) 핀란드 헬싱키

□ 탄소중립 목표와 온실가스 배출 현황

핀란드 헬싱키는 '2017-2021 도시전략계획(The Helsinki City Strategy 2017-2021)'을 통해 2035년까지 탄소중립을 달성하는 것을 목표로 설정하였다(City of Helsinki, 2018, p.7). 또한 2018년에 '2035 탄소중립 헬싱키 행동계획(The Carbon-neutral Helsinki 2035 Action Plan)'을 수립하여 배출량을 감소시킬 수 있는 147개의 구체화된 방안을 제안하였다(City of Helsinki, 2018, p.8). 실행계획은 교통, 건물, 소비 등 경제, 성장, 개발 프로그램, 탄소흡수원 및 배출물 보상, 소통과 협약, 조정 모니터링 및 평가 등 8개 항목을 다루고 있다. 이 중 탄소흡수원 부문을 살펴보면, 헬싱키시는 탄소흡수원(Carbon storage and carbon sink)을 확대하는 것은 탄소배출 보상 기회가 증가하는 것으로, 헬싱키 전체의 탄소 흡수원의 잠재력을 조사하고 지속적으로 모니터링할 필요가 있다고 보고 있다.

헬싱키시의 온실가스 배출상태에 대한 정보는 헬싱키 지역 환경 서비스국(HSY, Helsinki Region Environmental Services Authority)의 계산을 기반으로 한다. 추정 당시 헬싱키의 수목, 식생, 토양은 약 1,250킬로톤의 탄소를 저장할 수 있으며, 이는 헬싱키에서 1.5년간 배출하는 온실가스(약 4,600kT CO_2e)의 양과 유사하다(City of Helsinki, 2018, p.105). 당시 탄소저장량은 연간 35kt이 증가하고 있었고, 이는 도시의 식생과 토양이 효과적인 탄소흡수원으로 작용하고 있음을 의미하는 것으로 해석하였다.

□ 탄소흡수원 조사연구

헬싱키 지역환경 서비스국(HSY)은 2014년부터 헬싱키 대도시 지역(에스포, 헬싱키, 카우니 아이넨, 반타시 지역)의 탄소흡수원 및 저장소에 대한 연구를 수행하였다(HSY, 2021, p. 4). 이 연구의 제목은 '헬싱키 대도시 지역의 탄소흡수원 및 저장소에 관한 연구'이며 2021년에 완료되었다(HSY, 2021, p. 6). 연구의 목적은 최신 지리공간 데이터를 생성하고 헬싱키 대도시 지역의 도시에서 탄소저장량 현황과 변화에 대한 이해를 얻는 것으로, 지속적인 모니터링 프로세스를 위한 토대를 마련하는데 목적을 두었다.

해당 방법론의 핵심은 공간 데이터 형식의 산림자원과 녹지관리 분류 데이터를 사용하여 지역을 여러 유형으로 분류하는 것이다. 먼저 산림과 녹지를 크게 ① 건설 및 개방 녹지, ② 산림으로 구분하고, 각 항목의 '식생'과 '토양'에 대한 저장 및 흡수량을 계산하였다(HSY, 2021, p. 10).

건설 및 개방 녹지의 '식생'에 대해서는 각 유형별 녹지의 평균 탄소량을 계산하여 적용하였고, '토양'은 ILKKA 프로젝트에서 사용된 Yasso모델(식물에서 토양으로 투입되는 탄소, 토양의 기본 탄소저장량, 주요 기후조건 등을 토대로 시간에 따른 토양의 탄소저장량량을 파악 가능)을 업데이트하여 활용하였다(HSY, 2021, p. 10).

산림지역의 '식생'의 경우 핀란드 천연자원연구소(LUKE)의 최신 Motti 성장 모델을 토대로 수치별 산림자원 자료를 활용하여 3대 주요 수목(소나무, 가문비나무, 자작나무)에 대해 서로 다른 관리 범주의 식생 바이오매스와 탄소의 관계를 정립하여 적용하였다(HSY, 2021, p. 11). 한편, 산림자원 데이터를 이용할 수 없는 임야지역의 경우 VMI 격자 데이터에서 바이오매스 부피를 도출하여 탄소 수치를 추출하여 적용하였다. VMI 격자 데이터도 사용할 수 없는 영역은 지역 토지 피복 데이터(SMPA)의 수목 스탠드 클래스를 통해 클래스당 나무의 평균 길이를 통해 탄소저장량량과 유량의 크기를 도출하여 적용하였고, 산림지역의 토양에 대해서는 건설 및 개방 녹지와 동일하게 ILKKA 프로젝트의 Yasso모델을 적용하였다.

표 3-5 | 핀란드 헬싱키 대도시지역의 녹지관리 유형

분류		특징
A. 건설된 녹지	A1. 대표적인 녹지	중요한 공공건물, 중앙 도시 공원, 광장 또는 그 일부의 공간
	A2. 사용가능한 녹지	도시 공원 및 광장, 놀이터, 도심 지역의 교통 녹지 지역, 스포츠 및 활동을 위한 공간 및 녹지 지역
	A3. 운영 및 보호 녹지	일반적으로 광범위한 공원, 완충 구역 또는 도심 외곽의 마당 지역보다 유기적으로 관리되는 공간 등
B. 개방 녹지	B1. 경치 좋은 필드	조경작물이 재배되는 경작 및 사용중인 토지
	B2. 기능적인 초원	개방형 또는 반 개방형 초원
	B3. 조경 초원	개방 또는 반개방형 조경초원
	B4. 개방된 공간 및 전망	뷰를 유지하거나 전력 등 기술 네트워크를 유지하기 위해 개방된 상태로 유지되는 영역
	B5. 보전이 필요한 초원	문화유산, 경관 또는 생물 다양성의 중요성이 있는 초원
C. 도시 숲	C1. 지역(로컬) 숲	사용과 소비가 많은 정착지에 가까운 숲
	C2. 야외 및 휴양림	야외 활동과 하이킹을 위한 더 큰 산림 지역
	C3. 보호된 숲	정착지와 기타 건축 환경 사이에 위치한 숲
	C4. 상업 산림	지속가능한 임업의 원칙에 따라 관리/사용되는 산림
	C5. 보전이 필요한 숲	풍경, 문화, 생물 다양성 가치 또는 기타 특성으로 인해 특히 가치 있는 숲
S. 보호영역		중요한 조치가 취해지지 않은 영구 보호 구역
E. 특별 지역		도시가 지정한 토지 이용의 특별 지역
R. 토지이용 변경지역		도시가 지정한 토지 이용 변경 지역
O. 치료 외 영역		유지관리의 범위를 벗어난 도시가 지정한 지역

자료: HSY(2021, p.48)의 자료를 활용하여 저자 작성

표 3-6 | A와 B로 분류된 식생의 바이오매스 추정량

주의 범주	산림지 바이오매스 % 비율	잔디 바이오매스 수집 비율, %
A1- 대표적인 녹지	2	100
A2- 사용 가능한 녹지	5	90
A3- 운영 및 보호 녹지 지역	20	70
B2- 기능성 초원	5	70
B3- 풍경 초원과 목초지	5	10
B4- 열린 공간과 전망	10	10
B5- 가치 있는 초원	5	0

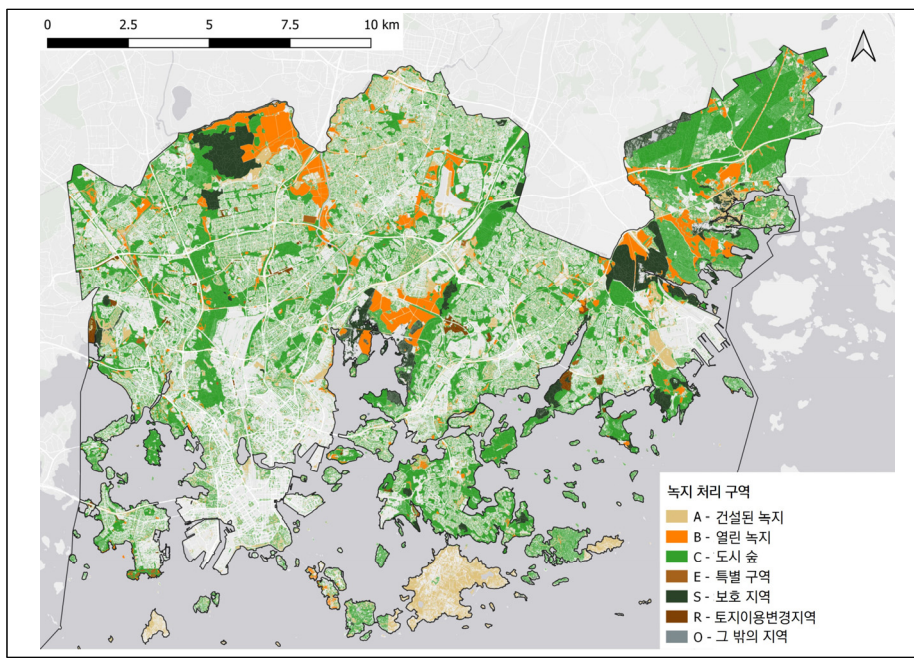
자료: HSY(2021, p.10) Table1 인용

이를 적용하여 4개 도시별 탄소재고량을 추정하고, 도시별 비교 및 과거 연구결과를 활용하여 연도별 재고량 변화를 분석하였다(HSY, 2021, p. 15). 그 결과, 헬싱키의 경우 도시의 59%인 12,400ha가 녹지·산림이며, 이 중 약 72%가 산림(관리등급 C. 도시

숲, S. 보호영역)에 해당하고 나머지 지역은 조성녹지와 개방녹지가 절반 정도로 나뉘어져 있는 것으로 밝혀졌다(그림 3-2). 헬싱키 녹지 지역의 총 탄소재고는 2019년 기준 5,610,600tCO로, 이 중 35%는 식생에, 65%는 토양에 해당한다(HSY, 2021, p.17). 또한 식생 및 토양의 탄소저장량에 대한 연간 총 탄소 유·출입량(유량, flux)는 약 95,600tCO$_2$/v positive로, 이 중 약 82%가 식생에, 18%가 토양에 저장되고 있었다.

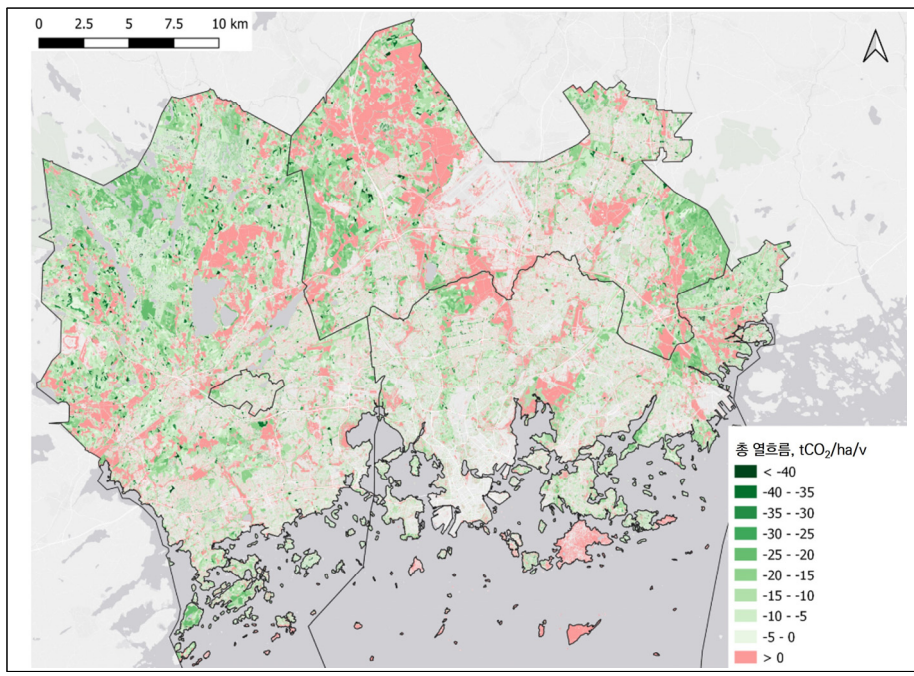
4개 도시의 탄소저장량과 유량 분포도(그림 3-3)를 살펴보면 건설·개방된 녹지(A, B유형)의 경우 희미한 빨간색 색조(>0)로 나타나는데, 이는 탄소 유량이 양수로 흡수량보다 배출량이 더 큰 것을 의미한다. 반면 산림지역(C. 도시 숲, S. 보호영역 유형)은 식생량이 매년 증가하고 있으며 유량이 음수(<0)로 탄소를 저장하는 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

그림 3-2 | 핀란드 헬싱키 지역의 유형별 녹지 분포



자료: HSY(2021, p.14) Figure2 인용

그림 3-3 | 핀란드 헬싱키의 탄소저장량과 유량 분포



자료: HSY(2021, p.25) Figure6 인용

표 3-7 | 2019년 헬싱키의 ABC 범주별 탄소저장량

	식물 탄소 저장량	식물 탄소 저장량	토양 탄소 저장량	토양 탄소 저장량
주의 범주	tCO2	tCO2/ha	tCO2	tCO2/ha
A- 건설된 녹지	10,611	6	243,349	132
B- 열린 녹지	5,196	4	231,618	194
C- 도시 숲	1,648,127	203	2,619,578	323
S- 보호지역	273,488	294	466,106	501
그 밖의 (E, H1, O, R)	33,363	90	79,175	212
총 계	1,970,784	158	3,639,825	292

자료: HSY(2021, p.17) Table10 인용

표 3-8 | 2019년 헬싱키의 ABC 범주별 탄소 유량

	식물 탄소 유량	식물 탄소 유량	토양 탄소 유량	토양 탄소 유량
주의 범주	tCO2	tCO2/ha	tCO2	tCO2/ha
A- 건설된 녹지	0	0.0	1,284	0.7
B- 열린 녹지	0	0.0	421	0.4
C- 도시 숲	-69,027	-8.5	-13,724	-1.7
S- 보호지역	-8,282	-8.9	-4,876	-5.2
그 밖의 (E, H1, O, R)	-1,165	-3.1	-224	-0.6
총 계	-78,474	-6.3	-17,119	-1.4

자료: HSY(2021, p.17) Table11 인용

한편, 4개 도시의 2011년 및 2019년 탄소재고량과 유량을 비교한 결과를 살펴보면, 헬싱키가 다른 도시들보다 저장량이 크게 감소한 것을 알 수 있다. 특히 탄소 유량의 경우 2011년과 2019년 사이에 상당한 차이가 발생하는데, 식생의 경우 모든 도시에서 30% 이상 명확하게 감소한 반면, 토양의 탄소 유량은 2~3배 증가했다는 특징이 있다 (HSY, 2021, p. 30).

표 3-9 | 2011년과 2019년 핀란드 도시별 매년 탄소저장량 및 상대적 변화 비교

	년도	에스포	%	헬싱키	%	반타	%
관측 구역의 면적, ha	2011	19,509		8,971		13,162	
관측 구역의 면적, ha	2019	23,698	+21	12,449	+39	16,591	+26
식물 탄소 저장량, tCO2	2011	3,728,179		1,663,772		2,023,894	
식물 탄소 저장량, tCO2	2019	4,279,413	+15	1,970,784	+18	2,580,882	+28
토양 탄소 저장량, tCO2	2011	6,820,854		2,905,654		4,201,831	
토양 탄소 저장량, tCO2	2019	8,261,062	+21	3,639,825	+25	5,209,911	+24
평균 식물 탄소 저장량, tCO2/ha	2011	191		185		154	
평균 토양 탄소 저장량, tCO2/ha	2019	181	-5	158	-14	156	+1
평균 토양 탄소 저장량, tCO2/ha	2011	350		324		319	
평균 토양 탄소 저장량, tCO2/ha	2019	349	0	292	-10	314	-2

자료: HSY(2021, p.30) Table21 인용

표 3-10 | 2011년과 2019년 핀란드 도시별 매년 탄소 유량 및 상대적 변화 비교

	년도	에스포	%	헬싱키	%	반타	%
식물 탄소 유량, tCO2/v	2011	273,834		121,517		158,118	
식물 탄소 유량, tCO2/v	2019	178,654	-35	78,474	-35	107,827	-32
토양 탄소 유량, tCO2/v	2011	22,425		8,265		8,763	
토양 탄소 유량, tCO2/v	2019	42,792	+91	17,119	+107	25,577	+192
평균 식물 탄소 유량, tCO2/ha/v	2011	14.0		13.5		12.0	
평균 식물 탄소 유량, tCO2/ha/v	2019	7.5	-46	6.3	-53	6.5	-46
평균 토양 탄소 유량, tCO2/ha/v	2011	1.1		0.9		0.7	
평균 토양 탄소 유량, tCO2/ha/v	2019	1.8	+64	1.4	+56	1.5	+114

자료: HSY(2021, p.31p) Table23 인용

2) 미국 뉴욕

□ 뉴욕 숲의 탄소재고 연구[7)]

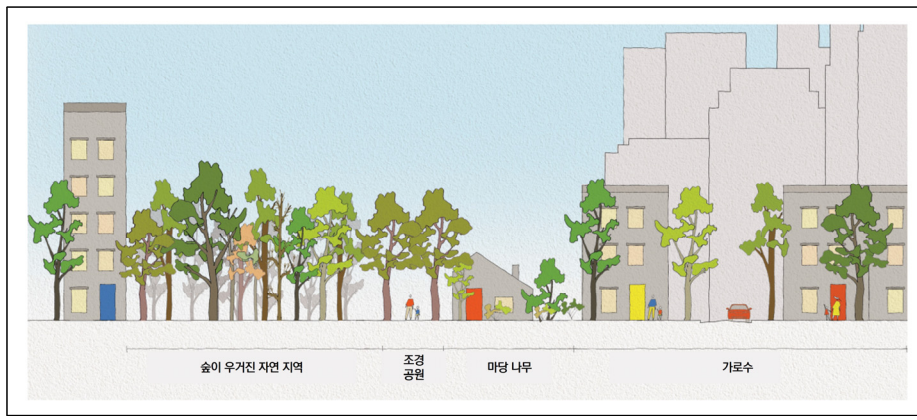
뉴욕자연지역보존협회(NYC, Natural Areas Conservancy, 이하 NAC)는 뉴욕시 내 숲 자연지역(Forested natural area)의 탄소저장량을 추정하고, 도시 전체의 탄소 저장(Storage or Sequestration)에 얼마나 기여하는지 분석하였다. 해당 연구의 목표는 1) 문헌 및 현장조사를 통해 수집한 데이터와 방법을 사용하여 뉴욕의 자연지역에 저장·격리된 탄소의 양을 추정하고, 2) 뉴욕에서 발견된 다양한 산림 유형의 탄소 저장·격리 역량을 네이티브 유형과 비네이티브 유형에 초점을 맞춰 비교하였으며, 3) 가로수와 조경수 또는 공원수를 포함한 도시 전체에 대한 자연지역의 산림 기여도를 추정하였다.

