

수원시 탄소중립 가로녹지 효과분석

The Effect Analysis on Carbon Neutrality for Street Green Areas in Suwon

김은영
Kim Eunyoung



수원시 탄소중립 가로녹지 효과분석

The Effect Analysis on Carbon Neutrality for Street Green Areas in Suwon

김은영

CONTENTS

연구요약

01 서론 01

제1절 연구배경 및 목적

제2절 연구범위 및 방법

02 선행연구 고찰 07

제1절 도시수목의 탄소저장 및 흡수량 산정방법

제2절 수목별 탄소저장 및 흡수량

제3절 탄소중립을 위한 식재기준 및 관리방안

제4절 바이오차 적용

제5절 소결

03 수원시 현황분석 37

제1절 수원시 탄소중립 가로녹지 관련 계획

제2절 수원시 가로녹지 조성 및 관리현황

제3절 소결

04 탄소중립 가로녹지 조성 방안 53

제1절 탄소중립 가로녹지 수종 선정

제2절 탄소중립 가로녹지 식재 방법

제3절 탄소중립 가로녹지 관리 방안

제4절 소결

05 탄소중립 가로녹지 효과 분석 63

제1절 시범대상지 선정

제2절 탄소흡수와 저장 효과 분석

제3절 경제 및 기타 효과

06 결론 및 제언 77

제1절 연구결과 및 정책제언

제2절 연구한계 및 향후 과제

참고문헌 81

연구요약

연구목적

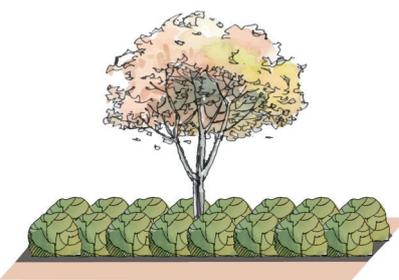
- 수원시가 2050 수원시 탄소중립 기본계획을 수립하고, 2030년까지 온실가스를 2018년 대비 40% 감축하고자 하는 목표를 설정하고 고색역 일원에서 2026년까지 탄소중립 그린도시 수원 사업 추진
- 도시 녹지, 가로수, 도시숲은 도시의 온실가스 배출량을 줄이고 이산화탄소를 지속적으로 흡수하여 저장하는 등 탄소흡수원으로써 기능하고 있으나 산림지역의 수목의 탄소흡수량 외 도시녹지의 탄소흡수량에 대한 연구는 제한적임
- 따라서 도심 내 녹지, 특히 수원시 가로녹지에 적용할 수 있는 탄소중립 식재 모델을 도출하여 탄소 저장 및 흡수 및 경제적 가치 분석을 통해 적용 가능성 검토 필요

탄소중립 가로녹지

- 탄소중립 가로녹지는 탄소저장 및 흡수 우수종 선정, 식재·토양기반 조성 및 유지관리 등 가로녹지 전 분야에서 탄소중립 실현을 목표로 함
- 주요 교목, 관목의 탄소저장 및 흡수능력 뿐만 아니라 도시적응성, 식재 지역의 특성 등을 고려하여 탄소중립 가로녹지 적용 수종 및 식재 모델을 제안함
 - 탄소중립 가로녹지 교목 : 느티나무, 회화나무, 이팝나무, 은행나무
 - 탄소중립 가로녹지 관목 : 병꽃나무, 낙상홍, 사철나무, 꽃댕강나무, 산철쭉
 - 식재모델 : 단목식재(교목), 혼합식재(교목+관목), 띠녹지(교목+관목+녹지연결)
 - 식재모듈 : 8m 기준 교목 1주, 띠녹지일 경우 관목 2열 식재 (수관폭에 따라 식재주수 결정)
- 토양 및 식재기반 조성을 위해 바이오차 투입 필요. 바이오차는 토양의 탄소고정 능력을 향상시킬 뿐만 아니라 식생의 탄소흡수능력 향상에 기여

- 탄소중립 가로녹지 실현을 위해서는 전정 최소화, 시민참여를 통한 유지관리 등 가로녹지 유지관리 측면에서도 탄소발생을 최소화 필요

탄소중립 가로녹지 주요내용

이미지	주요 내용		
	개념	탄소저장 및 흡수 우수종 선정, 식재·토양기반 조성 및 유지관리 등 가로녹지 전 분야에서 탄소중립 실현	
	탄소중립 수종	교목	느티나무, 회화나무, 이팝나무, 은행나무
		관목	병꽃나무, 낙상홍, 사철나무, 꽃땀강나무, 산철쭉
	식재모델	띠녹지 조성을 원칙으로 하되 불가할 경우 혼합식재	
	식재모듈	8m 기준 교목 1주, 띠녹지일 경우 관목 2열 식재 (수관폭에 따라 식재주수 결정)	
	토양기반	바이오차 투입을 통한 탄소격리효과 증진	
	유지관리	전정 최소화 등 탄소발생 저감. 시민참여를 통한 관리	

탄소중립 가로녹지 효과분석

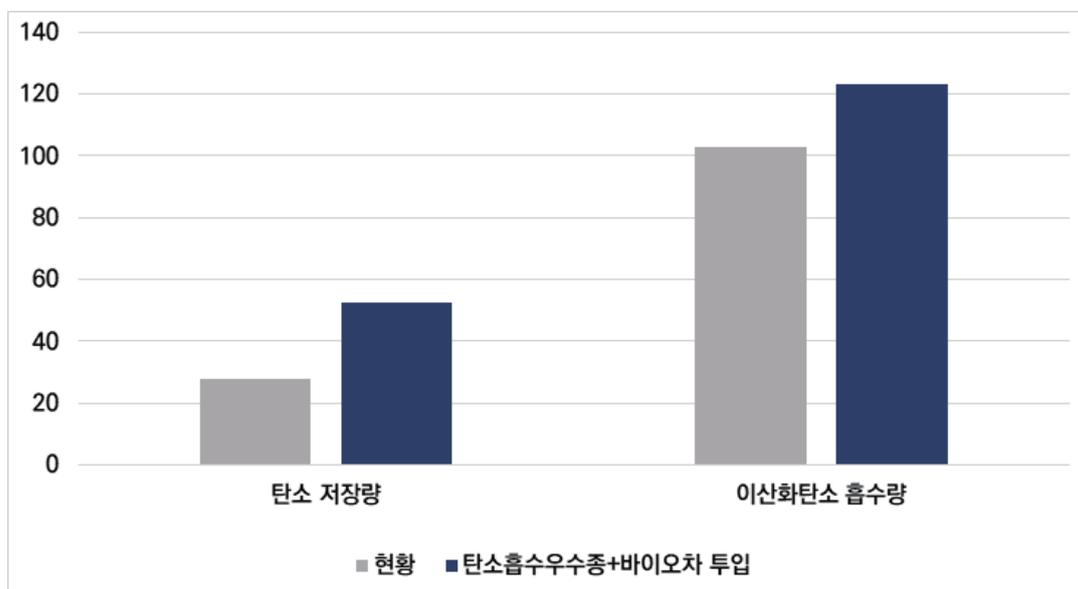
- 탄소중립 가로녹지에 대한 탄소저장 및 흡수량과 경제적 가치 등에 대한 효과분석 실시
- 탄소중립 가로녹지 식재모듈을 토대로 탄소 저장 및 흡수 기준 마련하여 수원시 권선구 내 추진 중인 탄소중립 그린도시에 시범 적용
 - 현재 식재된 왕벚나무를 유지하고 탄소중립 가로녹지 관목(병꽃나무)을 띠녹지 모델 적용, 바이오차 투입 시 탄소저장 및 흡수 효과를 산정한 결과, 수목 및 토양에 의해 탄소 52.44t C가 저장, 수목에 의해 이산화탄소 123.02t CO₂ 흡수

시범대상지 내 탄소저감 효과분석

구분	식재모델		시범대상지 적용(6,510m)	
			탄소저장량 (t C)	CO ₂ 흡수량 (t CO ₂ /yr)
기존	단목 (왕벚나무)	식재	27.99	102.61
		토양	0.84	-
탄소흡수우수종 보완 식재 (관목)	띠녹지 (왕벚나무+병꽃나무)	식재	37.22	111.84
		토양	9.06	-
		바이오차 투입	52.44	123.02

- 기존대비 탄소저장량은 1.9배 증가하였으며 이산화탄소 흡수량은 약1.2배 증가하는 것으로 분석

시범대상지 내 기존 대비 탄소저감 효과



- 배출권거래시장을 통해 탄소흡수량 및 저장량 거래할 경우 약 718만원의 경제적 효과가 있으며, 장기적으로 탄소 거래 가격이 상승할 것을 고려 시 경제적 효과는 더욱 증가할 예정

탄소중립 가로녹지 조성에 따른 경제적 가치

구분		경제적 가치	
기준	탄소가격	시범구간	단위구간(km)당
현재	40,900원/톤*	7,176천원	1,103천원
2040년	125달러/톤	28,512천원	4,380천원
2050년	550달러/톤	87,818천원	13,490천원

*2019년 12월 최고가 환율 1,300원/\$ 기준 적용

- 탄소중립 가로녹지 조성에 따른 효과를 km당으로 환산 시 약 27t CO₂ 흡수 및 저장 효과 발생하며 현재 가치로 약 110만원의 경제적 가치 발생. 2050년 탄소가격 적용 시 최대 약1,349만원의 효과 발생 예측
- 그 밖에 탄소중립 가로녹지 조성을 통해 생물다양성 증진효과 및 미세먼지, 열섬저감 등 생활환경 개선 효과 발생

정책제언

- 탄소중립 그린도시 시범대상지 내 실시설계 시 탄소중립 가로녹지 식재모델을 적용하여 사업을 추진 필요
- 향후 탄소흡수우수종 및 바이오차를 도입하여 가로녹지에서 도시공원으로 탄소중립 대상을 확대할 수 있으며, 탄소중립을 고려하여 가로수 조성 지침 및 가이드라인을 변경하여 현장에의 적용이 용이하도록 해야 함
- 탄소흡수원을 통해 발생하는 탄소흡수 및 저장량은 수원시 탄소중립 기본계획에 반영되어 조기 달성 기여

주제어: 탄소흡수원, 가로수, 띠녹지, 탄소중립 식재모델, 바이오차

01

서론

제1절 연구배경 및 목적

1 • 연구배경

- 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」을 제정하고 2050년 국가 탄소중립을 목표로 하는 ‘대한민국 2050 탄소중립 전략’을 수립. 개별 부처 및 지방자치단체에서 정책 수립 및 이행 추진 중
 - 탄소중립 전략의 기본방향 중 하나로 ‘탄소 흡수 수단 강화’를 제시하고 2050년까지 현재 탄소흡수량의 약30%까지 달성하는 것을 목표로 함(구경아 외, 2023)
 - 환경부는 2021년 탄소중립 이행계획을 수립하여 흡수원 관리를 위한 전략으로 자연기반해법(NbS: Nature-based Solutions)을 적용(환경부, 2021)
 - 보호지역 탄소흡수원 확대, 도심·수변 등 탄소흡수원 확대, 자연·생태계 기반 온실가스 감축·적응 전략 계획 수립 제시
 - 자연·생태 기반 기후변화 완화·적응 전략을 통해 탄소중립 달성을 위한 자연환경 부문의 4대 정책방향을 제시하고, 범부처가 추진해야 하는 12대 과제 제시(관계부처 합동, 2021)
 - 4대 정책방향에는 신규 탄소흡수원 확대 및 탄소흡수능력 증진, 생물다양성 및 탄소흡수원 보전 강화, 기후변화 완화 및 적응의 공동효과 증진, 전략 기반 강화 포함
- 국내 대부분의 탄소흡수량을 갖는 산림에 대해서는 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」을 제정(‘21.9)하는 등 탄소중립 정책 추진 기반 마련
 - 산림청은 「도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률(이하 도시숲법)」(‘22.12 개정)에 따라 가로수를 포함한 도시숲에 대하여 그 전부 또는 일부를 탄소흡수원으로 인정할 수 있도록 함
 - 도시숲법의 주요 목적이 기존 미세먼지 저감, 폭염 완화 등으로 생활환경 개선에서 탄소흡수 기능을 유지·증진하는 목적 보완

- 동 법에 따라 조성·관리되는 도시숲 등에 대하여 탄소흡수 기능·효과 등을 고려하여 그 전부 또는 일부를 관계 법률에서 정하는 바에 따라 탄소흡수원으로 인정

- 수원시는 Post-2020 신기후체제 선도적 대응을 위한 탄소중립도시 조성 기본계획 수립('20)
 - 수원시는 '수원형 탄소중립도시 모델 확립'이라는 비전을 토대로 탄소중립 단계별 모델 구현, 수소연료 기반의 에너지 전환 선도, 도시통합정책을 통한 지속가능발전의 주요 전략을 수립
 - 7개 분야별 실행계획 중 그린인프라 분야에서는 친환경 공간관리를 통한 그린인프라 확충을 실행과제로 선정하는 등 탄소흡수원에 대한 실행과제 제시
 - 수원시는 탄소중립 그린도시 사업을 추진하면서 에너지 전환, 흡수원 확대, 기후변화 적응, 자원순환 촉진, 사회전환 프로그램 운영을 통해 온실가스 감축목표를 설정
- 수원시의 현재 탄소배출량은 약5,531천톤인 것으로 조사됨. 현재 토지이용 및 토지이용 변화에 따른 탄소흡수량은 2020년 기준 산림지 약14.69천톤, 초지 등에 의해 0.06천톤이 흡수·저장되는 것으로 나타남
- 탄소 흡수원 확대는 도시 환경에서 온실가스 배출량을 줄이는 것 외에도, 이산화탄소를 지속적으로 흡수하여 저장함으로써 기후변화 적응능력 향상에 기여. 특히, 도시 녹지, 가로수, 도시숲 등은 탄소 저장 및 흡수에 있어 핵심적인 역할 수행
- 탄소중립을 위해 탄소흡수원 확대는 중요한 이슈이나 산림지역의 탄소흡수량 외 도시녹지의 탄소 흡수량에 대한 정보는 제한적
 - 산림청은 주요 산림수종의 탄소흡수량을 제공하고 있으나 소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소 나무, 편백, 상수리나무, 신갈나무 등 7종의 산림수종을 대상으로 하고 있어 도시녹지에 적용 한계
 - 그 외 탄소흡수량에 대해 다양한 연구가 진행되었으나 연구자별로 탄소흡수량을 계산하는 방법 등이 상이하여 적용 한계
- 도시지역 내 공원녹지 조성 성과를 향후 자발적 탄소시장 등에 활용하기 위해서는 공원녹지 및 지역에 맞는 최적화 및 효과분석 연구 필요
 - 식재 공간이 한정된 가로수 및 띠녹지 내에서의 탄소 저장량 및 흡수량에 대한 효과성 분석 필요

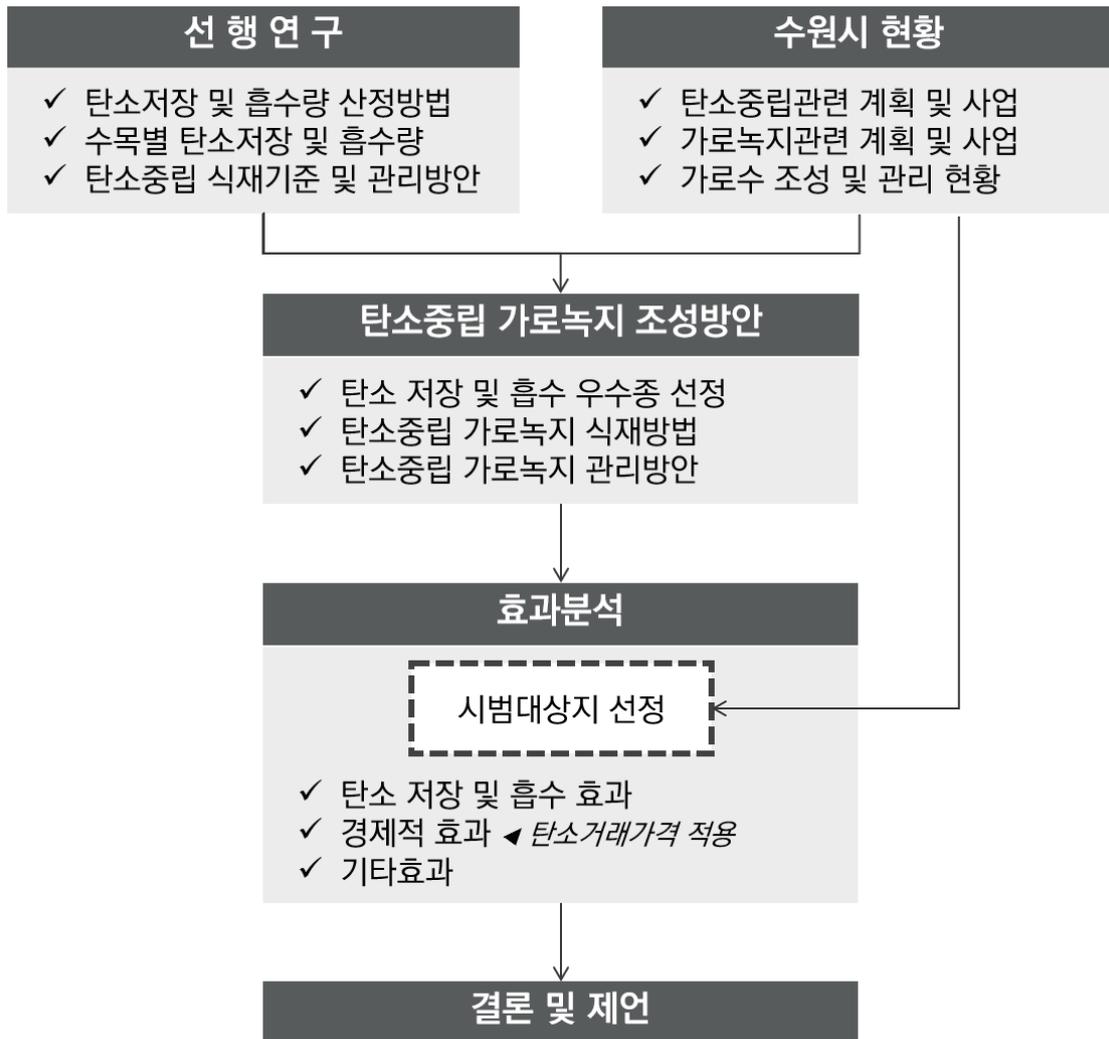
2 · 연구목적

- 탄소흡수원으로서 산림 외 도시녹지에 적합한 수종 및 식재방법 도출
 - 기존 선행연구를 종합하여 수종별 탄소흡수량을 산출하여 탄소중립 수원에 적합한 수종 선정 및 식재방법 제시 필요
- 탄소중립을 고려한 도시녹지 조성 시 탄소 저장 및 흡수 등 효과분석
 - 탄소중립을 고려한 가로녹지 등 도시녹지 조성 시 탄소 저장 및 흡수량 분석
 - 탄소중립 가로녹지 등 도시녹지 조성에 따른 사회·경제적 효과분석
- 탄소중립을 고려한 도시녹지 관리방안 제시
 - 탄소저장량 극대화를 위한 토양 및 도시녹지 관리방안 검토

2 • 연구방법

- 본 연구는 탄소중립 가로녹지에 적용할 탄소저장 및 흡수 우수 수종 및 식재기법 선정을 위한 선행연구 고찰, 수원시 현황분석, 탄소중립 가로녹지 조성, 탄소중립 가로녹지 효과분석을 수행
- 선행연구 고찰
 - 도시수목의 수종별 탄소흡수 및 저장량 파악
 - 수종별 탄소저장 및 흡수량 산정방법 검토
 - 수종별 탄소저장 및 흡수량 검토
 - 탄소흡수효과 증진을 위한 식재기법 및 관리방안 검토
 - 바이오차 투입 시 탄소저감효과 검토
- 수원시 현황 분석
 - 수원시 탄소중립 가로녹지관련 계획 검토
 - 수원시 가로녹지 현황 분석
- 탄소중립 가로녹지 조성방법
 - 선행연구 결과 및 전문가 자문을 통해 탄소저장 및 흡수 우수종 및 식재기법 도출
- 탄소중립 가로녹지 효과분석
 - 시범대상지 적용을 통해 탄소중립 식재모델 적용을 통한 탄소저장 및 흡수량 산정
 - 탄소가격 등을 고려한 경제적 효과 분석 등

그림 1-2 | 연구체계도



02

선행연구 고찰

제1절 도시수목의 탄소저장 및 흡수량 산정방법

1. 수목의 탄소저장량 및 탄소흡수량 산정

1) 산림수목의 탄소저장량 및 탄소흡수량 산정

- 수목은 바이오매스 안에 탄소를 저장하여 격리시키는데, IPCC 가이드라인에서는 이를 측정하기 위해 임목축적에 배출계수를 곱하여 탄소저장량을 산정하도록 방법론 제시
 - 여기서 탄소저장량은 수목이 성장하면서 다년간에 걸쳐 축적한 탄소의 총량이며, 탄소흡수량은 수목이 한해 동안 흡수한 탄소의 양을 말함
- 국내 산림수목의 탄소배출계수에 관한 연구는 국립산림과학원을 중심으로 등록 및 발표
 - 2018년 총 20개 수종에 대한 국가고유계수 등록을 완료하고 그에 따라 산림의 주요 수종별 탄소저장량을 산정하였고 이에 기반하여 국립산림과학원은 2022년 주요 산림수종 8종의 표준탄소흡수량을 발표하였음
- 산림수목과 도시수목 성장에 차이가 있어 도시의 가로녹지의 탄소중립 효과 분석에 적용 한계

표 2-1 | 산림 교목 탄소순흡수량 계산식

구분	산정식	비고
산림 교목 탄소순흡수량 (t CO ₂)	$\Delta V \times D \times BEF \times (1+R) \times CF \times 44/12$	- ΔV : 임목 순생장량(m ³) - D : 목재기본밀도 - BEF : 바이오매스 - R : 뿌리함량비 - CF : 탄소전환계수 (바이오매스⇒탄소 (IPCC 기본값=0.5) - 44/12 : 이산화탄소 전환계수 (탄소(C)⇒이산화탄소(CO ₂))

자료 : 국립산림과학원(2022)

2) 도시수목의 탄소저장량 및 탄소흡수량 산정

- 한국수목원정원관리원에서 산림 수종에 도시수목전환계수를 적용하여 도시 수목의 탄소저장 및 흡수량 계산
 - 한국수목원정원관리원(2022)에서는 ‘국립세종수목원 교목 4종의 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량 평가’를 위해 산림수목의 탄소저장량 계산식에 도시수목전환계수를 0.8로 적용하여 도시권역의 교목 탄소순흡수량 계산 방법을 제시한 바 있음
 - 그러나 해당 계산식은 임령에 따른 흉고직경 등에 의한 바이오매스 생장식을 기준으로 하고 있어 일반적인 가로녹지의 탄소흡수량을 계산하기 어려운 측면이 있음

표 2-2 | 도시권역 교목 탄소순흡수량 및 연간 이산화탄소 흡수량 계산식

구분	산정식	비고
도시권역 교목 탄소저장량 (kg C)	$(a \times (DBH)^b) \times D \times BEF \times UCF \times (1+R) \times CF$	- a, b : 재적식 상수 - DBH : 흉고직경 - D : 목재기본밀도 - BEF : 바이오매스확장계수 - UCF : 도시수목전환계수 (0.8 적용) - R : 뿌리-지상부 비율 - CF : 탄소분율(IPCC 기본값 적용 0.5)

자료 : 한국수목원정원관리원(2022)

- 김학구 외(2022)는 도시숲 및 정원에 식재되는 교목, 관목의 직접수확법을 통해 탄소흡수계수를 직접 개발하여 보다 더 정확한 탄소저장량, 탄소흡수량을 산정하고자 하는 연구를 진행
 - 김학구 외(2022)는 ‘도시숲 및 정원 주요 관목의 탄소흡수계수 개발 및 탄소저장량과 흡수량 비교’ 연구에서 도시에서 주로 사용되는 관목 5종의 상대생장식을 개발하기 위해 직접수확법에 의하여 식물체별 바이오매스량을 측정한 결과 제공
 - 개발된 탄소흡수계수를 현장에 적용하기 위해서는 나무의 수령, 직경 자료 필요

- 산림청(2020)은 ‘신기후체제 대응을 위한 생활권 도시림의 탄소흡수원과 다원편익 증진을 위한 조성·관리·평가모델 및 기술개발’을 위해 도시림 식재수종별 탄소저장 및 흡수 계량모델을 개발함
 - 도시수목 대상의 수종별 계량모델을 응용하여 개발
 - 교목뿐 아니라 관목, 남부지방 도시수목 중 식재빈도가 높은 수종을 대상으로 직접수확법을 통해 생체량 변화와 탄소 저장 및 흡수를 용이하게 산정하는 계량모델을 개발함
 - 그러나 계량모델은 국립산림과학원 발표자료와 상이하여 정량적인 적용에 한계가 있음

표 2-3 | 도시수목(교목) 탄소저장 계량모델

	구분	직경범위(cm)	계량모델	비고
낙엽수	느티나무	5~28	$\ln Y = -2.4708 + 2.3862 \ln DBH$	- Y : 탄소저장량(kg) - DBH : 흉고직경(cm) - DAG : 근원직경(cm)
	단풍나무	5~20	$Y = -23.2064 + 4.8538 DBH$	
	산수유	3~15	$\ln Y = -3.3110 + 2.4057 \ln DAG$	
	살구나무	4~14	$\ln Y = -2.4307 + 2.2999 \ln DBH$	
	왕벚나무	5~23	$\ln Y = -2.8265 + 2.4171 \ln DBH$	
	은행나무	5~25	$\ln Y = -2.8428 + 2.3787 \ln DBH$	
	이팝나무	3~11	$\ln Y = -2.7512 + 2.4952 \ln DBH$	
	전체 (산수유 제외)	3~28	$\ln Y = -2.5274 + 2.3431 \ln DBH$	
상록수	소나무	5~25	$\ln Y = -3.1140 + 2.4430 \ln DBH$	
	잣나무	5~31	$\ln Y = -4.4489 + 2.8942 \ln DBH$	
	전나무	5~19	$\ln Y = -2.2126 + 2.0814 \ln DBH$	
	주목	2~15	$\ln Y = -3.7842 + 2.4407 \ln DAG$	
	전체 (주목 제외)	5~31	$\ln Y = -3.3313 + 2.5098 \ln DBH$	

