기본연구보고서 2022-5

탄소중립 2050 실현을 위한 생활권 단위 공간계획 모형 연구

A Study on Spatial Planning Model of Living Area Unit for Carbon-Neutral 2050

남성우 Nam, Seongwoo
권오규 Kwon, Ohkyu
문보람 Moon, Boram

(aur

기본연구보고서 2022-5

탄소중립 2050 실현을 위한 생활권 단위 공간계획 모형 연구

A Study on Spatial Planning Model of Living Area Unit for Carbon-Neutral 2050

지은이 남성우, 권오규, 문보람

펴낸곳 건축공간연구원
출판등록 제2015-41호 (등록일 '08. 02. 18.)
인쇄 2022년 10월 26일, 발행: 2022년 10월 31일
주소 세종특별자치시 가름로 143, 8층
전화 044-417-9600
팩스 044-417-9608

http://www.auri.re.kr
가격: 25,000원, ISBN:979-11-5659-380-5

이 연구보고서의 내용은 건축공간연구원의
자체 연구물로서 정부의 정책이나 견해와 다를 수 있습니다.

연구진

연구책임	남성우 부연구위원
연구진	권오규 부연구위원 문보람 연구원
연구보조원	신수민 조사원 정규리 조사원 신현기 조사원
외부연구진	최정수 시아플랜건축사사무소 이사 윤수영 시아플랜건축사사무소 파트장

연구심의위원	유광흠 부원장 김영현 건축정책본부 본부장 조영진 빅데이터연구단 단장 이제승 서울대학교 환경대학원 교수 이홍일 한국건설산업연구원 연구위원
연구자문위원	강명수 토지주택연구원 수석연구원 김영철 KAIST 건설 및 환경공학과 교수 김승남 중앙대학교 도시공학과 교수 김현기 포스코 A&C 부장 민현준 잘그린연구소 소장 박종순 국토연구원 연구위원 엄선용 츠쿠바대 시스템정보계 교수 왕광익 그린디지털연구소 소장 이범현 성결대학교 도시디자인정보과 교수 이정찬 국토연구원 부연구위원 임희지 서울연구원 선임연구위원 정승현 한국건설기술연구원 수석연구원 정혜진 서울대학교 연구교수

연구요약

Summary

제1장 서론

글로벌 및 국가 핵심 정책 어젠다로서 '탄소중립' 정책이 강조되며, 탄소중립을 위한 건축도시 공간 조성 정책의 현안이 대두되고 있다. 국제사회는 기후변화 문제의 심각성을 인식하고 이를 해결하기 위해 교토의정서(1997년), 파리협정(2015) 채택 등의 노력을 기울여왔다. 우리나라는 건물과 도시공간의 온실가스 감축 전략으로서 「국토교통 2050 탄소중립 로드맵」 수립하였으며, 정부는 2050년까지 건물, 교통, 국토와 도시, 국외감축 분야에서 탄소중립을 위한 다양한 과제를 추진하고 있다.

'21년 12월 국토교통부는 지역·도시 차원에서 탄소중립을 실현하기 위해 도시·군기본계획과 도시개발계획을 수립하는 경우 탄소중립 계획 요소 등을 반영토록 도시·군기본계획수립지침 및 도시개발 업무지침을 개정·시행하였다.

지역과 도시 차원에서의 탄소배출 관리 중요성이 증대함에 따라 개별 건물을 포함한 공간 단위로의 탄소중립 전략 필요한 상황이다. 더 나아가, 도시계획 법제 개편에 따른 대응 및 공간 전략 마련 필요한 실정이다. 이를 위해서는 도시계획과 탄소중립 전략이 결합된 계획적·설계적 대안 마련을 위한 연구가 시급히 이루어져야 할 필요가 있다.

본 연구는 건축과 도시공간에서의 탄소중립을 위한 주요한 전략으로 생활권 단위에서의 최적화된 공간계획 모형을 개발하고, 이를 도시계획·개발 사업 추진시 도입·적용하는 방향을 제시하는 것을 목적으로 한다. 세부적으로 첫째, 생활권 단위 공간에 대한 도시계획·설계 차원에서의 탄소 배출량 저감 및 흡수 방안 발굴, 둘째, 생활권 공간에서의 탄소 배출저감 및 흡수 최적화 모형 개발, 셋째, 탄소중립을 위한 지구단위계획 수립 방향 제안 등을 중심으로 연구를 수행하였다.