해당 연구는 2013, 2014년에 수집한 산림 재고 데이터[8)]를 사용하여 탄소의 재고량

7) Pregitzer et al(2020) 참고하여 작성하였음
8) NAC(2014)는 나무의 횡단면 길이, 플롯 크기, 최소 직경 등에서 약간의 차이가 있는 USFS Forest Inventory Analysis(FIA) 프로그램 방법을 기반으로 현장 프로토콜을 개발하였음

을 계산하였으며 FIA(Forest Inventory and Analysis)의 종별 정보가 부족할 때는 평균을 사용하였고, 연간 변화를 추정하기 위해서 문헌조사를 기반으로 격리 및 배출 비율을 적용하였으며, 나무의 성장률을 반영하는 등 연구결과의 현실성을 높이기 위해 노력하였다. 도시의 나무를 공간에 따라 Forested Natural Area, Landscaped Park, Yard Trees - Street Trees 등으로 구분하였고, 여기서는 Forested Natural Area에 초점을 맞추어 분석한 후 그 외 도시 내 나무, 교외 지역 등과 비교하였다.

그림 3-4 | 미국 뉴욕에서 공간에 따른 산림의 구분

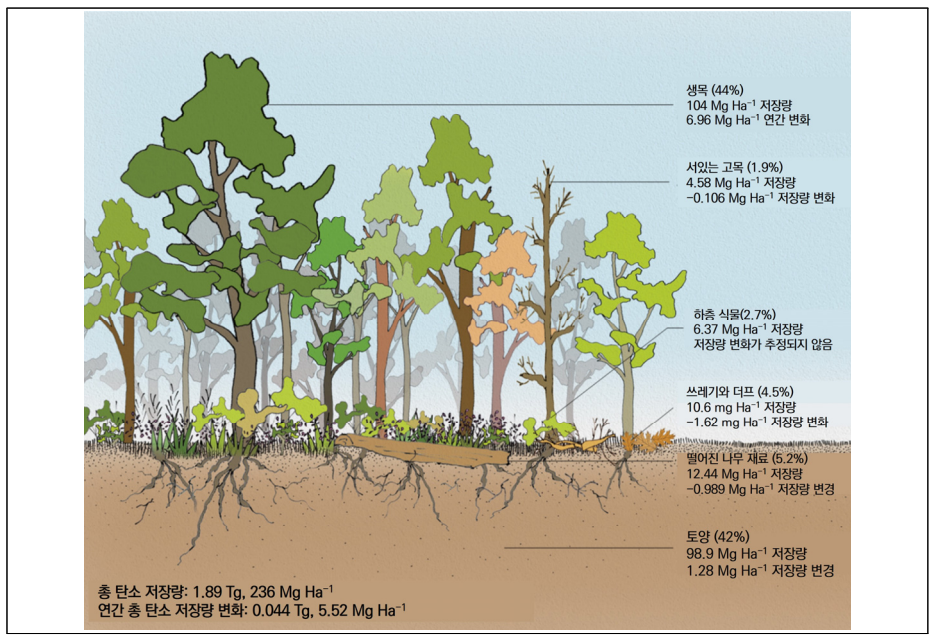


자료: NAC(2020, p.2) Figure1 인용

본 연구는 도시숲의 탄소 저장고(carbon pool)을 7개 유형으로 구분하고, 유형별 특징을 고려한 추정 방법을 적용하였다. 구성요소와 나무 상태 등을 고려하여 Live Tree Pool, Herbaceous Pool, Standing Dead Tree Pool, Coarse Woody Material Pool, Fine Woody Material Pool, Litter&Duff Pool, Soil Organic Carbon Pool의 7가지 유형으로 구분하였으며 각 유형별 탄소저장량에 대한 계산방법 또한 식으로 제시하였다.

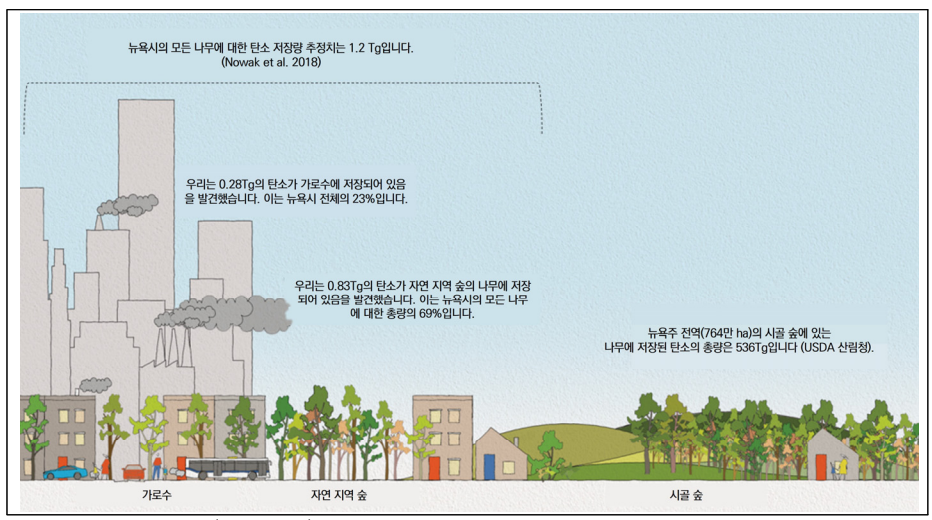
뉴욕시의 자연지역 내 산림은 뉴욕시 내 모든 나무의 탄소재고량의 69%를 차지하며, 이는 가로수의 3배 이상에 해당하였고 뉴욕시의 숲 자연 지역은 비도시지역의 삼림과 비슷한 비율로 탄소를 저장/격리하며, 주 전체 추정치의 0.15%를 차지하고 있음을 보였다 (Pregitzer et al., 2020, p.8).

그림 3-5 | 미국 뉴욕 자연 지역 산림의 총 탄소 축적량 및 변화



자료: Pregitzer et al.(2020, p.6) Figure1 인용

그림 3-6 | 미국 뉴욕 내 산림의 탄소저장량

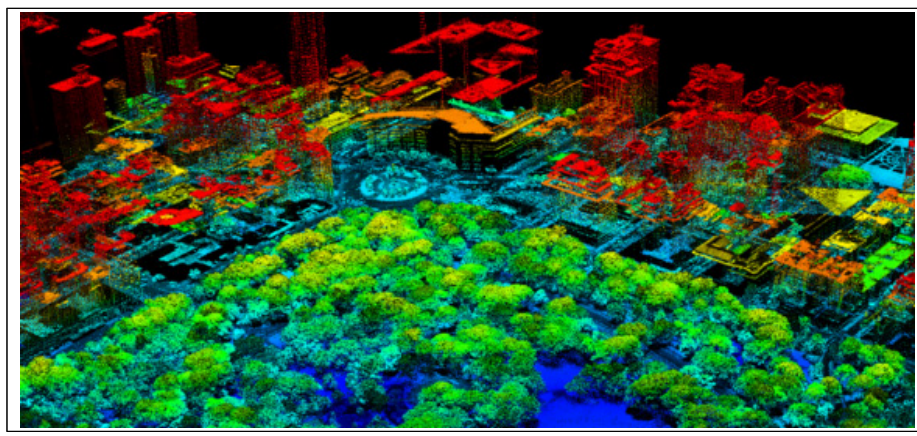


자료: Pregitzer et al.(2020, p.8) Figure3 인용

□ Cool Neighborhoods NYC[9)]

뉴욕시는 매년 여름 심각한 폭염에 대응하기 위해 Cool Neighborhoods NYC 프로그램을 통해 전략적으로 지역 기온을 낮추는 정책을 실행하고 있다. 뉴욕시는 지역 대학과 협업을 통해 폭염에 취약한 지역을 우선 파악하고 도로 수목환경을 조성하는 사업에 8,200만 달러(984억 원)의 예산을 추가로 투입하여 도시열섬을 최소화하고 있다(서울연구원, 2019). 또한, 복잡한 건물 분포를 고려하여 LiDAR를 활용하여 데이터 분석을 통해 폭염 취약지역을 파악 후 녹지조성이 우선적으로 필요한 지역을 선정하도록 172만달러(약 20.6억)를 투자하여 활용하고 있다(서울연구원, 2019).

그림 3-7 | 미국 뉴욕 LiDAR 지도 데이터 예시



자료: City of New York(2017, p.34) Figure23 인용

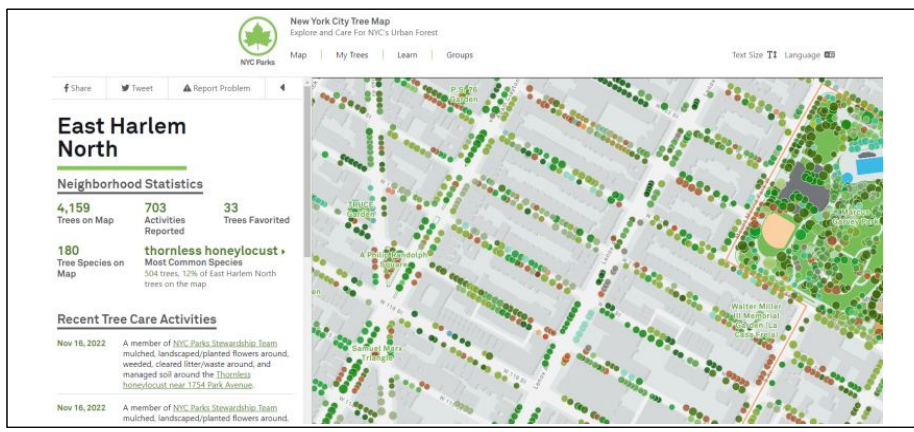
□ 뉴욕시 트리 맵(New York Tree Map)[10)]

뉴욕시 트리 맵은 자신이 거주하는 동네에 조성된 가로수에 대한 종합적인 정보를 제공하는 시스템으로 도시열섬 불평등을 해소하기 위해 더 많은 가로수를 확보하기 위

9) 서울연구원(2019)를 참고하여 작성함
10) Bollmberg(2022)을 참고하여 작성함

해 '기존 스트리트 트리 맵'의 확장판으로 공개되었다. 트리 맵은 나무의 위치, 색과 원 크기를 통해 나무의 특징을 보여주고 가로수가 뉴욕시에 미치는 생태적, 경제적 데이터를 제공하고 있다. 가로수는 주변 건물의 에너지 수요를 낮춰 연간 약 2만 5천톤의 탄소 배출량을 절감할 수 있고 연간 8천갤런의 빗물을 흡수하여 한 그루 당 약 550달러 이상 경제적인 기여를 발생시킬 것으로 보여주고 있다. 이를 통해 시민들이 자발적으로 주변의 공원과 가로수를 관리할 수 있도록 독려하고 있다.

그림 3-8 | 미국 뉴욕시 트리 맵



자료: City of New York(2023), NYC's Trees, 검색일: 2023.08.11., https://tree-map.nycgovparks.org/

3) 싱가포르

싱가포르는 전체 토지 중 70% 이상이 녹지일 만큼 생태적인 환경을 잘 갖추고 있는 대표적인 자연친화적인 도시국가이다(포브스, 2016. 01. 23.). 1990년부터 '싱가포르 녹색계획'을 추진하고 '클린 앤 그린 싱가포르' 환경운동을 펼치며 국민들에게 환경의식을 제고해오고 있으며 무분별한 개발을 지양하고, 지속적인 녹지조성 사업을 추진하는 등 더욱 친환경적인 싱가포르를 만들기 위한 통합적인 노력을 기울이고 있다.

싱가포르는 막대한 석유화학 설비, 해운, 항공 산업으로 자본당 이산화탄소 배출량

이 가장 많은 국가 중 하나로, 2016년 인구 565만명 기준으로 8.56톤의 이산화탄소를 배출한 바 있다(아시아엔, 2021.10.20.). 에너지 전환 이외에도 산림과 같은 CO_2 흡수계(Carbon Sink, 지구온난화를 줄이는 데 도움이 되는 넓은 삼림지대) 늘리는 것을 온실가스 경감 정책의 일환으로 활용하고 있으며(이범현, 2010, p.101), 소규모의 한정된 자연 자원을 지닌 도시국가인 싱가포르는 환경정책과 경제발전정책 목표의 시너지 효과 극대화를 위해 힘쓰고 있다. 또한, LEDS를 통하여 2030년까지 200ha 이상의 생태숲 공원을 조성할 것과 'One Million Trees' 운동을 통해 국립공원과 거리에 100만 그루 이상 조림할 것을 발표하였다(김래현 외, 2021, p.6).

그림 3-9 | 싱가포르 전경



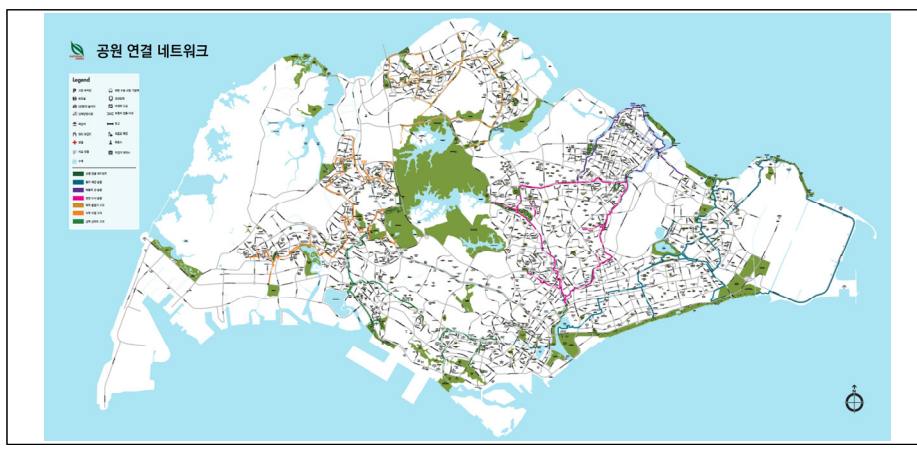
자료: 포브스(2016.01.23.), 청정녹색도시, 싱가포르, 검색일: 2022.08.05., https://jmagazine.joins.com/forbes/view/310013

□ 시티인가든(City in Garden) 정책

탄소중립이 주목받기 이전부터 싱가포르는 도시열섬을 완화하고자 '시티인가든' 정책을 추진해 오고 있다. 국가 차원에서 나무심기와 정원 가꾸기를 지속적으로 진행해

왔으며 건물옥상, 벽면조경, 가로수, 도시숲 등 녹지를 연결되게 조성하도록 하였다. 바람길을 염두하여 공간을 계획하고 2~3m 폭의 녹지를 두어 보행자와 자동차가 직사광선을 쬐는 경우가 없도록 계획되었다(스마트투데이, 2020. 12. 04.). 또한, 좁은 국토에 효율적으로 녹지공간을 조성하기 위해 1989년부터 공원녹지를 녹색회랑(Green Corridor)으로 연결하는 개념이 처음 등장하였고, 모든 시민이 400m 도보권 내에서 접근 가능하도록 '파크커넥터'를 계획하였다. 20~30년 동안 총 360km의 파크커넥터를 조성하는 계획을 수립하여, 도시계획에 반영하였고 2030년까지 400km로 연장할 계획을 갖고 있다(한국일보, 2017. 04. 03.).

그림 3-10 | 파크커넥터



자료: NParks Park Connector Network(2023), Singapore PCN, 검색일: 2023.8.10., https://pcn.nparks.gov.sg/the-pcn-experience/pcnloops/

4) 호주 멜버른

□ 도시림 전략(Urban Forest Strategy)[11)]

멜버른시의 도시숲 조성 정책의 특징은 캐노피(Canopy) 나무를 사용하는 것으로, 이

11) 김광석·이현지(2015, p.84)

나무들은 크기가 크기 때문에 작은 나무들에 비해 보다 건강하며 환경 부분에서 다양한 장점을 보이고 있다. 크기에 따라 75%까지 나무가 가진 효과를 증가시킬 수 있으며 도시의 열기를 나무가 흡수함으로써 그 열기를 감소시켜 도시열섬 완화에도 효과적이다.

따라서 북부와 서부 멜버른시에서 특히 캐노피를 확산시키고 있는 추세이며, 2040년까지 멜버른시 전체에 40%까지 확대 적용할 계획을 가지고 있다. 도시의 지하공간과 수변, 그리고 주거지 및 공공장소 이외에 사적 영역까지 캐노피의 확산 범위를 확대하고자 노력하고 있다. 이 밖에도 아스팔트와 콘트리트 건설을 줄이거나 없애는 대신 캐노피와 각종 나무들을 대체하여 심을 때 수반되는 물 부족 문제를 위하여 지하수 보충 및 수질개선 정책 등을 시행 중에 있다. 도시의 물이 50% 이하로 줄어들지 않도록 하며, 토양의 질을 향상시켜 나무의 뿌리가 더 건강하게 자랄 수 있도록 관리에 힘쓰고 있다.

그림 3-11 | 호주 멜버른의 로얄 보타닉 가든



자료: 호주 빅토리아주관광청(2022), 검색일: 2022.08.05.,
https://kr.visitmelbourne.com/regions/melbourne/see-and-do/nature-and-wildlife/parks-and-gardens/royal-botanic-gardens-victoria-melbourne-gardens

5. 시사점

우리나라의 온실가스 배출량은 줄어들고 있으며, 2050년에 탄소중립의 목표를 설정하였다. 이를 위해서는 지역에서의 탄소중립 정책의 이행체계를 구축하고, 지역 배출 특성에 따른 부문별 감축 수단을 마련해야 한다. 특히 부문 중 탄소흡수원은 국가 탄소중립 목표에서 상대적으로 작은 부분을 차지하나 직간접적으로 긍정적 효과를 미치고 있어 탄소흡수원을 유지·관리하고 영역 확대가 필요하다. 그러나 지자체는 탄소 감축 기술 구축과 실천 행동에 초점이 맞춰져 있어 탄소흡수원 확충·관리를 위한 계획 등을 종합하기 위한 공간적 접근이 필요하다.