자료 : 산림청(2020)

표 2-4 | 도시수목(교목) 연간 탄소흡수 계량모델

	구분	직경범위(cm)	계량모델	비고
낙엽수	느티나무	5~28	$\ln Y = -2.8177 + 1.7715 \ln DBH$	- Y : 연간 탄소흡수량(kg/년) - DBH : 흉고직경(cm) - DAG : 근원직경(cm) - H = 수고(m) - CV = 수관체적(m³)
	단풍나무	5~20	$Y = 0.9608 + 0.1535 DBH$	
	산수유	3~15	$\ln Y = -3.1622 + 1.8844 \ln DAG$	
	살구나무	4~14	$\ln Y = -2.8278 + 1.8824 \ln DBH$	
	왕벚나무	5~23	$\ln Y = -3.0939 + 1.7702 \ln DBH$	
	은행나무	5~25	$\ln Y = -3.6471 + 1.8287 \ln DBH$	
	이팝나무	3~11	$\ln Y = -2.2695 + 1.7554 \ln DBH$	
	플라타너스	10~58	$Y = (32.604 + 0.0204 H^2 CV) \times 0.5914$	

			$x 0.6640 - 3.9546 + 0.0030 H^2CV)$ $x 1.6243 x (12/44)$
	전체 (산수유 제외)	3~28	$\ln Y = -2.6119 + 1.5686 \ln DBH$
상록수	소나무	5~25	$\ln Y = -2.6720 + 1.5251 \ln DBH$
	잣나무	5~31	$\ln Y = -4.4881 + 2.2262 \ln DBH$
	전나무	5~19	$\ln Y = -3.1386 + 1.6158 \ln DBH$
	주목	2~15	$\ln Y = -4.7726 + 1.8554 \ln DAG$
	전체 (주목 제외)	5~31	$\ln Y = -3.7807 + 1.9347 \ln DBH$

자료 : 산림청(2020)

표 2-5 | 도시수목(관목) 탄소저장 계량모델

구분		계량모델	비고
낙엽 관목	산철쭉	$\ln Y_s = 2.9196 + 2.2911 \ln DBH$	- Y : 관목 탄소저장량(g) - DBH : 흉고직경(cm) - DAG : 근원직경(cm)
	조팝나무	$\ln Y_s = 3.2542 + 2.2724 \ln DAG$	
	화살나무	$\ln Y_s = 2.6608 + 2.5536 \ln DAG$	
상록 관목	회양목	$\ln Y_s = 3.1299 + 2.3502 \ln DAG$	
	사철나무	$\ln Y_s = 2.8594 + 2.4356 \ln DAG$	

자료 : 산림청(2020)

표 2-6 | 도시수목(관목) 연간 탄소흡수 계량모델

구분		계량모델	비고
낙엽 관목	산철쭉	$\ln Y_s = 1.9456 + 1.6715 \ln DBH$	- Y : 연간 관목 탄소흡수량 (g/주/년) - DBH : 흉고직경(cm) - DAG : 근원직경(cm)
	조팝나무	$\ln Y_s = 2.2364 + 1.6422 \ln DAG$	
	화살나무	$\ln Y_s = 1.9944 + 1.7354 \ln DAG$	
상록 관목	회양목	$\ln Y_s = 2.1997 + 1.6536 \ln DAG$	
	사철나무	$\ln Y_s = 2.1099 + 1.7444 \ln DAG$	

자료 : 산림청(2020)

- 도시 교목에 대한 연구는 산림 수종에 비하여 공식적으로 발표된 탄소흡수계수 및 계산식이 없어 가로녹지 효과분석을 위해 적용하기에 한계가 있음
- 본 연구에서는 국립산림과학원, 한국수목원정원관리원 등 기관에서 분석한 교목, 관목, 지피식물의 수종별 탄소저장 및 흡수량 연구 결과를 적용하여 효과를 분석하고자 함

제2절 수목별 탄소저장 및 흡수량

1. 교목

1) 교목(산림)

- 국립산림과학원은 주요 산림수종의 탄소순흡수량 국가 표준을 발행(2022)하였으며, 산림탄소상쇄 사업 추진 시 사업면적당 이산화탄소 흡수량(t CO₂)을 산정하는데 표준이 되고 있음
- 우리나라 산림의 주요 수종으로 소나무(강원지방, 중부지방), 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무, 편백, 상수리나무, 신갈나무 8종에 대한 표준을 담고 있음
- 한 그루 당 연간 탄소 흡수량은 30년생 기준으로 상수리나무가 가장 높으며, 전체적으로 침엽수보다 활엽수(낙엽수)가 탄소 흡수량이 더 많음
- 나무 한 그루 당 연간 CO₂ 흡수량은 수령이 높아질수록 대체로 높아지나, 수령이 높아질수록 수관폭이 함께 증가하여 단위면적당 탄소 흡수량은 30년 이전이 가장 높고 임령이 증가할수록 감소하는 특징이 있음
- 도시에서 주로 활용되는 교목 수종은 활엽수이나, 모두 '기타 활엽수'로 적용되고 있어 이를 근거자료로 가로녹지의 탄소저감효과를 계산할 경우 수종에 따른 탄소저감효과의 차이를 산정하기 어려움

표 2-7 | 배출 1t CO₂ 상쇄에 필요한 수종별 식재 그루 수

수종	CO ₂ 흡수량(kg)	60년 누적 CO ₂ 흡수량(kg)	t CO ₂ 상쇄 식재 그루 수(그루)
강원지방소나무	2.57	154.20	6.49
중부지방소나무	2.13	127.88	7.82
소나무(평균)	2.35	141.04	7.16
잣나무	2.73	163.94	6.10
낙엽송	2.86	171.76	5.82
리기다소나무	2.65	158.75	6.30
편백	2.04	122.47	8.17
상수리나무	4.18	250.65	3.99
신갈나무	3.54	212.57	4.70
참나무(평균)	3.86	231.61	4.35

자료 : 국립산림과학원(2022)

표 2-8 | 나무 한 그루 당 연간 CO₂ 흡수량(kgCO₂/그루·년)

수종	수령												
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
강원지방소나무	1.4	3.2	5.0	6.7	8.1	8.8	9.0	9.2	9.2	9.0	8.6	8.1	7.6
중부지방소나무	1.0	2.2	3.9	9.8	9.1	7.9	6.6	4.9	4.0	3.2	2.6	2.2	1.8
잣나무	1.6	5.2	8.6	11.6	12.5	13.6	14.1	14.2	14.0	13.7	13.3	12.8	12.3
낙엽송	4.3	4.7	9.2	11.5	13.6	15.0	15.8	16.2	16.1	15.8	15.6	15.5	15.3
리기다소나무	0.9	3.6	6.8	9.2	10.6	11.1	9.9	9.3	8.6	7.9	7.3	6.7	6.4
편백	2.5	4.2	5.1	5.7	5.9	5.9	5.8	5.7	5.2	5.0	4.6	4.3	4.2
상수리나무	6.2	9.4	13.5	14.6	14.1	14.5	14.9	15.2	15.5	15.8	15.9	16.1	16.3
신갈나무	1.2	2.6	5.6	6.4	6.7	8.1	8.8	9.7	10.7	11.8	12.3	12.8	13.1

자료 : 이선정 외(2019)

표 2-9 | 단위면적 당(ha당) 연간 CO₂ 흡수량(톤/ha/년)

수종	임령					
	10	20	30	40	50	60
강원지방소나무	7.35	9.92	9.40	8.08	6.61	5.25
중부지방소나무	3.40	6.76	12.14	6.29	3.22	1.77
소나무(평균)	5.38	8.34	10.77	7.19	4.92	3.51
잣나무	5.31	11.55	10.61	8.90	7.45	6.37
낙엽송	8.96	10.31	9.27	8.33	7.70	7.31
리기다소나무	4.42	13.60	12.16	8.49	5.70	4.02
편백	5.10	8.67	8.03	6.47	5.06	4.04
상수리나무	11.72	16.53	14.55	12.83	11.43	10.22
신갈나무	9.00	15.62	9.73	8.79	7.80	7.08
참나무(평균)	10.36	16.08	12.14	10.81	9.62	8.65

자료 : 국립산림과학원(2022)

2) 교목(도시)

- 국립산림학원에서 2012년 발표한 ‘탄소지킴이 도시숲’에서는 도시숲 수목을 그룹화하고, 그룹별 적용가능 흉고직경 대비 줄기 재적식을 제시하여 주요 수목의 탄소흡수량을 계산함
 - 탄소흡수우수종으로 분류된 과는 느릅나무과, 콩과, 은행나무과, 측백나무과, 소나무과(가문비속, 전나무속), 물푸레나무과임

표 2-10 | 나무의 과(Family)별 탄소흡수우수종

구분	과(Family)
탄소흡수 우수 과	느릅나무과(느티나무 등), 콩과(회화나무 등), 은행나무과, 측백나무과(편백나무 등), 소나무과(가문비속, 전나무속), 물푸레나무과(이팝나무 등)
탄소흡수 평균 과	소나무과(소나무류, 잣나무류), 단풍나무과(청단풍 등), 버즘나무과(양버즘나무)
탄소흡수 평균이하 과	낙우송과, 목련과, 참나무과, 자작나무과, 층층나무과, 버드나무과, 계수나무과 등

자료 : 국립산림과학원(2012)

- 해당 과별 수종, 흉고직경 성장에 따른 CO₂ 흡수량은 아래 표와 같으며, 과에 따라 대표적인 수종으로 탄소흡수계수를 적용하였고 평균 이하의 대부분의 수종은 벚류의 계수가 적용됨
- 초기에 식재되는 규격(B10~12)를 기준으로 하면 탄소흡수우수종의 차이가 크지 않으나, B20으로 성장한 이후를 살펴보면, 양버즘나무, 느티나무, 소나무 순으로 탄소흡수량이 우수하게 나타나 성장을 고려하여 식재수종을 선택할 필요성이 있음을 시사함

표 2-11 | 도시숲 수목의 흉고직경 성장에 따른 평균 탄소 흡수량

구분	과	수종	흉고직경(DBH) 성장에 따른 탄소 흡수량(kg/CO ₂)				탄소흡수계수 적용수종
			10cm	12cm	20cm	30cm	
우수종	Ulmaceae	느티나무	49.7	68.1	165.4	334.5	느티나무
	Ulmaceae	팽나무	49.7	68.1	165.4	334.5	느티나무
	Ulmaceae	느릅나무	49.7	68.1	165.4	334.5	느티나무
	Fabaceae	회화나무	40.8	58.1	157.1	346.1	회화나무
	Fabaceae	자귀나무	40.8	58.1	157.1	346.1	회화나무
	Fabaceae	아까시나무	40.8	58.1	157.1	346.1	회화나무
	Gingkoaceae	은행나무	34.7	49.7	136.3	303.7	은행나무
	Cupressaceae	편백나무	34.7	49.7	136.3	303.7	은행나무
	Cupressaceae	화백나무	34.7	49.7	136.3	303.7	은행나무
	Cupressaceae	향나무	34.7	49.7	136.3	303.7	은행나무
	Cupressaceae	측백나무	34.7	49.7	136.3	303.7	은행나무
	Pinaceae	독일가문비	34.7	49.7	136.3	303.7	은행나무
	Pinaceae	가문비나무	34.7	49.7	136.3	303.7	은행나무
	Pinaceae	구상나무	34.7	49.7	136.3	303.7	은행나무
	Pinaceae	전나무	34.7	49.7	136.3	303.7	은행나무
	Pinaceae	주목	34.7	49.7	136.3	303.7	은행나무
	Oleaceae	이팝나무	33.8	50	149.6	357.1	이팝나무
	Oleaceae	물푸레나무	33.8	50	149.6	357.1	이팝나무

구분	과	수종	흉고직경(DBH) 생장에 따른 탄소 흡수량(kg/CO ₂)				탄소흡수계수 적용수종
			10cm	12cm	20cm	30cm	
평균	Pinaceae	소나무	29.2	45.7	160.2	433.6	소나무
	Pinaceae	해송	29.2	45.7	160.2	433.6	소나무
	Pinaceae	개잎갈나무	29.2	45.7	160.2	433.6	소나무
	Pinaceae	스트로브잣나무	29.2	45.7	160.2	433.6	소나무
	Pinaceae	섬잣나무	29.2	45.7	160.2	433.6	소나무
	Pinaceae	잣나무	29.2	45.7	160.2	433.6	소나무
	Pinaceae	백송	29.2	45.7	160.2	433.6	소나무
	Aceraceae	중국단풍	25.6	37	103.9	236.5	단풍나무
	Aceraceae	신나무	25.6	37	103.9	236.5	단풍나무
	Aceraceae	고로쇠	25.6	37	103.9	236.5	단풍나무
	Aceraceae	청단풍	25.6	37	103.9	236.5	단풍나무
	Aceraceae	홍단풍	25.6	37	103.9	236.5	단풍나무
	Aceraceae	공작단풍	25.6	37	103.9	236.5	단풍나무
	Aceraceae	은단풍	25.6	37	103.9	236.5	단풍나무
	Aceraceae	복자기	25.6	37	103.9	236.5	단풍나무
	Aceraceae	단풍	25.6	37	103.9	236.5	단풍나무
	Platanaceae	양버즘나무	25	41.2	166.8	506.4	양버즘나무
	평균 이하	Taxodiaceae	메타세콰이어	21.3	33.9	123.9	346.8
Taxodiaceae		삼나무	21.3	33.9	123.9	346.8	메타세콰이어
Magnoliaceae		백합나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Magnoliaceae		목련	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Fagaceae		대왕참나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Fagaceae		루브라참나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Fagaceae		밤나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Fagaceae		상수리나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Fagaceae		굴참나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Fagaceae		갈참나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Fagaceae		떡갈나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Fagaceae		졸참나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Betulaceae		자작나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Betulaceae		오리나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Betulaceae		박달나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Betulaceae		소사나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
Betulaceae		서어나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류

구분	과	수종	흉고직경(DBH) 생장에 따른 탄소 흡수량(kg/CO ₂)				탄소흡수계수 적용수종
			10cm	12cm	20cm	30cm	
평균 이하	Cornaceae	산수유	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Cornaceae	층층나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Cornaceae	산딸나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Cornaceae	말채나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Salicaceae	버드나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Salicaceae	능수버드나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Cercidiphyllaceae	계수나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Sapindaceae	모감주나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Hippocastanaceae	칠엽수	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Simaroubaceae	가죽나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Ebenaceae	감나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Elaeagnaceae	보리수	18.8	28	84.9	204.9	벗류
	Eucommiaceae	두충나무	18.8	28	84.9	204.9	벗류

자료 : 국립산림과학원(2012; 2022)

표 2-12 | 도시숲 수목의 흉고직경 생장에 따른 평균 탄소 저장량(가로에 식재된 수종 기준)

구분	그룹	수종	흉고직경(DBH) 생장에 따른 탄소 저장량(kg C)				비고
			10cm	12cm	20cm	30cm	
활엽수	A	느티나무	11.3	16.3	45.7	103.8	-
	B	벗류	9.7	13.5	34.4	72.0	-
	C	양버즘나무	11.4	17.2	54.3	135.3	-
	D	회화나무	13.2	19.3	56.3	131.9	-
	E	이팝나무	9.7	14.3	42.0	98.8	-
	F	중국-단풍	10.0	14.4	40.6	92.1	-
		단풍 (공원식재기준)	7.0	10.1	28.3	64.4	가로식재 기준 없음
침엽수	L	은행나무	9.1	13.5	40.1	95.4	-
	M	메타세콰이어	14.8	21.6	62.4	144.5	-
	O	소나무 (공원식재기준)	8.0	12.5	33.7	118.3	가로식재 기준 없음

자료 : 국립산림과학원(2012)

표 2-13 | 탄소계정을 위한 도시숲 수목의 그룹화

구분	그룹	과	일반명
활엽수	A	느릅나무과(Ulmaceae)	느티나무, 팽나무, 느릅나무
	B	장미과(Rosaceae)	왕벚나무, 벚나무, 산벚나무, 겹벚나무, 산사나무, 모과나무, 야광나무, 사과나무, 꽃사과나무, 배나무, 팔배나무, 마가목, 살구나무, 매화나무, 귀룽나무, 복숭아나무, 자두나무
	C	버즘나무과(Platanaceae)	양버즘나무
	D	콩과(Leguminosae)	회화나무, 자귀나무, 아까시나무
	E	물푸레나무과(Oleaceae)	이팝나무, 물푸레나무
	F	단풍나무과(Aceraceae)	중국단풍, 신나무, 고로쇠, 단풍, 청단풍, 홍단풍, 공작단풍, 은단풍, 복자기
	G	목련과(Magnoliaceae)	백합나무, 목련
	H	참나무과(Fagaceae)	대왕참나무, 루브라참나무, 밤나무, 상수리나무, 굴참나무, 갈참나무, 떡갈나무, 졸참나무
		자작나무과(Betulaceae)	자작나무, 오리나무, 박달나무, 소사나무, 서어나무
	I	층층나무과(Cornaceae)	산수유, 층층나무, 산딸나무, 말채나무
	J	버드나무과(Salicaceae)	버드나무, 능수버드나무
	K	계수나무과(Cercidiphyllaceae)	계수나무
		무환자나무과(Sapindaceae)	모감주나무
		칠엽수과(Hippocastanaceae)	칠엽수
소태나무과(Simaroubaceae)		가죽나무	
감나무과(Ebenaceae)		감나무	
보리수과(Elaeagnaceae)		보리수	
활엽수	K	두충과(Eucommiaceae)	두충나무
		벽오동과(Sterculiaceae)	벽오동, 가래나무, 호두나무
		두릅나무과(Araliaceae)	음나무
		부처꽃과(Lythraceae)	배롱나무
		녹나무과(Lauraceae)	후박나무
		뽕나무과(Moraceae)	뽕나무
		석류나무속(Punicaceae)	석류나무
		차나무과(Theaceae)	노각나무, 후피향나무
		때죽나무과(Styracaceae)	때죽나무, 쪽동백나무
		피나무과(Tiliaceae)	피나무
		갈매나무과(Rhamnaceae)	대추나무

구분	그룹	과	일반명	
침엽수	L	은행나무과(Gingkoaceae)	은행나무	
	M	낙우송과(Taxodiaceae)	메타세콰이어, 삼나무	
	N	소나무과 (Pinaceae)	전나무속	구상나무, 전나무
		주목과 (Taxaceae)	주목속	주목
	O	소나무과 (Pinaceae)	소나무류	소나무, 해송, 개잎갈나무
			잣나무류	스트로브잣, 섬잣나무, 잣나무, 백송
	P	측백나무과 (Cupressaceae)	편백속	편백, 화백나무
			향나무속	향나무
			측백속	측백
	Q	소나무과 (Pinaceae)	가문비속	독일가문비, 가문비나무

자료 : 국립산림과학원(2012)

- 김태진(2013)은 가로변 수목의 도로에서 발생하는 오염원 흡착 및 이산화탄소 흡수를 위해 탄소저감효과가 큰 수종을 선정함

 - 기존 연구결과와 탄소계정 산출 프로그램을 활용하여 수종별 CO₂ 흡수효율을 상대 비교하여, 대교목, 중부지방, 낙엽수종에 기준을 두고 최종적으로 8종의 가로 수종을 선정함
 - 툴립나무, 메타세콰이어, 양버즘나무, 은행나무, 느티나무, 회화나무, 칠엽수, 상수리나무
- 김학구 외(2022)는 국립세종수목원의 주요 교목 4종(소나무, 메타세콰이어, 칠엽수, 이팝나무)의 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량을 분석함

 - 수목 생장특성에 따라 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량이 높아지는 시기가 수종마다 상이하게 나타나 신규 탄소흡수원으로 도시숲을 조성 시 생육시기에 따라 이산화탄소 흡수량이 증진될 수 있도록 수종 선정에 대한 검토와 고민이 필요하다고 제언함
 - 흉고직경이 12cm급 수종 중 탄소저장이 가장 뛰어난 종은 이팝나무, 소나무, 메타세콰이어, 칠엽수 순
 - 흉고직경이 24cm로 성장하면 소나무, 이팝나무, 메타세콰이어, 칠엽수 순으로 탄소 저장량이 높은 수종으로 변화

표 2-14 | 국립세종수목원 주요 교목(4종)의 탄소저장량 및 탄소흡수량

수종	탄소저장량(kg·C)		이산화탄소 순흡수량(ton·CO ₂ /yr) 산정식
	B12(cm)	B24(cm)	
소나무	12.5	68.4	순 흡수량 = 총 흡수량 - 사업배출량 - 누출량
이팝나무	13.6	60.3	
메타세콰이어	9.2	53.7	
칠엽수	7.6	34.4	

자료 : 김학구 외(2022)

- 도시 교목의 탄소저장 및 흡수량 산정에 대한 기존 선행 연구를 살펴보면 도시교목에 대한 표준이 없고 탄소의 저장량 및 흡수량을 계산한 표본과 계산방식이 달라 산정 결과가 차이가 나고 있음
- 따라서 탄소저감 가로녹지를 위한 식재수종 선정 시 탄소흡수 우수 수종에 대한 연구 결과를 반영하되, 탄소저감 효과를 정량적으로 계산하기 위해서는 탄소저장 및 흡수 계량모형을 활용할 필요가 있음

2 • 관목

- 국내 도시숲과 정원용 관목 중 재배량의 88%를 차지하는 5개 수종을 선정하고 탄소저장량과 연평균 탄소흡수량을 산정하여 수종별 탄소흡수 기능을 비교 및 분석함(김학구 외, 2022)
 - 5개 수종 : 회양목(*Buxus sinica*), 화살나무(*Euonymus alatus*), 사철나무(*Euonymus japonicus*), 산철쭉(*Rhododendron yedoensis*), 조팝나무(*Spiraea prunifolia*)
 - 수령, 직경 등의 독립변수를 활용하여 수종별 상대생장식을 개발하였는데, 실질적으로 유통 및 식재되는 3년생 이후의 묘목 중 충청권역의 동일한 환경에서 자란 식물을 공시재료로 채택하고 수령 및 직경변화에 따른 부위별 흡수계수를 개발함
- 개체당 평균탄소저장량은 아래 표와 같으며 화살나무, 사철나무, 조팝나무, 회양목, 산철쭉 순으로 산정됨
 - 원자료의 탄소저장량 및 연간 CO₂ 흡수량의 단위는 g으로 표기되고 있으나, 교목 및 지피 식물의 관련 자료의 단위가 kg으로 단위를 통일하여 정리함

표 2-15 | 도시숲 식재 주요 관목류(5종)의 탄소저장량 및 탄소흡수량

수종	수령(년)	원자료		단위환산		탄소흡수량 감소 기점
		탄소저장량 (g·C)	탄소흡수량 (g·C/yr)	탄소저장량 (kg·C)	탄소흡수량 (kg·C/yr)	
화살나무	3~21	175.17 ± 61.61	214.09	0.17517	0.21409	14년생 이후
사철나무	3~11	141.54 ± 66.65	173.00	0.14154	0.173	7년생 이후 (탄소흡수량 감소하다 증가)
조팝나무	3~24	136.90 ± 57.87	167.32	0.13690	0.16732	6년생 이후
회양목	3~11	91.70 ± 37.30	112.08	0.09170	0.11208	(11년생까지 지속 증가)
산철쭉	3~8	54.85 ± 13.83	67.04	0.05485	0.06704	18년생 이후 (탄소흡수량 감소하다 증가)

자료 : 김학구 외(2022)

- 도시생물다양성 증진을 위한 기반 구축의 일환으로 정원·도시숲 주요 관목의 탄소흡수우수종을 선별하고 주요 관목의 탄소흡수계수를 개발하였으며, 생물다양성 증진과 탄소흡수 증진을 위한 정원·도시숲 식재모형을 개발하였음(한국수목원정원관리원, 2022)

 - 유통량이 많은 3년생 식물 50종의 대상종 중 탄소흡수우수종은 아래의 관목 10종임
 - 히어리, 박태기나무, 병꽃나무, 낙상홍, 덜꿩나무, 사철나무, 수수꽃다리, 앵도나무, 남천, 병아리꽃나무
 - 도시숲에 식재되는 주요 관목류 5종 중 탄소흡수우수종에 해당하는 관목은 사철나무뿐이며, 화살나무·조팝나무·회양목·산철쭉은 탄소흡수우수종에 해당하지 않음
 - 산철쭉의 탄소저장 및 흡수량은 연구마다 차이가 있어 향후 연구결과 모니터링 필요. 김학구 외(2022)의 자료에서는 산철쭉의 탄소저장량 및 흡수량이 5종 중 가장 최하위였으나, 한국수목원정원관리원(2022)의 자료에서는 산철쭉의 탄소저장 및 흡수량이 사철나무 다음으로 우수하다는 연구결과

표 2-16 | 연평균 이산화탄소 흡수량이 높은 관목 수종(10종)

수종	원자료		단위환산	
	탄소저장량 (gC)	CO ₂ 흡수량 (g CO ₂ /yr)	탄소저장량 (kgC)	CO ₂ 흡수량 (kg CO ₂ /yr)
히어리	215.76 ± 22.43	263.71 ± 27.42	0.21576	0.26371
박태기나무	212.79 ± 47.76	260.07 ± 58.38	0.21279	0.26007
병꽃나무	193.20 ± 71.70	236.13 ± 87.63	0.19320	0.23616
낙상홍	130.50 ± 31.91	159.50 ± 39.01	0.13050	0.15950
털팽나무	120.24 ± 39.97	146.96 ± 48.86	0.12024	0.14696
사철나무	108.28 ± 27.24	132.34 ± 33.90	0.10828	0.13234
무궁화	106.99 ± 38.65	130.77 ± 47.24	0.10699	0.13077
수수꽃다리	100.14 ± 11.16	122.40 ± 13.64	0.10014	0.12240
등나무	93.50 ± 40.43	114.28 ± 49.41	0.09350	0.11428
앵도나무	88.92 ± 25.27	108.68 ± 30.88	0.08892	0.10868

자료 : 한국수목원정원관리원(2022)

표 2-17 | 연평균 이산화탄소 흡수량이 높은 관목 수종(기타 40종)