제2장 생활권 관련 탄소중립 개념 및 정책

'20년 12월, 정부는 관계부처 합동으로 '「2050 탄소중립」 추진전략'을 발표하였다. 본 전략의 비전은 '적응적(Adaptive) 감축'에서 '능동적(Proactive) 대응'으로, 3대 정책 방향과 10대 과제를 제시하였다. 또한, '21년 12월, 국토교통부는 '국토교통 탄소중립 로드맵'을 발표하였다. 국토교통 분야에 특화된 로드맵은 건물, 교통, 국토·도시 기반, 국외 감축 부문으로 구분하여 추진과제 및 방안들을 제시하고 있다. '21년 12월 개정한 「도시·군기본계획 수립지침」에서는 공간구조, 교통체계, 주거환경, 공원·녹지 등 부문별 계획에 탄소중립 계획방향을 반영토록 한다. 계획 부문별로는 공간구조, 토지이용, 교통계획, 물류계획, 도심 및 시가지 정비, 주거환경계획, 대기환경 및 수환경보전, 폐기물, 에너지, 공원녹지계획 등 10가지로 계획방향을 분류하고 있다.

거시적 차원에서 국토·도시의 탄소중립을 추진하는 가장 근본적인 수단은 효율적인 공간구조를 설계하고 분야별 세부 요소를 체계적으로 적용하는 것이다. 반면, 미시적 차원에서 건물 단위의 대표적인 탄소중립 공간계획 요소는 건물 내 에너지 절감을 할 수 있는 패시브 에너지 건물, 제로에너지빌딩과 그린리모델링 등의 방안이 있다. 탄소중립 전략은 상위로는 국가 단위에서부터 지자체(도시) 단위-개발사업(신도시) 단위-생활권(지구) 단위, 그리고 최하위로는 건물 단위까지 다양한 공간적 위계에서 추진될 수 있다.

그러나, 국토·도시 단위에서 탄소 흡·배출 현황과 탄소중립 정책의 효과를 정량화하기 위한 지식과 정보가 부족하며, 적용지역의 규모와 산업, 인구구성과 생활양식 등에 따라 탄소감축 효과의 차이 등으로 계량화가 어렵다. 즉, 국토·도시 단위에서는 인벤토리가 너무 거대함에 따라 도시설계만으로는 종합적이고 현실적으로 관리하기가 어려운 부분이 상당수 존재한다. 또한, 개별 건물 단위에서는 그 규모로 인하여 일정 수준 이상의 탄소감축 효과를 기대하기 어렵다. 이에 개별 건물 단위에서 벗어나 건물군 집합개념으로 관점을 전환시키면서 도시차원의 종합적 고려가 필요하다. 새로운 토지이용에 대한 수요 증가, 상업·업무 지역에 대한 수요 변화, 공공기반 시설의 수요와 기능 변화, 근린주거지 내 시설의 기능과 용도 복합화를 고려한 실증기반의 탄소중립 정책과 제도의 마련이 요구된다.

제3장 생활권 탄소배출 인벤토리 구축 및 계획요소

본 연구에서는 도시공간을 구성하는 다양한 규모 중 생활권 단위에서 온실가스를 배출하는 경로를 파악하고, 생활권 공간계획 요소들을 발굴하였다. 도시공간에서 온실가스 배출 경로와 관련하여 기존문헌을 조사·정리하여 생활권 인벤토리를 구축하였다. 특히,

추후 도출되는 탄소중립 공간 조성을 위한 계획 요소들을 유추하고 연계하는 과정으로서 인벤토리 구축을 고려하였다.

도시 공간을 대상으로 탄소배출 인벤토리를 구축한 문헌들을 조사한 결과는 다음과 같이 정리된다. 첫째, 공간 범위 내에서 소비되는 에너지원을 목록화하는 것이 인벤토리 구축에 우선하여 진행되어야 한다. 둘째, 주요한 소비 에너지원은 화석연료, 전기에너지, 난방에너지, 수도 공급 에너지, 폐기물 처리 등으로 정리 할 수 있다. 셋째, 산업공정이나 농림업에 대한 배출 인벤토리는 대상지의 토지이용 특성에 따라 달라진다.

생활권 탄소중립 공간계획 요소 도출을 위해 문헌연구, 사례조사를 진행하여 계획요소 pool을 구성하였다. 대부분의 기존논의가 도시 단위에서의 담론형태로 정리되어 있으나, 본 연구에서는 생활권 단위에서의 실효성을 중심으로 계획요소를 정리하였다. 탄소중립 계획요소 도출을 위해 도시, 건축, 조경, 교통, 에너지 등 관련분야 전문가 자문단을 구성하여 의견을 수렴하였다. 이를 통해 공간구조 및 토지이용, 교통계획, 공원녹지 계획, 건축물 및 에너지계획 등 탄소중립 공간계획 요소를 도출하였다.