헬싱키, 뉴욕 등 해외 도시는 도시 내 온실가스 감축을 위한 전략으로 도시 공원녹지를 확충하여 탄소흡수원을 증대시키는 노력을 해왔다. 또한 단순히 탄소흡수원을 확충하기 위한 정책뿐만 아니라 기술적인 분석을 활용하여 도시 내 녹지 영역을 파악하고 효율적인 조성계획을 제시함으로써 녹지 불평등을 해소함과 동시에 도시열섬 완화에도 기여하였다. 따라서 국내 탄소중립 실현을 위해서는 해외 도시의 정책 및 연구 사례를 참고하여 도시공원녹지의 조성전략이 필요할 것이며 정량적인 분석 방법을 활용하여 공원녹지의 형태, 크기에 따른 직간접적인 효과를 근거로 도시계획에서 결정하는 것이 필요하다.

CHAPTER 4

모의실험 및 법제도 개선방안

1. 분석의 개요 ····· 65
2. 감축실증: 녹지의 간접적 감축효과 산정 ····· 68
3. 모의실험: 공간계획에 따른 감축효과 변화량 예측 ····· 77
4. 계획수립 단계별 한계점 및 개선방안 ····· 84
5. 종합 및 시사점 ····· 97

04 모의실험 및 법제도 개선방안

본 연구의 목적은 온실가스 감축에 있어 탄소흡수원의 직·간접적인 역할을 규명하여, 국토·도시계획의 적용가능성 타진하는 것이다. 탄소흡수원의 간접적인 효과를 규명하기 위해 대구시를 대상으로 실증분석을 실시하였다. 공원녹지가 냉방에너지 사용량을 어느 정도 줄일 수 있는 지를 계량화하고, 이를 활용하여 온실가스 저감량을 산정하였다. 경기도 내 하나의 신도시를 대상으로는 공원녹지의 배치에 따라 냉방에너지의 감축량과 이에 따른 온실가스 감축량을 추정하였다. 여기에서 도출된 시사점을 도시계획 수립과정 단계별로 개선방안을 제시하고자 한다. 지자체의 도시계획과 직접적으로 연관이 있는 국토종합계획, 광역도시계획, 도시·군기본계획, 지구단위계획을 살펴보았다.

1. 분석의 개요

본 장에서는 국내 도시를 사례로 공원녹지의 간접적인 온실가스 감축효과를 산정하는 '감축실증'과, 실제 신규 도시개발사업의 토지이용계획(안)의 간접적인 감축효과를 예측하는 '모의실험'으로 구성된다.

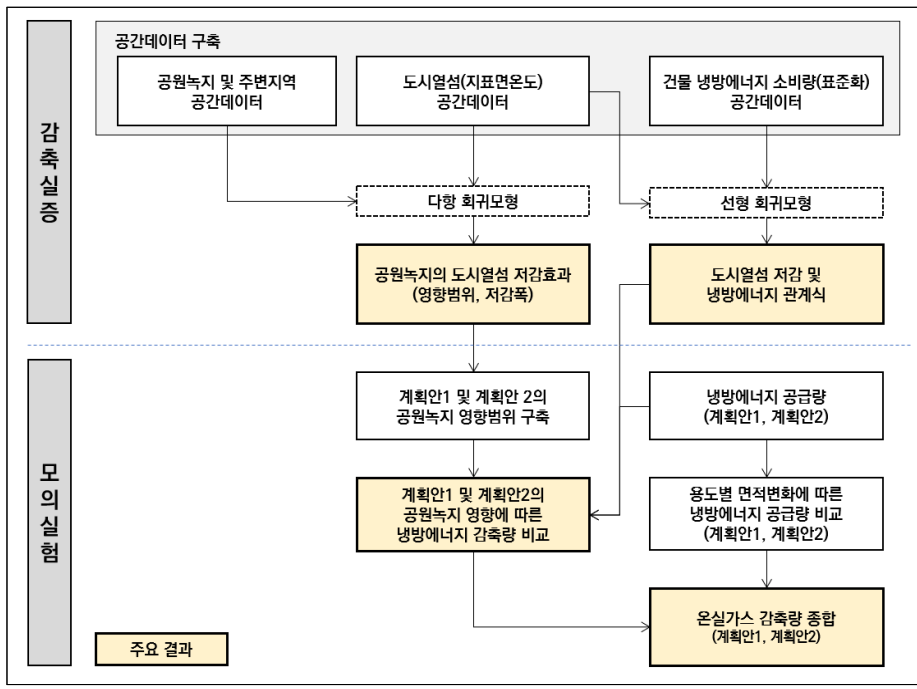
먼저 '감축실증'은 대구광역시 서구 및 중구로를 대상으로 녹지유형별 도시열섬의 저감효과를 지표면 온도를 통해 평가하고, 도시열섬 저감효과 및 냉방에너지 소비량과의 관계식을 도출한다. 대구광역시는 도시열섬이 심각한 내륙 분지형 도시로 이를 해결하고자 '푸른대구 가꾸기(1996-2026)' 사업[12]을 추진하여 누적 4,725만 그루를 식재하였다. 이에 따라 탄소흡수원의 간접적 감축효과를 산정하는 데 용이하다.

'모의실험'의 경우, 경기도에 위치한 신도시 중 1단계 개발지구에 대한 복수의 토지이용계획을 중심으로 공원녹지 계획 방식에 따른 온실가스 변화를 고찰한다. 여기서는

12) 제1차 푸른대구 가꾸기 사업은 1996~2006년 추진되었고, 현재 진행 중인 제5차 푸른대구 가꾸기 사업은 2026년까지 예정되어 있으며 누적 6,000만 그루 식재가 목표임(대구역사문화대전:달서구, 2023)

앞서 대구광역시의 감축실증의 결과에 기초하여 공원녹지의 간접적 온실가스 감축량을 산정하여 비교하고자 한다.[13] 대상지는 기후변화 및 수요변화 등에 따라 토지이용계획을 여러 차례 수정해왔고, 이에 따라 녹지조성 면적과 패턴에 변화가 있어 동일한 지역의 계획안 간 감축실증 결과를 적용 및 비교하기 용이하다는 장점이 있다.

그림 4-1 | 실증분석 및 모의실험의 흐름도



자료: 저자 작성

이 분석에서는 공원녹지의 도시열섬 저감효과 또는 냉방에너지 절감효과를 주제로 한 선행연구에 기초하여 세 가지 가설을 설정하였다. 가설1은 '공원녹지는 주변지역의 지표면 온도를 저감하는 효과가 있다.'이다. 가설2는 '공원녹지의 규모에 따라 지표면

13) 직접적인 온실가스 감축량은 활동자료(수종, 면적)와 흡수계수의 곱으로 산정하며, 간접적인 온실가스 감축량은 대구광역시를 대상으로 한 감축실증 결과에 기초함

온도를 저감하는 공간적 범위와 그 수준이 달라질 수 있다.'이며, 가설3은 지표면 온도가 저감될수록 해당 지역의 냉방에너지 소비량이 절감될 수 있다.'이다. 가설1 및 가설2, 가설3을 증명하는 경우 '공원녹지는 주변지역의 냉방에너지 소비량을 절감할 수 있다.'라는 결론을 내릴 수 있으며, 이것은 결국 공원녹지가 흡수원 부문 외에도, 건물 부문의 냉방에너지 사용으로 인한 온실가스 배출량을 감축하는데 간접적으로 기여함을 의미한다.

2. 감축실증: 녹지의 간접적 감축효과 산정

1) 방법

(1) 공간데이터 구축

녹지의 간접적 감축효과를 산정하기 위해 '공원녹지의 열섬저감 효과'와 '열섬 및 냉방에너지 사용량 간 관계성'을 분석하는 데 필요한 공간정보를 구축한다. 먼저 공원녹지의 열섬저감 효과를 파악하는 데에는 공원녹지의 규모와 형태, 경계선을 구분하기 위한 데이터와 열섬의 공간 분포를 파악하기 위한 지표면 온도 데이터가 필요하다. 다음으로 열섬 및 냉방에너지 사용량의 관계성을 분석하는 데에는 앞서 구축한 지표면 온도 데이터와 표준화된 건물의 냉방에너지 소비량이 필요하다. 이때, 건물 냉방에너지 사용량을 표준화하는 이유는 건물의 규모 등으로 인한 영향을 배제하기 위함이다.

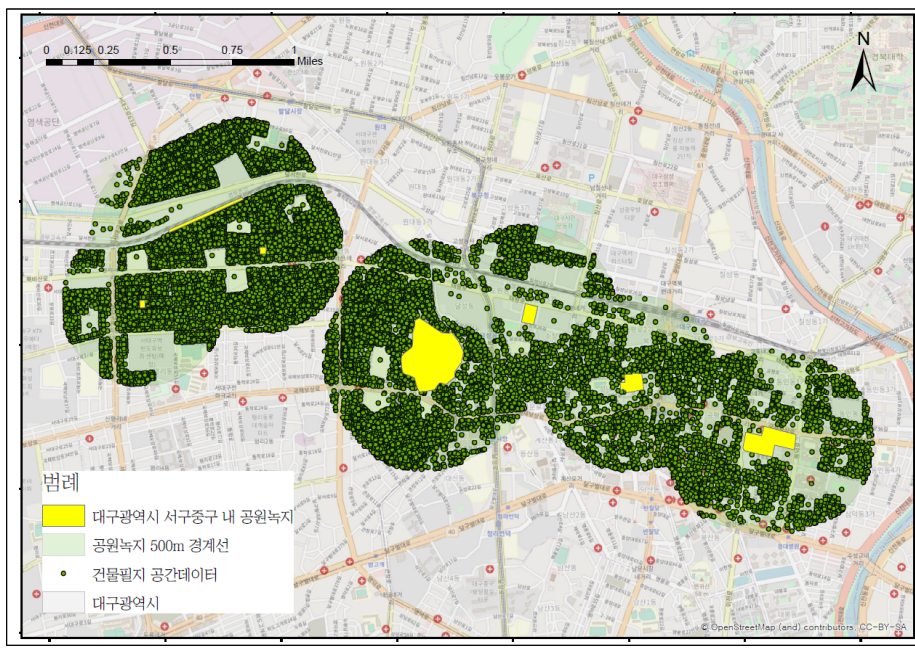
표 4-1 | 분석에 활용된 입력자료

목적	자료명	단위	기준시기	출처	비고
공원 위치 및 규모	공원·유원지·녹지현황 정보	㎡	2020	국가공간정보포털(2022)	
	공원, 유원지, 녹지현황	-	2020	네이버 지도(2022)	
도시 열섬	Landsat (위성영상)	℃	2019.8	Google Earth Engine (GEE)	지표면 온도
건물 냉방에너지 관계식	냉방에너지	kWh	2019.5~2019.8	관계시스템 제공[1]	
	건물 연면적	㎡	2019.8		
	건물 용도	주거, 상업[2]	2019.8		

1) 해당 자료는 국토교통부 과제 '탄소중립형 스마트도시 추진을 위한 탄소공간지도 구축방안 연구'에서 구축된 시스템에서 제공하는 정보임
2) 주거시설에는 단독주택(1000) 및 공동주택(2000)이 포함되며, 상업시설에는 제1종근린생활시설(3000)과 제2종근린생활시설(4000)이 포함됨
자료: 저자 작성

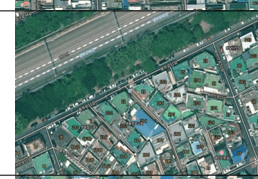
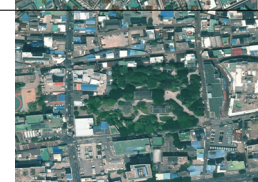
공원녹지 데이터는 2020년 도시계획시설 중 공간시설(공원·유원지·녹지)에 대한 국가공간정보포털의 자료와 네이버 지도를 활용하여 7개소를 구축하였다. 녹지 규모별 냉각효과에 대한 선행연구와 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」의 도시공원 설치기준에 따라 공원녹지를 소형(1만㎡ 이하), 중형(1만~10만㎡), 대형(10만㎡ 초과)으로 구분하였다. 소형공원은 '개미산공원, 날뫼공원, 나무숲길'의 3개소, 중형공원은 '경상감영공원, 국채보상운동기념공원, 제1수창공원'의 3개소이며, 대형공원은 '달성공원' 1개소가 해당한다. 또한 선행연구에 따르면 공원녹지의 열섬저감 효과 및 냉방에너지 절감 효과 등은 최대 500m를 초과하지 않으므로, 본 연구는 도시열섬 저감효과 및 냉방에너지에 관한 분석을 공원녹지 경계선에서 500m의 범위 내로 한정하였다.

그림 4-2 | 분석대상의 공간적 범위



자료: 2023년 국토연구원이 수행 중인 '탄소중립형 스마트도시 추진을 위한 탄소공간지도 구축방안 연구'의 내용 중 대구시 자료를 활용하여 저자 작성(국토연구원, 2023)

표 4-2 | 선정된 공원녹지 7개소

유형구분	공원	현황	주소	면적(㎡)
소형	개미산공원		(서구 평리동 694-7)	1,637
	날뫼공원		서구 평기1동 656-1	1,641
	나무숲길		서구 북비산로51길, 53길	2,153
중형	경상감영공원		중구 경사감영길 99	16,500
	국채보상 운동기념공원		중구 국채보상로670	43,000
	제1수창공원		중구 수창동174	36,930
대형	달성공원		중구 달성공원로35	129,700

자료: 네이버 지도(2022), 2020년 공원, 유원지, 녹지현황, 검색일: 2022.08.05., https://map.naver.com/p?c=15.00,0,0,2,dh

'지표면 온도 데이터'는 2019년 8월에 촬영된 위성영상 Landsat8[14]를 활용하였다. 이를 Mast Clouds을 사용하여 전처리하였고, GEE(Google Earth Engine)의 NDVI, 방출률, TCWV(Total Column Water Vapor)[15]를 활용하여 최종 지표면 온도 데이터를 구축하였다. 마지막으로 '표준화된 냉방에너지의 데이터'는 2023년 국토연구원이 수행 중인 '탄소중립형 스마트도시 추진을 위한 탄소공간지도 구축방안 연구'에서 제공받은 건물의 일반정보와 냉방에너지 소비량 데이터를 활용하였다.

조향훈 외(2022)의 선행연구를 참고하여, 건물 냉방에너지 소비량은 자연로그를 사용하여 표준화하였다. 표준화된 자료는 건물 용도에 따른 영향을 고려하기 위해 모든 용도의 건물을 포함하는 경우와 주거·상업용도를 구분하는 경우를 모두 분석하였다.

표 4-3 | 선행연구에서의 건물의 냉방에너지 사용량 표준화 방법

표준화 방법	단위	참고문헌
자연로그 표준화된 냉방에너지 소비량	ln(kWh)	조향훈 외(2022)

자료: 저자 작성

(2) 공원녹지의 도시열섬 저감효과

대구광역시의 공원녹지를 7개소를 대상으로 유형별(소형, 중형, 대형) 도시열섬 저감효과를 파악하고자, 공원녹지 주변 지표면온도가 유의미하게 낮아진 공간적 범위와 그 폭을 분석하였다. 최대 분석 범위는 공원녹지 경계로부터 500m 이내이며, 해당 범위 내에서는 다른 공원녹지, 또는 인구 사회학적 영향을 받지 않는 것으로 가정하였다. 도시열섬은 대기온도로 설명하는 것이 적절하지만 그 공간해상도가 낮아 500m 범위 내 변화를 분석하기 어려우므로 앞서 구축한 지표면 온도 자료를 활용하였다.

14) NASA(National Aeronautics and Space Administration)과 USGS(United States Geological Survey)rk 공동으로 개발한 위성으로 지구 표면에 있는 토양의 지질학적 구조, 토지피복, 지표의 물 분포 등 다양한 요소의 관측이 가능함

15) TCWV는 수증기 함량에 관한 정보로서 관측에서의 대기 기여도를 반영함으로써 지표면 온도 데이터의 신뢰도를 높일 수 있음

분석은 회귀모형을 활용하였는데, 공원녹지 유형별로 경계선에서부터의 거리를 독립변수로 하고, 지표면 온도를 종속변수로 설정하였다. 선형회귀모형 및 다항회귀모형을 각각 적용한 다음, 비교검정(ANOVA) 및 설명력(R^2)을 고려하여 적절한 모형을 선택하였다. 다음으로, 선택된 회귀모형에 대해 공원 경계선에서부터의 거리에 따른 기울기 변화를 분석하고 그 기울기 값이 영 또는 음수로 전환되는 첫 번째 변곡점을 기준으로 지표면 온도가 저감된 범위와 폭을 도출하였다.

(3) 열섬저감과 냉방에너지 관계 분석

도시열(지표면 온도)와 냉방에너지 소비량의 관계식을 도출하여 공원녹지의 열섬저감 효과를 냉방에너지의 감소량으로 변환하는데 활용하였다. 이때, 열섬저감 저감효과와 마찬가지로 최대 분석범위를 공원녹지 경계로부터 500m 이내로 설정하였다. 여기서도 회귀모형을 통해 분석하였으며, 종속변수를 표준화된 냉방에너지 소비량으로 설정하고, 매개변수 및 독립변수는 각각 지표면 온도와 공원녹지로부터의 거리로 설정하였다. 도시열섬 저감효과와 마찬가지로 선형회귀모형 및 다항회귀모형을 적용한 다음, 비교검정(ANOVA) 및 설명력(R^2)을 고려하여 적절한 모형을 선택하였다.

표 4-4 | 분석모형 및 변수설정

구분		상세	
분석범위	공간적 범위	(공원) 대구광역시 서구 및 중구 내 위치한 7개 소·중·대형 공원녹지	
		(건물) 공원녹지 주변 500m 내 위치한 건물 (주거 및 상업 포함)	
	시간적 범위	(냉방에너지·지표면 온도) 2019년 8월 기준 자료	
구분		측정	단위
종속변인	건물 냉방에너지 소비량	자연로그 표준화된 냉방에너지 소비량	ln(kWh)
매개변인	지표면 온도	(위성자료) 건물필지 지표면 온도	℃
독립변인	공원녹지와의 거리	최근점 공원까지의 공간적 거리	m
분석방법	1) 선형회귀모형 및 다항회귀모형		
	2) ANOVA 분석을 통한 최적모형 도출		

자료: 저자 작성

2) 결과

(1) 공원녹지의 열섬저감 효과 분석

공원녹지의 열섬저감 효과 분석을 위해, 공원녹지 유형별로 경계선으로부터의 거리에 따른 지표면 온도의 변화를 설명하는 회귀식을 도출하였다. 1차(선형)회귀모형에서부터, 2차·3차·4차 회귀모형을 구축한 다음 비교검정 및 설명력을 검토한 결과, 대형 및 중형공원은 4차항 회귀식이, 소형공원은 3차항 회귀식이 선정되었다.[16] 공원녹지 유형별로 선정된 다항회귀모형은 <표 4-5>와 같다.