수종	원자료		단위환산	
	탄소저장량 (gC)	CO ₂ 흡수량 (g CO ₂ /yr)	탄소저장량 (kgC)	CO ₂ 흡수량 (kg CO ₂ /yr)
가막살나무	85.62	104.64	0.08562	0.10464
꽃뎡강나무	84.59	103.38	0.08459	0.10338
산철쭉	80.87	98.84	0.08087	0.09884
치자나무	78.73	96.23	0.07873	0.09623
무궁화	75.59	92.01	0.07559	0.09201
작살나무	73.73	90.11	0.07373	0.09011
화살나무	73.42	89.73	0.07342	0.08973
보리수나무	72.31	88.37	0.07231	0.08837
국수나무	69.57	85.04	0.06957	0.08504
등나무	62.57	79.78	0.06257	0.07978
백당나무	63.96	78.17	0.06396	0.07817
좁작살나무	59.92	73.24	0.05992	0.07324
호랑가시나무	59.29	72.46	0.05929	0.07246
능소화	57.57	70.36	0.05757	0.07036
흰말채나무	54.57	66.69	0.05457	0.06669
개나리	54.18	66.22	0.05418	0.06622

수종	원자료		단위환산	
	탄소저장량 (gC)	CO ₂ 흡수량 (g CO ₂ /yr)	탄소저장량 (kgC)	CO ₂ 흡수량 (kg CO ₂ /yr)
개쉬땅나무	52.12	63.70	0.05212	0.06370
팔손이	46.95	57.39	0.04695	0.05739
생강나무	42.10	51.45	0.04210	0.05145
명자꽃	39.24	47.96	0.03924	0.04796
조팝나무	38.20	46.69	0.03820	0.04669
쥐똥나무	37.90	46.32	0.03790	0.04632
미선나무	36.19	44.24	0.03619	0.04424
꼬리조팝나무	34.55	42.22	0.03455	0.04222
수국	33.39	40.81	0.03339	0.04081
짚레꽃	32.25	39.42	0.03225	0.03942
돈나무	31.09	38.00	0.03109	0.03800
진달래	30.72	37.55	0.03072	0.03755
줄사철나무	30.01	36.68	0.03001	0.03668
산수국	28.63	34.99	0.02863	0.03499
다래	25.44	31.09	0.02544	0.03109
담쟁이덩굴	23.25	28.41	0.02325	0.02841
인동덩굴	22.67	27.71	0.02267	0.02771
철쭉	22.65	27.69	0.02265	0.02769
다정큼나무	20.95	25.61	0.02095	0.02561
회양목	11.60	14.17	0.01160	0.01417
말발도리	8.72	10.66	0.00872	0.01066
송악	8.18	10.00	0.00818	0.01000
마삭줄	7.63	9.32	0.00763	0.00932
광나무	-	-	-	-

자료 : 한국수목원정원관리원(2022)

- 관목의 탄소저장 및 흡수량에 관한 연구는 교목에 비해 상대적으로 적게 진행되어 비교할 수 있는 데이터가 많지 않았으며, 특히 정량적으로 탄소저장 및 흡수량을 산정할 수 있는 계량모델은 도시에서 주로 식재되고 있는 관목수종 5종에 대해서만 개발되어 있음
- 이산화탄소 흡수량이 가장 높은 히어리가 주요 식재 5종 중 가장 흡수량이 큰 사철나무에 비해 약 2배 정도 흡수능력이 더 좋으나 가로녹지 수종으로 적합여부 필요

3 지피 및 초화류

- 탄소저감 방안의 하나로 지피식물 30종을 대상으로 식물별 연간 탄소 흡수량을 계산하여 발표함. 1㎡당 연간 탄소흡수량이 3.0~3.5kg로 비교적 높은 지피식물군은 박하, 구절초, 노랑꽃창포 등 11종임(농촌진흥청, 2021)
- 가로화단용(초화류) 및 가로화단용(관목류)의 식재면적(㎡)에 따른 연간 탄소저장량 및 연간 탄소흡수량을 연구한 결과가 있음
- 같은 국수나무라도 자엽국수나무가 황금국수나무보다 연간 탄소 저장 및 흡수능력이 좋음

표 2-18 | 지피식물(30종 기준)의 단위면적(㎡) 당 연간 CO₂ 흡수량(kg/년)

구분	식물군(흡수량 순)	연간 CO ₂ 흡수량(kg/년)	
		1㎡ 단위면적	200㎡ 화단
우수 (11종)	박하, 자엽국수(**), 구절초(*), 노랑꽃창포(*), 붓꽃(*), 억새(*), 무늬사초, 수크령(*), 꼬리풀, 국수나무 '타이니와인'(**), 리아트리스(*)	3.0±0.5	500 이상
평균 (11종)	두메부추, 호스타(*), 비비추, 아스틸베, 노루오줌(*), 배초향(*), 약모밀, 국수나무 '황금국수'(**), 기린초, 큰김의털, 한국잔디	2.0±0.5	300~500
평균 이하 (8종)	톱풀, 범부채(*), 꽃댕강나무(**), 삼색조팝(**), 꽃향유(*), 뱀무(*), 제리늪(*), 휴케라	1.0±0.5	200 이하

(*) : 가로화단용 초화류 / (**) 가로화단용 관목류
 자료 : 농촌진흥청(2021)

표 2-19 | 지피식물별 연간 탄소저장량(gC/㎡) 및 연간 CO₂ 흡수량(kg/년)

구분	명칭	잎면적지수(LAI)	연간 탄소 저장량 (gC/㎡)	연간 CO ₂ 흡수량 (kg/㎡)
옥상 녹화용 (지피식물)	무늬사초	14.3 ± 0.17	828.3	3.04
	가는기린초	3.71 ± 0.15	748.2	1.889
	(무관수)	3.07 ± 0.19	674.3	1.703
	큰김의털	3.68 ± 0.21	747.1	1.886
	꼬리풀	5.7 ± 0.21	725.9	2.66
	금잔디	2.45 ± 0.17	713.5	1.802
	두메부추	9.9 ± 0.0	666.6	2.44
	비비추	7.7 ± 10.1	623.2	2.29
	톱풀	11.2 ± 0.17	411.9	1.51
휴케라	8.8 ± 0.3	170.4	0.62	

구분	명칭	잎면적지수(LAI)	연간 탄소 저장량 (gC/m ²)	연간 CO ₂ 흡수량 (kg/m ²)
가로 화단용 (초화류)	호스타	10.5 ± 10.1	3,708.3	13.60
	돌단풍	8.8 ± 0.21	2,265.5	8.31
	억새	16.0 ± 3.2	1,344.4	3.18
	리아트리스	15.1 ± 1.5	1,085.6	2.61
	범부채	7.0 ± 0.15	1,025.9	3.76
	구절초	12.3 ± 0.16	996.4	3.65
	노랑꽃창포	16.5 ± 0.15	962.0	3.53
	붓꽃	14.8 ± 0.16	876.9	3.22
	수크령	17.4 ± 0.16	791.2	2.90
	노루오줌 원예종	11.8 ± 16.0	1,491.4	5.47
	노루오줌	7.9 ± 0.16	581.2	2.13
	배초향	10.3 ± 0.21	549.4	2.01
	꽃향유	11.3 ± 0.17	257.8	0.95
	뱀무	10.0 ± 0.7	235.5	0.86
	제라늄	8.3 ± 1.2	178.3	0.65
가로 화단용 (관목)	자엽국수	12.7 ± 4.0	4,670.2	3.74
	황금국수	19.6 ± 3.6	3,195.1	1.93
	타이니와인	17.3 ± 0.6	1,615.0	2.64
	꽃댕강	15.1 ± 1.8	1,129.1	1.48
	삼색조팝	11.3 ± 0.8	538.6	1.02
하천 녹화용	흰갈대	11.1 ± 0.21	2,461.8	9.03
	물억새	20.7 ± 0.15	1,370.5	5.03
	홍띠	8.7 ± 0.16	1,283.6	4.71
	속새	11.8 ± 0.17	1,142.1	4.19
	박하	14.7 ± 0.16	1,079.4	3.96
	약모밀	12.1 ± 0.21	539.9	1.98

자료 : 농촌진흥청(2021)

- 생활정원 조성용 초본의 탄소저장량을 분석한 결과 ‘고사리류 > 벼·사초과 > 초본류’ 순의 탄소저장량을 나타냄(한국수목원정원관리원, 2022)
 - 그 중 초본류인 돌단풍, 바위취는 생활밀착형숲 내 식재량은 많았으나 탄소저장에 미치는 기여도가 낮았음
 - 홍지네고사리는 가장 높은 탄소함량비와 탄소저장량을 나타냄

표 2-20 | 생활정원에 식재된 초본의 그룹별 탄소저장량 분석

그룹	국명	평균 탄소저장량(gC)
고사리류	흥지네고사리	13.30 ± 4.37
	바위고사리	2.59 ± 0.98
벼·사초과	좁보리사초	4.37 ± 0.62
	여우꼬리사초	3.14 ± 0.14
	새	3.05 ± 0.19
생밀초본	맥문동	2.06 ± 0.54
	상사화	2.53 ± 0.59
	돌단풍	2.08 ± 0.61
	바위취	0.29 ± 0.08
	수호초	4.07 ± 1.06

자료 : 한국수목원정원관리원(2022)

- 지피식물에 대한 탄소 저장 및 흡수능력에 대한 연구는 현재 탄소흡수우수종에 대한 결과만 공개되어 있으며, 탄소흡수계수 및 계량모델 등이 개발되지는 않았음
- 그러나 지피식물도 탄소저감능력이 입증되고 연구되고 있어 탄소중립 가로녹지 조성 시 관목 식재가 불가능한 곳은 탄소저감능력이 우수한 지피식물을 식재하는 것을 고려할 필요성을 시사함. 특히 탄소흡수능력이 우수하고 경관 조성이 가능한 벼·사초과의 특화 식재를 통해 단조롭지 않은 가로녹지를 조성할 수 있음

4 • 토양

1) 토양의 탄소저감 효과

- 도시 주거지 조경수목의 탄소저장량 분석 결과, 수목에 21%, 토양에 78%가 고정되어 있었으며, 농촌지역 산림에서는 토양에 약 63%, 수목에 27%가 저장됨(Miller, 1998; 김태진, 2013)

 - 가로수목뿐 아니라 그 기반이 되는 토양층을 가급적 많이 확보해야 함(김태진, 2013)
- 도심지 화단에 많이 심는 붓꽃류는 일반 토양(3.2kg/m²)보다 물빠짐이 좋은 토양(7.2kg/m²)에서 탄소 흡수량이 2배 이상 높게 나타남(농촌진흥청, 2021)

 - 구절초 등 10종 또한 불량한 토양 환경에서 연간 탄소 흡수량이 50% 이하로 떨어지는 결과를 보임(농촌진흥청, 2021)
- 도시림의 식재기법에 따른 토양 탄소저장량은 ‘초본<교목<초본+교목<관목+교목’ 순으로 나타나 단층식재지보다 다층식재지에서 토양의 탄소고정량이 높게 나타남(산림청, 2020)

표 2-21 | 대전시 도시림의 식재기법별 토양의 단위면적당 탄소저장량

구분	식재기법	토심(cm)	탄소저장량(t/ha)
전체평균 (공원녹지, 공동주거지, 가로녹지)	초본	0~30	7.72 ± 2.45
	단층식재 (교목)	0~30	10.34 ± 7.29
	단층식재 (초본+교목)	0~30	11.37 ± 6.32
	다층식재 (관목+교목)	0~30	13.92 ± 8.54

자료 : 산림청(2020)

- 탄소저감 효과를 극대화하기 위해 수목의 생육 기반이자 탄소를 저장하는 수단으로서 토양이 있는 식재공간을 확보하고 양질의 토양환경에 대한 고려가 필요함
- 녹지공간의 확보가 어려운 도시 내에서는 인위적으로 제거되는 낙엽 및 낙지와 같은 부산물을 퇴비화하여 토양으로 환원한다면 토양 내 탄소고정 효과를 기대할 수 있을 뿐만 아니라 식물의 성장환경이 양호해져 식물에 의한 탄소고정에도 긍정적인 효과가 있을 것임(산림청, 2020)

제3절 탄소중립을 위한 식재기준 및 관리방안

1

탄소중립을 위한 식재기준

- 탄소 저장 및 흡수량을 극대화할 수 있는 도시숲 설계방법은 기본적으로 많은 수목을 식재하고, 성장을 위한 충분한 공간이 확보된 최상의 성장환경을 제공하며, 식재할 입지에 적합한 수종을 선정하여 고사율을 줄여야 함(국립산림과학원, 2012)

표 2-22 | 탄소 흡수·저장량을 극대화할 수 있는 도시숲의 설계방법

구분	내용
설계 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 보다 많은 수목을 식재 • 지상부 및 지하부 모두에 성장을 위한 충분한 공간이 확보된 최상의 성장환경을 제공하며, 수목뿌리가 성장 가능한 충분한 지하부 공간을 제공하여 이산화탄소 흡수저장량 및 수목의 성장기간을 최대화 • 식재할 입지에 적합한 수종을 선정 • 시기에 따른 지속적인 수관 피복을 유지하기 위해, 다양한 수령 및 수종을 지닌 여러 종 집단의 군집 조성

자료 : 국립산림과학원(2012)

- 탄소저감을 극대화할 수 있는 식재 가이드라인으로 김태진(2013)은 ‘도로 이산화탄소 저감을 위한 가로 수종 선정 및 식재기준 연구’를 통해 탄소흡수량뿐 아니라 성장속도, 도로적응성을 복합적으로 고려한 가로수종 8종을 제안
 - 탄소저감을 극대화할 수 있는 가로녹지의 수종선정원칙, 수종구성방식, 식재설계기준, 식재 공간조성에 대한 가이드라인을 함께 제시함

표 2-23 | 탄소흡수 효율이 높은 주요수종과 환경적응성 비교

구분	CO2 흡수량 (kgCO2/tree/yr)	성장속도	도로 적응성			
			내공해성	내음성	내한성	내건성
느티나무	38.8	+	중	중	강	중
은행나무	39.7	+	강	약	강	강
메타세쿼이아	35.5	+++	중	약	약	약
양버즘나무	54.1	+++	강	중	강	중
회화나무	67.8	++	강	중	강	중
튤립나무	99.1	+++	강	중	강	중
칠엽수	54.0	++	중	중	강	중
상수리나무	51.0	+	중	중	강	중

자료 : 김태진(2013)

표 2-24 | 이산화탄소 흡수능력 향상을 고려한 식재 가이드라인

구분	식재 가이드라인
수종선정 원칙	<ul style="list-style-type: none"> • 수목은 아름다운 경관측면보다는 이산화탄소 저감기능에 중점 • 조경용으로 사용되는 수종보다는 탄소흡수능력이 우수한 자생수종 도입 • 침엽수종보다는 낙엽활엽수종을 다양하게 활용 • 단기 및 장기적으로 탄소 흡수기능을 높일 수 있는 수종조합을 고려
수종구성 방식	<ul style="list-style-type: none"> • 단기적으로 CO₂ 흡수 능력이 초기에 우수한 도로수종 식재 • 장기적으로 CO₂ 흡수 능력이 우수한 수종을 보완 식재 • CO₂ 흡수 능력이 우수한 자생 활엽수종 도입 검토 • 속성수와 중년~장년기에 탄소흡수효과가 좋은 늦게 자라는 수목을 함께 구성 • 유령기의 신규 식재와 중, 장령기의 식재가 공존하도록 다양한 영급의 수목을 구성 • 식재지 구성에서 관목이나 초본류보다는 교목성 수종의 비중 높임
식재설계 기준	<ul style="list-style-type: none"> • 남북방향 도로에 탄소흡수율이 좋은 수목을 집중 식재 • 그늘이 많이 발생하는 도로변에 내음성 수목을 식재 • 초기식재는 수목규격을 성목으로 상향(아래 기준은 최소기준이며 상호 독립적) <ul style="list-style-type: none"> - 수고 : 2.5m, 흉고직경 : 8~10cm, 근원직경 : 10~12cm, 지하고 2.5m • 일정규모(왕복 8차로) 이상의 도로에는 중앙분리대를 설치하여 식재 • 도로상황이 가능한 곳에는 식재간격을 현재 기준인 6~8m에서 6m 정도로 좁힘 • 도로변 식재 폭이 여유가 있는 곳에는 1열보다는 2~3열 이상으로 식재열 확대 • 교목 하부공간에 관목, 초본류를 추가 식재하여 상층, 중층, 하층이 복층을 형성 • 대상지 환경에 적합한 수종(적지적수)를 선정
식재공간 조성	<ul style="list-style-type: none"> • 산림지역을 통과하는 경우를 제외하고 가급적 일반국도변에 수목 식재 • 토양층을 가급적 많이 확보할 수 있도록 선형으로 투수표면을 넓게 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 폭은 수목의 성장크기와 종류에 따라 0.9m 이내, 0.9~1.2m, 1.2m 이상으로 구분 - 대형 교목은 최소 1.2m 이상 확보 • 연속적 수관층을 형성하고 수목연령과 수종이 다양하게 구성된 생태공간으로 조성 • 광장, 주차공간, 여건이 불리한 공간에 식재량을 늘리고 적절한 토양환경 조성

자료 : 김태진(2013)

- 한국수목원정원관리원(2021)은 가로변 및 도심정원 식재에 적합한 정원소재 자생식물 발굴하기 위해 주 1회 관수로도 관리하기 용이한 내건성이 강한 식물, 제설제 사용 등에 노출되는 가로변 식재에 적합한 내염성이 강한 자생식물을 연구하고 있음
 - 내건성·내염성이 강해 도시환경에 적응하기 용이한 자생식물을 식재할 경우 관리를 최소화할 수 있어 이에 따르는 탄소저감효과가 있음
 - 농촌진흥청(2021)에 따르면 무늬사초가 연간 탄소 흡수량이 우수한 종에 속해 같은 벼·사초 과인 여우꼬리사초, 줌보리사초 또한 연간 탄소 흡수량이 높다고 가정하고 해당 식물군을 경관 형성을 위한 가로녹지에 식재하는 것을 고려할 수 있음

표 2-25 | 도시환경 적응 정원식물(실외)

구분	정원식물		비고
내건성(강)	벼·사초과	여우꼬리사초, 줌보리사초, 그늘사초	주 1회 관수로도 관상가치 유지, 관리 편의성 높아 도심정원 식재 적합
	산림 신품종	기린초 '금강', 기린초 '산내트리칼라', 금평의다리 '서동명'	
내염성(강)	벼·사초과	줌보리사초, 새, 향부자, 청사초	제설제 사용 등에 노출되는 가로변 식재에 적합
	산림 신품종	기린초 '금강', 기린초 '산내트리칼라', 수크령 '자이언트브러쉬'	
내건성·내염성 복합 고려	벼·사초과	여우꼬리사초, 줌보리사초, 새	가로변 및 도심정원 식재에 적합
	산림 신품종	기린초 '금강', 기린초 '산내트리칼라'	

자료 : 한국수목원정원관리원(2021)

2 • 탄소중립을 위한 관리방안

- 국립산림과학원(2012)은 탄소의 흡수·저장량을 극대화하는 도시숲 경영방법으로 전정 및 관리를 최소화하여 탄소의 흡수, 저장량을 극대화하는 방안 제시

표 2-26 | 이산화탄소 흡수·저장량을 극대화할 수 있는 도시숲의 경영방법

구분	내용
경영 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 나무 및 그루터기 제거에서 기인한 CO₂ 손실을 보완하기 위해 고사목은 즉시 교체 • 유사한 관리 요건을 지닌 수종군과 함께 전정, 시비, 제초 및 병충해를 관리하는 방법을 마련하여 비용과 노력을 최소화 • 미는 예초기, 한 손으로 켜는 톱, 정지·전정 도구, 갈퀴를 사용함으로써 관리와 관련된 CO₂를 감축

자료 : 국립산림과학원(2012)

- 탄소배출을 최소화하는 수목 유지관리 가이드라인으로 유지, 관리를 최소화하여 탄소배출을 최소화하는 방법을 제시함(김태진, 2013)

표 2-27 | 이산화탄소 흡수능력 향상을 고려한 식재 가이드라인

구분	식재 가이드라인
수목 유지관리	<ul style="list-style-type: none"> • 수목 바이오매스의 감소를 최소화하도록 빈번한 전정작업을 지양 • 고사된 수목은 가급적 신속히 새로운 수목으로 교체 • 유사수목을 그룹화하여 배식하며 관수, 전정, 비배, 제초, 병해충 방제 등을 최소화 • 수목 낙지물의 잔재를 멀칭재로 활용 • 병충해, 고온에서 수분부족 등 각종 스트레스를 받지 않도록 관리 • 식재 후 활착율을 높일 수 있는 첨단 식재기술을 적용

자료 : 김태진(2013)

제4절 바이오차 적용

1 • 바이오차의 탄소격리효과

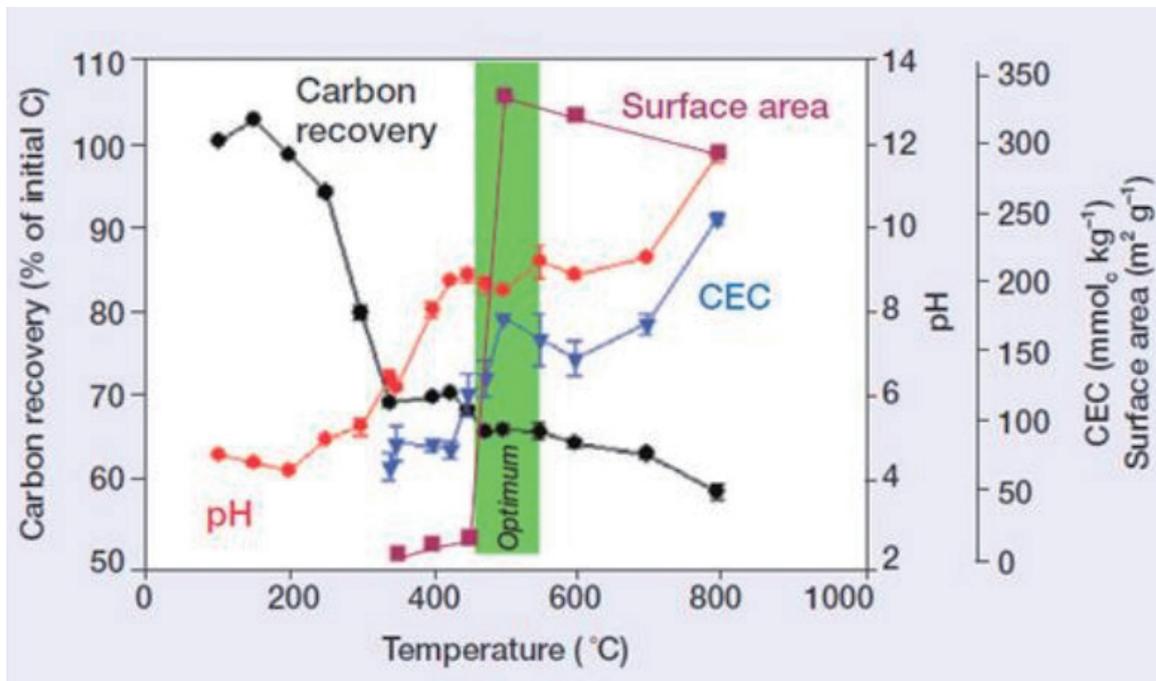
1) 바이오차 도입배경

- 바이오차(Biochar)는 바이오매스(Biomass)와 숯(Charcoal)의 합성으로 산소가 제한된 환경에서 유기자재를 열분해하여 만들어진 분해 저항성이 강한 공형물임
 - 바이오매스를 산소가 없거나 매우 적은 환경에서 약 300-800℃로 열분해하면 기체, 액체, 고체가 생성되는데, 이때 생성되는 고형물을 바이오차라고 함
 - 바이오차 제조의 원료가 되는 바이오매스는 모든 유기물이 가능하며, 원료의 종류에 따라 바이오차의 특성이 확연하게 달라질 수 있음(한국농촌경제연구원, 2021)
- 2018년 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 특별보고서에 바이오차가 이산화탄소 제거기술로 처음 제안
 - 2007년 코넬대의 Lehmann 교수가 네이처에 탄소 네거티브 원리 발표
 - 2018년 IPCC 6차 보고서에서는 1.5℃ 목표 달성을 위해 기후변화 저감 옵션 몇 가지를 제시하고 함. 분야별로는 1) 에너지 시스템 전환(바이오에너지, 풍력, 태양광, 원자력 등), 2) 토지/생태계 전환(식량생산 효율화, 음식물쓰레기 저감, 생태회복 등), 3) 도시/인프라 시스템 전환(도시계획, 전기차, 스마트그리드 등), 4) 산업 시스템 전환(에너지 효율화 등), 5) 이산화탄소제거(Carbon Dioxide Removal, CDR) 등이 있음(IPCC, 2018)
 - 이 중에서 CDR 기술에는 5차 보고서 당시 신규조림 및 재조림(Afforestation and reforestation, AR), 바이오매스/바이오에너지 탄소저장 및 격리(Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)만 제시되었던 것이 6차 보고서에는 바이오차, 토양 탄소격리(Soil Carbon Sequestration, SCS), 화학용매 및 흡수제를 이용한 탄소저장 및 격리(Direct Air Capture with Carbon Capture and Storage, DACCS), 가속 광물화(Enhanced Weathering, EW), 해양 염기성화(Ocean Acidification, OA) 등의 기술이 추가(우승한, 2021)
 - 바이오차는 토양복원뿐 아니라 탄소 저감 효과까지 있는 것으로 밝혀져 기후변화에 대응하는 수단으로 활용

2) 바이오차 제조 및 물리화학적 특성

- 바이오차는 생산 온도에 가장 큰 영향을 받으며 높은 온도에서 만들어진 바이오차일수록 분해가 많이 되어 산소와 수소 함량이 줄어들고, 탄소의 함량이 증가함
 - 높은 온도에서 생산된 바이오차일수록 탄소저장 효과가 높다고 할 수 있으나 생산되는 양이 줄어 동일한 원료 바이오매스 양 대비 탄소저장 양은 줄어들
 - 단, 생산 온도가 증가할수록 바이오차의 pH와 양이온 치환능 증가