제4장 생활권 탄소중립 공간계획 모형 개발

생활권 탄소중립 공간계획 모형 개발을 위하여 연구목적에 적합한 생활권 규모를 정립하고, 관련 사례를 검토하여 계획요소 특성에 따른 공간계획 시나리오를 작성하였다. 계획요소 시나리오를 적용한 공간계획 모형을 개발하고, 최적화 모형을 개발하였다.

먼저, 생활권 규모 선정을 위해 행복도시 생활권 규모와 보행 중심생활권의 규모를 비교·분석하였다. 본 연구에서는 생활권 기본 모형의 규모를 도보 10분 거리인 반경 600m로 정한다. 보행 중심의 이동이 가능한 거리를 600m, 도보 10분 거리로 정함으로써 이를 탄소중립 실현을 위한 공간 규모로 규정한다. 이후, 문헌연구를 통해 생활권 공간단위에서의 탄소배출량 및 감축률 분석 자료를 정리하고, 지구단위계획 및 도시개발계획 분석을 통해 생활권의 토지이용 비율을 도출하였다. 저탄소 녹색시범마을 계획과 행복도시 저탄소 에너지도시계획을 통해 생활권 공간에서의 탄소배출 저감 계획과 지구단위계획 및 도시개발사업 토지이용을 조사·분석하였다.

이를 바탕으로 생활권 공간계획에 따른 탄소배출량 비교분석을 위한 대안적 모델 개발을 위해 시나리오를 작성하였다. 시나리오는 공간계획 요소들을 대상으로 앞서 개발한 기본 모형을 기준으로 정량적 변화를 통해 유형화하였다. 모형 작성을 위한 계획요소는 앞서 도출한 바와 같이 첫째, 토지이용 부문으로서 생활권을 컴팩트화하는 용도복합·압

축적 개발, 둘째, 교통 부문으로서 생활권 내 이동거리를 최소화, 셋째, 탄소흡수원을 확보하기 위한 공원녹지 면적을 확충하는 것이다. 계획요소의 조합을 통해 공간계획의 변화를 반영하는 시나리오를 구성하여 공간계획모형을 개발하였다.

마지막으로 생활권 탄소중립 공간계획 요소들을 기반으로 배출량을 최소화할 수 있는 모형(Optimization Model)을 제안하였다. 모형은 설정된 조건을 기반으로 교통부문, 건물부문, 공원녹지부문의 탄소배출의 총합을 최소화하는 공간 배치를 도출하였다.

제5장 결론 및 제언

본 연구를 통해 정리한 탄소중립을 위한 생활권 공간계획 수립 방향은 다음과 같다.

- 생활권 내 이동량이 많은 상업·업무 등 용도를 생활권 중심에 배치
- 상업·업무 주변으로 고밀주거와 일부 저밀주거 배치
- 건물에서의 신재생 에너지 생산을 통한 탄소저감 효과를 고려하여 고밀주거 외에도 중·저밀주거를 적절히 배분
- 학교와 공공시설은 주거지역 주변으로 분산시켜 이동거리를 줄이도록 배치
- 공원녹지의 확보는 단순히 탄소흡수원의 역할보다는 도시공간에서 공원녹지의 순기능을 위해 반드시 필요한 토지이용으로서의 역할을 우선 고려하는 공간 계획 필요

탄소중립 생활권 공간계획을 정책적으로 추진하기 위해 생활권 규모 지구단위계획 수립 시 탄소중립 모델의 적용이 요구된다. 또한, 지구단위계획 시행지침에 탄소중립 원칙을 제시할 필요가 있다. 또한, 생활권 내 이동거리 최소화를 위해 수평적 토지이용 분배 및 수직적 용도용적제를 활용할 수 있다. 이 외에도 신재생에너지 생산량 및 에너지자립률 기준 제시를 통해 탄소중립 수단의 마련 등 지구단위계획제도에 생활권 단위 탄소중립 공간계획을 반영할 필요가 있다.

본 연구는 생활권에서 탄소중립을 실현하기 위한 공간계획 방향을 제시하고자 가상의 모형들을 개발하고 조건과 시나리오를 적용한 시뮬레이션 방법론을 활용하였다. 생활권 탄소배출량 산정을 위한 기틀마련과 탄소배출 최적화모형 시각화, 정책 적용방안 제시 등 다양한 의의를 가지고 있으나, 연구의 한계를 보완할 수 있는 건축물 단위를 포함하여 다양한 공간규모를 대상으로 한 실측데이터 기반의 연구가 지속될 필요가 있다.