표 4-5 | 공원녹지 유형별 거리 및 지표면 온도에 대한 회귀모형 비교검토(ANOVA)

공원녹지 유형	분산분석(ANOVA)		Adjusted R2	채택여부
	대상	P-value		
대형공원	1차, 2차	0.003537	0.1051	미채택
	1차, 3차	3.155e-05	0.1075	미채택
	1차, 4차	5.001e-14	0.1163	채택
중형공원	1차, 2차	0.00307	0.008246	미채택
	1차, 3차	0.01197	0.01284	미채택
	1차, 4차	4.634e-14	0.01425	채택
소형공원	1차, 2차	6.727e-10	0.005385	미채택
	1차, 3차	<2.2e-16	0.01321	채택
	1차, 4차	<2.2e-16	0.01331	미채택

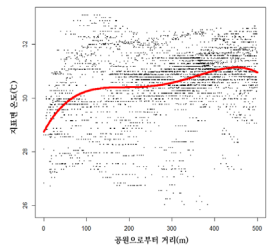
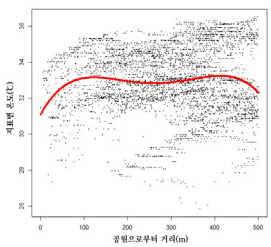
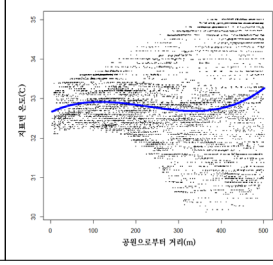
자료: 저자 작성

공원녹지 유형별 다항회귀식의 첫 번째 변곡점을 기준으로 도시열섬 저감(지표면 온도 감소)의 범위 및 수준을 도출한 결과, '공간적 범위'는 대형공원, 중형공원, 소형공원 순으로, '열섬저감 폭'은 중형공원, 대형공원, 소형공원의 순으로 크게 나타났다. 특이사항으로 중형공원의 도시열섬 저감의 폭이 2.07℃로 대형공원의 1.65℃ 보다 높게 나타났으나, 이는 해당 공원의 녹지율 또는 주변 환경의 영향 때문으로 판단하였다.

16) 소형공원의 경우 4차 회귀모형의 설명력이 3차 회귀모형에 비해 다소 높았으나, 4차항의 계수가 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타남에 따라 3차 회귀모형을 선정하였음

다만, 대형공원의 경우 도시열섬 저감효과가 나타나는 공간적 범위가 중형공원 보다 약 66m 크기 때문에 전체적인 저감효과 역시 중형공원보다 클 것으로 예상된다.

표 4-6 | 공원녹지 유형별 거리 및 지표면 온도에 대해 선정된 회귀모형 종합

구분		대형공원	중형공원	소형공원
그래프				
		x축 : 공원으로부터의 거리(m), y축 : 지표면 온도(℃)		
계수	1차	2.903e-02***	4.405e-02***	5.102e-03***
	2차	-1.854e-04***	-3.182e-04***	-2.948e-05***
	3차	4.985e-07***	8.884e-07***	4.338e-08***
	4차	-4.524e-10***	-8.371e-10***	-
상수		2.875e+01***	3.110e+01***	3.266e+01***

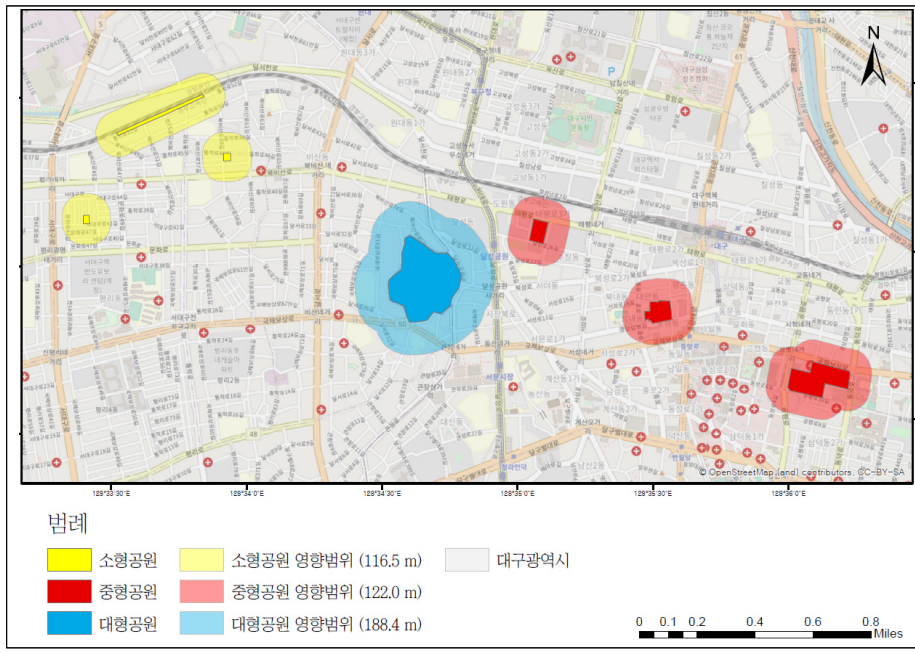
주: *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001
자료: 저자 작성

표 4-7 | 공원녹지 유형별 도시열섬 저감의 공간적 범위 및 수준 종합

공원녹지 유형	열섬저감 효과		비고
	공간적 범위(m)	저감 폭(℃)	
대형공원	188.4	1.65	중형공원의 열섬저감 폭이 가장 높은 데에는 녹지율 또는 주변 환경이 영향을 미친 것으로 판단됨
중형공원	122.0	2.07	
소형공원	116.5	0.26	

자료: 저자 작성

그림 4-3 | 도시열섬 저감의 공간적 범위



자료: 저자 작성, 다만 기초도면(Base map)은 ArcGIS 10.5에 내재 되어 있는 지도 활용

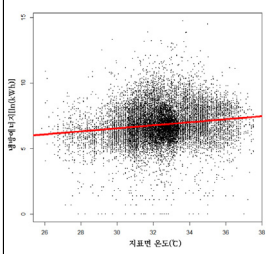
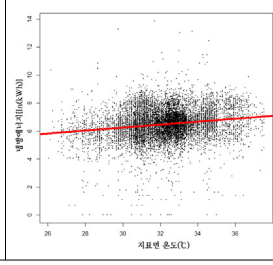
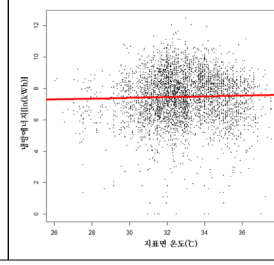
(2) 도시열섬과 냉방에너지 관계 분석

대상지로 선정된 대구의 공원녹지 7개소의 500m 반경 내에서, 주거 및 상업용도를 구분하지 않은 건물의 냉방에너지 소비량과 지표면 온도와의 선형회귀분석을 실시한 결과, 지표면 온도가 1℃ 상승할 때, 냉방에너지 소비량은 약 11.4% 증가하는 것으로 나타났다. 반면 주거 및 상업용도를 구분하여 각각에 대한 선형회귀모형을 구축한 결과, 주거용도 건물인 경우 지표면 온도가 1℃ 감소할 때 냉방에너지의 소비량은 약 10.5% 감소한 반면, 상업용 건물의 경우 여름철 냉방에너지 소비량과 지표면 온도 간의 통계적으로 유의미한 상관성이 나타나지 않았다. 이는 상업 용도의 건물은 도시열

섬 등 환경적 요인에 대한 영향이 주거 용도의 건물에 비해 상대적으로 적기 때문으로 사료된다.

이에 따라 모의실험 부문에서는 건물 용도를 구분하지 않고 도출된 결과인 지표면 온도 1℃ 상승 시, 냉방에너지 소비량 약 11.4% 증가하는 것으로 일반화하여 적용하였다.

표 4-8 | 지표면 온도와 냉방에너지 소비량에 대한 회귀모형 비교검토

구분	용도구분 안함	용도 구분함	
		주거용도	상업용도
그래프			
	x축 : 지표면 온도(℃), y축 : 냉방에너지 소비량		
계수	0.114291***	0.104820***	0.02349
상수	3.114434***	3.115702***	6.70013***
Adjusted R2	0.02363	0.03141	0.0005844
N	15983	11041	4208

주: *p 〈 0.05, **p 〈 0.01, ***p 〈 0.001
자료: 저자 작성

3. 모의실험: 공간계획에 따른 감축효과 변화량 예측

1) 개요

모의실험 대상지로 경기도 내 신도시로 선정하였다. 전체 대상지의 면적은 약 5,000만㎡이며, 본 연구의 대상지 면적은 약 3,000만㎡이다.

신도시는 기존 계획안(이하 계획안1)에서 녹지의 배치를 대폭 수정하여 새로운 계획안(이하 계획안2)을 수립함에 따라 계획 수정 전후의 녹지의 면적 및 배치뿐만 아니라 그에 따른 간접적인 온실가스 감축효과의 변화를 예측하기에 용이하다. 계획안1은 3곳의 수변공원 등을 포함하여 총 4,624,242㎡를 계획한 반면, 계획안2에서는 기후변화 대응역량을 강화하고자 공원녹지 면적을 4,643,000㎡(계획안1 대비 19,000㎡ 증가, 전체부지의 38.38%)으로 상향조정하고 10곳의 수변공원과 3개의 근린공원을 균등하게 분산 및 연결함으로써 지구 내 물길과 바람길(블루-그린 네트워크) 체계를 보완하하였다는 특징이 있다.

또한, 계획안1에서는 대형 및 중형공원을 중앙부에 위치시켰으나, 계획안2에서는 대형 및 중형공원은 외곽으로 배치하고 다수의 소형공원을 중심지에 비교적 조밀하게 위치시켰다. 계획안2를 수립하였을 때 공원녹지의 양적 증대 외에도 탄소흡수량을 증가 등의 질적 제고를 위해 기후위기 대응형 식재 가이드라인 수립, 다기능 탄소숲 조성, 탄소흡수량 공인데이터 확보 등을 추진하였다. 다만, 계획안2에서의 에듀타운(학술용지) 부지는 대부분의 공원녹지가 제외되는 등 탄소중립형 공간으로 보기 어렵다고 판단하여 분석대상에서 제외하였다.

2) 방법

(1) 용도별 냉방에너지 공급량 산정

대상지 1단계 개발지구의 계획안1과 계획안2에 대해 공원녹지의 영향을 받지 않은

총 냉방에너지 수요량을 산정하였다. 먼저 화성시의 용도별 연간 전력사용량 대비 냉방에너지 소비량 비율을 산정하였는데, 이때 냉방용 전력사용량이란 5월 대비 6~9월에 초과 사용된 전력량의 합을 의미한다. 대상지의 용도별 에너지 공급계획에 해당 비율을 적용하여 용도별 냉방에너지 공급량을 산정하였다. 이어서 용도별 냉방에너지 공급량을 용도별 면적으로 나누어 신도시 전체의 '용도별 냉방에너지 공급량 원단위'를 계산하고, 해당 원단위에 1단계 개발지구 계획안1 및 계획안2의 용도별 면적을 곱하여 사례대상지의 용도별 냉방에너지 공급량을 산출하였다.

(2) 공원녹지 영향범위 설정 및 냉방에너지 감축량 산정

계획안1과 계획안2에서의 공원녹지의 간접적 온실가스 감축효과는 공원녹지가 도시열섬을 저감시킬 수 있는 '영향범위'에 포함된 용도별 면적을 산정한 다음, 열섬저감폭에 따른 냉방에너지 감소율(%)[17]을 적용하였다.

각 계획안에서의 공원녹지를 면적에 따라 대형, 중형, 소형으로 구분하고, 각 유형별로 도시열섬 저감의 공간적 범위(표 4-7)에 상응하는 버퍼를 형성하여 영향범위를 분석하였다. 형성된 영향범위가 서로 다른 공원에 의해 상호 중첩되는 경우, 열섬저감폭이 더 큰 영향범위에 포함되는 것으로 하였다. 영향범위에 포함된 용도지역별 면적에 냉방에너지 원단위를 곱하여 냉방에너지 수요량을 산정하였고, 여기에 다시 공원녹지 유형별 도시열섬 저감 폭에 상응하는 냉방에너지 소비량의 감소율을 곱함으로써[18] '녹지조성으로 인한 냉방에너지 감축량'을 산정하였다. 마지막으로 냉방에너지 감축량에 국가 전력 배출계수인 0.4594 $tCO_2eq/MWh \cdot$년을 적용함으로써 녹지조성으로 인한 간접적 감축효과를 최종적으로 산출하였다.

17) 녹지가 냉방에너지를 감소시키는 영향범위와 저감 폭, 이를 감소율로 전환하는 데 필요한 계수 등은 모두 대구광역시에서 도출한 실증분석 결과를 활용함
18) 용도를 구분하지 않은 건물에 대해 도출된 선형회귀식을 활용함

3) 결과

(1) 용도별 냉방에너지 공급량 산정

먼저 경기도 화성시의 용도별 전체 전력사용량 대비 냉방에너지 소비량 비율은 주거용의 경우 7.4%, 일반용 6.1%, 교육용 4.1%, 산업용 4.1% 수준 등으로 나타났다.

신도시의 계획안에서 도출된 용도별 냉방에너지 수요량 원단위 및 1단계 개발지구의 용도별 냉방에너지 수요량은 <표 4-10>과 같다. 계획안2의 총 면적은 계획안1보다 약 575,241㎡ 증가하였으나, 전체 냉방에너지 수요량은 약 2,505,353kWh(2.44%) 감소하였다. 감소한 냉방에너지 수요량은 대부분 상업업무 용지에서 발생된 변화이다. 상업업무 용지의 냉방에너지 수요량의 원단위가 계획안1에서는 136kWh/㎡·년이었으나 계획안2에서 82kWh/㎡·년으로 크게 낮아졌고, 면적은 287,001㎡ 증가하였기 때문이다.

표 4-9 | 신도시 1단계 개발지구의 총 냉방에너지 수요량

구분	계획안1			계획안2		
	원단위 (kWh/㎡·년)	면적 (㎡)	냉방에너지 (kWh/년)	원단위 (kWh/㎡·년)	면적 (㎡)	냉방에너지 (kWh/년)
합계	16.00	6,425,620	102,795,284	14.33	7,000,861	100,289,931
주거용지	7.12	1,487,500	10,589,277	7.71	1,550,011	14,544,383
상업업무	136.70	287,011	39,235,422	82.01	440,258	36,107,414
산업연구	11.77	2,821	33,192	11.77	4,165	49,006
지원시설	45.08	216,001	9,736,630	54.59	241,291	13,172,901
학술	19.11	1,504,598	28,748,927	20.72	1,421,486	29,454,053
관광레저용지	8.18	1,433,639	11,729,949	2.93	1,301,578	3,815,466
공공용지	1.82	1,494,050	2,721,887	1.84	1,705,711	3,146,708

자료: 저자 작성

(2) 공원녹지 영향범위 설정

대구광역시를 대상으로 실시한 실증분석 결과에 기초하여 대상지의 1단계 개발지구 계획안1과 계획안2의 공원녹지의 감축효과가 나타나는 '영향범위의 면적'을 산출하였다. 그 결과 계획안1의 영향범위 면적은 2,649,388㎡이며, 계획안2는 3,127,359㎡로 계획안1보다 약 477,971㎡ 증가하였다. 공원 유형별로 보면, 계획안1과 계획안2 모두 전체 영향범위 중 대형공원의 비중이 각각 60.2%, 51.8%로 가장 높았지만, 중형과 소형의 영향범위 면적은 계획안1에 비해 계획안2에서 크게 증가하였다. 중형은 308,141㎡로 30.5% 증가하였고, 소형은 152,523㎡로 357.6% 증가하였다. 이는 계획안2에서 소형공원의 개수가 크게 늘었기 때문으로 보인다.

표 4-10 | 신도시 1단계 개발지구의 공원녹지 영향범위 면적

구분	계획안1(㎡)				계획안2(㎡)			
	전체	대형공원	중형공원	소형공원	전체	대형공원	중형공원	소형공원
합계	2,649,388	1,595,798	1,010,940	42,650	3,127,359	1,613,105	1,319,081	195,173
주거용지	904,425	571,624	290,151	42,650	1,473,051	537,120	773,477	162,454
상업업무	242,439	95,747	146,692	-	362,809	131,679	227,122	4,008
산업연구	-	-	-	-	-	-	-	-
지원시설	86,168	50,361	35,807	-	108,937	51,436	57,501	-
학술	1,168,757	682,177	486,580	-	851,995	682,196	156,234	13,565
관광레저용지	68,065	68,065	-	-	-	-	-	-
공공용지	179,534	127,824	51,710	-	330,567	210,674	104,747	15,146

자료: 저자 작성

(3) 공원녹지 영향에 따른 냉방에너지 감축량 산정

신도시의 계획안1과 계획안2의 냉방에너지 수요량 중 공원녹지 유형별 영향범위 면적에 대한 수요량을 구분한 다음, 도시열섬 저감 폭에 상응하는 냉방에너지 감소율(표

4-12)을 적용하였다. 그 결과, 계획안2는 계획안1보다 공원녹지에 의한 냉방에너지의 감축량이 4,026,156kWh만큼 감소하였다. 구체적으로 대형 및 중형공원에 의한 감축량이 각각 3,293,389 kWh, 739,568 kWh 감소한 반면, 소형공원에 의한 감축량은 6,801 kWh 증가하였다.

계획안2에서 대형 및 중형공원의 영향범위가 증가하였음에도 불구하고, 냉방에너지의 감축량이 감소한 것은, 각 공원의 공간적 입지 변화에 따른 것으로 해석할 수 있다. 계획안2의 전반적인 공원녹지 분포는 계획안1 보다 균등하게 분산 및 연결되어 있다. 그러나, 도시공원의 유형별로 살펴보면 도시열섬 저감효과가 높은 중형 및 대형공원은 1단계 개발지구의 중심지에서 외곽으로 이동한 반면, 저감효과가 낮은 소형공원은 중심지에 집중적으로 분포하게 되었다. 이에 따라 1단계 개발지구의 중심지에 주로 분포하는 상업업무 지구에서, 공원녹지로 의한 냉방에너지 감축량이 계획안1 대비 계획안2에서 4,110,769 kWh (55.4%) 감소한 것으로 나타났다. 외곽에 주로 분포하는 주거용지 및 지원시설 등에서는 냉방에너지 감축량이 다소 증가하였으나, 상업업무지구에서의 감소량 대비 미미한 편이다.