그림 2-1 | 바이오차 제조 온도에 따른 물리화학적 특성



자료 : Lehmann(2007)

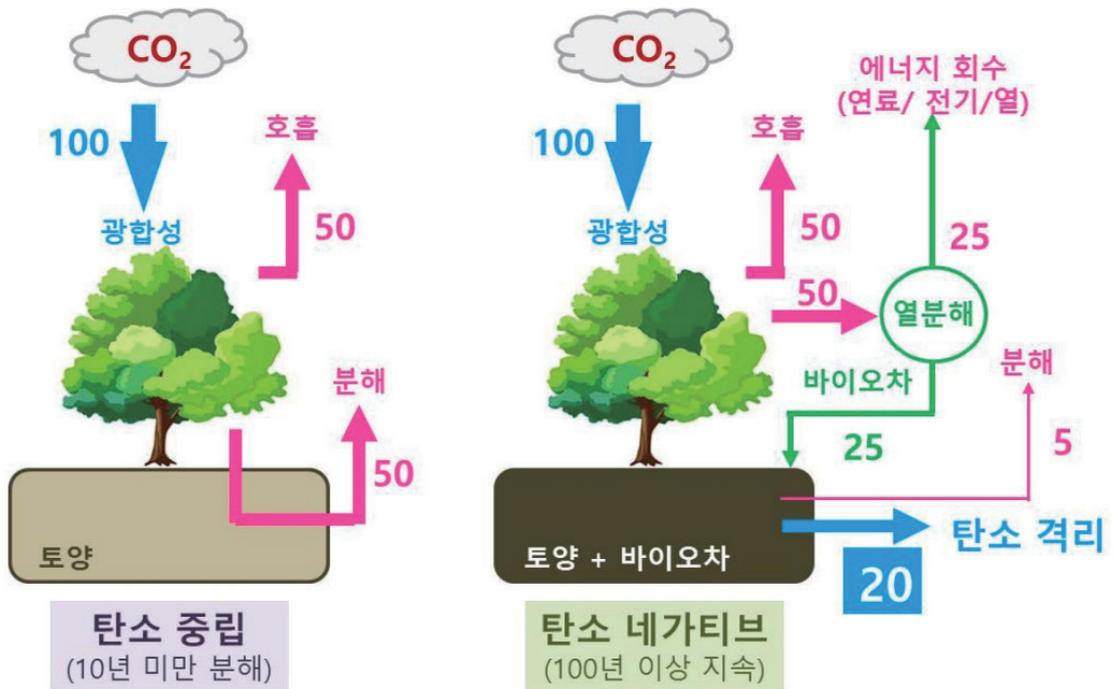
2 • 바이오차의 기후변화 저감원리

- 바이오차의 기후변화 저감 원리는 낙엽 및 낙지와 같은 부산물을 얻기 쉽지 않은 환경에서 바이오차를 이용해서 토양을 조성할 수 있는데, 바이오차를 토양에 투입하면 100년 이상 분해되지 않고 토양에 남아 토양 속에 탄소를 고정시킴
 - 식물이 광합성에 의해 대기 중의 이산화탄소를 흡수하면 약 50%는 호흡에 의해 대기 중으로 방출되고, 나머지는 식물에 의해 바이오매스에 고정됨. 그러나 바이오매스는 토양에서 미생

물에 의해 약 10년의 기간 동안 모두 분해되어 결과적으로 초기에 흡수되었던 이산화탄소가 모두 방출되는 결과를 가져옴(우승한, 2021)

- 바이오차를 활용할 경우 바이오매스에 저장되었던 이산화탄소가 열분해를 통해 바이오차의 형태로 남게 되어 토양에 들어가더라도 100년 이상 보존될 수 있으며, 바이오차의 일부가 분해되더라도 초기에 흡수된 이산화탄소의 약 20%가 장기간 저장됨(우승한, 2021)

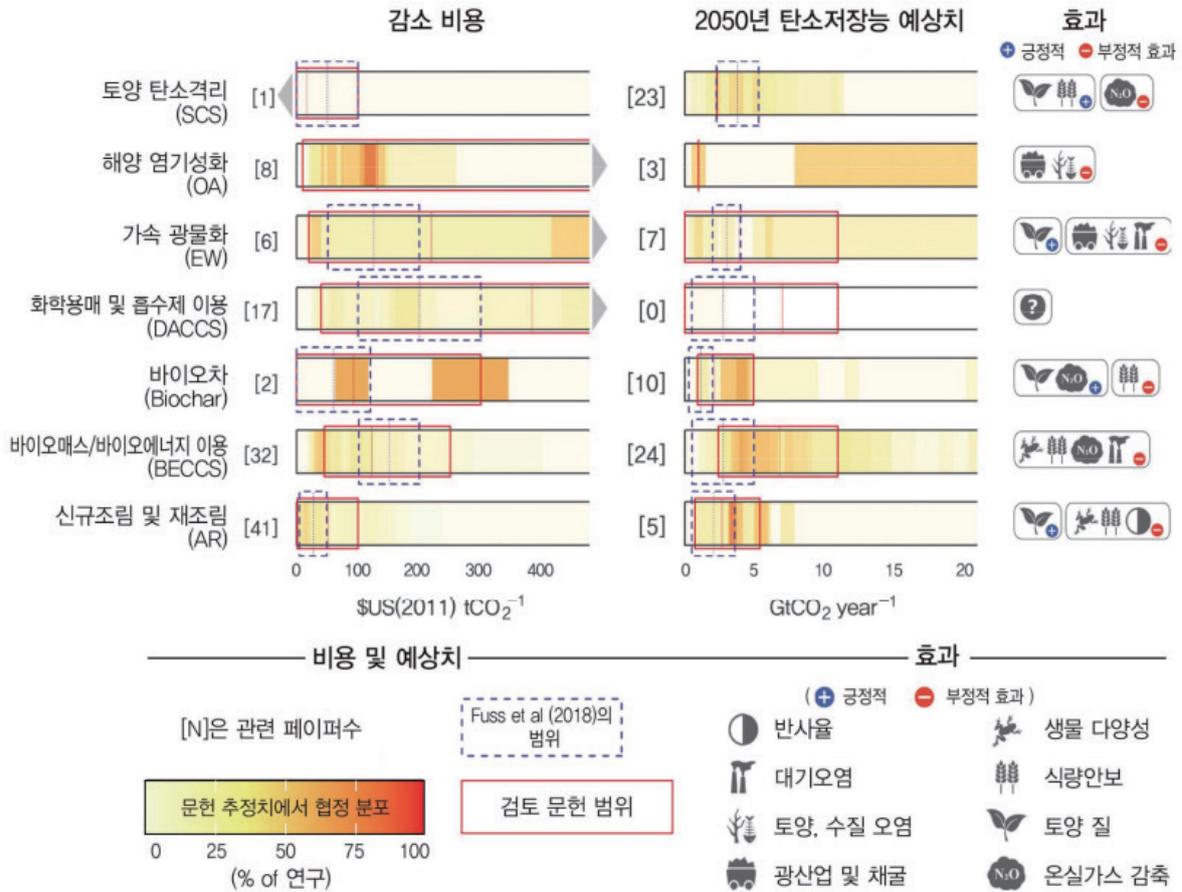
그림 2-2 | 바이오차의 기후변화 저감 원리



자료 : Lehmann(2007), 우승한(2015 재구성)

- 바이오차는 비용이 저렴한 기술이지만, 탄소저장능도 다소 낮은 것으로 예측. 바이오차의 탄소저장 예상치는 토양에 투입하여 100년 후 분해되지 않고 잔존하는 탄소의 양을 기준으로 함
- 이러한 바이오차의 100년 안정성에 대한 계량적 수치는 생산 온도에 따라 달라지는데 600℃ 이상일 때는 89±13%, 450-600℃일 때는 80±11%, 350-450℃일때는 65±15%인 것으로 IPCC에서는 제시하고 있으나, 생산 조건과 재료, 그리고 다양한 변수에 따라 달라질 수 있을 것(우승한, 2021)

그림 2-3 | CDTR 기술의 비용과 2050년 탄소저장능 예상치 비교



자료: IPCC Special Report(2018), 우승한(2021)

3 • 바이오차의 탄소저장량 계산

1) 바이오차의 탄소저장량

- 바이오차는 다공성에 표면적이 넓어 토양에 투입하면 토양의 용적밀도, 양이온 흡착량, 수분 보유력 등을 개선하고 중성이기 때문에 산성, 알칼리성 토양 개량에 효과적임
 - 바이오차 시비 시 상토와 섞어 혼합토로 사용하며, 혼합토에서의 바이오차 비율이 약 10~30%일 때 식물의 생장이 좋은 것으로 나타남(한국수목원정원관리원, 2022)
- 바이오차의 탄소 저장 및 격리 능력은 IPCC에서 2019년에 발간한 보고서에 바이오차를 토양에 처리 시 바이오차의 탄소함량, 처리 후 100년 간 지속가능한 탄소함량비 등을 반영하여 바이오차의

탄소 저장 및 격리 능력을 인정하여 수식으로 나타냄

표 2-28 | 바이오차의 탄소 저장량 계산식

구분	산정식	비고
바이오차 처리로 인해 변화된 탄소함량 (t CO ₂)	$\Delta BC_{Mineral} = \sum_{p=1}^n (BC_{TOTp} \cdot F_{Cp} \cdot F_{perm_p})$	- BC _{mineral} : 바이오차 처리로 인해 변화된 탄소함량(C yr ⁻¹) - BC _{TOTp} : 처리된 바이오차의 건조중량(ton yr ⁻¹) - F _{Cp} : 바이오차의 탄소함량 - F _{Permp} : 100년간 유지되는 탄소함량비

자료 : IPCC(2019)

- 경희대학교 산학협력단(2023)은 시판되고 있는 바이오차에 대한 토양 탄소 저장 증가량을 산정함. 유기바이오차(왕겨)와 포이엔바이오차(커피박)를 제외한 제품이 모두 목재 바이오차로 이 중 한 개의 제품에 대한 탄소 증가량으로 토양-식생 결합 공법을 도출하였음
 - 이 때 바이오차는 5%, 60cm 깊이로 투입되어 토양의 100년 간 장기 저장될 수 있는 연간 탄소 흡수량을 산정함
 - 바이오차의 탄소함량은 혼합물 여부에 따라 차이가 있을 수 있음

표 2-29 | 바이오차의 탄소함량 및 토양탄소 저장 증가량

구분	탄소 함량	잔존율*	토양 탄소 저장 증가량
에코플러스 바이오차	0.76	0.89	0.68
아리 바이오차	0.55	0.65	0.36
유기 바이오차	0.57	0.80	0.46
하나로 바이오차	0.53	0.65	0.34
경동 바이오차	0.58	0.80	0.46
포이엔 바이오차**	0.83	0.80	0.66

*열분해 온도에 따라 잔존율 결정(IPCC, 2019)

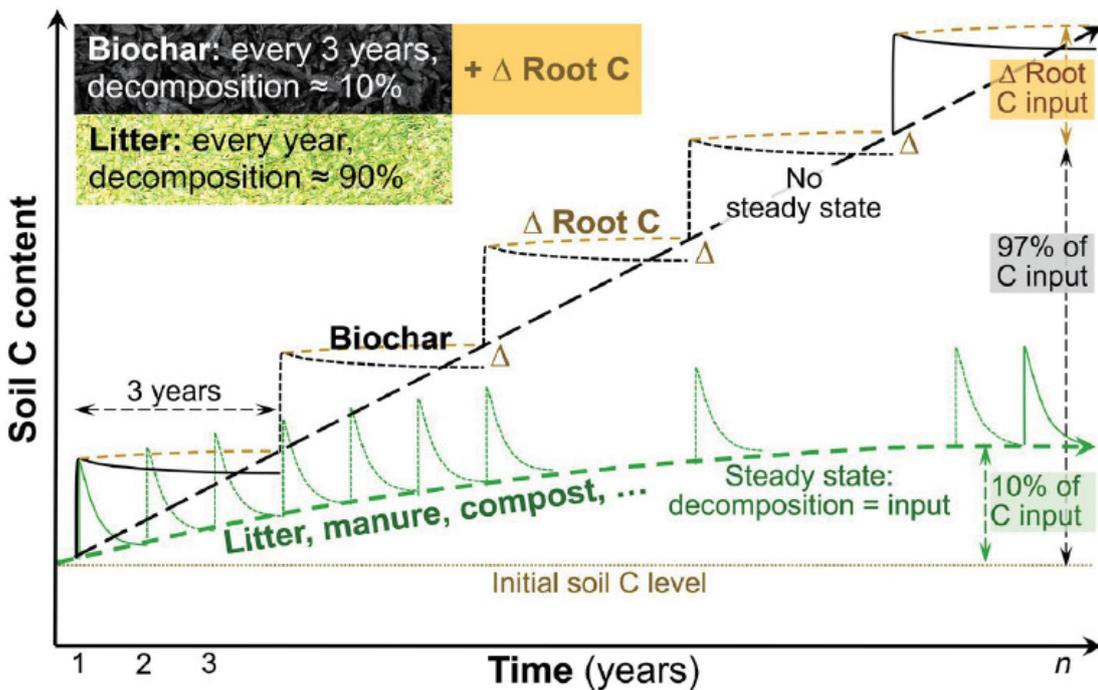
**시험성적표를 바탕으로 작성

자료 : 경희대학교 산학협력단(2023)을 바탕으로 저자 재구성

2) 바이오차 투입 시 식생탄소흡수증가량

- 바이오차 투입 시 토양의 탄소고정효과뿐 아니라 식물의 탄소 흡수량 증가 등의 효과가 있는 것으로 나타남. 다만 바이오차에 대한 연구가 현재 여러 기관에서 진행 중에 있으며 그 효과의 크기는 연구마다 차이가 있음
 - 바이오차를 투입 시 토양 유기탄소 축적량이 증가함. 매년 90%의 바이오차가 분해되고 열분해되지 않는 바이오매스를 연간 추가하는 것과 비교 시 3년마다 연간 3%씩 분해되는 것으로 분석됨(그림 2-4; Jesoph et al, 2021)
 - 경희대학교 산학협력단(2023)은 바이오차 투입에 따른 식생의 탄소 흡수 증가량을 40%로 적용하였으나, 이는 1년 실험 결과에 기반한 값임(Kim et al., 2020)

그림 2-4 | 바이오차 투입 시 탄소흡수증가량



자료: Jesoph et al(2021)

- 바이오차를 투입할 경우 탄소흡수증가량에 대한 연구는 현재 진행 중이며, 이에 대한 효과 분석 시 최소한의 효과를 적용토록 함

제5절 소결

- 수목의 탄소저장 및 흡수능력을 계산하기 위해 국내는 산림수종 20종의 국가고유계수가 공식적으로 발표되었으나 도시수목의 경우 등록된 탄소배출계수가 없어 연구자별로 계산식 및 계산결과가 상이한 한계가 있어 본 연구의 효과 분석을 위해 선행연구에서 발표된 수종별 탄소 저장 및 흡수량을 적용
 - 수목의 탄소저장량 및 탄소흡수량을 측정하기 위해 IPCC는 임목축적에 배출계수를 곱하여 탄소저장량을 산정하는 가이드라인을 제시함
 - 국내에서도 산림수목을 중심으로 탄소저감능력 계산을 위한 탄소배출계수를 발표하였으며, 최근에는 산림수목과 화경이 다른 도시수목의 탄소흡수원으로써 효과를 계산하기 위한 탄소배출계수, 계량모델 계산식 개발 등의 연구가 진행되고 있음
 - 그러나 공식적으로 등록된 국가고유계수가 없으며, 임목생장 또는 직접수확법에 따른 계산식을 적용하고 있어 연구에 따라 계산 결과가 다르게 적용되는 한계가 있음
 - 본 연구에서는 수원시 가로녹지 탄소중립 효과분석을 위해 국립산림과학원, 한국수목원정원관리원 등 기관에서 연구하여 발표된 교목, 관목, 지피식물의 수종별 탄소 저장 및 흡수량을 적용하여 효과 계산
- 식재되는 수종의 탄소저감능력 뿐만 아니라 이를 극대화하기 위해서는 적응성, 저관리를 최우선적으로 고려하여 식재기준을 선정하고 관리방안을 제시할 필요
 - 이산화탄소 저감에 집중한 수종을 보다 많이 식재하고, 충분한 공간이 확보된 최상의 성장환경을 제공하고, 식재할 입지에 적합한 수종을 선정하여 고사율을 줄이는 것이 중요함
 - 또한 저장했던 탄소를 배출하는 고사목은 즉시 교체하고, 전정 및 관리를 최소화하고, 수목 낙지물의 잔재를 멀칭재로 활용, 식재 후 활착율을 높이는 첨단 식재기술 적용 등의 관리방안이 필요함
- 수목 외에도 가로녹지 토양의 탄소저감 효과를 고려하여 식생기반을 마련해야 하며, 특히 토양의 탄소 고정능력을 향상할 뿐 아니라 식생의 탄소흡수능력을 향상시킬 수 있는 바이오차 투입 필요
 - 가로녹지 조성 시 토양의 탄소저장효과가 있기에 띠녹지를 연결해야 하며, 초본이나 단층식재보다 다층식재 시 토양의 탄소저장량이 증가하기 때문에 다층식재를 적용해야 함
 - 바이오매스로 만들어지는 바이오차는 토양 내 탄소를 격리시켜 탄소저장효과를 증가시키며, 식생기반을 개량하여 수목의 탄소흡수능력 또한 증가시킴

03

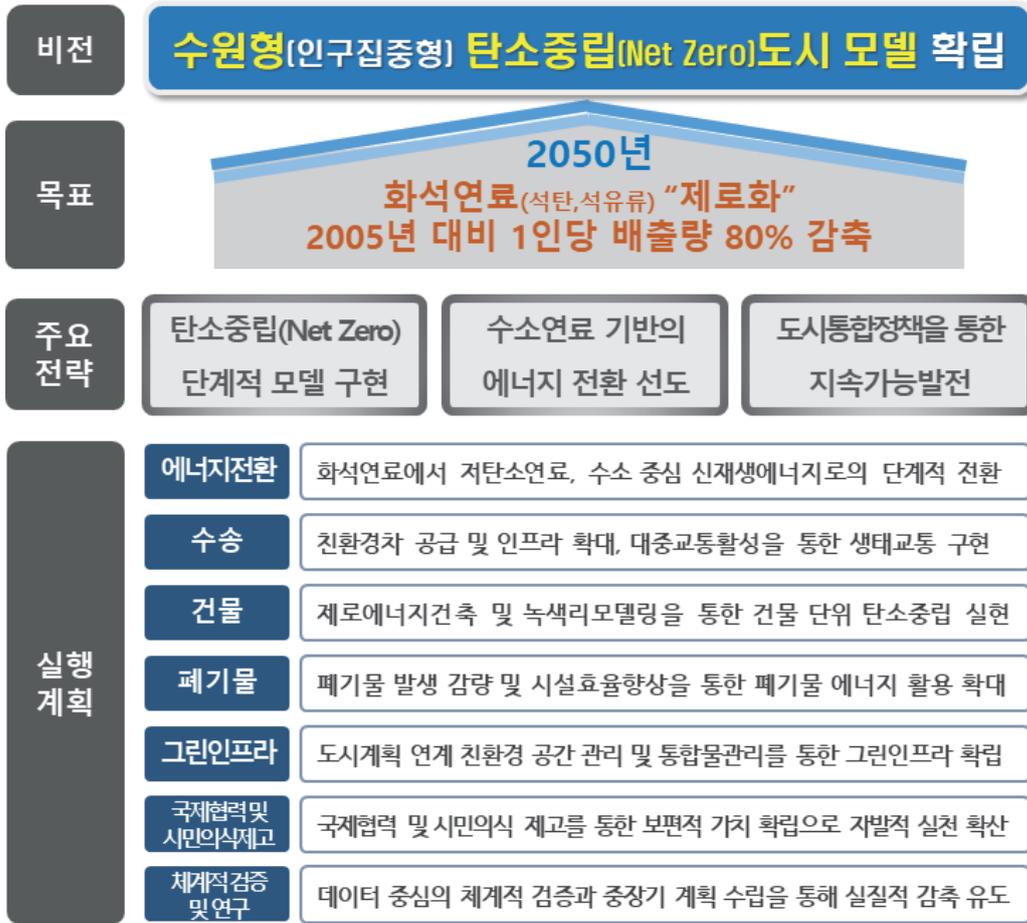
수원시 현황분석

제1절 수원시 탄소중립 가로녹지관련 계획

1 • 수원시 2050 탄소중립 전략

- 수원시는 탄소중립 특례시 수원을 조성하기 위해 ‘탄소중립, 시민의 일상이 되다’를 비전으로 2050 탄소중립 전략을 수립하였음
- 수원시는 2050년까지 탄소중립을 달성하고 시민의 건강하고 쾌적한 삶을 증진시켜 나가고자 2019년 ‘2050 수원시 탄소중립 기본계획’을 작성함
 - ‘탄소흡수 또는 상쇄’ 부문의 주요 전략으로 띠녹지, 가로수 등 도시녹지 공간 확보를 통한 탄소저장량 확대, 바이오차 투입 등으로 탄소저장효율 증가를 통한 탄소저장량 확대 등을 제시하고 있음
- 2023년 「수원시 탄소중립 기본 조례」을 제정하여 탄소중립을 달성하기 위한 법적 근거를 마련함
 - 수원시는 온실가스 배출량을 2030년까지 2018년의 온실가스 배출량 대비 40% 이상 감축하는 것을 중장기 온실가스 감축 목표로 설정하였으며, 조례에 의거하여 수원시는 탄소흡수원 등을 조성·확충하고, 온실가스 흡수 능력을 개선하기 위한 시책을 수립·시행하여야 함

그림 3-1 | 수원시 탄소중립 비전 및 목표



자료 : 수원시(2019)

표 3-1 | 2050 수원시 탄소중립 기본계획 중 '탄소흡수 또는 상쇄' 부문 주요계획

구분	내용	비고
목표	<ul style="list-style-type: none"> 탄소저장량 확대를 통한 탄소중립에의 기여 	-
전략 및 핵심사업	<ul style="list-style-type: none"> 도시녹지 공간 확보를 통한 탄소저장량 확대 <ul style="list-style-type: none"> - 도시지역 내 공원, 띠녹지, 가로수 조성 등 녹지공간의 양적인 증가 등 탄소저장효율 증가를 통한 탄소저장량 확대 <ul style="list-style-type: none"> - 탄소저장 효과가 우수한 식재기반 및 식재기법 도입 <ul style="list-style-type: none"> ; 토양-식생 결합 공법(지상부 식생 생육 관리-지하부 생육 환경 개선 -토양 탄소 저장 증대) 도입 ; 탄소흡수능력이 뛰어난 수목으로 교체, 띠녹지를 통한 다층식재 도입 ; 탄소저장량이 높은 수목 발굴 및 식재기법 도입 - 토양의 탄소저장능력 극대화를 위한 바이오차 도입 <ul style="list-style-type: none"> ; 수목 교체 시 바이오차 투입하여 토양에 100년 이상 장기 저장될 수 있는 탄소의 양을 증가, 식생의 탄소 흡수량 증가, 탄소저장능력 확보 생물다양성 증진 및 탄소저장량 확보를 위한 체계적인 산림·녹지 관리 	가로녹지 관련내용 발췌

자료 : 강은하(2021) 재구성

2 • 수원시 가로녹지 관련 계획·법규

1) 수원시 가로수 조성 및 관리기본계획

- 수원시는 「산림자원의 조성과 관리에 관한 법」과 「수원시 가로수 조성 및 관리 조례」에 의거하여 매 5년마다 ‘가로수 조성 및 관리기본계획’을 수립하고 있으며, 가로수 현황 및 기본구상, 기본계획, 사업계획, 정책제언 순으로 구성되어 있음
 - 향후 가로수 기본계획 수립 시 탄소중립을 위한 가로녹지 조성 및 관리 방안이 반영 필요

표 3-2 | 수원시 가로수 조성 및 관리 기본계획 기본내용

구분	항목	내용
개요	계획 목적	• 가로수의 기능 및 역할을 최대한 발휘할 수 있는 가로수 조성 및 정비체계 제공
	공간적 범위	• 수원시 관내 가로수 전 노선 연장 약 200km(국도, 지방도, 가로녹지 포함) • 신규 식재 검토대상 노선 등
구성	가로수 현황	• 일반현황 / 도로망 현황 / 관련계획 및 법규 검토 / 사례조사 / 가로수 현황
	기본구상	• 비전 및 기본방향 / 가로유형별 녹지축 구상 / 가로수 도입수종 검토
	기본계획	• 가로숲 조성계획 / 녹지량 증진계획 / 테마가로수 계획 / 그린빛물 인프라 계획 / 가로수 정비계획
	관리방안	• 신규조성 가이드라인 / 가로시설물 가이드라인 / 미개설계획도로 가이드라인 / 체계적인 수목 관리 / 시민참여 거버넌스 / 수목 생육진단 시스템
	사업계획	• 연차별 조성계획
	정책제언	• 환경영향 저감방안 / 가로수 확충 및 관리제도 방안 / 가로수 이력관리 방안

자료 : 수원시(2019)

- 가로수 기본계획에서는 대표 도입수종을 한국의 정자목, 정원수종, 자생수목, 화성행궁사료뿐 아니라 기후와 조성공간을 고려한 수종을 제시함
 - 대표 도입수종으로 소나무, 양버즘나무, 느티나무 등 15종의 교목을 제안하고 있는데 공통적인 특성으로는 심근성에 내한성이 강하다는 특성이 있으며 그 외 내공해성, 이식, 생장속도는 수목에 따라 다름