주제어

탄소중립, 생활권, 공간계획, 최적화 모형, 지구단위계획

차례 CONTENTS

제1장 서론

1. 연구의 배경 및 필요성 — 1
   1) 연구 배경 및 필요성 — 1
   2) 연구 목적 — 5
2. 연구의 범위 및 방법 — 6
   1) 연구범위 — 6
   2) 연구방법 — 7
   3) 연구 수행 과정 — 8
3. 선행연구 검토 및 본 연구의 차별성 — 9
   1) 선행연구 검토 — 9
   2) 선행연구 한계 및 본 연구의 차별성 — 10

제2장 생활권 관련 탄소중립 개념 및 정책

1. 탄소중립 관련 개념 및 정책 — 13
   1) 탄소중립 개념과 시나리오 — 13
   2) 탄소중립 관련 국가 정책 — 17
   3) 도시공간에서의 탄소중립을 위한 방법과 전략 — 22
   4) 「도시·군기본계획수립지침」에서의 탄소중립 계획 방향 — 27
2. 시나리오형 계획 기법에 대한 개념과 이론 — 31
   1) 시나리오형 계획 기법의 개념 — 31
   2) 도시계획 분야 시나리오형 계획 기법 적용 사례 — 34
3. 생활권 단위 탄소중립 공간계획의 필요성과 방향 — 43
   1) 생활권의 개념 및 공간규모별 탄소중립 계획 — 43
   2) 생활권 단위에서의 탄소중립 공간계획 필요성 — 56

제3장 생활권 탄소배출 인벤토리 구축 및 계획요소 도출

1. 생활권 단위 탄소배출 인벤토리 구축 — 59
   1) 생활권 공간에서의 탄소배출 인벤토리 조사 — 59
   2) 생활권 탄소배출 범주 및 단계 설정 — 80
   3) 생활권 단위 탄소중립 인벤토리 구축 — 84

2. 생활권 탄소배출·흡수량 산정방법 — 86
1) 생활권 탄소배출량 산정을 위한 산식 및 계수 검토 — 86
2) 탄소배출량 산정을 위한 계산식 및 모형 검토 — 95
3) 생활권 탄소배출·흡수량 산정 계수 및 배출량 산정방법 도출 — 98
3. 생활권 탄소중립 공간계획 요소 도출 — 100
1) 부문별 생활권 탄소중립 계획요소 검토 — 100
2) 탄소중립 생활권을 위한 계획요소 도출 — 117

제4장 생활권 탄소중립 공간계획 모형 개발

1. 생활권 탄소중립 공간계획 기본 모형 개발 — 123
1) 생활권 기본 모형 개발을 위한 검토 — 123
2) 모형 작성을 위한 사례 검토 — 125
2. 탄소중립 공간계획 시나리오 및 모형 유형화 — 136
1) 계획요소 특성에 따른 공간계획 시나리오 작성 — 136
2) 계획요소 시나리오를 적용한 공간계획 모형 개발 — 137
3) 모형별 토지이용 및 계획요소의 정량적 통계 — 145
3. 탄소 배출량 산정 및 결과 해석 — 150
1) 배출량 산정을 위한 조건 및 계수 설정 — 150
2) 탄소 배출량 산정을 위한 계산식 — 154
3) 탄소 배출량 산정 결과 — 159
4) 결과 해석 및 논의 — 166
4. 탄소중립을 위한 생활권 공간계획 최적화 모형 — 168
1) 최적화 모형 개발 개요 및 산식 — 168
2) 최적화 모형 조건 — 168
3) 최적화 시나리오 설정 — 170
4) 최적화 모형 결과 — 171

제5장 결론 및 제언

1. 탄소중립을 위한 생활권 공간계획 수립 방향 — 175
1) 생활권 탄소중립을 위한 공간계획 수립 방향 — 175
2) 탄소중립 지구단위계획 도입 방향 제안 — 177
2. 연구의 한계 및 의의 — 179
1) 연구 한계 — 179
2) 연구의 의의 및 후속 과제 — 180