표 4-11 | 공원녹지 유형별 도시열섬 저감범위 및 저감 폭, 냉방에너지 감축률

구분	대형공원	중형공원	소형공원
열섬저감 범위	188m	122m	117m
열섬저감 폭	1.65℃	2.07℃	0.26℃
냉방에너지 감축률*	18.8%	23.6%	3.0%

* 용도를 구분하지 않고 도출한 선형회귀식의 계수(표 4-8)를 적용함
자료: 저자 작성

표 4-12 | 신도시 1단계 개발지구의 공원녹지 유형별 냉방에너지 감축량

구분	계획안1(kWh/년)				계획안2(kWh/년)			
	전체	대형공원	중형공원	소형공원	전체	대형공원	중형공원	소형공원
합계	14,368,624	7,840,259	6,501,697	26,668	10,342,468	4,546,870	5,762,129	33,469
주거용지	997,752	628,826	342,258	26,668	2,157,297	743,984	1,393,413	19,900
상업업무	7,425,309	3,619,911	3,805,398	-	3,314,540	745,456	2,564,684	4,400
산업연구	-	-	-	-	-	-	-	-
지원시설	655,427	372,151	283,276	-	1,007,865	438,399	569,466	-
학술	4,116,732	2,172,606	1,944,126	-	3,311,649	2,326,802	978,039	6,808
관광레저용지	846,391	846,391	-	-	-	-	-	-
공공용지	327,013	200,374	126,639	-	551,117	292,229	256,527	2,361

자료: 저자 작성

표 4-13 | 신도시 1단계 개발지구의 공원녹지 유형별 온실가스 감축량

구분	계획안1(tCO_2 eq)				계획안2(tCO_2 eq)			
	전체	대형공원	중형공원	소형공원	전체	대형공원	중형공원	소형공원
합계	6,600.9	3,601.8	2,986.9	12.3	4,751.3	2,088.8	2,647.1	15.4
주거용지	458.4	288.9	157.2	12.3	991.1	341.8	640.1	9.1
상업업무	3,411.2	1,663.0	1,748.2	-	1,522.7	342.5	1,178.2	2.0
산업연구	-	-	-	-	-	-	-	-
지원시설	301.1	171.0	130.1	-	463.0	201.4	261.6	-
학술	1,891.2	998.1	893.1	-	1,521.4	1,068.9	449.3	3.1
관광레저용지	388.8	388.8	-	-	-	-	-	-
공공용지	150.2	92.1	58.2	-	253.2	134.3	117.8	1.1

자료: 저자 작성

표 4-14 | 신도시 1단계 개발지구의 냉방에너지 소비량 및 온실가스 증감량 종합*

구분	냉방에너지(kWh/년)				온실가스(tCO_2 eq)			
	전체	대형공원	중형공원	소형공원	전체	대형공원	중형공원	소형공원
합계	▽4,026,156	▽3,293,389	▽739,568	▲6,801	▽1,849.6	▽1,513	▽339.8	▲3.1
주거용지	▲1,159,545	▲115,158	▲1,051,155	▽6,768	▲532.7	▲52.9	▲482.9	▽3.1
상업업무	▽4,110,769	▽2,874,455	▽1,240,714	▲4,400	▽1,888.5	▽1,320.5	▽570	▲2
산업연구	-	-	-	-	-	-	-	-
지원시설	▲352,438	▲66,248	▲286,190	-	▲161.9	▲30.4	▲131.5	-
학술	▽805,083	▲154,196	▽966,087	▲6,808	▽369.9	▲70.8	▽443.8	▲3.1
관광레저용지	▽846,391	▽846,391	-	-	▽388.8	▽388.8	-	-
공공용지	▲224,104	▲91,855	▲129,888	▲2,361	▲103	▲42.2	▲59.7	▲1.1

* 계획안2를 계획안1과 비교했을 때의 추가 감축분에 해당함

자료: 저자 작성

(4) 온실가스 감축량 종합

공원녹지 계획의 변경으로 인해 계획안1에서는 온실가스가 간접적으로 6,600.9 tCO_2eq 감축되었으며, 계획안2의 경우는 4,751.3 tCO_2eq가 감축되었다. 해당 감축량은 10인 이하의 승용차 1대가 배출하는 온실가스 배출량이 89 gCO_2/km라고 했을 때(환경부 보도자료, 2020.08.30.), 연간 1만 km 운행하는 자동차를 7,400~5,400대 줄이는 효과에 상응한다.

단, 계획안2는 계획안1 대비 공원녹지의 영향범위가 증가하였지만, 중형 및 대형공원의 입지 변경(중심에서 외곽으로 이동)으로 냉방에너지 감축량 및 온실가스 감축량 수준은 상대적으로 낮아진 것으로 나타났다. 따라서 계획안2는 계획안1 대비 냉방에너지 감축량은 4,026,156 kWh, 간접적 온실가스 감축량은 1,849.6 tCO_2eq 감소하였다.

모의실험 결과를 해석해보면, 도시개발 사업을 추진할 때 공원녹지의 면적을 확대하고 연계성을 강화하는 데에서 더 나아가, 공원녹지 유형별 균등한 분포와 유형간 연계를 지향해야 한다는 시사점을 얻을 수 있다. 공원녹지 유형에 따라 식생 및 시설 비율이 다르고(도시공원의 규모가 작아지면 시설 비율이 높아짐), 그에 따라 편익 역시 달라지므로(도시공원 규모가 작아지면 열섬저감 효과가 낮아짐) 중대형 도시공원처럼 질적 수준 및 편익이 높은 유형을 되도록 균등하게 배치하는 것이 중요하다. 특히, 상업업무지구가 집중되는 중심지에는 일정 비율 이상이 배치되도록 하고, 소형 또는 선형의 공원을 통해 상호 연계하는 것이 중요하다.

이러한 접근법은 최근 도시 내 공원녹지의 접근성을 높이고자 하는 방향과도 부합한다. 미국과 영국 등에서는 도시민이 일정 시간 내에 중대형 이상 규모의 녹지에 도달할 수 있도록 규정하고 있으며(이상민 외, 2018, p.138-140; Natural England, 2011, p.12), 국내에서도 거주민이 다양한 유형의 도시공원에 접근할 수 있는지를 중요한 평가지표로 개발하여 활용하고 있다(김한수, 2020).

4. 계획수립 단계별 한계점 및 개선방안

본 절에서는 탄소흡수원의 공간적 대상이 되는 공원녹지의 확충과 관련한 법제도를 공간 위계별로 다루었다. 검토 대상 공간계획 법·제도·계획은 국토종합계획, 국토계획평가, 국토모니터링, 광역도시계획, 도시·군기본계획, 도시·군관리계획, 지구단위계획이다.

온실가스 감축에 대한 탄소흡수원의 간접적인 효과뿐만 아니라, 탄소흡수원이 조성된 이후에야 탄소흡수원의 간접효과도 기대할 수 있기 때문에, 탄소흡수원 조성에 대한 내용도 비중 있게 다루었다.

1) 검토 대상 계획 및 제도

(1) 국토 종합계획·계획평가·모니터링

국토종합계획은「국토기본법」제9조를 근거로 수립하는 계획으로, 2019년에 수립된 '제5차 국토종합계획(2019)'은 '기후변화에 대응한 저탄소 국토환경 조성'을 주요 정책으로 제시하였다(대한민국 정부, 2019, p. 115). 세부 목표인 '저탄소 국토환경 조성을 위한 적응기반 향상'을 위해 녹색인프라, 도시 내 공원녹지 확충, 신재생에너지 확대 등을 제안하였고, '깨끗하고 환경 친화적 국토 조성'에서는 국토 생태축과 도심지 녹지공간과의 네트워크 강화를 강조하였다(대한민국 정부, 2019, p. 111). 이와 관련하여 도심지 내 공원·녹지, 건물의 녹지 등의 연결을 위한 그린웨이, 가로수 등을 확충하고 접근성을 개선하는 '녹색 인프라 확충 및 환경서비스 접근성 제고'를 세부 과제로 제안하였다.

국토계획평가는「국토기본법」제19조의2 제1항에 근거하여 최상위계획인 국토종합계획과 상위 유관계획이 부합하는지 여부를 평가하는 것이다. 국토계획평가 기준에는 '저탄소 친환경적 국토이용' 항목이 포함되어 있으며, 이에 대한 세부평가 기준으로 탄소저감을 위한 온실가스 감축 및 대응 측면을 명시하였다. 더불어 온실가스 감축 및

대응 측면의 검토항목으로 온실가스 감축, 탄소흡수원 증대, 신재생에너지 확대, 재해에 대한 예방 및 대응체계 구축 등을 포함하고 있다. 평가기법으로는 시나리오 분석, 모델링 분석, GIS 등을 예시로 제시하였고, 이를 통해 온실가스 배출량 및 오픈 스페이스, 생태공간, 녹지축 등의 변화를 분석하도록 하였다. 하지만 권고적 성격으로 인하여 강제성이 없으며 계획기간 등의 불일치로 상위계획 내용을 반영하는데 실질적인 어려움이 있다는 한계가 있다.

국토모니터링은「국토기본법」제25조(국토 조사)에 따른 인구, 경제, 환경 등의 조사항목에 대해 제25조의2을 근거로 국토의 변화를 진단·전망 주기적 또는 수시로 국토종합계획을 점검하는 절차이다. 국토기본법 시행령 제10조(국토조사의 실시)에 따라 정주지(定住地: 도시 등 사람이 거주하고 있는 일정한 지역)의 온실가스 통계를 조사하도록 하고 있다. (2020. 9. 22. 개정) 국토모니터링 제도는 2021년에 도입되어 아직까지 탄소배출 및 흡수에 관한 모니터링 방안에 대한 연구가 수행 중이라는 한계점이 있다.

(2) 광역도시계획

광역도시계획은「국토의 계획 및 이용에 관한 법률(국토계획법)」의 제10조(광역계획권의 지정)에 따라 지정된 광역계획권의 장기발전방향을 제시하는 계획으로, 도시·군도시계획체계 상 최상위계획이다. 특·광역시 또는 시군의 행정구역이 2개 이상 인접한 경우 공간구조 및 기능을 상호 연계시키고 환경을 보전하며 광역시설을 체계적으로 정비하기 위하여 수립한다. 광역도시계획의 수립권자는 국토교통부장관 또는 시·도지사, 시장 또는 군수이며,「국토계획법」제12조제2항 및 동법 시행령 제10조에 근거하여 국토교통부장관이 정하는 '광역도시계획수립지침'을 따라 수립해야 한다. 이 수립지침에서는 녹지축·생태계·산림·경관 등의 보전 및 확충에 주력하여 광역도시계획을 수립할 수 있도록 여러 기준을 제시하고 있다.

광역도시계획수립지침은 기후위기 대응, 자연환경 보존·관리, 역사문화환경의 보존·활용, 자연재해·재난·감병 등을 고려하여 수립하는 것을 기본원칙으로 제시하였다.

공간구조의 골격구상과 관련하여 광역계획권 내외부의 녹지가 유기적으로 연결되도록 구축하고 훼손 또는 단절 되지 않도록 토지이용계획 및 교통계획을 수립하도록 하였다. 또한 보전축 내 녹지나 생태계 복원이 필요한 지역은 시가화예정지로 지정을 금지하고 녹지 및 생태계 복원 전략을 제시하도록 해야 한다.

그 외 광역도시계획수립지침에서는 '기초조사', '녹지관리계획', '환경보전계획'과 관련하여 탄소흡수원에 관한 사항을 제시하고 있다. 기초조사의 세부항목 및 조사내용에서 '생태/식생, 산지, 공간시설(녹지 현황)'이 포함되어야 한다. 녹지관리계획에서는 녹지축과 녹지거점의 기능 및 규모에 따라 위계를 구분하여 녹지체계를 설정하도록 하였다. 외곽의 공원·녹지 등을 최대한 활용하여 상호연계시키고, 단절·훼손 지점은 복원방향을 제시하도록 하였다. 또한 환경보전계획에서는 생태적으로 보전가치가 높은 지역은 시가화예정지로 지정하지 않는 것을 원칙으로 하되, 불가피하게 개발하는 경우 자연환경 훼손 및 생태계 파괴 최소화 방안을 강구하도록 하였다. 이처럼 광역도시계획에 대한 법제도에서는 공원·녹지에 대한 조사 및 계획수립에 대한 지침을 제시하고 있으나, 온실가스 배출·흡수를 직접적으로 다룬 항목은 없는 실정이다. 기존 부문별 계획에서 탄소흡수원을 고려한 공원·녹지 확충·보전·연결 등 반영과 하위계획과의 정합성 고려가 필요하다.

표 4-15 | 광역도시계획 중 탄소흡수원 관련 내용

부문	주요 내용
기초조사	• 세부항목 및 조사내용에서 생태/식생, 산지, 공간시설(녹지 현황) 가 포함
녹지관리계획	• 녹지축과 녹지거점의 기능 및 규모에 따라 위계를 구분하여 녹지체계를 설정 • 공원 · 녹지 및 개발제한구역 등이 상호 연계되도록 녹지체계를 구상하되, 발전축 및 교통축과 상충되지 않도록 계획 • 시가화 확산을 방지하기 위해 외곽의 개발제한구역, 자연공원, 도시공원 및 도시자연공원구역 등을 최대한 활용한 녹지체계 구축 • 녹지축 상에 단절되거나 훼손된 지점들을 조사 · 분석하고 이들 지점을 복원하기 위한 기본방향 및 전략 등 제시
환경보전계획	• 생태적으로 보전가치가 높은 지역은 시가화예정지로 지정하지 않는 원칙으로 하되, 불가피한 개발사업 추진 시 자연환경 훼손 및 생태계 파괴 최소화 방안을 강구

자료: '광역도시계획수립지침'의 자료를 활용하여 저자 작성

(3) 도시·군기본계획

도시·군기본계획은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률(국토계획법)」 제18조를 근거로 특별시장·광역시장·특별자치시장·특별자치도지사·시장 또는 군수가 관할 구역에 대하여 수립하는 계획이다.

제19조(도시·군기본계획의 내용)에 따라 기후변화 대응 및 에너지절약에 관한 사항을 포함하여야 하며, 국토교통부장관이 정하는 '도시·군기본계획수립지침'을 따라 수립하여야 한다. 한편, 2050년 국가 탄소중립 실현이 국가적 목표로 설정됨에 따라 2021년 12월 30일에 개정된 도시·군기본계획수립지침에서 탄소중립에 관한 구체적인 내용을 담게 되었다. 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」에서 제시하는 탄소중립 사회로의 이행 취지에 적극 대응 하고자 환경적 측면에서 공간구조 개편, 신재생에너지 사용 촉진, 탄소흡수원 확충 등의 내용을 반영함으로써 탄소중립형 도시계획의 수립을 도모하고자 하였다.

도시·군기본계획 수립지침에서는 '기후변화 대응 및 환경친화적 계획 수립'을 기본원칙으로 제시하고 있으며, 산림지, 농경지, 초지, 습지, 연안, 공원 및 녹지 등의 도시 내 탄소흡수원과 건물 등 인공구조물을 활용한 탄소흡수 및 탄소포집을 포함하여 도시의 탄소흡수 능력을 보전·확대하기 위한 계획 및 관리방향을 제시하도록 하였다. 그 외에도 '기초조사', '공간구조', '도심 및 주거환경', '공원·녹지' 분야에서 탄소흡수원 관련 지침을 제시하였다.

먼저 '기초조사' 항목 중 하나로 시군에서 최신자료 기준으로 구축 가능한 최근 5년간 온실가스 배출 흡수량 현황을 수집하도록 하고, 이때 IPCC 국제표준을 준용하도록 하였다. '공간구조계획' 수립 시에는 보전축이 아닌 지역 내 탄소흡수원을 확대하고, 흡수원분포지도 등을 자율적으로 구축하고 탄소흡수가 최적화되도록 공간구조를 개편할 것을 권장하였다.

'도심 및 주거환경 부문' 구시가지 내 온실가스 감축을 위한 그린인프라 확충, 주택 내 탄소흡수원 확충방안 등을 제시할 것을 권장하였다. '공원·녹지계획' 부문에서는 온실가스 감축목표 달성과 연계한 공원·녹지의 온실가스 흡수량을 설정하고, 도시열섬

완화가 가능한 입지 및 조성 계획방안을 강구하는 것을 기본원칙으로 정하였다.

표 4-16 | 도시·군기본계획 중 탄소흡수원 내용

부문	주요 내용
기초조사	• 시군에서 최신자료 기준으로 구축 가능한 최근 5년 간 온실가스 배출 흡수량 현황을 수집하도록 함 • 탄소중립기본법 제36조에 따른 기준, IPCC 국제표준을 준용하여 반영하도록 함(단, 불가피한 경우 시군에서 자율적으로 정함)
공간구조	• 보전축이 아닌 지역 내 탄소흡수원 확대 및 인공구조물을 활용한 입체적 녹화 고려 • 흡수원 분포 지도 등 자율적으로 구축하고 탄소흡수가 최적화되도록 공간구조 개편 권장
도심 및 주거환경	• 도심 및 시가지 정비) 구시가지내 온실가스 감축을 위한 그린인프라 확중 등 개발 전략 및 실천 수단을 강구해야 함 • 주거환경계획) 주택 내 탄소흡수원 확충방안 제시 권장
공원·녹지	• 기본원칙 및 계획방향) 온실가스 감축목표 달성과 연계한 공원·녹지의 온실가스 흡수량 설정하고, 도시열섬 완화가 가능한 입지 및 조성 계획 방안 강구해야 함 • 공원·녹지체계 형성) 공원녹지 조성비율과 온실가스 감축 목표에 따른 탄소흡수량을 고려하여 1인당 조성공원면적, 도시 내 공원·녹지비율 등 목표연도의 공원·녹지지표를 제시해야 함 • 공원·녹지시설의 설치) 공원·녹지에 신재생에너지 발전 및 에너지 저장 등 온실가스 감축 시설·설비 설치 시 경관과 생태, 접근성, 이용성에 영향을 미치지 않아야 함

자료: '도시·군기본계획 수립지침'의 자료를 활용하여 저자 작성

이와 관련하여 탄소흡수량을 고려한 공원·녹지지표를 제시하고, 온실가스 감축 시설·설비를 설치할 때는 경관과 생태, 접근성, 이용성에 영향을 미치지 않아야 한다는 지침을 제시하였다. 이처럼 도시군기본계획은 수립지침을 개정함에 따라 타 계획에 비해 탄소흡수원 관련 사항이 잘 반영되어 있으나, 도심에 중대형 공원을 조성하거나 선형 공원 조성 등 실질적으로 탄소흡수 효과를 높이기 위한 실질적인 내용은 부재한 실정이다.