표 3-3 | 수원시 가로수 도입 권장 수종

구분	항목	권장 수종	
		교목	관목
대표 도입수종		소나무, 양버즘나무, 느티나무, 회화나무, 왕벚나무, 이팝나무, 은행나무, 느릅나무, 중국단풍, 메타세콰이아, 미국풍나무, 팔배나무, 복자기나무, 칠엽수, 산딸나무	-
도입 수종	한국의 정자목	소나무, 느티나무, 은행나무, 회화나무, 느릅나무	-
	한국의 정원수종	소나무, 느티나무, 은행나무, 느릅나무	산철쭉, 백철쭉, 영산홍, 무궁화, 박태기나무
	한국 자생수목	소나무, 느티나무, 이팝나무, 느릅나무, 왕벚나무, 계수나무, 메타세콰이어	산철쭉, 백철쭉, 무궁화, 병꽃나무, 조팝나무, 수수꽃다리, 회양목
	화성행궁사료	소나무, 느티나무, 은행나무, 이팝나무, 회화나무, 왕벚나무	-
기후, 조성공간 고려한 수종	기온 변화에 따른 수종	목백합, 꽃사과, 은행나무, 느티나무, 이팝나무, 노르웨이단풍, 미국풍나무 등 (내한성 좋으며 기온상승에 적응 가능수종)	광광나무, 황매화, 조팝나무, 병꽃나무, 화살나무 등
	녹지형 중앙분리대 수종	느티나무, 이팝나무, 중국단풍 등 (도로 일사량을 고려한 엽면적 지수가 높은 수종 권장, 온도저감 효과를 위한 교목+초본 및 관목을 활용한 다양한 배치법 식재)	회양목, 철쭉, 영산홍, 황매화, 조팝나무, 화살나무 등

자료 : 수원시(2019)

- 수원시 가로수 기본계획은 조성계획, 관리계획, 실행계획으로 구분되며 가로수의 심미적, 환경적 효과를 위한 가로수 계획뿐 아니라 생육이 불량한 가로수에 대한 관리방안 제시

 - 가로녹지 중 수목의 수세쇠퇴 현상이 나타나 생장이 불량한 녹지에 대해서는 토양의 영양 공급, 환토, 부엽토 처리가 주요 대책이며, 수세가 극히 쇠퇴한 가로는 가로수에 적합한 수종으로 점차적으로 교체하여 식재할 수 있음
- 향후 기본계획 내 가로수 도입수종 및 조성계획 수립 시 탄소중립 가로녹지 조성을 위한 식재모델을 제시 필요

표 3-4 | 수원시 가로수 기본계획 총괄

구분	계획	내용
구성 계획	가로숲 조성계획	• 바람길을 확충하여 미기후현상에 적응하는 방안 제시
	녹지량 증진계획	• 도로다이어트, 녹도화 지속추진, 도로망 신설로 인한 가로수 녹지량 증진 방안 제시
	테마가로수 계획	• 매화나무, 소나무, 대나무를 활용한 사절우 가로수길 제시 • 기존에 조성된 소나무길 보호덮개 교체 및 신규 조성구간 제시
	그린빗물인프라 계획	• 강우유출수의 띠녹지 침투를 활용한 빗물관리시설 제시 • 빗물관리시설의 적용방안 및 유형 제시
	가로수 정비계획	• 생육 양호 가로수 선정 및 관리방안 제시 • 생육 불량 가로수 선정 및 관리방안 제시
관리 계획	가이드라인 제시	• 신규개발구역, 신규조성, 가로시설물 관련 가이드라인 제시
	체계적인 수목관리	• 가지치기 개선, 생육환경개선 등 유형별 수목관리 방안 제시
	시민 참여 거버넌스	• 가로수 셰어링, 나무돌보미 서비스 등 시민참여 거버넌스 제시
	정책제언	• 환경영향 저감방안, 가로수 이력관리 방안 등 제시
실행 계획	사업추진계획	• 조성 : 단기 및 장기 갱신, 띠녹지 확충 실행계획 수립 • 관리 : 유지 및 생육 관리 실행계획 수립
	재원조달계획	• 조성 : 단기 및 장기 갱신, 띠녹지 확충 예산 확보 및 시행방안 • 관리 : 유지 및 생육관리 예산 확보 및 시행 방안

자료 : 수원시(2019)

2) 수원시 가로수 조성 및 관리 조례

- 수원시는 「도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률」에 따라 「수원시 가로수 조성 및 관리 조례」를 제정하여 가로수의 공익적 기능을 향상시켜 쾌적한 생활환경을 조성하고자 함
- 조례에서는 가로수 조성을 위해 수종의 선정 및 조건, 식재 위치, 식재 기준, 식재 시기, 관리 방법 등을 규정하고 있음
 - 수원시 가로수는 경관뿐 아니라 환경오염 저감, 기후 조절 등에 적합한 수종을 선정할 수 있음
 - 교목의 식재 기준에 대해 식재 간격은 6~8m, 규격은 수고 5m 이상, 직경(흉고직경, 근원경) 20cm 이상으로 규정하고 있어 이를 고려한 효과 계산이 필요함

표 3-5 | 수원시 가로수 식재 기준

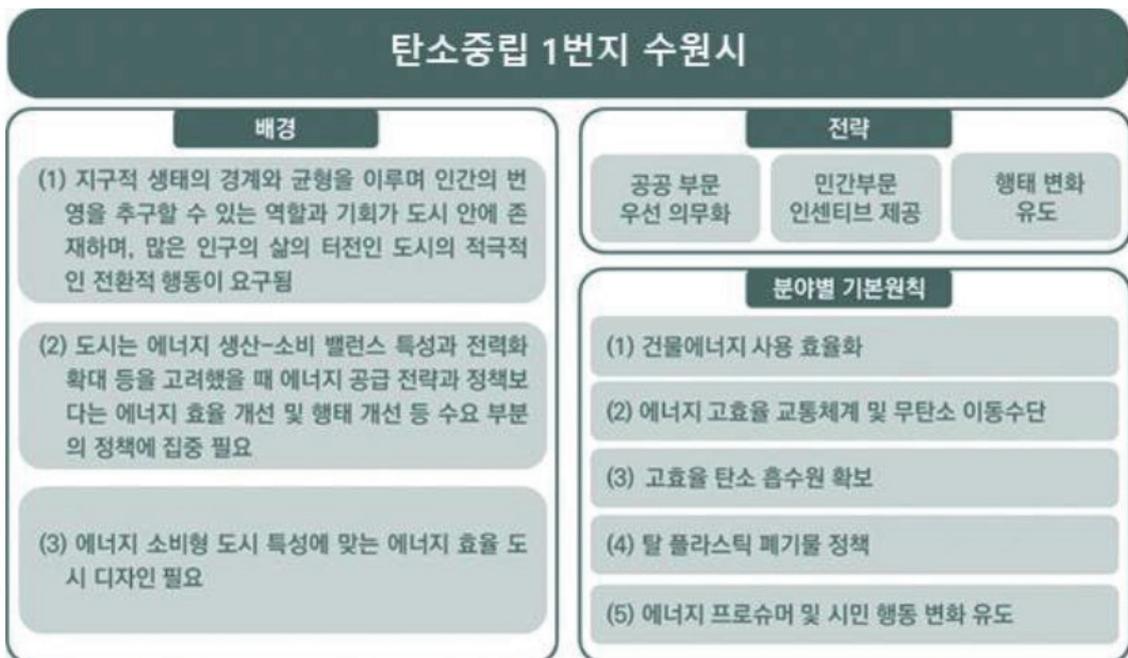
구분	내용
교목	<ul style="list-style-type: none"> • 식재간격은 6~8m를 기준으로 함 • 규격은 수고 5m 이상, 직경(흉고직경, 근원직경) 20cm 이상
관목	<ul style="list-style-type: none"> • 식재수종의 특성에 따라 아름다운 경관조성과 교통안전에 지장이 없는 범위 내에서 식재
식재 유형 및 구조	<ul style="list-style-type: none"> • 도로선형과 평행하도록 열식하는 것을 원칙 <ul style="list-style-type: none"> - 1열 심기, 보도의 여건에 따라 2열 이상 식재 • 도로의 동일 노선과 도로 양측에는 동일 수종으로 식재 • 식재공간의 여유가 있는 경우, 운전자와 보행자의 안전과 도로 구조의 안전에 지장이 없는 범위 내에서 교목, 관목, 초본류를 다층구조로 식재할 수 있음

자료 : 수원시(2022)

3 • 수원시 탄소중립 그린도시 사업

- 「탄소중립 기본법」에 의한 ‘탄소중립도시’란 탄소중립 관련계획 및 기술 등을 적극 활용하여 탄소중립을 공간적으로 구현하는 도시로 정의하고 있으며, 환경부 주관으로 ‘탄소중립 그린도시 사업(2022~2026년)’ 시범사업을 추진하고 있음
 - ‘탄소중립 그린도시 사업(2022~2026년)’은 시범사업으로 생활 속 체감가능한 탄소중립 공간모델 제시 및 지역 중심의 탄소중립 이행·확산 기반을 마련하고자 하는 사업임
 - 일정한 공간권역(근린생활권, 15분 도시 등)에 탄소중립 그린도시 및 연계사업을 집약하여 탄소감축 효과를 극대화함
- 수원시는 “탄소중립 1번지 수원시”를 비전으로 수원시 권선구 고색동 일대(고색역 반경 2km 내외, 약 9km²)를 사업대상지로 사업을 추진하여 2030년까지 온실가스 40% 감축을 목표로 함
 - ‘에너지 전환’, ‘흡수원 확대’, ‘기후변화적응’, ‘자원순환촉진’, ‘사회전환 프로그램’의 부문별 목표를 설정함
 - 이 중 ‘흡수원 확대’부문은 도시 내 녹지와 생태계를 보전하고 강화하여 대기 중 이산화탄소의 흡수를 촉진하는 데 목표를 둬. 이를 통해 주민들의 일상 가까운 장소에 탄소흡수지대를 조성하여 도시환경의 개선과 생태계 회복을 실현하고자 함

그림 3-2 | 탄소중립 그린도시 수원 조성계획 마스터플랜



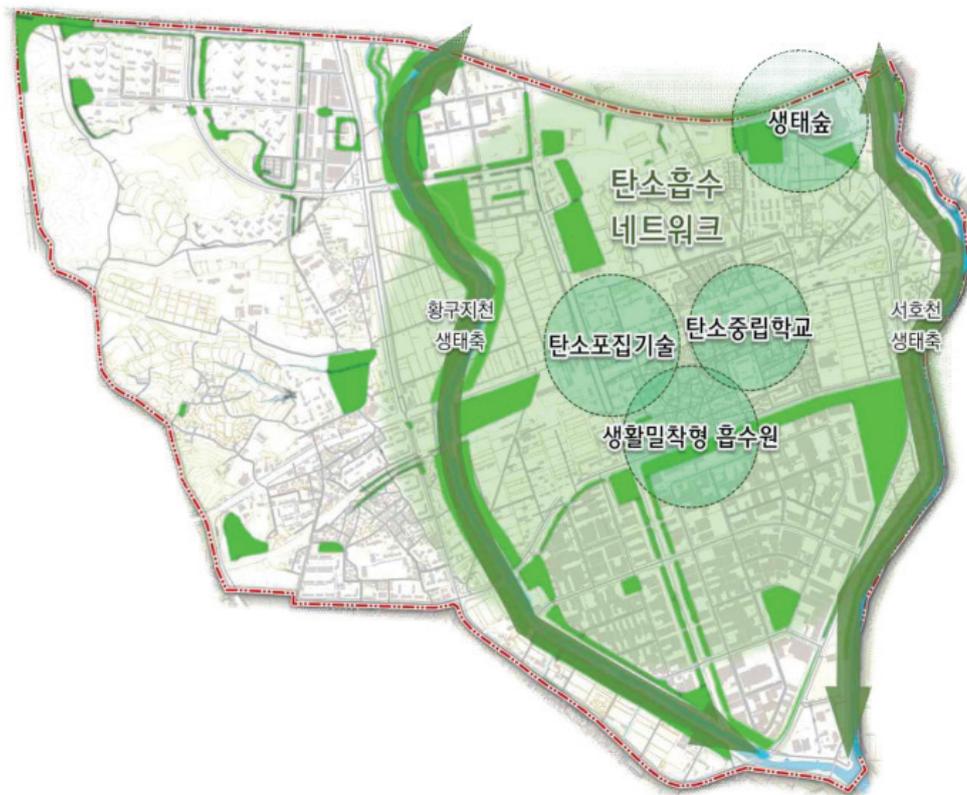
자료 : 수원시(2023)

표 3-6 | 탄소중립 그린도시 수원 : 탄소흡수 네트워크 구축사업 시행계획

부문	추진전략	세부내용
흡수원 확대	도시녹지 공간 확보를 통한 탄소저장량 확대	<ul style="list-style-type: none"> • 공원, 띠녹지, 가로수 등 녹지공간의 꾸준한 확보 • 유휴공간이나 식재밀도가 낮은 공원 등을 대상으로 녹지 공간의 확대 • 외부지역에서의 조림사업 지원을 통해 AR CDM(청정개발체계) 외부 사업 효과 확보
	탄소저장효율 증가를 통한 탄소저장량 확대	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소저장 효과가 우수한 식재기반 및 식재기법 도입 <ul style="list-style-type: none"> - 토양-식생 결합 공법 도입(지상부 생육관리, 지하부 생육환경 개선, 토양 탄소저장 증대 등) • 탄소흡수능력이 뛰어난 수목으로 교체 및 띠녹지 통해 다층식재 도입 • 수목 교체 시 바이오차 투입하여 장기 저장 탄소량 증가
	생물다양성 증진 및 탄소저장량 확보를 위한 체계적인 산림·녹지 관리	<ul style="list-style-type: none"> • 도시 산림의 생물다양성을 높이고 탄소저장량도 확보할 수 있는 관리 방안 마련 • 산림 탄소상쇄숲 조성을 통한 사회공헌형 활동 증진 등
	다양한 탄소포집기술(CCU) 적용	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소 포집 활용 기술을 병행하여 탄소 흡수효과를 증폭

자료 : 수원시(2023)

그림 3-3 | 탄소중립 그린도시 수원 : 공간환경계획(탄소흡수 네트워크)



자료 : 수원시(2023)

제2절 수원시 가로녹지 조성 및 관리현황

1 • 수원시 가로녹지 형태

- 수원시 가로녹지는 가로수, 띠녹지, 중앙분리대, 교통섬, 보행자도로, 제방 유형으로 구분됨
 - 조성된 지 오래된 가로의 가로수는 주로 교목중심의 1열 식재로 되어있으며, 신규로 조성되는 도로의 가로녹지는 2열 식재 및 중앙분리대가 많이 조성됨

표 3-7 | 수원시 가로녹지 유형별 형태

구분	특징	조성 예시
가로수	<ul style="list-style-type: none"> • 가로수는 1~2열로 교목이 단독 식재되어 있는 형태임 • 교목은 대부분 1열로 보도에 식재되어 있으며, 토양이 수목보호덮개로 덮여 있음 	
띠녹지	<ul style="list-style-type: none"> • 띠녹지는 가로 옆으로 녹지가 연결된 형태임 • 1~2열 식재된 교목과 하층으로 관목, 혹은 지피·초화류로 식재가 이어지는 것이 일반적임 	
녹지형 중앙분리대	<ul style="list-style-type: none"> • 녹지형 중앙분리대는 도로 중앙에 설치된 녹지 형태임 • 중앙분리대의 규모에 따라 교목이 식재되어 있거나 없으며, 다양한 관목이 혼식되어 있음 	
교통섬	<ul style="list-style-type: none"> • 원활한 교통처리를 위한 교통섬에 조성된 녹지임 • 강조식재를 위한 장송(소나무) 식재, 혹은 초화류가 식재됨 	
보행자도로	<ul style="list-style-type: none"> • 보행자전용도로에 설치된 녹지 형태임 • 교목 2열 식재, 혹은 관목과 다층식재로 이루어짐 	
제방	<ul style="list-style-type: none"> • 하천변 제방에 다양한 수목이 식재된 형태임 • 식재형태는 다양하게 나타남 	

자료 : 수원시(2023)

2 수원시 가로녹지 식재 유형

- 수원시의 녹지형태 및 성상별 가로수 식재 현황을 살펴보면 가로수는 주로 교목 위주로 식재되어 있는 것을 알 수 있으며, 띠녹지에 식재된 관목은 전체 관목 중 72.6%에 해당하는데 이는 띠녹지 형태일 경우 교목과 관목이 함께 식재됨

표 3-8 | 수원시 주요 가로수 식재 수종

구분	연장(m)	교목		관목	
		식재 수량(주)	비율	식재 수량(m)	비율
계	-	78,257	100.0%	334,465	100.0%
가로수	-	52,385	66.9%	44,349	13.3%
중앙분리대	31,182	3,433	4.4%	23,558	7.0%
띠녹지	252,834	20,130	25.7%	242,758	72.6%
보행자도로	-	724	0.9%	60	0.0%
제방	-	1,501	1.9%	16,200	4.8%
교통섬	-	84	0.1%	7,540	2.3%

자료 : 수원시 내부자료

- 수원시 가로수는 교목을 기준으로 2023년 10월 현재 총 78,257주 식재되어 있으며, 가로수로 식재된 주요 교목 수종은 총 48종임
 - 주요 수종은 8종으로 전체 가로수의 81.0%를 차지하고 있으며, 느티나무(22.5%), 은행나무(15.6%), 왕벚나무(15.0%), 이팝나무(15.0%), 메타세콰이어(4.2%), 청단풍(2.7%), 소나무(3.4%), 버즘나무(2.8%), 기타(19.0%)임
 - 기타 수종은 40종으로 회화나무(2.6%), 중국단풍(2.3%), 대왕참나무(1.9%), 산벚나무(1.6%), 칠엽수(1.6%), 톨립나무(0.7%), 무궁화(0.1%), 산딸나무(0.3%), 기타(8.0%)임
 - 관목은 단일수종으로는 사철나무, 쥐똥나무, 화살나무, 회양목, 철쭉이 가장 많이 사용되고 있으나 혼식의 형태로 식재된 가로가 22.4%로 가장 많았음

표 3-9 | 수원시 주요 가로수 식재 수종

구분		주요 가로수 식재 수종
교목	상록	소나무 등
	낙엽	느티나무, 은행나무, 왕벚나무, 이팝나무, 메타세퀘이아, 청단풍, 버즘나무, 회화나무, 중국단풍, 대왕참나무, 산벚나무, 칠엽수
관목	상록	사철나무, 남천, 회양목, 혼식
	낙엽	쥐똥나무, 철쭉, 화살나무, 홍매자, 홍매화, 황매화, 매자나무, 혼식
지피·초화		맥문동, 실유카

자료 : 수원시 내부자료, 수원시(2019)

표 3-10 | 수원시 가로수 주요 식재 수종(교목)

구분	계	느티나무	은행나무	왕벚나무	이팝나무	메타세 퀘이아	청단풍	소나무	버즘나무	기타
식재 수량 (주)	78,257	17,603	12,185	11,704	11,723	3,251	2,081	2,635	2,216	14,859
비율 (%)	100.0	22.5	15.6	15.0	15.0	4.2	2.7	3.4	2.8	19.0

자료 : 수원시 내부자료

표 3-11 | 수원시 가로수 주요 식재 수종(관목)

구분	계	혼식	사철나무	쥐똥나무	화살나무	회양목	철쭉	기타
식재 수량 (m)	334,465	74,797	54,171	54,168	31,130	13,062	9,324	97,813
비율 (%)	100.0	22.4	16.2	16.2	9.3	3.9	2.8	29.2

자료 : 수원시 내부자료

- 수목의 탄소저장량, 탄소흡수량을 계산하기 위해서는 수목의 규격뿐 아니라 수령도 함께 파악되어야 하는데 현재 수원시의 가로수 관리시스템에 의하면 수목은 수종, 식재주수, 규격으로 기록되어 관리하고 있고 수령에 대한 정보는 별도로 관리하지 않음
- 교목의 규격은 근원직경(R)으로 측정한 경우 'H4.5xR20~25' 규격이, 흉고직경(B)으로 측정한 경우 'H8.0xB20~25' 규격의 수종이 가장 많음

3 수원시 가로녹지 관리 현황

- 수원시는 가로녹지와 화단을 체계적으로 관리하여 도심 내 자연친화적인 가로환경을 제공하고, 미세먼지·이상기온 등 기후변화에 능동적으로 대응하는 조경관리사업 추진
 - 가로녹지를 포함한 도시 숲을 확충하여 기후변화를 선제적으로 대응하고, 지속 가능한 저관리형 도시 숲 관리 도입을 통해 경제성을 제고하고자 함

표 3-12 | 가로환경 조성 및 유지·관리 관련 사업계획

사업명		사업내용	세부내용
장안구	가로수 관리	가로수, 띠녹지, 중앙분리대 관리	교통사고목 및 재해우려목 처리, 띠녹지 전정, 제초, 가로수분 예·제초 등 유지관리
	폭염, 미세먼지 대응 녹음 조성사업(도비보조)	그늘목 식재 및 띠녹지 조성	이팝나무 등 생육이 강한 수목 식재, 기존 왕벚나무 등 생육이 불량한 수목은 교체하고 다층구조 도시숲길 조성
	사계절 꽃길 조성	도로변 교통섬 및 화분에 계절꽃 식재로 다층구조 가로녹지 조성	비올라, 팬지 등 계절 초화 식재 및 관수
권선구	가로환경 유지관리	가로수분 및 띠녹지 관리	제초, 전정관리
		재해우려목 정비	위험 수목 사전 제거, 재해 발생 시 제거
		가로수 병해충방제	수간주사, 지상방제 등 병해충방제
		자투리녹지 관리	연중 유지관리
		가로수 및 가로수벽 보식	띠녹지 등 수목 보식
		자투리녹지 정비공사	노후 녹지, 훼손지 수목 식재
	가로변 아름다운 꽃길 조성	가로변 아름다운 꽃길 조성	계절초화 식재 (화분 70개)
가로숲길 조성(도비보조)	가로숲길 조성	생육불량한 띠녹지 정비	
팔달구	가로수 관리	가로녹지 유지관리	띠녹지 보식, 가로수분 제초 등
		띠녹지 유지관리	띠녹지, 중앙분리대 유지관리
	가로수 보호덮개 재정비	가로수 보호덮개 재정비	-
	재해우려목 정비	재해우려목 정비	재해우려목 제거 및 전정
	가로수 병해충 방제	가로수 병해충 방제	약제살포, 수간주사, 수세회복 등
교통섬 및 가로화단 조성	교통섬 및 가로화단 조성	방풍막 철거 및 설치, 꽃길조성 등	

사업명		사업내용	세부내용
	생태교통시범지구 녹지 관리	생태교통시범지구 녹지 관리	-
	주요도로변 입체화단 조성	주요도로변 입체화단 조성	주요도로변 꽃벽 설치
영통구	가로수 관리	가로수 및 띠녹지 관리	예초·제초, 관목전정 등
	가로화단 및 조경관리	가로화단 및 조경 관리	예초·제초, 관목전정 등
	소규모 녹지정비	훼손지 복구 등 소규모 녹지 정비	훼손지 복구, 민원, 현안요구사항 조성 등
	도로변 입면녹화	교량, 대로변 꽃걸이 설치 및 관수용역	도로변 꽃걸이 구입, 주2회 관수
	가로수 병해충 방제	가로수 병해충 방제	수목 병해충 사전 예찰 및 적기 방제
	재해우려목 정비	재해우려목, 뿌리용기 등 정비	고사목 및 재해우려목 제거, 가로수 뿌리 돌출부 정비 등
	조경시설물 유지관리	기존 띠녹지 내 시설물 정비	가로녹지 내 조경시설물 유지보수

자료 : 수원시 내부자료

- 그 외에도 수원시는 제설제 살포로 염분 피해를 입은 가로수가 병들거나 말라 죽는 피해를 방지하기 위해, '예방·긴급처방·추후 관리'로 이루어진 3단계의 제설제 피해 대책을 추진하고 있음
 - 염화칼슘 성분이 포함된 제설제 살포 시 가로수가 염분피해를 입어 나무뿌리가 손상되거나 생육이 부진해지고, 양분·수분 흡수를 방해해 괴사 현상 또는 황화 현상이 일어날 수 있음
- 관리사업의 주요 목표가 시민들에게 쾌적한 도시환경을 제공하고 민원을 선제적으로 대응하기 위한 것이나 탄소중립 효과를 높이기 위한 목적의 관리사업은 부재함
- 수원시에서는 기존의 오래된 가로수를 독특한 수형으로 전정하여 도시 미관을 향상하거나, 꽃 피는 가로수 혹은 수원의 역사적 정체성을 살리는 가로수길이 특화되어 있음
 - 수원시에서는 2005년부터 가로수길 테마전정을 시작하였으며, 연간 3회 테마형 전정으로 수형을 유지하고 있음
 - 정조로 버즘나무 네모가로수길(1.5km), 중부대로 은행나무 원형전정(1.0km), 동말·회양로 배롱나무 특화거리(1.8km), 수원천 버드나무 가로수(0.6km)가 있음
- 수원시 공원녹지사업소는 가로수의 역할을 도로 안전 및 쾌적한 보행환경 제공, 아름다운 가로경관 조성, 도시환경 개선, 생물다양성 증진 등으로 말하고 있으며 아직 탄소저감 기능에 대한 구체적인 적용은 이루어지지 않음

- 수원시가 ‘탄소중립 그린도시’ 대상지에 선정됨에 따라 탄소중립에 특화된 가로수길을 조성하고 탄소저감수증 식재, 토양 관리 등으로 도시의 탄소저감 뿐 아니라 시민의 교육 현장으로 활용할 수 있는 방안을 고려해야 함

그림 3-4 | 수원시 특화 가로수길 모습



버즘나무 네모가로수길



중부대로 은행나무 원형전정



동말·회양로 배롱나무 특화거리



수원천 버드나무 가로수

자료 : 수원뉴스(2023.09.27.); 수원일보(2022.08.09.)