참고문헌 — 181

SUMMARY — 189

표차례 CONTENTS

[표 1-1] 주요 선행 연구 및 본 연구의 차별성 — 10
[표 2-1] IPCC 제6차 평가보고서 WG3의 C1-C8 시나리오 — 15
[표 2-2] 2050 탄소중립 시나리오 최종(안) 총괄표 — 19
[표 2-3] 국내 탄소 배출량 중 건물 구성비 — 23
[표 2-4] 수송부문 온실가스 배출 관련 주요 지표 — 25
[표 2-5] 「도시군기본계획수립지침」에서 제시한 주요 탄소중립 계획방향 — 30
[표 2-6] 시나리오형 계획 기법의 추진 단계 — 33
[표 2-7] 미국 Brentswood 지역 도시내부 용도지역 변경 사례의 두 가지 시나리오 — 35
[표 2-8] 미국 Brentswood 지역 도시내부 용도지역 변경 사례의 최종 시나리오 — 36
[표 2-9] 지속가능한 접근 및 모빌리티 프레임워크의 세부 내용 — 39
[표 2-10] 다핵도시 Wotton City-Region과 일핵도시 Castlemore의 교통 부문 80%를 위한 시나리오별 탄소 배출 경로 — 41
[표 2-11] 한국 주거 생활권 개념 시기적 변화 — 44
[표 2-12] 국내 생활권 계획개념 흐름 — 44
[표 2-13] 생활권 규모 — 47
[표 2-14] 생활권 위계별 규모 선행연구 — 47
[표 2-15] 세종시 2040 탄소중립 5대 추진 전략 — 52
[표 2-16] 탄소중립단지 계획 적용방안의 항목별 특징 — 53
[표 2-17] 탄소중립 지향 생활권 공간 계획 사례의 규모 및 탄소중립 목표 — 55
[표 2-18] 탄소중립 추진을 위한 공간 위계별 특성 — 57
[표 3-1] 국내 지자체 온실가스 배출량 산정지침에서 정하고 있는 배출량 산정단계(Tier) — 62
[표 3-2] 지자체를 위한 인벤토리 세분화 — 63
[표 3-3] 석유제품 및 도시가스 온실가스 배출계수 — 64
[표 3-4] 석유제품 및 도시가스 에너지원별 순발열량 — 64
[표 3-5] 도시가스 용도별 정의 — 64
[표 3-6] 전력소비에 따른 온실가스 배출계수(Tier2) — 65
[표 3-7] 전기소비 용도별 정의 — 65
[표 3-8] 열사용에 의한 온실가스 배출계수 — 66
[표 3-9] 열 용도별 정의 — 66
[표 3-10] 하수처리 공정의 온실가스 배출계수 — 67
[표 3-11] 도시공간 계획요소별 이산화탄소 감축량 산정 알고리즘 — 68
[표 3-12] 탄소배출원으로서 도시특성지표 — 70
[표 3-13] 용도별 활동 및 온실가스 배출량 산정 — 71

[표 3-14] 스펀지 프로젝트 탄소배출량 산정방법 76
[표 3-15] 인벤토리 구축 자료조사 결과 79
[표 3-16] 도시 탄소배출 범주 80
[표 3-17] 전과정 평가의 유형별 이산화탄소 배출량(kg·CO2/m^3) 81
[표 3-18] 건물 전생애주기 단계별 탄소배출량 평가결과 82
[표 3-19] 라이프사이클 에너지 및 이산화탄소 원단위 83
[표 3-20] 건축물 부문 저탄소 녹색재생 기법을 적용한 탄소배출량 86
[표 3-21] 건축물 부문 설계요소별 탄소저감량 86
[표 3-22] IPCC 가이드라인을 통한 배출량 산정법 87
[표 3-23] 원단위를 활용한 배출량 산정법 87
[표 3-24] 흡수 부문 저탄소 녹색재생 기법을 적용한 탄소흡수량 88
[표 3-25] 녹지 부문 설계요소별 탄소저감량 88
[표 3-26] 이산화탄소 흡수량 산정식 89
[표 3-27] 교통수단 전과정평가를 위한 분석 자료 중 도로 부문 91
[표 3-28] 교통 부문 저탄소 녹색재생 기법을 적용한 탄소배출량 93
[표 3-29] 교통부문 설계요소별 탄소저감량 93
[표 3-30] 탄소배출·흡수량 산정을 위한 계수 및 산식 조사 종합 95
[표 3-31] 생활권 탄소배출·흡수량 산정 계수 및 배출량 산정방법 도출 99
[표 3-32] 수종별 연간 탄소흡수량(위: 교목 / 아래: 관목) 115
[표 3-33] 조사 개요 117
[표 3-34] 부문별 생활권 탄소중립 계획요소 선정 결과 118
[표 4-1] 행복도시 생활권 현황 비교 123
[표 4-2] 보행중심 도시를 위한 생활권 규모 비교 125
[표 4-3] 반경 600m 생활권 규모와 행복도시 사례 비교 125
[표 4-4] 저탄소 녹색시범마을 부문별 탄소배출량 126
[표 4-5] 저탄소 녹색시범마을 탄소감축량 127
[표 4-6] 행복도시 용도별 이산화탄소 배출량 128
[표 4-7] 신도시지역 생활권 단위 온실가스 배출량 128
[표 4-8] 지구단위계획의 토지이용계획 129
[표 4-9] 도시개발사업의 토지이용계획 130
[표 4-10] 계획·개발사업 별 기반시설 설치 기준 131
[표 4-11] 해외 보행친화적 블록 사례 133
[표 4-12] 행복도시 생활권별 토지이용 현황 분석 134
[표 4-13] 생활권 기본 모형의 용도별 면적 및 구성 135
[표 4-14] 탄소중립 계획 요소를 적용한 공간계획 시나리오 137
[표 4-15] 도로 다이어트에 따른 체계 변화 검토 138
[표 4-16] 공간계획 모형 개발을 위한 디자인 검토 140
[표 4-17] Clean-Energy 도시 형태 관련 International Cases & China Cases 142
[표 4-18] 국내 생활권 공간 형태 사례 143
[표 4-19] 탄소중립 계획 요소 시나리오별 공간계획 모형 개발 144