(4) 도시·군관리계획과 지구단위계획

도시·군관리계획은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률(국토계획법)」의 제24조에 따라 특별시장 · 광역시장 · 특별자치시장 · 특별자치도지사 · 시장 또는 군수가 관할 구역

에 대하여 입안하는 계획이다. 상위계획에서 제시한 장기적인 발전방향을 공간에 구체화시키고 용도지역·지구, 도시개발사업, 지구단위계획 등을 단계적으로 집행하도록 물적으로 표현하는 계획이다. 도시·군관리계획은 환경에 미치는 영향 등에 관하여 환경성검토를 수행하도록 되어 있으며 환경성검토는 환경오염, 기후변화, 생태계 및 주민의 생활에 미치는 영향 등 개발활동에 따른 영향 해소 또는 저감을 목표로 한다. 환경성검토에서 도시지역의 녹지율을 30% 이상 확보하는 것을 원칙으로 명시하고 있으나, 탄소중립과 관련한 직접적인 내용이 포함되지 않았다는 한계점이 있다.

지구단위계획은 토지이용의 기능 증진 및 합리화하고 경관·미관을 개선하여 양호한 환경을 확보하게 하며 당해 구역을 체계적·계획적으로 개발·관리하도록 수립하는 계획으로, 「국토계획법」 제4장 제4절 제49조부터 제52조에 근거한 지침에 따라 계획을 수립한다. 계획 수립 시 기초조사는 「도시·군기본계획수립지침」 및 「도시·군관리계획수립지침」을 따르며 지구단위계획에서 녹지 및 공원 확보, 기후조절에 관한 사항을 선언적으로 포함하도록 하였다.

또한 유형별로 '공원 및 녹지', '토지이용계획', '기반시설' '경관' 등 부문별 계획에 탄소흡수원 관련 사항이 포함되어 있다. 모든 유형의 지구단위계획은 '공원 및 녹지' 부문에서 공원녹지를 자연친화적이며 녹지축이 단절되지 않도록 조성하고, 비점오염 물질의 외부 유출을 저감하는 시설이 되도록 해야 한다. 토지이용계획에서는 각 계획유형별 녹지면적의 비율을 제시하였으며, 주거형의 경우 '기반시설', '경관' 부문에서도 공원과 녹지대 및 가로수 설치에 관한 구체적인 지침을 포함하고 있다.

이처럼 지구단위계획에서는 관련 법제도에 따라 보다 상세한 공원·녹지계획을 수립할 수 있으나, 단위 구역 개발에 따른 기존 탄소 흡수량 손실과 공원녹지 조성에 따른 탄소 흡수량은 고려되지 않았다. 따라서 공원녹지 조성 계획 수립 시 정량적인 탄소 흡배출에 대한 분석이 시행될 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다.

표 4-17 | 지구단위계획 중 탄소흡수원 관련 내용

부문		주요 내용
공통	공원 및 녹지	• 공원·녹지가 자연 친화적이고 녹지축이 단절되지 않도록 조성하고 지구단위계획 구역 내 보행 네트워크 연계를 고려하여 계획 • 비점오염 물질의 외부 유출을 저감하는 시설이 되도록 위치 및 규모를 고려하고 계획구역 내 문화재보호법에 따른 보존 조치가 필요한 경우 녹지용지 면적에 포함하여 계획을 수립 • 대지 내 공지) 가구 및 획지간 동선체계 확립에 도움되도록 공공통로 활용이나 인근 근린공원에 이어지는 녹지축 형성을 적극 검토 • 순차개발) 주거자수에 맞추어 각 개발단계에 적절하게 공급되도록 계획 • 기본적으로 공원 및 녹지는「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」에 따른 공원 및 녹지의 설치기준에 따라 설치
주거형	토지이용계획	• 공업용지와 주거용지 사에 폭 10m이상 완충녹지 계획 • 완충녹지 설치 기준) 주거용지와 면하는 철도부지변 폭 30m 이상, 폭 25m 이상의 도로변은 폭 10m 이상, 철도역 등과 인접은 폭 10m 내외
	기반시설	• 근린공원·어린이공원·완충녹지·경관녹지 등 구역내 공원 또는 녹지의 총면적을 구역면적 기준(30만㎡미만 또는 이상)에 따라 거주인구당 3㎡ 또는 6㎡ 이상으로 구분 • 공원면적과 완충녹지, 경관녹지, 광장, 보행자전용도로, 친수공간, 유수지 등 오픈스페이스의 총면적은 구역면적 기준(3만㎡~30만㎡미만 또는 30만㎡ 이상)에 따라 전체구역의 15% 또는 20% 이상으로 구분
	경관	• 옹벽 전면에 녹지대 및 가로수 설치를 의무화하고 옹벽의 높이가 1m 이상인 경우 녹지 폭을 1m 이상으로 함
산업유통형	토지이용계획	• 녹지용지 비율은 구역 면적의 5% 이상 ~ 15% 이하의 범위로 공동위원회 심의를 통해 결정
관광휴양형	토지이용계획	• 녹지용지는 원지형보전면적과 용지 사이에 설치하는 완충용 녹지, 기타녹지로 계획, 원칙적으로 구역면적의 30% 이상 계획 • 단, 해수욕장 등 녹지 확보가 어려운 구역은 입안권자에 의해 완화 가능

자료: '지구단위계획 수립지침'의 자료를 활용하여 저자 작성

2) 계획수립 단계별 구분 및 개선

본 연구는 각 도시계획 수립과정을 조사–작성–평가–모니터링의 4개 단계로 구분하고, 공간 위계에 따른 탄소흡수원 확충을 위한 관련 법령을 검토하여 개선(안)을 제시하고자 한다. '조사' 단계에서는 온실가스 배출·흡수량 현황을 조사하도록 하였으며, '작성' 단계에서는 온실가스 감축에 유리한 공간을 조성하도록 하고 탄소흡수원 훼손

을 최소화하도록 하였다. ‘평가’ 단계에서는 온실가스 배출을 최소화하고 흡수를 최대화하도록 지표를 마련하여 평가하도록 하였으며, ‘모니터링’ 단계에서는 공원녹지 조성 등 감축 수단 적용 전후에 따른 탄소 감축·흡수량을 모니터링 하도록 하였다.

표 4-18 | 계획수립 단계별 관련 법령 검토항목 및 내용

계획수립 단계	검토항목	개선(안)
조사 단계	·「국토기본법」 시행령 ·「국토계획법」 시행령 ·광역도시계획수립지침 ·도시·군관리계획수립지침	·온실가스 배출·흡수량 현황을 조사
작성 단계	·광역도시계획수립지침 ·도시·군관리계획수립지침 ·지구단위계획수립지침	·탄소 흡수원 훼손 및 탄소 흡수량 손실을 최소화 ·온실가스 감축에 유리한 공간조성
평가 단계	·국토계획평가에 관한 업무처리지침 ·도시·군관리계획수립지침	·온실가스 배출 최소화 및 흡수 최대화 관련 지표: 탄소흡수원 면적당 또는 1인당 탄소 흡수량 등
모니터링 단계	·광역도시계획수립지침 ·도시·군기본계획수립지침	·탄소 감축·흡수량 모니터링

자료: 저자 작성

(1) 조사 단계

조사 단계에서는 온실가스 배출·흡수 현황을 국토조사 단계 또는 기초조사 항목에 포함할 필요가 있다. 「국토기본법」에 따른 ‘제5차 국토종합계획’에서 목표로 제시한 ‘저탄소 국토환경 조성’을 실현하기 위해서는 지역의 온실가스 배출·흡수 현황을 근거로 도시 내 공원녹지를 확충하는 것이 중요하다. 상·하위 계획 간 정합성 확보를 위해 공간 위계별 기초조사항목에 온실가스 배출·흡수 현황을 조사하도록 광역도시계획, 도시·군관리계획에도 반영하도록 해야 한다.

표 4-19 | 조사단계 관련 법 개선(안)

계획	현행	개선(안)
「국토기본법」 시행령	**제10조(국토조사의 실시)** ①법 제25조제1항에서 "대통령령으로 정하는 사항"이란 다음 각 호의 사항을 말한다 4. 정주지(定住地: 도시 등 사람이 거주하고 있는 일정한 지역) 온실가스 통계에 관한 사항	**제10조(국토조사의 실시)** ①법 제25조제1항에서 "대통령령으로 정하는 사항"이란 다음 각 호의 사항을 말한다 4. ——————————— ———온실가스 배출·흡수량————
「국토계획법」 시행령	**제11조(광역도시계획의 수립을 위한 기초조사)** ① 법 제13조제1항에서 "대통령령으로 정하는 사항"이란 다음 각 호의 사항을 말한다. 〈개정 2018. 11. 13.〉 1. 기후 · 지형 · 자원 · 생태 등 자연적 여건 2. 기반시설 및 주거수준의 현황과 전망 3. 풍수해 · 지진 그 밖의 재해의 발생현황 및 추이 4. 광역도시계획과 관련된 다른 계획 및 사업의 내용 5. 그 밖에 광역도시계획의 수립에 필요한 사항	**제11조(광역도시계획의 수립을 위한 기초조사)** ① ——————————— ——————————— —— 1. ——————————· 환경 등 ———— 2. ——————————— 3. ——————————— 4. 온실가스 배출·흡수량 현황 및 전망 5. ——————————— 6. ———————————
광역도시계획 수립 지침	**제3절 기초조사** 2-3-1.광역도시계획에서 조사하여야 할 항목은 별표1(기초조사 세부항목 및 조사내용)과 같다. 다만, 광역계획권의 특성에 따라 여러 항목을 포괄적으로 조사하거나 필요한 항목만을 선택하여 조사할 수 있다.	**제3절 기초조사** 2-3-1.——————————— ——————————— ——————————— ——————————— (1)기초조사 시 온실가스종합정보체계에서 제공하는 해당 시 · 도의 연도별 직 · 간접적 온실가스 배출 · 흡수량을 활용하여 부문별로 현황을 분석하여야 한다.
도시군관리계획수립 지침	**제3장 자료의 활용** 2-3-1. 기초조사 결과는 다음 사항 등에 관한 도시·군관리계획을 입안하는 데 활용할 수 있다. (2) 개발활동의 생태적 영향을 파악하는 환경성 검토	**제3장 자료의 활용** 2-3-1. ——————————— ——————————— (2) ——————————— 및 온실가스 배출·흡수량 변화를 ———————

자료: 「국토기본법」 시행령, 「국토계획법」 시행령, 광역도시계획수립지침, 도시군관리계획수립지침의 자료를 활용하여 일부 인용 및 저자 작성

(2) 작성 단계

작성 단계에서는 온실가스 배출을 최소화하고 온실가스 흡수를 최대화하는 공간계획을 수립하는데 중점을 둘 필요가 있다. 광역도시계획에서는 에너지·탄소흡수원 등 공간확보를 구상하도록 하여 탄소중립을 실현할 수 있도록 구상하고 탄소흡수원 훼손을

최소화하기 위해 주변 녹지의 확충·보전·연결 등을 고려할 필요가 있다.

도시·군기본계획에서는 온실가스가 많이 배출되는 도심에 중형 및 대형공원을 배치하고, 소공원과 연결하여 도시 전반에 선형공원을 조성하는 것이 중요하다. 또한 지구단위계획수립지침' 상에서 개발에 따른 온실가스 발생량을 고려하여 공급을 계획하도록 하고 공원녹지 조성에 따른 탄소 흡수량을 검토할 필요가 있다.

표 4-20 | 작성단계 관련 법 개선(안) 예시

계획	현행	개선(안)
광역 도시 계획 수립 지침	**제3절 공간구조구상 및 기능분담계획** **3-3-1. 공간구조의 골격구상** (1) 공간구조는 인구와 사회 · 경제 · 환경지표를 감안하여 미래지향적인 방향으로 개편될 수 있도록 다음 사항을 포함하여 구상하여야 한다. ① 토지 · 수자원 · 에너지 등 한정적인 자원의 지속가능하고 효율적인 이용을 위한 압축적인 공간구조 형성 ⑧ 기후변화에 따른 자연재해, 재난 및 안전사고, 감염병 대유행 등에 대비한 공간확보 등	**제3절 공간구조구상 및 기능분담계획** **3-3-1. 공간구조의 골격구상** (1) ——— ① ——— · 에너지 · 탄소흡수원 등 ——— ⑧ ——— 대비와 탄소중립 실현을 위한 공간확보 등
	제4절 부문별 계획 **3-4-3. 녹지관리계획** (3) 특별시 · 광역시 등을 중심으로 설정된 광역계획권에서는 시가지의 무분별한 확산을 방지하기 위해 외곽의 개발제한구역, 자연공원, 도시공원 및 도시자연공원구역 등을 최대한 활용하여 녹지체계를 구축한다.	**제4절 부문별 계획** **3-4-3. 녹지관리계획** (3) ——— 방지 및 탄소흡수원 훼손을 최소화하기 ——— 확충·보전·연결 등을 고려한 녹———
	제4절 부문별 계획 **3-4-4. 환경보전계획** (4) 자연환경보전계획은 다음과 같이 수립한다. ② 생태적으로 보전가치가 높은 지역은 시가화예정용지로 지정하지 않는 것을 원칙으로 하되, 불가피하게 개발사업을 추진할 경우에는 개발사업으로 인한 자연환경 훼손 및 생태계 파괴를 최소화할 수 있는 방안을 강구한다.	**제4절 부문별 계획** **3-4-4. 환경보전계획** (4) 자연환경보전계획은 다음과 같이 수립한다. ② ———생태계 파괴, 탄소 흡수량의 손실을 최소화———
도시·군 기본 계획 수립 지침	**제4장 부문별 계획 수립기준** **제9절 공원 · 녹지** 4-9-2. 계획의 방향 (5) 공원 및 녹지에 식재되는 수목의 종류는 지역의 생태 여건과 온실가스 흡수 효과 등을 고려하여 결정하도록 하고, 도심 바람통로 및 미기후와 연계하여 열섬현상을 완화할 수 있도록 입지 및 조성을 계획하는 방안을 강구한다.	**제4장 부문별 계획 수립기준** **제9절 공원 · 녹지** 4-9-2. 계획의 방향 (5) ———

계획	현행	개선(안)
		① 온실가스가 많이 배출되는 도심에 중형 및 대형공원을 배치를 계획하도록 한다. ② 소공원은 서로 연결되도록 하여 도시 전반에 선형으로 계획하도록 한다.
도시·군 관리계획 수립지침	**제7편 환경성검토** **제2장 일반원칙** 7-2-3. 환경성검토는 도시·군관리계획이 환경오염, 기후변화, 생태계 및 주민의 생활에 미치는 영향의 원천적 해소 또는 저감을 목표로 한다.	**제7편 환경성검토** **제2장 일반원칙** 7-2-3. ——————————————————————————기후위기 및 탄소배출, ———————————————————————————
지구단위계획 수립지침	**제2절 지구단위계획의 성격** 1-2-6. 지구단위계획은 인간과 자연이 공존하는 환경친화적 환경을 조성하고 지속가능한 개발 또는 관리가 가능하도록 하기 위한 계획이다	**제2절 지구단위계획의 성격** 1-2-6. ——————————————————————————하고 온실가스 감축에 유리한 공간구조를 형성하고,———————————————————————
	제3장 지구단위계획 수립기준(공통) **제14절 공원 및 녹지** 3-14-1. 공원 및 녹지를 계획하는 경우에는 다음 사항을 고려한다. (3) 공원 또는 녹지는 단지내에서 발생되는 비점오염 물질의 외부 유출을 저감할 수 있는 시설이 되도록 위치 및 규모를 고려하여 계획하여야 한다.	**제3장 지구단위계획 수립기준(공통)** **제14절 공원 및 녹지** 3-14-1. 공원 및 녹지를 계획하는 경우에는 다음 사항을 고려한다. (3) ——————————————————————————저감과 온실가스 흡수를 —————————————————————————— (신설) (5) 개발 에 따른 온실가스 발생량을 고려하여 공원 또는 녹지 공급을 계획하도록 하고 공원녹지 조성에 따른 탄소 흡수량을 검토하도록 한다.
	3-14-3. 순차개발을 하는 경우에 공원 및 녹지는 개발단계별로 입주하는 주거자수에 맞추어 각 개발단계에 적절하게 공급되도록 계획하여야 한다.	3-14-3. ——————————————————————————주거자수 또는 개발에 따른 온실가스 발생량에 ———————————————————————————

자료: 「국토기본법」 시행령, 「국토계획법」 시행령, 광역도시계획수립지침, 도시군관리계획수립지침의 자료를 활용하여 일부 인용 및 저자 작성

(3) 평가 단계

평가 단계에서는 '국토계획평가에 관한 업무처리지침' 별표2를 통해 국토·도시계획이 탄소중립녹색성장기본계획에 부합한 지를 평가할 필요가 있다. '도시군관리계획수

립지침' 에서는 정량적 평가지표로 탄소흡수원 면적당 또는 1인당 탄소 흡수량을 평가하고, 정성적 평가로 탄소흡수원 확충 등 온실가스 흡수 방안을 검토하는 것을 제안하였다.

표 4-21 | 평가단계 관련 법 개선(안) 예시

계획	현행	개선(안)
국토계획평가에 관한 업무처리지침	**〈별표2〉** ·환경보전계획 및 정책과의 부합성 - 국가환경종합계획, 환경비전21, 생물당양성국가전략, 자연환경보전기본계획, 환경보전중기계획, 물관리종합대책, 기후변화협약대응 종합대책 등과의 부합 여부 ·환경 보전을 위한 계획의 적정성 -토지이용계획이나 공간개발전략 수립, 기반시설 구상 등 각종 개발 계획시 자연환경 훼손 저감 등 환경요소를 고려한 계획내용 수립여부 및 관련 근거 제시	**〈별표2〉** ·환경보전계획 및 정책과의 부합성 - ——— 종합대책, 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획 ——— ·환경 보전을 위한 계획의 적정성 - ——— 훼손 저감, 탄소흡수원 확충 등 ———
도시·군 관리계획 수립지침	**제3장 환경성검토의 내용 및 방법** **제2절 자연환경 평가기준 및 방법** **7-3-2-1. 기상·기후 및 에너지** (1) 기상·기후의 변화가 자연환경에 미치는 영향 및 도시·군관리계획이 기후 및 에너지 소비에 미치는 영향의 최소화를 목표로 한다. (3) 정량적 지표로는 단위 건물당 연간에너지 소비량이나 단위건물당 연간 CO_2 발생량이 대표적이나, 객관적인 평가기준이 설정되어 있지 않은 경우 정성적 지표를 위주로 평가한다. (4) 정성적 평가를 위한 주요 검토지표는 다음과 같다. ④ 바람통로의 설정 등 겨울철 찬공기 정체 및 여름철 열섬현상을 완화시키기 위한 방안	**제3장 환경성검토의 내용 및 방법** **제2절 자연환경 평가기준 및 방법** **7-3-2-1. 기상·기후 및 에너지** (1) ——— 소비, 온실가스 배출에 미치는 영향의 ——— (3) ——— 발생량, 탄소흡수원 면적당 또는 1인당 탄소 흡수량으로 하며, ——— (4) 정성적 평가를 위한 주요 검토지표는 다음과 같다. ④ 탄소흡수원 확충, 바람통로——— 온실가스 흡수, 겨울철———
	7-3-2-5. 녹지 (1) 녹지의 평가는 토양기능의 보전과 녹지기능의 개선을 함께 유도할 수 있는 방향으로 검토가 이루어져야 한다.	7-3-2-5. 녹지 (1) ——— 개선, 온실가스 흡수의 최대화를 함께———

자료: 국토계획평가에 관한 업무처리지침, 도시군관리계획수립지침의 자료를 활용하여 일부 인용 및 저자 작성

(4) 모니터링 단계

모니터링 단계에서는 탄소 감축·흡수량 변화를 모니터링하여 녹지조성 등 감축수단 전후의 계획을 비교하도록 하였다.