제3절 소결

- 수원시는 '2050 수원시 탄소중립 기본계획'에 의하여 2030년까지 2018년 대비 온실가스 감축량을 40% 감축하고자 하는 목표를 가지고 있음. 고색역 일원에서 2026년까지 '탄소중립 그린도시 수원' 사업을 진행하여 "그린경제로 성장하는, 탄소중립 1번지 수원시"를 달성하고자 해 그에 맞는 탄소중립 가로녹지에 대한 탄소흡수 우수 모델 제안 필요

 - 도시녹지 공간 확보는 띠녹지, 가로수 조성 등 녹지공간의 양적인 증가 필요
 - '탄소중립 그린도시 수원'사업에 적용 가능한 탄소중립 가로녹지 모델을 제안하고 탄소저장 및 흡수량을 정량적으로 제시 필요
- 수원시의 가로녹지는 단독식재 형태의 가로수, 다층식재 형태의 띠녹지 등의 유형으로 조성되어 관리되고 있으며, 주로 사용되는 교목 8종과 관목 5종이 있음

 - 수원시 가로녹지에 가장 많이 식재된 교목은 느티나무, 은행나무, 왕벚나무, 이팝나무, 메타세퀘이어, 청단풍, 소나무, 배롱나무 8종이며, 관목은 혼식을 하는 경우가 가장 많으며 단일수종으로는 사철나무, 쥐똥나무, 화살나무, 회양목, 철쭉이 가장 많이 사용됨
 - 최근 수원시는 가로수길 테마전정, 특정 경관수목을 식재한 특화 가로수길을 조성하며 가로수의 심미적 기능을 강화하고 있는데 탄소중립 1번지 수원시를 상징할 수 있는 탄소중립 가로녹지의 조성 필요성이 대두됨
 - 가로녹지 관리사업의 주요 목표가 시민들에게 쾌적한 도시환경을 제공하고 민원을 선제적으로 대응하기 위함으로, 전정·정비·병해충 관리 등에 관리사업이 집중되어 있어 토양 등 생육환경 개선을 목적으로 하는 관리방안이 2024년에 수립될 가로수 기본계획(2024~2028)에 반영될 수 있도록 관리방안을 제언하고자 함

04

탄소중립 가로녹지 조성방안

제1절 탄소중립 가로녹지 수종 선정

1. 교목

- 수원시 가로수 현황을 고려하여 흉고직경(DBH) 20cm를 기준으로, 탄소흡수우수종 25종 중 저장량, 성장속도, 도시환경 적응성, 수원시 가로수 기본계획 및 식재현황을 고려하여 탄소중립 가로녹지 적합 수종을 선정함
 - 탄소흡수우수종은 국립산림과학원 자료(2012; 2022)를 기초로 하였음
 - 주요 도시식재수목 8종에 대해 계량모델을 제공한 산림청(2020)의 자료는 비교할 수 있는 수종이 한정적이며 국립산림과학원 자료와 상이한 부분이 있음
 - 따라서 다양한 수종에 대한 연구결과를 공표한 국립산림과학원 자료를 적용함
 - 도시지역에 식재된 수목은 생육환경인자의 제한에 따라 적용할 수 있는 수종이 선정되어야 하며, 제한인자가 적을수록 수종선택의 폭이 커질 수 있음(수원시, 2023)
- 도시환경에 적응할 수 있는 탄소중립 가로녹지 적합 수종을 선정함
 - 탄소중립 가로녹지 적합 수종 : 느티나무, 회화나무, 이팝나무, 은행나무
 - 일반적인 탄소흡수우수종 : 느티나무
 - 성장속도가 빠른 수종 : 양버즘나무, 회화나무
 - 경관형성(꽃, 단풍) 고려 수종 : 이팝나무, 은행나무
 - * 양버즘나무의 경우 성장속도가 빠른 수종으로 탄소 저장 및 흡수능력이 뛰어나나 현재 신규 가로수 수종으로 사용되지 않아 제외하는 것이 바람직함

표 4-1 | 탄소흡수우수종(교목)

구분	수종 검토											탄소중립 가로녹지 적합 수종 선정
	탄소흡수우수종 (B=20cm)	탄소흡 수량(kg /CO ₂)	탄소저 장량(kg C)	생장 속도	도시환경 적응성					수원시 가로수		
					내공 해성	내음 성	내한 성	내건 성*	내염 성*	기본계획 계획수종	주요식재 수종	
1	양버즘나무	166.8	54.3	+++	강	중	강	중	중	대표수종	2.8%	
2	느티나무	165.4	45.7	+	중	중	강	중	약	대표수종 기후변화	22.5%	●
3	팽나무	165.4	45.7	++	강	-	강	-	강	-	-	-
4	느릅나무	165.4	45.7	+	-	-	-	-	강	대표수종	-	-
5	소나무	160.2	43.7	++	-	-	-	-	중	대표수종	3.4%	-
6	회화나무	157.1	56.3	++	강	중	강	중	중	대표수종	2.6%	●
7	자귀나무	157.1	56.3	++	-	-	-	-	강	-	-	-
8	아까시나무	157.1	56.3	++	-	-	-	-	강	-	-	-
9	이팝나무	149.6	42.0	++	-	약	강	-	강	대표수종 기후변화	15.0%	●
10	물푸레나무	149.6	42.0	+	-	-	-	-	강	-	-	-
11	은행나무	136.3	40.1	+	강	약	강	강	약	대표수종 기후변화	15.6%	●
12	편백나무	136.3	-	++	-	중	중	-	-	-	-	-
13	화백나무	136.3	-	++	-	중	강	-	중	-	-	-
14	향나무	136.3	-	++	-	약	강	-	강	-	-	-
15	촉백나무	136.3	-	++	강	약	강	강	중	-	-	-
16	독일가문비	136.3	-	+	-	강	강	-	-	-	-	-
17	가문비	136.3	-	+	-	강	강	-	-	-	-	-
18	구상나무	136.3	-	+	-	-	-	-	약	-	-	-
19	전나무	136.3	-	+	-	강	-	-	-	-	-	-
20	주목	136.3	-	+	-	강	강	-	강	-	-	-
21	메타세콰이어	123.9	62.4	+++	중	약	약	약	중	대표수종	4.2%	-
22	왕벚나무	126.1	34.4	++	-	약	-	-	중	대표수종	15.0%	-
23	중국단풍 /청단풍	103.9	40.6	+	-	강	강	-	중	대표수종	2.3% /2.7%	-
24	튤립나무	84.9	-	+++	강	중	강	중	-	기후변화	0.7%	-
25	철엽수	84.9	-	++	중	중	강	중	중	대표수종	1.6%	-

2 • 관목

□ 관목은 탄소흡수우수종 20종 중 제설제 살포 등을 고려한 내염성, 최소한의 전정을 위한 수고, 조달의 용이성을 복합적으로 고려하여 탄소중립 가로녹지 적합수종을 선정함

- 한국수목원정원관리원(2022) 자료를 기초로 하여 수종 선정
- 탄소중립 가로녹지 적합 수종 : 병꽃나무, 낙상홍, 사철나무, 꽃댕강나무, 산철쭉
- 이 중 수원시 가로수 주요 식재 수종은 사철나무, 산철쭉이 있음

표 4-2 | 탄소흡수우수종(관목)

구분	수종	단위환산(g → kg)		도시환경 적응성	수원시 가로수 주요식재 수종	최대수고	탄소중립 가로녹지 적합수종 선정
		탄소저장량 (kgC)	CO ₂ 흡수량 (kg CO ₂ /yr)	내염성			
1	히어리	0.21576	0.26371	-	-	1~5m	-
2	박태기나무	0.21279	0.26007	-	-	3~5m	-
3	병꽃나무	0.19320	0.23616	강	-	2~3m	●
4	낙상홍	0.13050	0.15950	강	-	2~3m	●
5	덜꿩나무	0.12024	0.14696	-	-	1.5~2m	-
6	사철나무	0.10828	0.13234	강	16.2%	6~9m	●
7	무궁화	0.10699	0.13077	강	-	1.5~4m	-
8	수수꽃다리	0.10014	0.12240	-	-	4~6m	-
9	등나무	0.09350	0.11428	강	-	덩굴성	-
10	앵도나무	0.08892	0.10868	약	-	2~3m	-
11	가막살나무	0.08562	0.10464	-	-	3m	-
12	꽃댕강나무	0.08459	0.10338	강	-	1~2m	●
13	산철쭉	0.08087	0.09884	강	2.8%	1~2m	●
14	치자나무	0.07873	0.09623	-	-	1.5~2m	-
15	무궁화	0.07559	0.09201	강	-		-
16	작살나무	0.07373	0.09011	-	-	2~3m	-
17	화살나무	0.07342	0.08973	강	9.3%	3m	-
18	보리수나무	0.07231	0.08837	-	-	2~4m	-
19	국수나무	0.06957	0.08504	-	-	1~2m	-
20	등나무	0.06257	0.07978	강	-		-

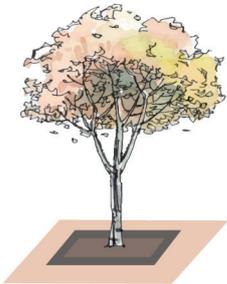
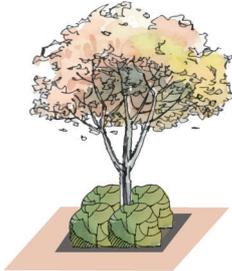
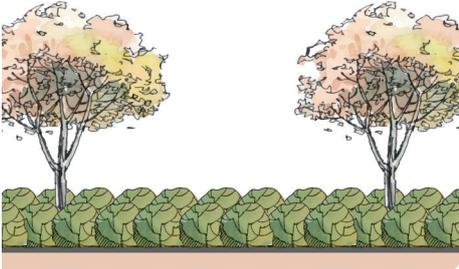
자료 : 한국수목원정원관리원(2022)

제2절 탄소중립 가로녹지 식재방법

1 • 식재모델

- 식재모델은 단목식재 모델을 기본으로, 하층식재를 추가한 혼합식재 모델과, 녹지를 연결하고 다층식재를 도입한 띠녹지 모델 세 종류가 있음

표 4-3 | 탄소중립 가로녹지 식재모델

구분	특징	식재모델 개념도
단목식재 모델	<ul style="list-style-type: none"> • 기본적인 가로수는 단목 식재되어 있음 • 상업지역의 가로 등 교목을 단독 식재할 수 밖에 없는 경우에는, 수목보호덮개를 적용하는 대신 토양의 면적을 최대한 확보하여 토양의 탄소저장효과를 가져옴 • 수목의 낙지물을 멀칭재로 활용하여 생육기반으로서의 토양을 강화하고, 관리로 인한 탄소배출을 최소화 함 	
혼합식재 모델	<ul style="list-style-type: none"> • 단목식재에 하층식재를 추가한 혼합식재 모델은 교목이 가지는 탄소 저장 및 흡수능력뿐 아니라 하층식재인 관목 혹은 지피식물의 탄소저장 및 흡수효과를 기대할 수 있음 • 탄소중립 가로녹지로서 가로수용 교목 아래 관목을 식재 하며, 부지의 특성상 관목 식재가 어려운 곳은 지피·초화 식물을 식재하여 탄소저감 효과를 기대함 	
띠녹지 모델	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립 가로녹지를 위해서는 녹지공간의 양적인 증가가 우선이며, 식생기반의 연결성과 토양이 가지는 탄소저장효과를 위해 녹지유형은 띠녹지를 형성해야 함 • 띠녹지 형성 시 다층식재를 적용함 • 녹지대 폭은 평균적으로 1.0m를 확보함 • 녹지대 확보가 가능한 곳은 1.0m 이상의 띠녹지를 확보하여 교목 2열 식재뿐 아니라 더 나아가 빗물정원 등 수생태계 조성 등을 고려하여 생물다양성 증진 효과도 가져올 수 있도록 함 	

2 · 가로녹지 식재모듈

- 띠녹지 식재모듈을 기준으로 탄소중립 가로녹지의 탄소흡수원으로써 효과를 분석하기 위하여 「수원시 가로수 조성 및 관리 조례(2022)」에 따른 가로수 식재 기준, 가로수 관리 현황을 종합적으로 검토하여 8m 단위의 가로녹지 단위 모듈을 가정함
 - 수원시 가로수 관리 현황에 따라 녹지대 폭은 1.0m로 가정
 - 수원시 가로수 조례에 따라 교목 식재간격 8m를 기준으로 1주가 식재되며, 교목의 규격은 B20로 적용
 - 하층식재 시 관목은 2열 식재되며, 식재주수는 수원시 가로수 관리 현황을 고려한 수관폭에 맞는 식재주수를 적용
 - 관목의 식재주수 및 밀도는 선행 연구(경희대학교 산학협력단 외, 2023)를 참고하였으며 해당 연구에서는 LH 전문시방서(한국토지주택공사, 2012) 기준을 참고하였음. 관목은 2열로 수관폭에 따라 밀도가 정해져 있어 교목 식재 구간인 8m를 기준으로 식재되는 관목의 주수가 계산됨
 - 권선구 띠녹지의 정량적 평가자료(2023)를 토대로 각 관목수종별 주 규격을 표4-5와 같이 구분하여 정리함
 - 토양은 생육최소심도 1.5m를 기준으로 함

그림 4-1 | 탄소중립 가로녹지 식재 모듈

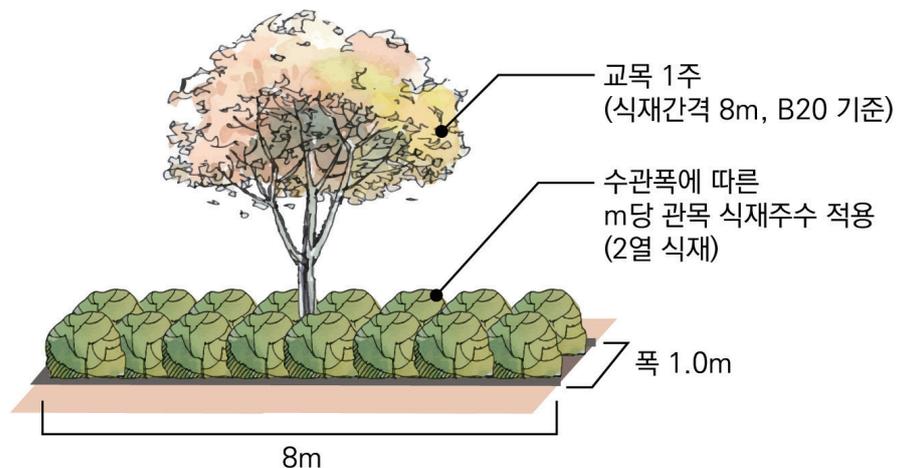


표 4-4 | 가로녹지 식재 모듈

구분	내용
녹지대	• 폭1.0m x 길이8.0m (현황 고려)
수목	• 교목 식재 간격 8m, 흉고직경 B20 (조례) • 하층식재 시 관목 2열 식재 (LH전문시방서) • 관목 식재주수는 수관폭에 따른 밀도 적용, 교목 식재구간인 8m 기준 식재주수 계산 (LH전문시방서)
토양	• 생육최소심도 1.5m 적용 시 1.0m x 8.0m x 1.5m = 12m³
바이오차 투입	• 3kg/m² 기준(농업분야 기준 적용)

저자 작성.

표 4-5 | 관목의 수관폭당 식재주수

수관폭(m)	LH 전문시방서(조경공사)		관목 종류(권선구 가로수 관리 현황)
	군식(m²당)	2열식재(m당)	
W0.3	16주	8주	사철나무, 쥐똥나무, 회양목
W0.4	9주	6주	영산홍, 백철쭉, 자산홍, 황매화
W0.5	6주	5주	홍가시나무
W0.6	4주	4주	화살나무, 산수국, 수국, 꽃댕강나무

자료 : LH전문시방서(조경공사)(2012)

- 가로녹지의 특징에 따라 탄소흡수우수종 중 교목 식재수종을 선정하고, 하층식재 또한 탄소흡수우수종 중 경관, 입지특성 등을 고려하여 수종을 선정함
 - 2030년까지 탄소저감효과를 효과적으로 나타내기 위해서 탄소흡수효과가 매우 우수하며 가로수로 조달이 쉬운 느티나무를 주요 식재 수종으로 선정함
 - 다만 꽃, 단풍 등의 계절에 따른 경관식재가 필요한 경우 탄소흡수우수종 중 은행나무, 이팝나무 등을 식재함
 - 관목은 탄소흡수능력과 최대수고 등을 고려하여 병꽃나무를 주요 식재 수종으로 선정함
 - 관목 및 지피·초화류의 경우 아직 탄소흡수능력에 대한 연구결과가 충분치 못한 상황으로 탄소흡수우수종 중 현장의 특성에 따라 교목식재를 보완할 수 있는 수종으로 선정하되, 비용을 등 고려하여 반드시 탄소흡수우수종이 아니더라도 하층식재를 확보하는 것을 최우선으로 함

제3절 탄소중립 가로녹지 관리방안

1 • 식생기반 관리

- 도시의 탄소는 수목에 21%, 토양에 78% 고정되어 있어 그 기반이 되는 토양층을 가급적 많이 확보해야 하며, 식물의 불량한 토양환경에서 연간 탄소 흡수량이 50% 이하로 떨어지는 연구결과가 있어(농촌진흥청, 2021) 토양의 탄소저감 효과를 고려해야 함
- 낙엽 및 낙지와 같은 부산물을 얻기 쉽지 않은 환경에서 바이오차를 이용해 토양을 조성할 수 있으며, 신규 가로녹지 조성 또는 수목 교체 시 토양에 바이오차를 투입하여 100년 이상 장기 저장될 수 있는 탄소의 양을 증가시킴
- 바이오차 투입 시 식생의 탄소 흡수량 또한 증가하므로 바이오차 도입을 통해 토양을 개량하고 탄소저장능력을 확보해야 함
 - 수원시 탄소중립 그린도시 사업 추진 시 바이오차의 도입 필요
- 선행 연구 결과에 따라 바이오차 투입 시 토양탄소증가량은 0.68로 적용하며, 식생탄소흡수증가량은 10%로 가정하여 계산함
- 현재 시판되고 있는 제품 및 원료를 대상으로 시험성적표를 분석한 결과, 대부분의 탄소함량이 일정 수준 이상으로 높게 평가되었음 H/C 비율 역시 대부분이 0.7 미만의 값을 나타내고 있음. 다만 산소함량은 검사에 포함하지 않는 경우가 많아 제도적으로 보완 필요

표 4-6 | 바이오차의 품질분석결과

구분	탄소	수소	질소	산소	H/C ¹	O/C ²
경동개발 바이오차	77.8	3.4	0.6	0.1	0.53	0.00
농협에코아그로	42.9	1.1	0.5	-	0.31	-
상림 바이오차그레놀	33.7	1.5	0.6	-	0.04	-
상림 아리바이오차	63.2	2.9	1.0	-	0.05	-
엑시엄우드 바이오차	56.7	3.2	1.0	-	0.06	-
케이아그로 에코바이오차	63.8	2.0	0.5	-	0.03	-
포이엔 바이오차	83.7	0.6	3.5	2.4	0.09	0.02

*시험성적표를 바탕으로 저자 작성

$${}^1H/C = \left\{ \frac{H(\text{질량분율, wt\%})}{C(\text{질량분율, wt\%})} \times \frac{12.01\text{amu}(C\text{원자량})}{1\text{amu}(H\text{원자량})} \right\}$$

$${}^2O/C = \left\{ \frac{O(\text{질량분율, wt\%})}{C(\text{질량분율, wt\%})} \times \frac{12.01\text{amu}(C\text{원자량})}{16\text{amu}(O\text{원자량})} \right\}$$

- 바이오차가 토양 내 탄소를 격리시켜 이산화탄소 감축효과를 인정받기 위해서는 아래의 조건을 만족해야 함
 - 산소가 공급되지 않는 조건의 고온(350℃ 이상)에서 열화학 반응을 통해 화학물질을 분해시키는 열분해 과정을 통해 생산된 바이오차를 사용
 - 바이오차 제품의 H/Corg 와 O/Corg는 각각 0.7, 0.4 미만이어야 함
 - 사업활동 과정에서 사용되는 전력은 전력계통으로부터 공급받아야 함
 - 바이오차 제품이 토양에 직접 시비되었거나, 콘크리트, 시멘트, 비료 등과의 혼합 등을 통해 바이오차 제품이 최종적으로 연소되지 않고 탄소가 격리됨을 입증하여야 함
 - 바이오차의 원료는 농업 잔재물, 농업부산물, 식품가공 유기폐기물 등으로 한정되며, 이 중 폐기물관리법을 위반하지 않은 경우로 제한함

그림 4-2 | 바이오차의 가로수 적용사례



〈바이오차 토양 기반 조성〉



〈기존 가로수에 바이오차 토양 혼합〉

자료 : <https://www.biochar-journal.org/en/ct/77>

2 • 수목 고사 방지

- 수목을 이식할 경우 뿌리 활착이 잘 되지 못하게 되어 고사하는 경우가 많으며, 고사한 수목에서 그 동안 흡수한 탄소를 배출하므로 식재할 입지에 적합한 수종을 선정해 고사율을 줄이는 것이 매우 중요함
 - 이식 후 수목 고사를 방지하기 위한 방법은 다음과 같음

- 이식 후 충분한 관수 및 적절한 시비
- 이식 적기에 수목을 이식
- 배수 등 토양환경 확인 및 개량
- 이식 후 수목 주위에 벚집이나 우드칩, 낙지 부산물 등으로 멀칭 등

3 • 수목관리 최소화

- 국립산림과학원(2012)과 김태진(2013)은 전정 및 관리를 최소화하여 탄소의 흡수, 저장량을 극대화하는 방안을 아래와 같이 제시하고 있음
 - 고사한 수목은 즉시 제거하고 새로운 수목으로 교체
 - 유사한 관리 요건을 지닌 수종을 함께 식재하여 관수, 전정, 시비, 제초, 병해충 방제 등 최소화
 - 수목 바이오매스의 감소를 최소화하도록 빈번한 전정작업 지양
 - 수목 낙지물의 잔재를 멀칭재로 활용 등

제4절 소결

- 탄소흡수능력, 도시환경 적응성 등을 종합적으로 고려한 탄소중립 가로녹지의 적용 수종은 다음과 같음
 - 교목 : 입지 환경에 따라 속성수, 일반 가로수, 경관 가로수로 나누어 선정
 - 속성수 : 회화나무
 - 일반 가로수 : 느티나무
 - 경관 가로수 : 은행나무, 이팝나무
 - 관목 : 병꽃나무, 낙상홍, 사철나무, 꽃댕강나무, 산철쭉
 - 지피·초화 : 구절초, 수크령, 무늬사초
 - 탄소흡수능력에 대한 연구결과가 충분치 못한 상황으로 탄소흡수우수종 중 상부식재를 보완할 수 있는 수종으로 선정하되, 비용 등을 고려하여 탄소흡수우수종이 아니더라도 하층식재를 확보하여 녹지의 양을 늘리는 것을 최우선으로 함
- 탄소중립 가로녹지 식재방법으로 제시하는 녹지유형은 녹지량을 충분히 확보하기 위한 띠녹지이며, 탄소흡수효과를 극대화할 수 있는 다층식재가 반드시 필요
 - 다층식재가 불가능할 경우 가로수 하부에 수목보호덮개 설치를 지양하고 토양을 확보하여 토양의 탄소저장효과나 지피·초화류를 함께 식재할 수 있는 방법 도모
- 교목의 식재간격인 8m를 기준으로 녹지대 폭을 1.0m 확보하고 하부에 관목 2열 식재하는 것을 탄소중립 가로녹지 식재모델로 적용함
- 토양의 탄소저장능력 극대화, 토양 식생환경 개량 등을 위해 바이오차 투입을 고려할 수 있으며 입지에 적합한 수종을 선정하여 고사율을 줄이고, 수목 관리를 최소화하여 탄소의 흡수, 저장량을 극대화해야 함

05

탄소중립 가로녹지 효과분석

제1절 시범대상지 선정

1 • 시범대상지 개요

- 시범대상지는 탄소중립 그린도시 수원 사업의 '경기선형공원 조성공사(연계사업)' 구간을 대상으로 하여 평균적인 권선구 가로수 식재 모델, 현재 계획 모델, 탄소흡수우수종 식재 모델의 탄소흡수효과를 비교하고자 함
- 경기선형공사 조성사업은 점형 가로수를 선형으로 연결할 수 있도록 다층구조형 가로공원을 조성하고자 하는 사업으로 기존의 교목 아래 수목보호덮개 및 블록을 철거하고 남천 등 관목이나 호스타 등 초화류를 보식하거나, 문그로우 등 새로운 교목을 식재하는 계획임
 - 주요 사업 대상지인 권선구 탑동 918(호매실로)의 식재 현황을 보면 가로수로 벗어나기가 단독 식재되어있거나, 띠녹지로 연결되어있으나 관목이 없는 단층식재 띠녹지 형태임
 - 띠녹지 조성 구간은 6,510m이며, 해당 사업을 통한 식재 계획은 문그로우 등 교목 30주, 남천 등 관목 4,213주, 호스타 등 초화류 12,900본임

표 5-1 | 경기선형공원 조성공사 시행계획

구분	내용	
목적	점형 가로수를 선형으로 연결할 수 있도록 다층구조형 가로공원 조성	
위치	권선구 탑동 918 (고색역 반경 2km 내외 포함)	
주요 내용	철거공	토양절취 854㎡, 소형고압블록 철거 349㎡, 화강석 철거 118㎡, 수목보호덮개 철거 27개 등
	토공	토양개량 854㎡, 단근처리 24주
	설치공	석재의자 13개, 스톤플랜터 68m
	포장공	화강석경계석 등 257m
	식재공	문그로우 등 교목 30주, 남천 등 관목 4,213주, 호스타 등 초화류 12,900본
소요예산	200,000천 원	

자료 : 수원시(2023)