[표 4-20] 모형별 토지이용 및 계획요소의 정량적 통계 145
[표 4-21] 모형별 토지이용 및 탄소중립 계획요소의 정량적 통계 149
[표 4-22] 각 주거지블록에서 목적지별 이동 비율 151
[표 4-23] 생활권 모형에서의 각 주거 블록별 가중치 152
[표 4-24] 배출량 산정을 위한 조건 및 계수 154
[표 4-25] 생활권 기본 모형의 블록 간 거리 산정 결과 예시 157
[표 4-26] 모형별 공간계획 특성 및 탄소배출량 산정 결과 161
[표 4-27] 교통 부문 탄소배출량 산정 결과 162
[표 4-28] 건물 부문 탄소배출량 산정 결과 163
[표 4-29] 건물 신재생에너지 생산에 따른 탄소배출량 산정 결과 164
[표 4-30] 공원녹지를 통한 탄소흡수량 산정 결과 165
[표 4-31] 최적화 모형 도출을 위한 산식 및 계수 169
[표 4-32] 탄소배출 최적화 모형의 주거 유형별 조건 170
[표 4-33] 최적화 모형의 부문별 시나리오 171
[표 4-34] 시나리오별 최적화 모형 결과 비교 173
[표 5-1] 「지구단위계획 수립 지침」 개정 방향 178

그림차례 CONTENTS

[그림 1-1] 탄소중립을 위한 공간 중심으로의 접근 — 4
[그림 1-2] 연구 수행 과정 — 8
[그림 2-1] 넷제로 달성 경로 — 13
[그림 2-2] 탄소중립 관련 용어 구분 — 14
[그림 2-3] 시나리오별 21세기 예상 지구 온난화 범위 — 15
[그림 2-4] WRI가 제시한 온실가스 배출 저감을 위한 10가지 핵심 솔루션 — 16
[그림 2-5] 「2050 탄소중립」 추진전략의 비전 및 전략 체계도 — 17
[그림 2-6] 국토교통 탄소중립 로드맵 — 22
[그림 2-7] 지속가능한 접근 및 모빌리티 프레임워크 — 38
[그림 2-8] 다핵도시 Wotton City-Region과 일핵도시 Castlemore — 41
[그림 2-9] 보행 일상권의 개념 — 46
[그림 2-10] 근린주구, 뉴어바니즘, 그린어바니즘 — 48
[그림 2-11] 도보, 자전거, 전기 이동수단, 자동차를 통한 15분 반경 비교 — 49
[그림 2-12] 보행 권역으로 정리한 진화도 — 49
[그림 2-13] 보행자가 받아들일 수 있는 보행거리와 도시 면적 1km2 — 50
[그림 2-14] 국토·도시 탄소중립 정책의 기능 — 51
[그림 3-1] 온실가스 배출량 산정의 기본 방법 — 60
[그림 3-2] 도시 내 활동에 따른 온실가스 배출 부문 및 산정 과정 — 70
[그림 3-3] 상해 스펀지시티의 탄소배출량 산정을 위한 경계 및 인벤토리 — 75
[그림 3-4] 스펀지시티의 탄소배출과 흡수에 대한 생애주기적 흐름 — 75
[그림 3-5] 전과정 평가의 유형별 이산화탄소 배출량(kg·CO2/m^3) — 82
[그림 3-6] 건물의 $LCCO_2$ 배출량 평가 결과 — 83
[그림 3-7] 생활권 단위 공간계획을 통한 탄소배출 인벤토리 구축 — 85
[그림 3-8] 내부 연결성(Inter-plot) — 94
[그림 3-9] 외부 연결성(Inter-block) — 95
[그림 3-10] 수평적 복합이용 기본구상안 — 100
[그림 3-11] 개발밀도에 따른 모습 변화 — 101
[그림 3-12] 대중교통중심개발(TOD) 개념도 — 102
[그림 3-13] 바람길을 고려한 단지 배치 — 104
[그림 3-14] 지형에 다른 에너지 저감 효과 — 105
[그림 3-15] 복합환승센터 개념도 — 106
[그림 3-16] 도로 다이어트의 효과: 좌) 자전거 수단분담률('14년) / 우) 연세로 버스 승객 수 변화 — 107