표 4-22 | 모니터링단계 관련 법 개선(안) 예시

계획	현행	개선(안)
광역 도시 계획 수립 지침	**제4절 부문별 계획** 3-4-3. 녹지관리계획 (4) 녹지축상에 단절되거나 훼손된 지점들을 조사·분석하고 이들 지점을 복원하기 위한 기본방향 및 전략 등을 제시한다.	**제4절 부문별 계획** 3-4-3. 녹지관리계획 (4) —————————— —————————— —제시하고 이전 계획과 비교하여 모니터링한다.
도시·군 기본 계획 수립 지침	제7절 환경의 보전과 관리 4-7-2. 탄소중립도시 조성 (6) 탄소중립도시 조성 계획 방안 ②감축 목표 달성을 위하여 필요한 감축 수단(흡수·포집 수단을 포함한다.)을 제시한다.	제7절 환경의 보전과 관리 4-7-2. 탄소중립도시 조성 (6) 탄소중립도시 조성 계획 방안 ②—————————— ——————제시하고 탄소 감축·흡수량을 모니터링 한다.

자료: 광역도시계획수립지침, 도시군기본계획수립지침의 자료를 활용하여 일부 인용 및 저자 작성

5. 종합 및 시사점

본 장은 공원녹지의 온실가스 감축효과를 실증하고, 이를 신규 도시개발계획에 적용하여 탄소감축의 관점에서 계획의 적정성을 검토하였다. 이를 토대로 도시계획 수립 단계별 한계점과 개선 방안에 대해 다루었다.

먼저 대구광역시를 대상으로 공원녹지가 도시열섬을 저감하는 공간적 범위와 수준, 도시열섬 저감효과를 냉방에너지 사용의 감소량으로 변환할 수 있는 관계식을 도출하였다. 여기서 도출된 결과를 경기도에 위치한 두 개의 신도시 계획안에 적용함으로써, 공원녹지 계획의 차이에 따른 냉방에너지 사용의 감소량과 그에 따른 간접적인 온실가스 감축량 변화를 살펴보았다.

실증분석 결과, 도시공원은 열섬현상을 저감시키는 데 효과가 있으며 공원의 규모가 클수록 영향 범위가 넓어진다. 지표면 온도 저감폭은 공원의 크기와 비례하지는 않는 것으로 나타났다. 한편, 일반적으로 도시열섬 현상이 심화될수록 냉방에너지 사용량이 증가하는 것으로 알려져 있는데, 본 연구는 지표면 온도 1℃ 상승할 때 마다 건물의 냉방에너지 소비량이 약 11.4% 증가한다는 정량적인 관계식을 도출하였다.

실증분석 결과를 신도시의 계획안1과 계획안2에 적용한 결과, 도시공원의 절대적인 면적과 영향범위가 증가하더라도 공원이 도시 외곽에 위치하였을 경우, 온실가스 감축 효과는 상대적으로 낮아지는 것을 확인하였다. 이를 통해, 공원녹지의 온실가스의 간접적인 감축 효과를 높이기 위해서는 절대적인 면적 증가뿐만 아니라, 공간적으로 적정하게 배치하는 것도 매우 중요하다는 시사점을 도출하였다.

현재 우리나라 국토·도시계획은 공간위계에 따라 공원녹지 조성 및 네트워크 강화를 선언적 또는 부문별 계획으로 제시하고 있다. 그러나 탄소중립과 관련한 계획수립 기준이 구체적으로 반영되지 않았다는 한계가 있다. 2021년에 개정한 도시·군기본계획 수립지침 외에, 국토·도시와 관련한 계획들은 기초조사에서 온실가스 배출·흡수량 현황 파악조차 부재한 실정이다. 이처럼 공간 위계별로 탄소중립 관련 계획 기준이 부재함에 따라 탄소흡수원 확충을 위한 근거가 미흡하고, 사업을 통해 이를 확충하고 관리

하는 데도 한계가 따른다. 이에 따라 탄소중립 관련 내용이 부족한 계획을 대상으로, 계획수립 단계별 탄소흡수원 확충의 근거를 마련하기 위해 온실가스 배출·흡수·저장량 현황 조사와 탄소흡수원 등의 내용을 포함하도록 법제도의 개선(안)을 제안하였다.

CHAPTER 5

결론

1. 연구의 결과 ····· 101
2. 법제도의 개선방안 ····· 103
3. 연구의 한계 및 향후 과제 ····· 104

05 결론

본 장에서는 탄소흡수원의 온실가스 감축효과 분석과 국토·계획수립 과정의 한계점과 개선방안에 대한 주요 성과와 학술적·정책적 기여도 및 한계점을 정리하였다. 우리나라는 2050년까지 탄소중립을 실현하는 것이 중요한 국가정책으로 강조하고 있으나, 국토·도시계획의 세부 지침에서는 탄소흡수원 확충·관리에 대한 구체적인 기준이 반영되지 않은 현시점에서 본 연구 결과가 기여하는 바가 클 것으로 예상된다. 이 연구는 국내 도시를 대상으로 탄소흡수원의 간접적인 온실가스 감축효과를 정량적으로 산출하였다는 데 의미가 있다. 향후 연구에서 대기온도, 대상도시의 유형, 도시의 형태 등을 고려한다면 보다 실효성 있는 시사점을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

1. 연구의 결과

본 연구는 도시 내 탄소흡수원을 중심으로 온실가스 감축 효과를 살펴보고, 바람직한 탄소흡수원을 조성하는 방안과 이를 실행하기 위한 국토·도시계획 수립과정의 단계별 개선방안을 제시하였다. 구체적으로는 국내외 사례, 선행연구, 실증사례 분석, 모의실험을 통해 국토·도시계획에 적용가능한 온실가스 감축 방안을 탐색하였고, 국토·도시계획의 수립과정을 '조사 - 작성 - 평가 – 모니터링'의 4단계로 구분하여 한계점과 개선방안을 제시하였다.

실증분석의 결과, 도시공원은 열섬현상을 저감시키는 효과가 있었으며, 공원의 규모가 클수록 영향 범위가 넓어진다. 대형공원인 경우는 188.4m, 중형공원인 경우는 122.0m, 소형공원인 경우는 116.5m 정도까지 영향을 미치는 것을 확인하였다. 지표면 온도저감폭은 대형공원인 경우 1.65℃, 중형공원인 경우는 2.07℃, 소형공원인 경우는 0.26℃로, 공원의 크기와 비례하지는 않는 것으로 나타났다. 일반적으로 도시열섬 현상이 심화될수록 지역의 냉방에너지의 사용량은 증가하는 것으로 알려져 있는데,

모든 건물용도를 포함하여 분석하였을 때, 지표면 온도 1℃ 상승 시 냉방에너지 소비량은 약 11.4%가 증가하는 결과가 도출되었다.

실증분석의 결과를 신도시에 적용한 모의실험에서는 도시공원의 절대적인 면적과 영향범위가 증가함에도 불구하고 공원이 도시 외곽에 위치하였을 경우, 온실가스 감축효과는 상대적으로 낮아지는 것을 확인하였다. 계획안2는 계획안1에 비해 공원녹지의 면적이 증가하였으나, 냉방에너지 감축량은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 실증분석과 모의실험 결과를 종합해 볼 때, 공원녹지의 간접적인 온실가스 감축효과를 높이기 위해서는 절대적인 면적을 증가시키는 것뿐만 아니라, 공원녹지를 공간적으로 적정하게 배치하는 것이 중요하다는 시사점을 도출할 수 있다. 중형 혹은 대형공원은 중심사업지구가 위치한 도심에 배치하는 것이 온실가스 감축에 효과적이며, 대형공원 사이에는 중소형 공원을 상호 연결시킨 선형공원을 조성하여 공원의 영향권을 증대시키는 것이 바람직하다.

이러한 원칙을 토대로 도시계획 관련 법·제도를 검토하여 한계점을 도출하였다. 먼저 '광역도시계획'은 수립지침을 통해 현재 다양한 기초조사 항목을 제시하고 있으며 광역계획권에 따라 이를 포괄적으로 조사하거나 필요한 항목만 선택할 수 있도록 하였다. 하지만 직접적으로 온실가스 배출·흡수와 관계있는 항목이 부재한 실정이다. '도시·군기본계획'은 2021년 수립지침 개정으로 타 계획에 비해 탄소흡수원 관련 사항이 구체적으로 반영되어 있으나, 탄소흡수 효과를 높이기 위해 도심에 중대형 공원을 조성하거나 선형 공원을 조성하는 내용 등은 미흡하다. '도시·군관리계획'은 탄소중립에 관련한 내용이 반영되어 있지 않으므로, 도시·군기본계획과 같이 전반적인 개선이 필요하다. '지구단위계획'은 법제도에 따라 공원·녹지계획을 수립할 수 있는 상세한 근거가 마련되어 있으나, 단위 구역 개발에 따른 기존 탄소 흡수량 손실과 공원녹지 조성에 따른 탄소 흡수량을 고려하는 내용이 부재한 실정이다.

2. 법제도의 개선방안

현행 국토·도시계획 수립과정의 단계별 개선방안은 다음과 같다. 첫째, 조사단계에서는 온실가스 배출·흡수 현황에 대한 조사항목을 국토조사 단계 또는 기초조사에 포함할 필요가 있다. 상·하위 계획 간 정합성 확보를 위해 광역도시계획, 도시·군관리계획공간의 기초조사 항목에 온실가스 배출·흡수 현황을 조사하도록 개선하는 것이 바람직하다. 둘째, 작성 단계에서는 온실가스 배출을 최소화하고 온실가스 흡수를 최대화하는 공간계획을 할 수 있는 근거를 마련해야 한다. 광역도시계획에서는 에너지·탄소흡수원 등 공간확보 방안을 구상하여 탄소중립을 실현할 수 있도록 하고, 탄소흡수원 훼손을 최소화하기 위해 주변 녹지의 확충·보전·연결 등을 고려하도록 한다. 도시·군기본계획에서는 온실가스가 많이 배출되는 도심에 중형 및 대형공원을 배치하고, 소공원과 연결하여 도시 전반에 선형공원을 조성하는 방안을 지침을 제시할 필요가 있다. 지구단위계획은 수립지침 상에서 개발에 따른 온실가스 발생량을 고려하여 탄소흡수원의 공급을 계획하도록 하고, 공원녹지 조성에 따른 탄소 흡수량을 검토하도록 해야 한다.

셋째, 평가단계에서는 '국토계획평가에 관한 업무처리지침' 별표2를 수정하여, 국토·도시계획이 탄소중립녹색성장기본계획에 부합한 지 평가하는 방안을 추가할 필요가 있다. '도시군관리계획수립지침'에서는 정량적 평가를 위한 지표로 탄소흡수원 면적당 또는 1인당 탄소 흡수량을 조사하도록 하고, 정성적 평가로 탄소흡수원 확충 등의 온실가스 흡수 방안을 검토하는 것이 바람직하다.

넷째, 모니터링 단계에서는 탄소 감축·흡수량 변화를 모니터링하여 녹지조성 등 감축수단 전후 계획을 비교하도록 할 필요가 있다.

3. 연구의 한계 및 향후 과제

본 연구는 공원녹지가 온실가스 감축에 간접적으로 기여하는 정도를 정량적으로 분석했다는 데 의의가 있다. 하지만 향후 연구에서 다음의 사항을 보완할 필요가 있다.

첫째, 지표면 온도와 에너지 사용량 간의 관계를 파악하여 온실가스 감축량을 산정하였으나, 지표면 온도보다는 대기 온도가 냉방 에너지 사용량과 더 큰 관계가 있을 것으로 사료된다. 따라서, 대기 온도와 냉방 에너지 사용량 간의 관계를 파악한 후, 온실가스 감축량을 산정할 필요가 있으나 이는 향후 과제로 남겨두고자 한다.

둘째, 본 연구는 대구광역시를 대상으로 지표면 온도에 영향을 주는 공원녹지의 공간적 범위를 설정하였으며, 지표면 온도와 에너지 사용량과의 관계를 분석하였다. 그러나 분석의 대상지를 변경하였을 경우, 도시공원의 영향권은 다르게 나타날 것으로 예상된다. 구체적으로 대상지역이 대도시가 아니라, 중소도시 혹은 연안도시, 농촌도시로 분석할 경우 상이한 결과가 도출될 수 있다. 따라서, 일반화된 결론을 도출하기 위해서는 도시의 유형을 보다 세부적으로 구분한 후, 도시 유형별 공원녹지의 역할을 규명하는 것이 필요하다.

셋째, 본 연구에서는 공원녹지의 면적에 따른 영향권의 범위를 살펴보고, 이를 타 토지이용계획에 적용하여, 온실가스 감축 정도를 살펴보았다. 하지만 공원녹지는 단순히 면적뿐만 아니라 형태에 따라서도 그 역할이 다를 것으로 예상된다. 향후 과제에서는 공원녹지의 형태에 따른 온실가스 감축 정도를 정량화함으로써 국토·도시계획에 대한 시사점을 도출할 필요가 있다.

참고문헌
REFERENCE

【 국내문헌 】

2050 탄소중립위원회. 2021a. 2050 탄소중립 시나리오.

2050 탄소중립위원회. 2021b. 탄소중립 학습 자료집.

관계부처 합동. 2021. 2050 탄소중립 시나리오안(2021. 10. 18.)

국립산림과학원. 2019. 산림정책이슈 제129호.

국토교통부. 2022. 개발제한구역과 연계한 탄소흡수원 확충방안 연구.

국토연구원. 2023. 탄소중립형 스마트도시 추진을 위한 탄소공간지도 구축방안 연구(현재 연구 수행 중).

김경순·피정훈·안지홍·임치홍·정성희·주승진·이창석. 2016. 서울의 두 도시 근린공원에서 평가된 탄소수지. 한국하천호수학회 49(10): 51-61.

김광석·이현지. 2015. 세계 주요국의 저탄소 도시 정책동향과 시사점. 건설경제. 81-89.

김기중·김동준·이창효·이승일. 2018. 도시공원의 규모와 형태별 주변지역의 지표온도·건물에너지소비저감 영향범위 분석 연구. 한국지역개발학회지. 30(2): 155-176.

김래현·조성실·이선정·이주원. 2021. 탄소중립, 장기저탄소발전전략 및 자연기반해결방안 추진 현황과 시사점. 국제산림정책토픽(102). 국립산림과학원.

김병찬·강재우·박찬·김현지. 2020. 심층신경망 모형을 이용한 서울시 도시공원 및 녹지공간의 열섬저감효과 분석. 한국조경학회지 48(4): 19-28.

대한민국도지사협의회. 2022. 주민과 함께 만드는 탄소중립도시 대덕. K-Glocal Newsletter. 5: 13-16.

대한민국 정부. 2019. 제5차 국토종합계획.

대한민국 정부. 2020. 지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략.

문주연·임철희·송철호·이우균. 2015. 도시림이 여름철 도시 미기후에 미치는 영향 연구. 대한공간정보학회 학술대회: 121-124.

박종순·안예현·김유민·이은석·박상준·박종화·김자인. 2022. 국토교통 2050 탄소중립 추진전략 수립.

박종화·조기혁. 2016. 공원 크기에 따른 공원의 온도저감 효과 분석-일산 신도시를 대상으로-. 국토계획. 51(5): 247-261.

박채연·이동근·권유진·허민주. 2017. 도시열섬현상완화를 위한 그린인프라 전략. 한국환경복원기술학회지. 20(5): 67-81.

산림청. 2020. 신기후체제(Post-2020) 대응 국가수준 토지이용변화 매트릭스 구축 및 검증기술 개발 최종보고서.

서울연구원. 2019. 폭염 대비 사회연결망 강화·취약지역 우선 개선 (미국 뉴욕市). 세계도시동향, 제458호. 서울:서울연구원.

신서경·손재선·이다예. 2022. 탄소중립 실현을 위한 도시공간정책 개선방안 연구. 세종:국토연구원.

안승만·김승종·이형찬. 2016. 도시지역 미기후 관리방향 연구. 세종: 국토연구원.

온실가스종합정보센터. 2019. 2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서.

온실가스종합정보센터. 2020. 2020 국가 온실가스 인벤토리 보고서.

왕광익·이범현·이병재. 2016. 신(新)기후변화체제에 대비한 도시 공간정책 및 관리방향 연구. 수시 16-40. 안양: 국토연구원.

이관규. 2003. 아파트단지의 녹지 지속가능성 지표 개발. 서울대학교 대학원 박사 학위 논문.

이동근·박진한·박찬. 2010. 도시 녹지 가치 평가를 위한 탄소 흡수량 추정. 환경영향평가 19(6): 607-615.

이범현. 2010. 싱가포르의 기후변화 대응정책: ABC Program. 해외리포트(342). 세종: 국토연구원.