그림 5-1 | 시범대상지 적용 구간

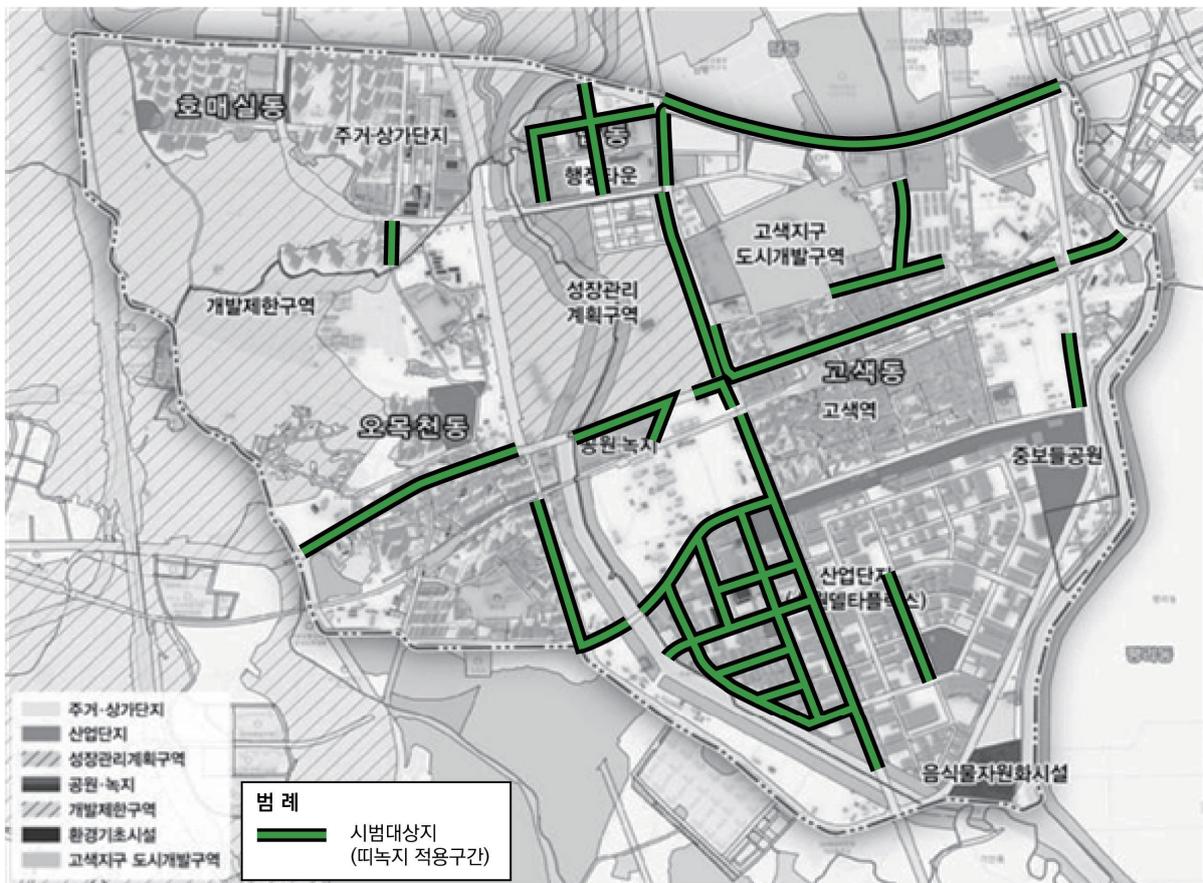


그림 5-2 | 시범대상지 현황



자료 : 카카오맵 로드뷰(2023)

- 시범대상지인 권선구의 식재 현황을 기준으로 가장 많이 식재되는 띠녹지 모델은 교목으로 왕벚나무, 하층식재인 관목으로 화살나무를 식재한다고 가정할 수 있음
- 권선구 교목 식재 현황을 보면 수원시 전체가 느티나무 가로수가 가장 많은 것에 비해 느티나무 식재 비율이 낮음. 특히 왕벚나무는 수원시의 약 62%가 권선구에 식재되어 있어 경관성이 강한 수종을 선택하고 있는 것을 알 수 있음

- 관목 식재 현황은 혼식을 많이 하고 단일수종으로는 화살나무를 가장 많이 식재하고 있음.
화살나무는 약 80%가 권선구에 식재되어 있음

표 5-2 | 수원시 가로수 주요 식재 수종(교목)

구분	식재수량(주)									
	계	느티나무	은행나무	왕벚나무	이팝나무	메타세 퀘이아	청단풍	소나무	버즘나무	기타
수원시 (비율)	78,257 (100.0)	17,603 (22.5)	12,185 (15.6)	11,704 (15.0)	11,723 (15.0)	3,251 (4.2)	2,081 (2.7)	2,635 (3.4)	2,216 (2.8)	14,859 (19.0)
권선구 (비율)	33,634 (100.0)	5,571 (16.6)	3,705 (11.0)	7,198 (21.4)	6,987 (20.8)	762 (2.3)	1,613 (4.8)	916 (2.7)	729 (2.2)	6,153 (18.3)

자료 : 수원시(2023)

표 5-3 | 수원시 가로수 주요 식재 수종(관목)

구분	식재수량(m)							
	계	혼식	사철나무	쥐똥나무	화살나무	회양목	철쭉	기타
수원시 (비율)	334,465 (100.0)	74,797 (22.4)	54,171 (16.2)	54,168 (16.2)	31,130 (9.3)	13,062 (3.9)	9,324 (2.8)	97,813 (29.2)
권선구 (비율)	143,987 (100.0)	32,773 (22.8)	14,119 (9.8)	20,269 (14.1)	24,822 (17.2)	10,862 (7.5)	3,683 (2.6)	36,339 (25.2)

자료 : 수원시(2023)

- 탄소중립 그린도시 사업 시행계획서(수원시, 2023)에 따르면 경기선형공원 조성공사를 통해 2026년까지 4,243그루 식재를 목표로 총 42.9t CO₂eq를 감축한다고 산정되어 있음
 - 다른 소규모 흡수원 조성사업은 조림 조성(ha)을 지표로 하고 있으나, 경기선형공원 조성공사의 경우에는 수목 식재(그루)를 지표로 함
 - 나무식재 1그루당 0.0101t CO₂eq 탄소 흡수 효과 가정하며, 교목과 관목을 구분하지 않고 1그루를 식재한 것으로 산정함
 - 산정식 : 3.88525ha x 0.0101t CO₂eq = 42.9t CO₂eq
- 본 연구를 통해 정리한 탄소흡수우수종의 탄소 저장 및 흡수량을 적용하여 가로녹지를 조성했을 경우 탄소 저장 및 흡수 효과를 정량적으로 산정하고자 함

2 • 시범대상지 분석 방법

- 본 연구에서 제시한 탄소중립 가로녹지 식재모델 3가지(단목, 혼합, 띠녹지)를 기준으로 현황과 탄소흡수우수종으로 식재 수종을 달리한 모듈에 대한 탄소 저장 및 흡수효과를 분석함
 - 현황 : 사업대상지 가로수 현황과 권선구 주요 식재 관목을 조합
 - 탄소흡수우수종 : 탄소저감능력 및 도시적응성이 뛰어나 선정된 교목 및 관목 적용
 - 현재 식재된 교목에 탄소흡수우수종 관목만 적용할 경우 / 교목 및 관목을 모두 적용할 경우
- 바이오차 투입 시의 토양의 탄소 저장효과를 함께 계산함

표 5-4 | 시범대상지 분석 식재 모듈

구분	식재모델		식재			토양	
			수종	적용 규격	식재모듈(8m 구간) 기준 식재 주수	토양 기준	바이오차 투입량
현황	단목식재	교목	왕벚나무	B20	1주	[단목, 혼합식재] 1mx1m=1㎡ [띠녹지] 1mx8m=8㎡	24kg (1㎡당 3kg)
		관목	-		-		
	혼합식재	교목	왕벚나무	B20	1주		
		관목	화살나무	W0.6	4주		
	띠녹지	교목	왕벚나무	B20	1주		
		관목	화살나무	W0.6	32주		
탄소 흡수 우수종 (관목 적용)	단목식재	교목	왕벚나무	B20	1주		
		관목	-		-		
	혼합식재	교목	왕벚나무	B20	1주		
		관목	병꽃나무	W0.4	6주		
	띠녹지	교목	왕벚나무	B20	1주		
		관목	병꽃나무	W0.4	48주		
탄소 흡수 우수종 (교목, 관목 적용)	단목식재	교목	느티나무	B20	1주		
		관목	-		-		
	혼합식재	교목	느티나무	B20	1주		
		관목	병꽃나무	W0.4	6주		
	띠녹지	교목	느티나무	B20	1주		
		관목	병꽃나무	W0.4	48주		

제2절 탄소 저장 및 흡수 효과분석

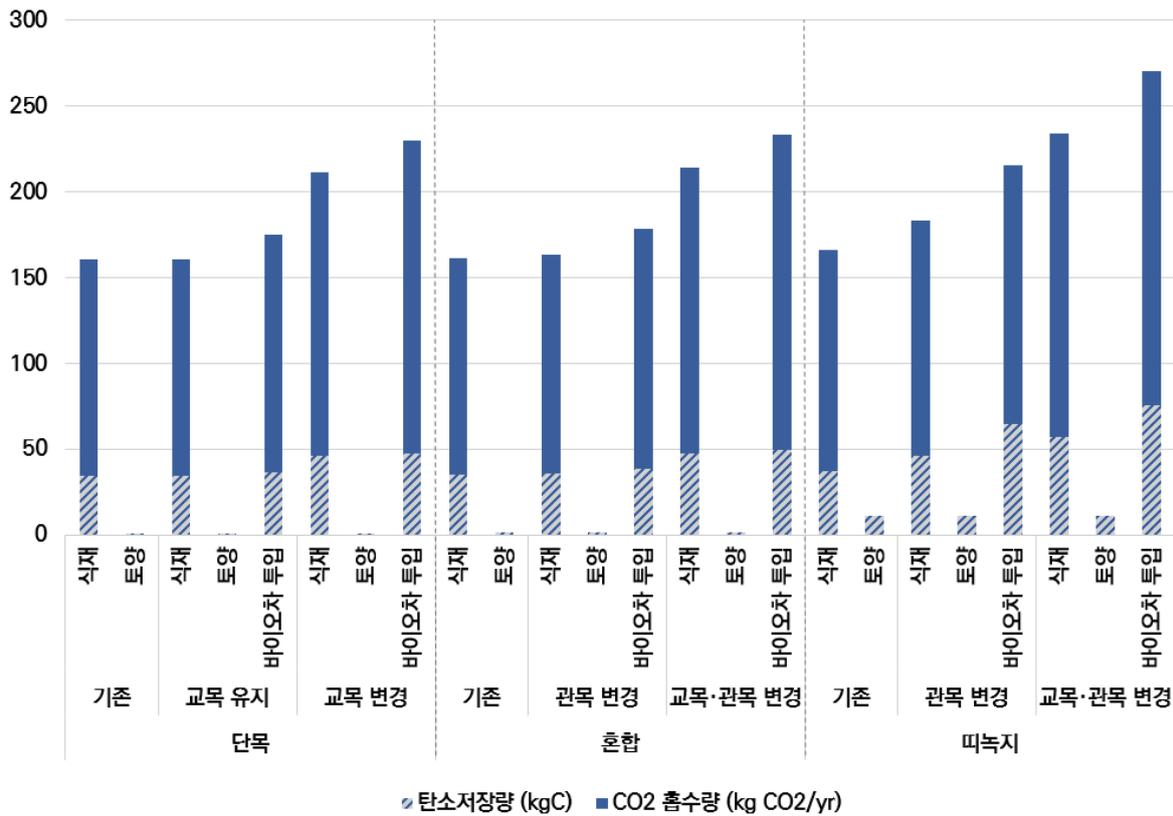
1 • 식재 모듈(8m)에 따른 탄소 저장 및 흡수 효과

- 기존 현황 식재(단목)에 비하여 띠녹지 모델 적용, 탄소흡수우수종(관목, 교목+관목) 적용, 바이오차 투입 시 현황보다 탄소저감능력이 최대 1.5배 증가함
- 바이오차 투입 시 토양의 탄소저장량은 0.68배 증가, 식생의 탄소흡수량은 10% 증가, 바이오차는 20년 내 토양안정화가 되는 것으로 적용

표 5-5 | 현황 식재 수종 시 탄소저감 효과 계산

구분	식재모델		탄소저장량 (kgC)	CO ₂ 흡수량 (kg CO ₂ /yr)	비고		
현황	단목 (왕벚나무)	식재	34.40	126.10			
		토양	1.03	-			
	혼합 (왕벚나무+화살나무)	식재	34.76	126.46			
		토양	1.39	-			
	띠녹지 (왕벚나무+화살나무)	식재	37.27	128.97			
		토양	11.14	-			
탄소 흡수 우수종 *관목	단목 (왕벚나무)	식재	34.40	126.10	현황보다 약 1.2배 증가		
		토양	1.03	-			
		바이오차 투입	36.14 (+0.70)	138.71 (+12.61)			
	혼합 (왕벚나무+병꽃나무)	식재	35.82	127.52			
		토양	1.39	-			
		바이오차 투입	38.16 (+0.95)	140.27 (+12.75)			
	띠녹지 (왕벚나무+병꽃나무)	식재	45.74	137.44			
		토양	11.14	-			
		바이오차 투입	64.44 (+7.57)	151.18 (+13.74)			
	탄소 흡수 우수종 *교목/ 관목	단목 (느티나무)	식재	45.70		165.40	현황보다 약 1.5배 증가
			토양	1.03		-	
			바이오차 투입	47.44 (+0.70)		181.94 (+16.54)	
혼합 (느티나무+병꽃나무)		식재	47.12	166.82			
		토양	1.39	-			
		바이오차 투입	49.46 (+0.95)	183.50 (+16.68)			
띠녹지 (느티나무+병꽃나무)		식재	57.04	176.74			
		토양	11.14	-			
		바이오차 투입	75.74 (+7.57)	194.41 (+17.67)			

그림 5-3 | 식재모델별 탄소저장 및 흡수 효과 분석



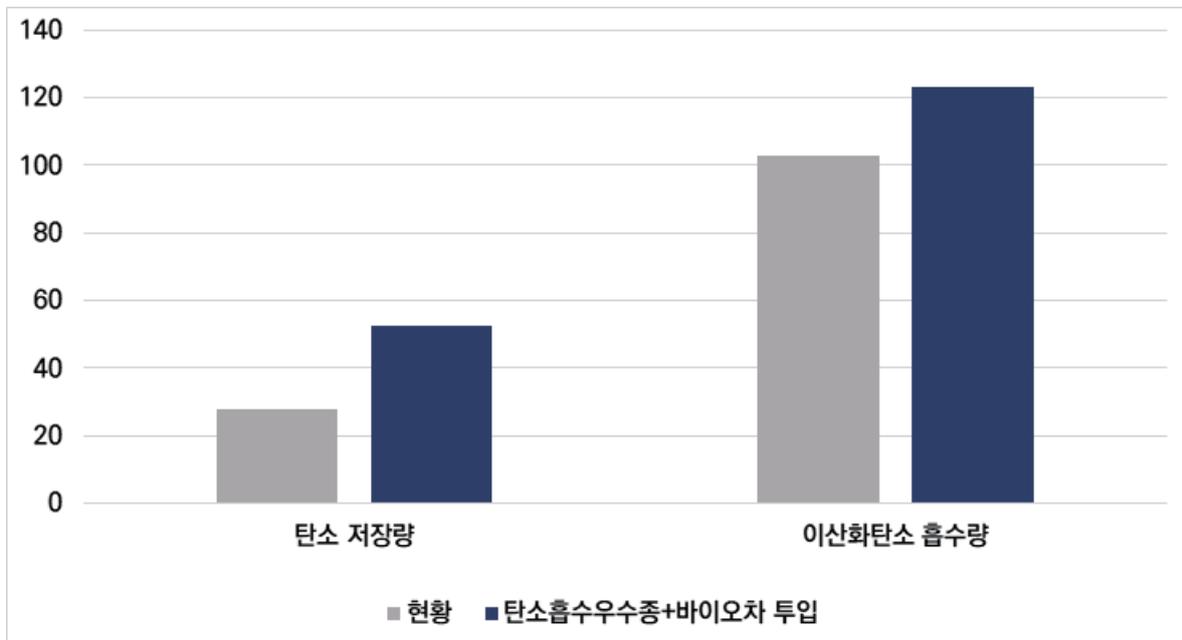
2. 시범대상지 탄소 저장 및 흡수 효과

- 시범대상지에 적용할 수 있는 식재모델로 교목인 현재 식재되어 있는 왕벚나무를 유지하고, 띠녹지 조성 시 탄소흡수우수종인 병꽃나무를 추가 식재하는 모델 적용
- 해당 모델로 시범대상지 구간 6,510m에 적용 시 전체 탄소 저장 및 흡수 효과는 다음과 같음
 - 수목 및 토양에 의해 탄소 52.44t C 저장
 - 수목에 의해 이산화탄소 123.02t CO₂ 흡수
- 탄소저장량은 기존대비 1.9배 증가하였으며 이산화탄소 흡수량은 약1.2배 증가하는 것으로 분석

표 5-6 | 시범대상지 내 탄소저감 효과분석

구분	식재모델		시범대상지 적용(6,510m)	
			탄소저장량 (t C)	CO ₂ 흡수량 (t CO ₂ /yr)
기준	단목 (왕벚나무)	식재	27.99	102.61
		토양	0.84	-
		바이오차 투입	-	-
탄소흡수우수종 보완 식재 (관목)	띠녹지 (왕벚나무+병꽃나무)	식재	37.22	111.84
		토양	9.06	-
		바이오차 투입	52.44	123.02

그림 5-4 | 시범대상지 내 기존 대비 탄소저감 효과

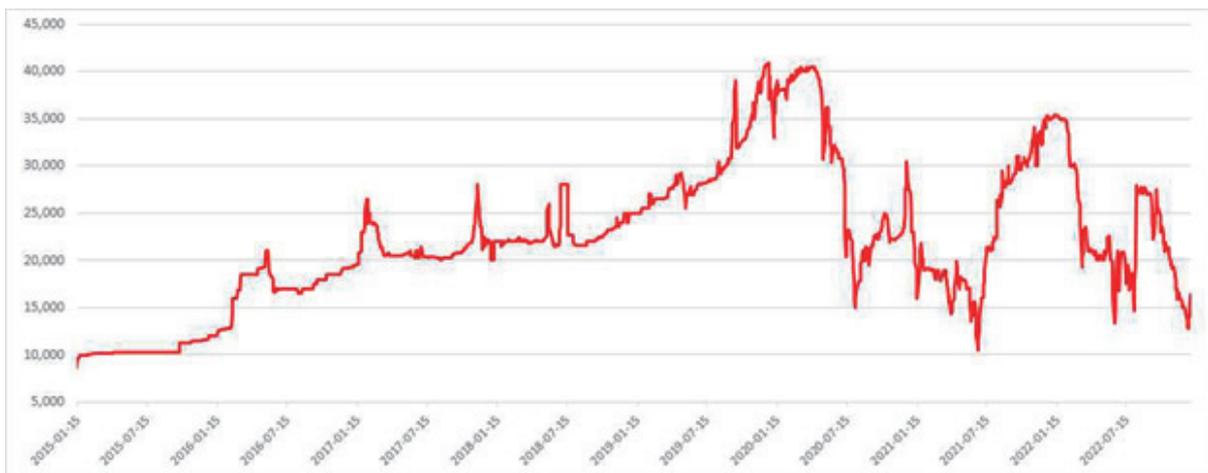


제3절 경제 및 기타 효과

1 • 경제적 효과

- 탄소중립 가로녹지 조성을 통해 발생된 탄소저장 및 흡수량은 현재 탄소시장에서 방법론 부재 등의 사유로 거래될 수 없으나 경제적 가치 판단을 위해 탄소가격을 적용하여 환산
- 시범대상지 내 탄소흡수량 및 저장량을 배출권거래시장을 통해 거래할 경우 약 718만원의 경제적 효과 발생, 장기적으로 탄소 거래 가격이 상승할 것을 고려할 때 그 이상의 경제적 효과가 발생함
 - 거래가격을 2019년 12월 최고가 40,900원을 기준으로 적용할 경우
 - 탄소흡수량 : 5,061,604원 / 탄소저장량 : 2,144,854원

그림 5-5 | 할당배출권(KAU) 지표물 가격



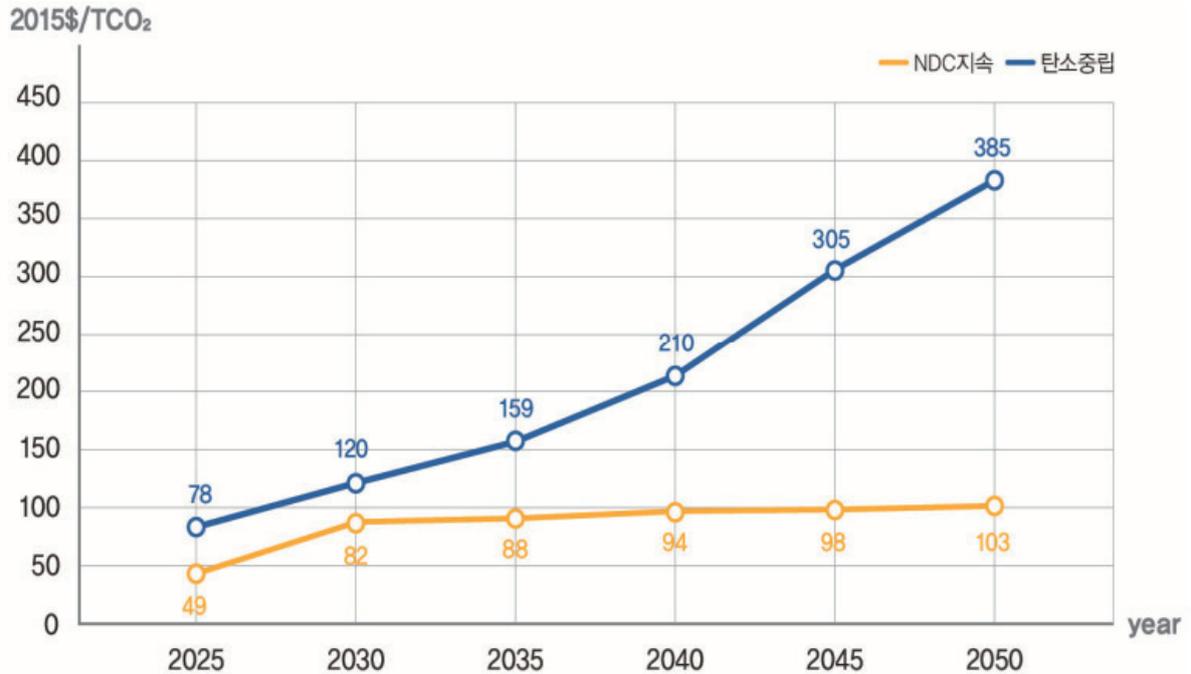
자료 : 배출권시장 정보플랫폼

- 배출권거래시장에서의 탄소가격은 향후 더 높아질 것으로 예상되고 있음
 - 국제에너지기구(IEA)는 탄소가격 장기전망(2019)에서 2030년 75달러, 2040년 125달러를 추정하고 있음. 125달러 적용 시 현재 환율(약1,300원)로 162,500원 적용 시 약 2,851만원의 경제적 효과 발생 가능
 - 탄소흡수량 : 19,990,750원 / 탄소저장량 : 8,521,500원
 - 2050 탄소중립 전환 시나리오 보고서에 따르면 탄소중립 2050년 탄소중립을 달성했을 때의 탄소 가격은 톤당 385달러로 분석함. 특히 탄소포집기술이 경제성을 확보해 적용되지 못한 상태에서는 톤당 550달러 수준까지 올라갈 것으로 예상함. 탄소중립이 달성되었다고 가정

시 약 8,782만원의 경제적 효과 발생 가능(염지용 외, 2021)

- 탄소흡수량 : 61,571,510원 / 탄소저장량 : 26,246,220원

그림 5-6 | 정책 이행에 요구되는 탄소가격



자료 : 염지용 외(2021)

- 탄소중립 가로녹지 조성에 따른 경제적 효과를 km당으로 환산 시 약 27t CO₂ 저장 및 흡수 효과 발생하며 현재 가치로 약 110만원의 경제적 가치 발생. 2050년 탄소가치 적용 시 최대 1,349만원의 효과 발생 예측

표 5-7 | 탄소중립 가로녹지 조성에 따른 경제적 가치

구분		경제적 가치	
기준	탄소가격	시범구간	단위구간(km)당
현재	40,900원/톤*	7,176천원	1,103천원
2040년	125달러/톤	28,512천원	4,380천원
2050년	550달러/톤	87,818천원	13,490천원

*2019년 12월 최고가
환율 1,300원/\$ 기준 적용

- 그밖에 국립산림과학원에서 i-Tree를 활용하여 경제적 가치를 분석한 결과, 연간 헥타르(ha)당 가로수의 탄소 흡수량은 효자로 0.964t, 연세로·성산로 0.607t, 신사동 0.504t, 노원구 0.438t에 달함. 가로수로 인한 대기오염물질 저감과 탄소 흡수, 홍수 저감 등 가치를 경제적 가치로 환산 시 가로수의 ha당 연간 경제적 가치는 노원구는 약 219만원, 효자로 약 265만원, 연세로·성산로 약 104만원, 신사동 약 96만원 수준으로 분석됨(경향신문, 2023.07.17.)
- 탄소중립 가로녹지 조성방향을 통해 안정적인 생육공간을 제공하여 전정, 관수 및 시비 등 유지관리 비용을 최소화 가능

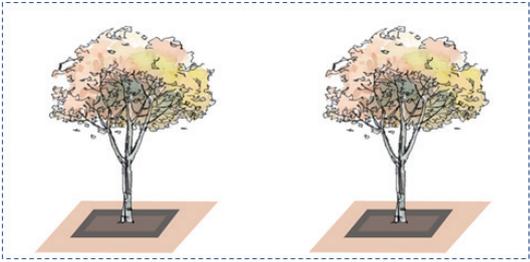
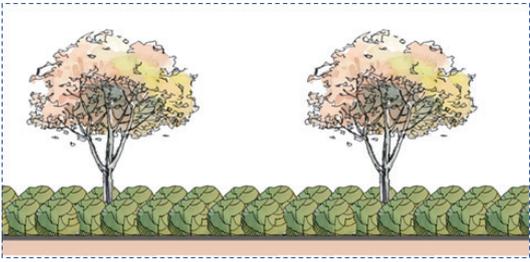
 - 전정을 최소화하여 가로녹지 유지관리비용 절감 효과 발생
 - 바이오차 투입에 따른 유지관리 비용 최소화
 - 토양의 투수성·보수성·보비성 향상, 식물 발근 촉진으로 건전한 생육 가능, 토양 산화 방지, 태양열 흡수를 도와 지온상승 및 동해 방지, 토양 영양분 보유력 증가