[그림 3-17] 자율주행차와 PM을 고려한 가로 공간 109
[그림 3-18] 제로에너지건축물 의무화 로드맵 110
[그림 3-19] 콘크리트 옥상면과 옥상녹화 조성면의 열 변화 비교 111
[그림 3-20] 태양열·태양광 융복합 시스템(좌) 및 태양광 설치 주택단지(우) 112
[그림 3-21] 소형풍력 발전기 113
[그림 3-22] 수소 연료전지 발전소 등 에너지시설이 복합된 주거 공간 114
[그림 3-23] 재생에너지 전환을 위한 4대 요소 114
[그림 3-24] 1헥타르 당 forest의 탄소 흡수량 변화 115
[그림 3-25] 일본 요코하마 코호쿠 신도시의 그린매트릭스 개념도 116
[그림 4-1] 탄소배출량 산정을 위한 생활권 기본 모형의 공간계획 도면 135
[그림 4-2] 생활권 가로에 대한 체계와 기능의 다양화 사례 138
[그림 4-3] 도시 규모에 따라 적용가능한 공원녹지 확보 방안 139
[그림 4-4] MIT Energy Proforma에서 제시한 Clean-Energy 도시 분석을 위한 유형화 결과 141
[그림 4-5] 모형별 토지이용 및 공간계획 특성 146
[그림 4-6] 유클리디안 거리와 맨하탄 거리의 비교 148
[그림 4-7] 배출량 산정을 위한 이동거리 시나리오 155
[그림 4-8] 탄소배출량 산정 결과 해석 167
[그림 5-1] 연구 결과에 따른 생활권 탄소중립 공간계획 수립 방향 177

제1장 서론

1. 연구의 배경 및 필요성
2. 연구의 범위 및 방법
3. 선행연구 검토 및 본 연구의 차별성

1. 연구의 배경 및 필요성

1) 연구 배경 및 필요성

(1) 탄소중립을 위한 건축·도시 공간 조성 정책 현안 대두

□ 글로벌 및 국가 핵심 정책 어젠다로서 '탄소중립' 정책 추진 등에 따른 탄소중립 사회로 전환 중

탄소중립은 인간의 활동에 의한 온실가스 배출을 최대한 줄이고, 남은 온실가스는 흡수(산림 등), 제거(CCUS)해서 실질적인 배출량이 0(Zero)이 되는 개념이다. 배출되는 탄소와 흡수되는 탄소량을 같게 해 탄소 '순배출이 0'이 되게 하는 것으로, 이에 탄소 중립을 '넷-제로(Net-Zero)'라고 쓰기도 한다(탄소중립 녹색성장위원회 n.d.).

지구 온난화로 폭염, 폭설, 태풍, 산불 등 이상기후 현상이 세계 곳곳에서 나타나고 있고, 높은 화석연료 비중과 제조업 중심의 산업구조를 가진 우리나라도 최근 30년 사이에 평균 온도가 1.4℃ 상승하며 온난화 경향이 더욱 심해지고 있다(KDI 경제정보센터 2022).

이에, 국제사회는 기후변화 문제의 심각성을 인식하고 이를 해결하기 위해 선진국에 의무를 부여하는 '교토의정서' 채택(1997년)에 이어, 선진국과 개도국이 모두 참여하는 '파리협정'을 2015년 채택했고, 국제사회의 적극적인 노력으로 2016년 11월 4일 협정이 발효되었다(한국지식재산연구원 n.d.).

파리협정의 목표는 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승을 2℃ 보다 훨씬 아래(well below)로 유지하고, 나아가 1.5℃로 억제하기 위해 노력해야 한다는 것이다.

이러한 공통적 인식 하에서 세계 각국은 2016년부터 자발적으로 온실가스 감축 목표를 제출했고, 모든 당사국은 2020년 까지 '파리협정 제4조 제19항'에 근거해 지구평균기온 상승을 2℃ 이하로 유지하고, 나아가 1.5℃를 달성하기 위한 장기저탄소발전전략(LEDS)[1]과 국가온실가스감축목표(NDC)[2]를 제출하였다.