이상민, 김용국, 이여경. 2018. 녹색도시 정책여건 변화에 대응한 공원녹지 지표 개발

방안 연구. 세종: 건축도시공간연구소
이수진·김기중·이승일. 2019. 연립방정식을 이용한 도시온도와 건물에너지 소비의 상호 영향관계 실증 분석. 서울도시연구. 20(1): 33-44.
이우균. 2021. 탄소중립대응을 위한 탄소흡수원 관리. 기상청 기상기술정책. 2021(12): 5-65.
이정찬·윤은주·김희철·김소윤·오병철·이미영·박종순·안승만. 2020. 건물 분야 온실가스 감축을 위한 건물·토지공간 활용 전략. 기본 20-32. 세종: 국토연구원.
조향훈, 오창호, 박예진, 신민경, 안진영, 김흥순. 2022. 계절적 요인을 고려한 건물 전기에너지 사용에 영향을 미치는 요인 분석 – 서울특별시를 대상으로 –. 국토지리학회지. 56(2): 113-124.
최영국·정진규·심우배·이문원·임은선·김명수···박정은. 2008. 기후변화에 대응한 지속가능한 국토관리 전략 (Ⅰ) 지역별 온실가스 인벤토리 구축 및 지역특성 분석. 국토연 2008-43. 안양: 국토연구원.
한미경·김경진·양금철. 2014. 도시공원 식재유형별 탄소저장량, 연간 탄소흡수량 및 토양 호흡량 비교. 한국환경생태학회지 28(2): 142-149.
환경부. 2022. 2050 탄소중립 교육 참고자료집.

【 국외문헌 】

Aram, F., García, E.H., Solgi, E. & Mansournia, S. 2019. Urban green space cooling effect in cities. Heliyon. 5(4): 1339.
City of Helsinki. 2018. The Carbon-neutral Helsinki 2035 Action plan.
City of New York. 2017. Cool Neighborhoods NYC: A Comprehensive Approach to Keep Communities Safe in Extreme Heat. (https://www.nyc.gov/assets/orr/pdf/Cool_Neighborhoods_NYC_Report.pdf)

Feyisa, G. L., Dons, K., & Meilby, H.. 2014. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. Landscape and urban planning. 123: 87-95.

Gao, Z., Zaitchik, B. F., Hou, Y., & Chen, W.. 2022. Toward park design optimization to mitigate the urban heat Island: Assessment of the cooling effect in five US cities. Sustainable Cities and Society. 81. 103870.

HSY(Helsinki Region Environmental Services Authority). 2021. Report on carbon sinks and carbon storages in the Helsinki metropolitanarea(https://julkaisu.hsy.fi/selvitys-paakaupunkiseudun-hiiliniel uista-ja-varastoista.pdf). 1-50.

Jaganmohan, M., Knapp, S., Buchmann, C. M., & Schwarz, N.. 2016. The bigger, the better? The influence of urban green space design on cooling effects for residential areas. Journal of environmental quality. 45(1): 134-145.

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. Applied Energy. 183: 1428-1440.

McPherson, E.G. & Simpson, J.R. 2003. Potential energy savings in buildings by an urban tree planting programme in California. Urban forestry & urban greening. 2(2): 73-86.

NAC(Natural Areas Conservancy). 2014. Upland and Forest Ecological Assessment Protocol (v4).

NAC(Natural Areas Conservancy). 2020. Calculating Carbon Storage and Sequestration in New York City's Natural Area Forests(https://naturalareasnyc.org/media/pages/climate/ab753dd0d1-15984

71724/carbon-report_handout_final_august5.pdf). 1-4.

Natural England. 2011. Nature Nearby: Accessible Natural Greenspace Guidance. 12-17.

Oliveira, S., Andrade, H., & Vaz, T.. 2011. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. Building and environment. 46(11): 2186-2194.

Park, J. H., & Cho, G. H.. 2016. Examining the association between physical characteristics of green space and land surface temperature: a case study of Ulsan, Korea. Sustainability. 8(8). 777.

Pregitzer, C.C., Hana, C., Charlop-Powers, S. & Bradford, M.A.. 2020. Carbon Accounting for New York City Natural Area Forests. Natural Areas Conservancy Report. (https://naturalareasnyc.org/media/pages/climate/d734f14737-1599830702/final.carbon.summary.report_july2020_to-edited.pdf).

Science Based Targets. 2020. SBTs for Cities Guide.

Shah, A., Garg, A., & Mishra, V.. 2021. Quantifying the local cooling effects of urban green spaces: Evidence from Bengaluru, India. Landscape and Urban Planning. 209. 104043.

UNEP. 2020. Emission Gap Report 2020. Nairobi.

Zhang, B., Gao, J.X. & Yang, Y. 2014. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China. Building and environment. 76: 37-43.

【 법령 】

광역도시계획수립지침(국토교통부훈령 제1344호, 2020.12.14. 전부개정)

국토계획평가에 관한 업무처리지침 (국토교통부고시 제2018-5호, 2018. 1. 2. 일부개정)
국토기본법(법률 제18829호, 2022. 2. 3., 일부개정)
국토의 계획 및 이용에 관한 법률 (법률 제19117호, 2022. 12. 27., 타법개정)
기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 (법률 제18469호, 2021. 9. 24. 제정)
도시·군관리계획수립지침 (국토교통부훈령 제1615호, 2023. 4. 21., 일부개정)
도시·군기본계획수립지침 (국토교통부훈령 제1470호, 2021. 12. 30. 일부개정)
도시공원 및 녹지 등에 관한 법률 (법률 제17893호, 2021. 1. 12., 타법개정)
온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률 (법률 제18469호, 2021. 9. 24. 타법개정)
지구단위계획수립지침 (국토교통부훈령 제1131호, 2018. 12. 21., 일부개정)
탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률 (법률 제18469호, 2021. 9. 24., 타법개정)

【 언론 보도 및 온라인 자료 】

건축공간연구원. 2021. 광주시, 2045 에너지 자립도시 실현 박차(2021. 9. 20.).
http://www.aurum.re.kr/Research/PostView.aspx?mm=1&ss=1&pid=22484&gid=0&cpage=1(2022. 08. 05. 접속)
경남신문. 2021. '주민 참여' 합천댐 수상태양광 발전소 가동(2021. 11. 24.).
http://www.knnews.co.kr/news/articleView.php?idxno=1364088(2022. 08. 05. 접속)
광명시 기후에너지센터. 2022.
https://netzero.gm.go.kr/main/index.php(2022. 08. 05. 접속)
국가공간정보포털. 2022. 공원·유원지·녹지현황 정보. www.nsdi.go.kr(2022. 08. 05. 접속)
국가온실가스 종합관리시스템. 2022. 제도소개-온실가스 배출권거래제.
https://ngms.gir.go.kr/cm/cmz/popup/popup_system_intro3.html(2022. 08. 05. 접속)
기상청 보도자료. 2021. 기후변화가 바꾼 우리나라 사계절과 24절기(2021. 4. 28.).

https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156449187(2022.08.05. 접속)

김한수. 2020. 경기도 도시공원 신규지표 도입방안. 경기연구원 정책브리프. https://blog.naver.com/gri_blog/221839970944(2022.08.18. 접속)

네이버 지도. 2022. 2020년 공원, 유원지, 녹지현황. https://map.naver.com/p?c=15.00,0,0,2,dh (2022.08.05. 접속)

당진시 보도자료. 2021. 당진시, 환경부 주관 지방정부 탄소중립 우수 사례 선정(2021.12.16.) https://www.dangjin.go.kr/cop/bbs/BBSMSTR_000000000014/selectBoardArticle.do?nttId=1082282&kind=&mno=sitemap_12&pageIndex=210&searchCnd=&searchWrd=(2022.08.05. 접속)

대구광역시. 2021. http://www.daegu.go.kr/daeguPolicy/9/index.html (2022.08.05. 접속)

대구역사문화대전:달서구. 2023. 푸른 대구 가꾸기. http://www.grandculture.net/daegu/dalseogu/toc/GC40003466 (2023.01.03. 접속)

대한경제. 2021. 대한경제, [탄소중립 넘어 탄소흡수] 韓, 국토 63% 숲인데 목재 자급률 16%...활용실적 '미미'(2021.7.14.). https://m.dnews.co.kr/m_home/view.jsp?idxno=202107061728249580999 (2022.08.05. 접속)

대한민국 정부. 2021. Q&A로 알아보는 2050 탄소중립 ② “2030 NDC, 무슨 뜻이에요?”(2021.11.05.). https://post.naver.com/viewer/postView.naver?volumeNo=32696513&memberNo=30808385(2022.08.05. 접속)

대한민국 정책브리핑. 2021a. 그린리모델링·제로에너지건축 확대…‘녹색건축’ 활성화. https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148888283(2022

. 08. 23. 접속)
대한민국 정책브리핑, 2021b, 2050 탄소중립.
https://www. korea. kr/special/policyCurationView. do? newsId=148881562(2022. 08. 05. 접속)
산업통상자원부 보도자료. 2020. 제9차 전력수급기본계획(2020-2034) 확정·공고(2020. 12. 28.).
https://www. korea. kr/news/pressReleaseView. do? newsId=156429427 (2022. 08. 23. 접속)
서울경제. 2021. 울산시"부유식 해상풍력 세계 1위 도전"(2021. 5. 6.)
https://www. sedaily. com/NewsView/22M98GMSP7(2020. 08. 05. 접속)
스마트투데이, 2020. [스마트시티 구축사례] 싱가로프가 무더위를 식히면서 시원하게 지내는 방법(2020. 12. 4.).
https://www. smarttoday. co. kr/news/articleView. html? idxno=10411(2023. 08. 10. 접속)
아시아엔. 2021. '친환경 도시국가' 싱가포르, 자연과 문명 사이에서 균형 찾는다. (2021. 10. 20.). http://kor. theasian. asia/archives/300476 (2022. 08. 05. 접속)
포브스. 2016. 청정녹색도시, 싱가포르(2016. 1. 23.).
https://jmagazine. joins. com/forbes/view/310013(2022. 08. 05. 접속)
한국일보. 2017. 도심공원 이어진 길 300km, 마음껏 걷고 뛰는 정원 속 도시(2017. 4. 3.).
https://www. hankookilbo. com/News/Read/201704031432617384(2023. 08. 10. 접속)
호주 빅토리아주관광청. 2022. 로얄 보타닉 가든, 빅토리아, 멜버른 가든.
https://kr. visitmelbourne. com/regions/melbourne/see-and-do/nature-and-wildlife/parks-and-gardens/royal-botanic-gardens-victoria-melbourne-garde

ns(2022. 08. 05. 접속)
환경부 보도자료. 2020. 2021~2030년 자동차 온실가스·연비 기준 행정예고(2020. 8. 30.). http://www. me. go. kr/home/web/board/read. do? boardMasterId=1&boardId=1393630&menuId=286(2022. 08. 23. 접속)
환경부 보도자료. 2021. 2019년 온실가스 배출량 전년 대비 3. 5% 감소, 7억 137만톤(2021. 12. 31.). https://www. korea. kr/news/pressReleaseView. do? newsId=156489666 (2022년 8월 23일 접속)
행정안전부 보도자료 2021. 행안부, 지자체 22곳과 함께 대한민국 탄소중립 이끈다(2021. 12. 9.). https://www. mois. go. kr/frt/bbs/type010/commonSelectBoardArticle. do? bbsId=BBSMSTR_000000000008&nttId=89169(2023년 1월 6일 접속)
Bollmberg, 2022. Mapping New York City's Trees (Now With More Trees). https://www. bloomberg. com/news/articles/2022-12-09/mapping-new-york-city-s-trees-now-with-more-trees(2023년 8월 11일 접속)
City of New York. 2023. NYC's Trees. https://tree-map. nycgovparks. org/(2023년 8월 11일 접속)
e-나라지표. 2022. 국가 온실가스 총배출량 및 증감률(2022. 1. 3.). https://www. index. go. kr/potal/main/EachDtlPageDetail. do? idx_cd=1464 (2022년 3월 28일 접속)
NParks Park Connector Network. 2023. Singapore PCN. https://pcn. nparks. gov. sg/the-pcn-experience/pcnloops/(2023. 8. 10. 접속)
S&T GPS. 2021. 미국, 2050년 탄소중립 달성을 위한 장기 전략 발표(2021. 11. 01.). https://now. k2base. re. kr/portal/trend/mainTrend/view. do? poliTrndId=TRND0000000000044546&menuNo=200004&pageUnit=10&pageIndex=1(202

2. 08. 05. 접속)
U. S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2008. https://www. crh. noaa. gov(2022년 8월 23일 접속)

SUMMARY

A Study on Greenhouse Gas Reduction in Cities Using simulation experiments Focusing on Carbon Sink

Park Jong-soon, Yoon Eun-ju, Park Jong-hwa, Hong Na-eun, Kim Eun-hwa, Hwang Jeong-min, Kim Chang-Hyun

Key words: Carbon Neutrality, Carbon Sink, Urban Heat Island Effect

The world is racing toward carbon neutrality, led by the EU. The EU, UK, Japan have declared carbon neutrality by 2050 and are pursuing legislation, and the US is documenting it in policy. China and Russia declared carbon neutrality by 2060, and India declared carbon neutrality by 2070.

Korea announced that it will reduce total greenhouse gas emissions by 40% in 2030 compared to 2018 and achieve carbon neutrality in 2050. Although reduction methods and proportions may change in the future in seven major areas including energy conversion, industry, buildings, transportation, agriculture and fisheries, waste, and sinks, the policy stance of carbon neutrality is expected to continue.

In order to achieve carbon neutrality, sector-specific policies have been established at the national level, and discussions on establishing efficient reduction measures are also necessary at city and local government levels.

Parks and green spaces within the city have the effect of reducing the demand for cooling energy in surrounding areas and thereby reducing emissions by regulating the microclimate, such as alleviating the urban heat island. However, no specific strategy for expanding and managing carbon sinks within the city has been proposed. Carbon sinks can absorb greenhouse gases from the air and support reductions in other sectors through microclimate control, but it is not known how this will be reflected in spatial planning systems of Korea.

The purpose of this study is to identify the direct and indirect role of carbon sinks in reducing greenhouse gases and to suggest ways to improve the legal system related to spatial planning. We conduct simulation experiments on greenhouse gas reduction focusing on carbon sinks within the city, and present a plan for creating a desirable carbon sink and a step-by-step improvement for the spatial planning system of Korea.

The research methodology is divided into reduction verification and simulation. Reduction verification analyzes greenhouse gas reduction derived by urban green space. We analyze the heat island reduction effect of green parks in Daegu City and explore the relationship between heat island and energy usage. Specifically, land surface temperature is measured using Landsat satellite images, and the spatial extent and width (°C) of ground surface temperature reduction for each type of park and green space are derived.

By deriving a linear regression equation that can explain the relationship between ground surface temperature and building cooling energy usage, the ground surface temperature reduction effect of park green space is converted into energy reduction.

In the case of simulation, the effect of reducing sinks is analyzed for a new city. For two multiple land use plans, we predict the amount of energy reduced and the indirect greenhouse gas reduction effect resulting from parks. By

comparing the energy reduction due to parks, implications on their types and locations are derived.

As a result, urban parks are effective in reducing the heat island effect, and the larger the park, the wider the area of the impact. For example, the length is 188.4m, for medium-sized parks, it is 122.0m, and for small parks, it is 116.5m. The reduction in surface temperature is 1.65℃ for large parks, 2.07℃ for medium-sized parks, and 0.26℃ for small parks, which is not proportional to the size of the park.

When applied to the new city, Plan 2 increases the area of park green space compared to Plan 1 (+151,033㎡), but the amount of cooling effects is relatively small. Even if the area and influence of park green space increase, the greenhouse gas reduction effect is relatively low if medium and large parks are located on the outskirts of cities.

The implications on spatial planing are as follows. At the survey stage, the greenhouse gas emission and absorption status should be included as a basic survey inventories. A spatial plan should be addressed to minimize greenhouse gas emissions and maximize greenhouse gas absorption. In metropolitan urban planning, space for energy and carbon sinks should be designed to achieve carbon neutrality, and the expansion, preservation, and connection of surrounding green spaces should be considered to minimize damage to carbon sinks.

In the city/county basic plan, medium-sized and large parks should be placed in the city center where a lot of greenhouse gases are emitted, and linear parks should be created throughout the city by connecting them with small parks. The ‘District Unit Planning Guidelines’ consider the amount of greenhouse gases generated during development, and the amount of carbon absorbed through the creation of park green space should be reviewed.

At the evaluation stage, improvement measures were presented in the ‘Guidelines for National Land Plan Evaluation’ and ‘Guidelines for Establishing City/County Management Plans’. Annex Table 2 of the ‘Guidelines for National Land Plan Evaluation’ has been revised to assess whether the national land/urban plan complies with the basic plan for carbon neutral green growth. In the ‘Urban Management Plan Establishment Guidelines’, the carbon absorption amount per carbon sink area or per person is evaluated as an indicator for quantitative evaluation, and greenhouse gas absorption measures such as expansion of carbon sinks are reviewed as a qualitative evaluation.

In the monitoring stage, changes in carbon reduction and absorption should be monitored to compare plans before and after considering reduction measures such as the providing of green space.

기본 23-06

모의실험을 통한 도시 내 온실가스 감축 방안 연구 : 탄소흡수원을 중심으로

연 구 진 박종순, 윤은주, 박종화, 홍나은, 김은화, 황정민, 김창현
발 행 인 김태환
발 행 처 국토연구원
출판등록 제2017-9호
발 행 2023년 7월 31일
주 소 세종특별자치시 국책연구원로 5
전 화 044-960-0114
팩 스 044-211-4760
가 격 7,000원

ISBN 979-11-5898-867-8
홈페이지 http://www.krihs.re.kr
© 2023, 국토연구원

이 연구보고서를 인용하실 때는 다음과 같은 사항을 기재해주십시오.
박종순, 윤은주, 박종화, 홍나은, 김은화, 황정민, 김창현. 2023. 모의실험을 통한 도시 내 온실가스 감축 방안 연구: 탄소흡수원을 중심으로. 세종: 국토연구원.

이 연구보고서의 내용은 국토연구원의 자체 연구물로서 정부의 공식적인 견해와 다를 수 있습니다.
이 연구보고서는 한국출판인협회에서 제공한 KoPub 서체와 대한인쇄문화협회가 제공한 바른바탕체 등이 적용되어 있습니다.

모의실험을 통한 도시 내 온실가스 감축 방안 연구 : 탄소흡수원을 중심으로

A Study on Greenhouse Gas Reduction in Cities Using Simulation Experiments Focusing on Carbon Sink

제1장 연구의 개요
제2장 이론 고찰 및 선행 연구
제3장 국내외 탄소중립정책
제4장 모의실험 및 법제도 개선방안
제5장 결론

KRIHS 국토연구원

(30147) 세종특별자치시 국책연구원로 5 (반곡동)
TEL (044) 960-0114 FAX (044) 211-4760

OPEN 출처표시 상업용금지 변경금지
공공누리 공공저작물 자유이용허락

값 7000 원
93300
9 791158 988678
ISBN 979-11-5898-867-8