2 • 생물다양성 증진 및 공동 이익

- 탄소중립 가로녹지 식재모듈이 기존 가로녹지 모듈에 비해 식재량 증가로 생물다양성 증가

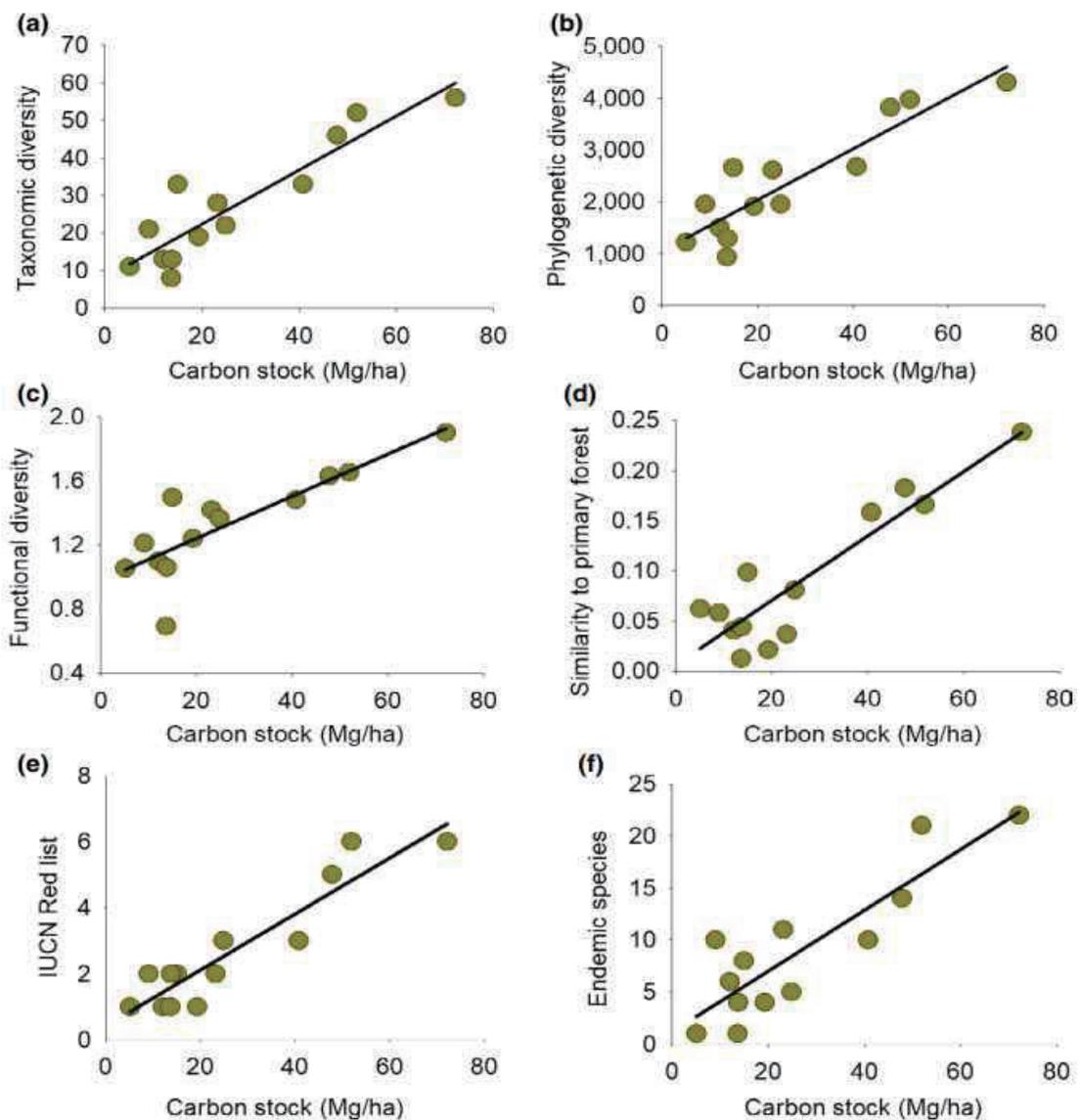
 - 토양, 관목 및 교목에 서식하는 곤충 및 조류 등 서식 가능
- 그 외 미세먼지 저감 효과, 도시열섬 효과 감소, 우수유출 감소 효과 등 생활환경 개선 효과

표 5-8 | 탄소흡수원 확대에 따른 생물다양성 증진 및 공동이익

	기존 가로녹지	탄소중립 가로녹지
식재모듈 (10m)		
식재량	교목 1종 2주	교목 1종 2주 / 관목 1종 80주
생물다양성	교목에 서식하는 곤충 및 조류 등 서식 가능	토양, 관목 및 교목에 서식하는 곤충 및 조류 등 서식가능
공동이익	-	미세먼지 저감 효과, 온도 저감 효과 우수유출 감소 효과, 건강증진 등 치유효과

- 탄소 저장 및 흡수를 위한 다양한 프로젝트가 생물다양성 증진에 기여. Matos 외(2020)에 따르면 2차림에서의 탄소 축적 및 생물다양성 회복력을 확인한 바 있음
 - 1차림과 비교하였을 때 30년이 지난 2차림은 지상 탄소 축적의 20%를 회복하였으며 나무의 분류학적 다양성의 76%, 계통학적 다양성의 84%, 기능적 다양성의 96%를 회복함. 추가적으로 IUCN 적색목록의 65%와 고유종의 30%를 회복함
 - 복원을 통한 2차림이 멸종위기종을 복원하고 경관 연결성을 개선함으로써 기후변화와 생물 다양성의 위기를 완화하는 데 도움이 될 수 있음을 확인함

그림 5-7 | 탄소축적량과 생물다양성 효과

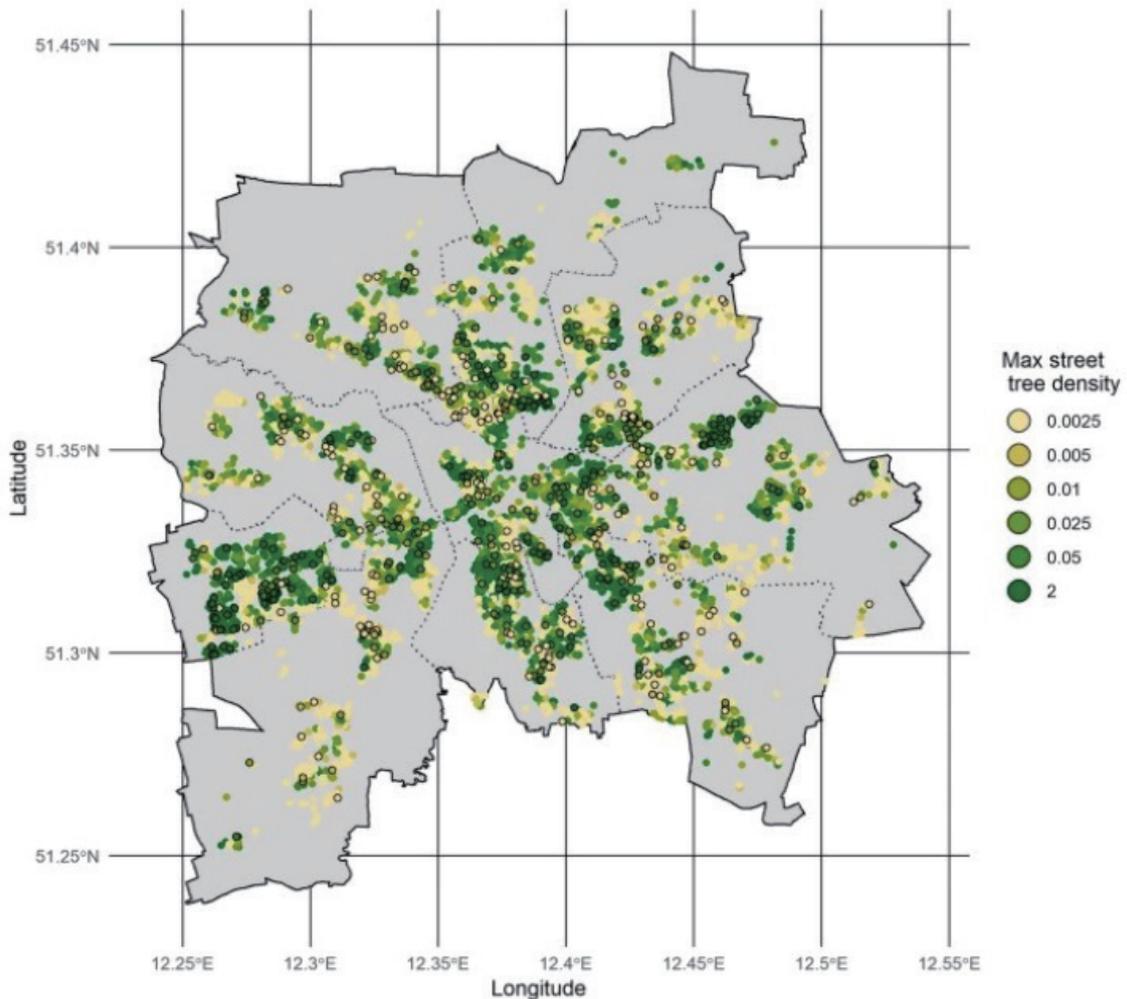


대서양림의 탄소축적량과 나무다양성(a-c)과 요소(d-f) 간의 공동효과: 분류학적 다양성(a); 계통학적 다양성(b); 기능적 다양성(c); 1차림과의 유사성(d); IUCN 적색목록종 풍부도(e); 고유종 풍부도(f)

자료 : Matos et al.(2020)

- 건강한 생태계는 다양한 식물과 동물 종을 지원하여 전반적인 생태 탄력성에 기여함. 생물다양성은 생태계 건강을 유지하는 데 필수적이며, 건강한 생태계는 탄소를 보다 효과적으로 격리하고 기후 변화에 직면하여 필수적인 환경 변화를 견딜 수 있음
- 집과 가까운 거리에 가로수가 많이 심어져 있으면 우울증의 위험이 낮아진다는 연구 결과 발표 (Marselle et al., 2020). 가로수가 도시에 사는 시민들의 정신 건강을 위한 좋은 해결책 역할
 - 가로수와 항우울제 처방 간의 상관관계는 사회·경제적 지위가 낮은 집단에서 특히 강하게 나타남. 고용 여부 및 성별, 나이, 체중 등 우울증에 영향을 미치는 모든 요인을 감안해도 동일한 결과 도출

그림 5-8 | 가로수의 건강증진 효과 분석



검은색 원 : 항우울제 처방을 받은 개인, 녹색과 노란색 원 : 100m 이내에 있는 가로수 밀도

자료 : Marselle et al., (2020)

- 가로수는 인간의 건강 외 도시에 가로수를 많이 심을수록 기후변화의 완화 및 생물다양성 보존 기여하며 대기오염 완화 및 토종 나무종 보전에 기여
- 다양한 시너지 효과를 내기 위해서는 조성비용이 많이 드는 대규모 공원보다는 가로수를 많이 심는 것이 더 효과적이며 도시 전체에 가로수를 균등하게 조성해 사회적 약자가 자연에 균등하게 접근할 수 있도록 함으로써 건강의 형평성을 고려하고 '녹색 젠트리피케이션' 방지 필요(Marselle et al., 2020)

3 • 교육 및 사회적 인식

- 탄소중립 수원 실현을 위해 탄소흡수원 중 하나인 가로녹지를 대상으로 효과분석을 실시하였음. 분석결과 및 효과를 교육·홍보 필요
 - 교육·홍보를 통해 탄소흡수원 확대의 필요성 인식 및 사업 확대의 기틀 마련
- 탄소중립 가로녹지 실현을 위해 유지관리 분야에서의 시민참여 확대 필요
 - 가로수 관리 교육, 행사 등을 통해 시민 역량 강화 및 참여기회 확대 마련
 - 가로수 유지관리 최소화 방안을 마련하여 탄소중립 실현 필요
 - 시민참여를 통한 가로수 유지관리 범위 제시
 - 관수, 병충해 발생신고, 가로수 생육에 지장·피해를 주는 장애물 제거, 사고 또는 고의로 가로수가 피해를 받았거나 받을 우려가 있을 때 신고, 비상재해 시 긴급조치 지원 및 협조
 - 시민참여를 통한 유지관리 시 필요한 경우 물품, 장비 등 지원 필요

06

결론 및 제언

제1절 연구결과 및 정책제언

1 연구 주요결과

- 수원시 탄소중립 기본계획 내 탄소흡수원 확보를 통한 저장량 확대가 중요 전략임. 본 연구에서는 가로녹지 분야에서 탄소 저장 및 흡수능력이 높은 수종과 식재기법을 제안하고 이에 따른 효과를 분석하였음
- 탄소중립 가로녹지 실현을 위해 적용 가능한 수목은 다음과 같음
 - 탄소중립 우수종(교목) : 느티나무, 회화나무, 이팝나무 등 선정
 - 탄소중립 우수종(관목) : 병꽃나무, 낙상홍, 사철나무, 산철쭉 등 선정
- 탄소 저장 및 흡수를 극대화할 수 있는 식재모델로 띠녹지 혹은 혼합식재 방법을 제안하였으며 바이오차 도입을 통한 탄소격리 효과 증진방안 제시
- 탄소중립 가로녹지 식재모델의 효과를 분석하기 위해 환경부 시범사업으로 추진 중인 고색동 일대 탄소중립 그린도시를 대상(6,510m)으로 적용한 결과 탄소 저장 및 흡수효과와 경제적 효과 기대
 - 탄소중립 효과로는 약 175t CO₂ 흡수 및 저장 효과 발생하여 기존 대비 탄소저장량은 약 1.9배, 이산화탄소 흡수량은 약 1.2배 증가
 - 경제적 효과로는 탄소 저장 및 흡수량에 대한 탄소배출권 거래 비용으로 환산한 결과, 시범구간 내 약 718만원의 경제적 가치 발생가능. 이러한 경제적 가치는 2050년 톤당 탄소가격이 385달러일 경우 약 8,782만원의 경제적 가치인 것으로 계상할 수 있음
- 탄소중립 가로녹지 구성에 따른 효과를 km당으로 환산 시 약 27t CO₂ 흡수 및 저장 효과 발생하며 현재 가치로 약 110만원의 경제적 가치 발생. 2050년 탄소가격 적용 시 최대 1,350만원의 효과 발생 예측
- 그 밖에 탄소중립 가로녹지 구성을 통해 생물다양성 증진효과 및 미세먼지, 열섬저감 등 생활환경 개선 효과 발생

2 정책제언

- 본 연구 결과를 토대로 탄소중립 가로녹지 식재모형을 적용하여 시범사업 추진 필요
 - 탄소중립 그린도시 내 탄소중립 식재모형을 적용하여 시범사업 지구 내 탄소 저장 및 흡수 극대화 필요
- 탄소흡수원 중 가로녹지를 대상으로 연구하였으나 도시공원 등으로 대상 확대 가능
 - 가로녹지에서 도시공원으로 대상 확대
 - 도시공원 내 탄소 저장 및 흡수능력이 높은 수종 선정 및 식재 필요
- 바이오차 도입을 통한 식재기반 마련 필요
 - 도시공원 및 가로녹지 내 토양 등 식재기반 조성 시 바이오차 도입하여 탄소격리 효과뿐만 아니라 보수력, 보비력 등의 기타 효과로 식생 활착에 기여
- 탄소중립을 고려한 가로수 조성 지침 및 가이드라인 변경 필요
 - 수종선정 기준
 - (기존) 기후 및 토양 적합, 향토성, 경관성, 기후조절 등
 - (변경) 탄소 저장 및 흡수량이 우수한 수종 추가
 - 생육환경 조성
 - (기존) 식재기반의 유기물 함유량 부족 시 토양개량을 실시
 - (변경) 탄소격리, 토양 공극 향상을 위해 바이오차 등 도입 추가
 - 가로수 관리기준
 - (기존) 가지치기 시기 및 강전정에서 약전정으로 전환
 - (변경) 가지치기 및 관리 최소화
 - 탄소중립 실현을 위한 가로수 유지관리에 시민참여 확대

표 6-1 | 가로수 조성 지침 및 가이드라인 변경

	기존 지침 및 가이드라인	탄소중립 가로녹지 지침 및 가이드라인
수종선정기준	<ul style="list-style-type: none"> • 식재 지역의 기후와 토양에 적합한 수종 • 식재 지역의 역사와 문화에 적합하고 향토성을 지닌 수종 • 식재 지역의 주변 경관과 어울리는 수종 • 시민의 건강에 나쁜 영향을 끼치지 않는 수종 • 환경오염 저감, 기후 조절 등에 적합한 수종 • 기타 특정 목적에 적합한 수종 	(선정기준 추가) <ul style="list-style-type: none"> • 탄소 저장 및 흡수능력이 우수한 수종 -교목 : 느티나무, 회화나무, 이팝나무 등 -관목 : 병꽃나무, 낙상홍, 사철나무 등
생육환경 조성	<ul style="list-style-type: none"> • 식재기반의 유기물 함유량 부족 시 토양개량 실시 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소격리, 토양공극 향상을 위해 바이오차 등 적용
가로수 관리	<ul style="list-style-type: none"> • 강전정에서 약전정으로 전환 	<ul style="list-style-type: none"> • 약전정 • 시민참여 확대

□ 산림청 산림탄소상쇄사업 등 국가 공모사업 참여를 통한 탄소흡수원 확보

- 산림탄소상쇄사업 중 신규조림사업 신청·참여하여 탄소흡수원 인정받을 수 있으므로 대상지 확보 시 공모사업 추진 필요

□ 탄소중립 가로녹지 등 탄소흡수원으로 저감되는 탄소저장 및 흡수량을 수원시 탄소중립 기본계획에 반영하여 탄소중립 실현에 기여

제2절 연구한계 및 향후 과제

1 • 연구한계

- 수목의 탄소 저장 및 흡수량에 대한 연구는 현재 계속 진행 중이며, 연구방법론에 따라 산정 결과의 차이가 있어 한계. 특히, 산림 수종 외 조경수로 활용되고 있는 수종에 대한 연구가 진행되지 않아 적용 한계
- 탄소격리효과가 있는 바이오차의 경우 다양한 연구가 현재 진행 중에 있음. 효과에 대한 내용은 인정되나 효과의 크기에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있어 향후 연구결과에 대한 반영 필요
- 경제적 효과 분석 시 탄소배출거래의 탄소가격을 기준으로 분석하였으나 실제 가로녹지 등에서 발생하는 탄소 저장 및 흡수량은 배출권거래제도 내에서 활용은 어려움. 흡수원을 통한 이산화탄소 저장 및 흡수량은 수원시 내부 탄소중립 기본계획에서 배출량 산정 시 적용이 가능함

2 • 향후 과제

- 수목의 탄소 저장 및 흡수량에 대한 산정방법과 산정량에 대한 연구가 계속 진행 중이므로 향후 지침 및 가이드라인에 탄소 저장 및 흡수 우수종은 지속적인 업데이트 필요.
- 수원시 도시공원 및 녹지 내 바이오차 도입 가이드라인 제시 필요
 - 바이오차 특성, 배합비율 등을 고려하여 바이오차 도입 기준, 투입량 등 적용 기준 마련 필요

참고문헌

REFERENCE

국문 자료 |

- 강은하. (2021). 수원시 2050 탄소중립 기본계획 수립 연구. 수원시정연구원.
- 경희대학교 산학협력단 외. (2023). 도시 생태계 탄소저장능력 향상을 위한 탄소저장량 평가 기술 및 토양-식생 결합 모듈화 공법 개발. 한국환경산업기술원.
- 구경아. (2023). 자연환경 정책의 탄소중립 효과성 평가 방안. 한국환경연구원.
- 국립산림과학원. (2012). 탄소지킴이 도시숲.
- 국립산림과학원. (2022). 산림에서의 탄소순흡수량 국가 표준.
- 김태진. (2013). 도로 이산화탄소 저감을 위한 가로 수종 선정 및 식재기준 연구. *한국산림휴양학회지*, 17(1), 131-144.
- 김학구, 김형섭, 홍용식, 윤이슬, 임윤경, 강신구, 김찬범. (2022). 도시숲 및 정원 주요 관목의 탄소흡수계수 개발 및 탄소저장량과 흡수량 비교 - 회양목, 화살나무, 사철나무, 산철쭉, 조팝나무를 대상으로 -. *한국산림휴양학회지*, 26(4), 131-139.
- 김학구, 홍용식, 임윤경, 윤이슬, 도기석, 정찬형, 이지문, 노희은, 강신구, 김찬범. (2023). 국립세종수목원 교목 4종의 탄소 저장량 및 연간 이산화탄소 흡수량 평가 - 소나무, 메타세쿼이아, 칠엽수, 이팝나무를 대상으로 -. *환경영향평가*, 32(1), 41-18.
- 농촌진흥청. (2021). 옥상녹화 식물에 의한 탄소절감 효과 산출.
- 산림청. (2020). 신기후체제 대응을 위한 생활권 도시림의 탄소흡수원과 다원편의 증진을 위한 조성·관리·평가모델 및 기술개발 최종보고서.
- 송홍선. (2021). 2050 탄소중립과 배출권거래제의 활성화.
- 수원시. (2019). 수원시 가로수 조성 및 관리기본계획.
- 수원시. (2023). 수원시 탄소중립 그린도시 사업 시행계획 수립용역 최종보고서.
- 수원시정연구원. (2022). 수원시 탄소중립 그린도시 추진전략.
- 엄지용 외. (2021). 2050 탄소중립 전환 시나리오 : 한국형 통합평가모형 분석.
- 우승한. (2015). 기후변화에 대응할 새로운 물결: 바이오차. 좋은땅출판사
- 우승한. (2021). 바이오차(Biochar)를 이용한 농림업부문 기후변화 대응 적용사례. *세계농업*. 2021(3). 1-16.
- 이선정, 임종수, 강진택. (2019). 주요 산림수종의 표준 탄소흡수량(ver.1.2). *산림정책이슈*, 129.
- 하지아, 박재민. (2023). 탄소저감설계 지원을 위한 수목 탄소계산기 개발 및 적용. *한국조경학회지*. 51(1). 45-55.
- 한국수목원정원관리원. (2021). 도시환경 적응 정원식물 평가 및 발굴.
- 한국수목원정원관리원. (2022). 도시생물다양성 증진을 위한 기반구축.
- 한국수목원정원관리원. (2022). 지구를 위한 10가지 탄소정원 가꾸기.
- 환경부. (2021). 2021년 환경부 탄소중립 이행계획.

영문 자료 |

IPCC (2018) **Special Report 2018. Global Warming of 1.5°C**

Lehmann, J. (2007). **A Handful of Carbon.** *Nature.* 447. 143-144.

Marselle et al., (2020). **Urban street tree biodiversity and antidepressant prescriptions.** *Scientific Reports* 10:22445

Matos, F. A., Magnago, L. F., Aquila Chan Miranda, C., de Menezes, L. F., Gastauer, M., Safar, N. V., ... & Edwards, D. P. (2020). **Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits.** *Global change biology,* 26(2), 509-522.

Stephen Joseph, Annette L.Cowie, Lukas Van Zwieten, Nanthi Bolan, Alice Budai, Wolfram Buss, Maria Luz Cayuela, Ellen R.Grabner, James A.Ippolito, Yakov Kuzyakov, Yu Luo, Young Sik Ok, Kumuduni N.Palansooriya, Jessica Shepherd, Scott Stephens, Zhe (Han Weng), Hohannes Lehmann. (2021). **How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar.** *GCB Bioenergy,* 2021;13, 1731-1764.

신문기사 / 웹페이지 / 통계자료 |

Landscape Times. (2021.09.06.). “작지만 강한 지피식물 ‘탄소 흡수원’으로 활용가치 매우 커”.

<https://www.latimes.kr/news/articleViewAmp.html?idxno=38661>

Landscape Times. (2023.06.14.). “수원시 명품 가로숲길 조성 -기존 띠녹지에 독특한 수목, 조경석 배치-”.

<https://www.latimes.kr/news/articleView.html?idxno=50385>

경기인뉴스. (2022.05.06.). “수원시, 도시 곳곳에 명품 가로숲길 조성 -금곡로 등 14개 가로에 가로환경에 맞는 다양한 나무 심어-”.

<http://www.gginews.kr/news/view.php?idx=67423>

경기일보. (2022.05.10.). “‘탄소중립 1번지 수원’, 고색동 미래 그린도시로 도약”.

<https://www.kgnews.co.kr/mobile/article.html?no=700661>

경향신문. (2023.07.17.) “서울 가로수 가치, 돈으로 따지면?…연간 효자로 265만원, 신사동 96만원”.

<https://m.khan.co.kr/national/national-general/article/202307172106015#c2b>

바이오차 저널. <https://www.biochar-journal.org/en/ct/77>

배출권시장 정보플랫폼. (2023). <https://ets.krx.co.kr/main/main.jsp>

산림청. (2023). 산림탄소등록부. <https://carbonregistry.forest.go.kr/>

수원뉴스. (2023.09.27.). “수원특레시는 가로수길 우수 선도도시입니다. - 정조로 네모가로수길은 대한민국 원조로 기록 -”.

<https://news.suwon.go.kr/?p=40&viewMode=view&reqIdx=202309261715252211>

수원일보. (2022.08.09.). “[기획특집] 꽃·바람·שמ·힐링이 있는 곳, 수원의 여름 명소 10선(選)”.

<http://www.suwonilbo.kr/news/articleView.html?idxno=219757>

수원특레시. (2023). 수원특레시청 홈페이지. <https://www.suwon.go.kr/>

환경부. (2023). 온실가스종합정보센터. <http://www.gjir.go.kr/>

연구책임자 김은영 (수원시정연구원 연구위원)

참여연구원 김소영 (지역활성화센터 팀장)

SRI-정책 2023-19

수원시 탄소중립 가로녹지 효과 분석

The Effect Analysis on Carbon Neutrality for Street Green Areas in Suwon

발행인 김성진

발행처 수원시정연구원

경기도 수원시 권선구 수인로 126

(우편번호) 16429

전화 031-220-8001 팩스 031-220-8000

<http://www.suwon.re.kr>

인쇄 2023년 11월 30일

발행 2023년 11월 30일

ISBN 979-11-6819-148-8

© 2023 수원시정연구원

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처 표시해 주십시오.

김은영. 2023. 「수원시 탄소중립 가로녹지 효과 분석」. 수원시정연구원.

비매품

SRI-정책

2023-19

수원시 탄소중립 가로녹지 효과분석

The Effect Analysis on Carbon Neutrality for Street Green Areas in Suwon

SRI 수원시정연구원
SUWON RESEARCH INSTITUTE

16429 수원시 권선구 수인로 126 더함파크

TEL 031.220.8001 | FAX 031.220.8000

www.suwon.re.kr

비매품/무료



9 791168 191488

ISBN 979-11-6819-148-8