이러한 목표에 대한 실천적 차원에서, 공공부문에서는 탄소국경세 도입 등 기후변화 대응을 위한 규제를 강화하고, 민간부문도 RE100 참여, ESG 투자 등 친환경 경영을 확대해 나가고 있는 실정이다.

□ 건물과 도시공간의 온실가스 감축 전략으로서 「국토교통 2050 탄소중립 로드맵」 수립

건축 및 도시공간의 탄소중립과 관련하여 정부는 2050년까지 "국민의 생활터전이 되는 모든 공간과 이동수단의 탄소중립"을 목표로 건물, 교통, 국토와 도시, 국외감축 분야에서 탄소중립을 위한 다양한 과제를 추진하고 있다. 이에 '30년까지 건물 32.8%, 수송 37.8% 탄소감축('18 比)을 위한 구체적 실행방안을 마련 중이다.

건물 부문에서는 건물의 에너지성능을 측정·기록한 데이터 기반으로 생애주기별 건물 관리체계를 구축하고, 이를 기반으로 신축건물의 제로에너지화, 기축건물의 그린리모델링 확산을 꾀하고 있다. 2030 국가온실가스감축목표(NDC) 상향에 맞춰 공동주택은 제로에너지건축 의무화를 조기적용(공공: `23~, 민간: `24~)하고, 건물 부문의 탄소감축 활동(설비 설치 등)을 활성화하기 위하여, 주택도시기금을 활용한 금융지원 등을 검토·추진하고 있다.

국토를 포함한 도시 부문에서는 주거·산업·교통 등에 사용되는 도시의 주 에너지원을 수소로 전환한 수소도시, 에너지자립, 녹지 확충, 저탄소 교통물류체계 등을 지향하는 스마트그린산업단지 등 성과사례와 함께 도시 내에 공원·녹지 등 탄소중립 공간도 조성·확대하고자 한다.

---

1) LEDS : Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies (장기저탄소발전전략)

2) NDC : Nationally Determined Contribution (국가 온실가스 감축 목표, 5년 주기 제출)

(2) 건물 단위에서 확대하여 공간 단위로의 탄소중립 전략 필요

□ 지역과 도시 차원에서의 탄소배출 관리 중요성

UN에 따르면 글로벌 경제활동, 에너지 소비와 탄소배출은 전세계 면적의 2%에 불과한 도시에 집중되어 있으며, 특히 전체 인구의 55%, GDP 생산량의 80%, 탄소 배출량의 75%, 에너지 소비율의 66%가 도시에 집중되어 있다.[3] 또한 도시거주인구비율은 2019년 55% → 2050년 68%로 증가하고, 도시면적 비율은 2019년 1.5백만㎢ → 2.5백만㎢로 확대될 것으로 예측되고 있다.

우리나라는 전체 국토 면적 17%에 불과한 도시에 92%의 인구가 집중되어 있기 때문에 도시로의 집중이 더욱 심각한 상황이다. UN에서는 도시가 인간 거주 수용성을 높이고 자원 효율성, 기후변화 완화 및 적응, 재난 복원력을 위한 통합적인 정책과 계획을 구현하는 방안을 마련해야 한다고 강조하고 있다.[4]

□ 도시계획 법제 개편에 따른 대응 및 공간 전략 마련 필요

'21년 12월 국토부는 지역·도시 차원에서 탄소중립을 실현하기 위해 도시·군기본계획과 도시개발계획을 수립하는 경우 탄소중립 계획 요소 등을 반영토록 도시·군기본계획 수립지침 및 도시개발 업무지침을 개정·시행하였다.[5] 그리하여 지역·도시 단위에서 탄소중립 실현을 위한 제도적 기반이 마련됨에 따라, 이에 대한 이행 수단으로서 도시계획과 탄소중립 전략이 결합된 계획적·설계적 대안 마련을 위한 연구가 시급히 이루어져야 할 필요가 있다.

□ 도시라는 공간 단위에서 탄소중립이라는 정량적 목표치를 설정함으로써 상호 보완과 시너지 효과 창출 가능

탄소중립을 통한 기후변화에 대한 대응은 완화와 적응의 양대 축으로서 완화는 배출량을 줄이고 흡수원을 늘리는 전략을 취해야 한다. 적응은 지역사회와 생태계가 변화 주체가 되어야 하고, 도시 차원의 탄소중립은 기후변화에 대한 완화와 적응을 동시에 구현하

---

3) UN(2019). Global Sustainable Development Report. p.84.

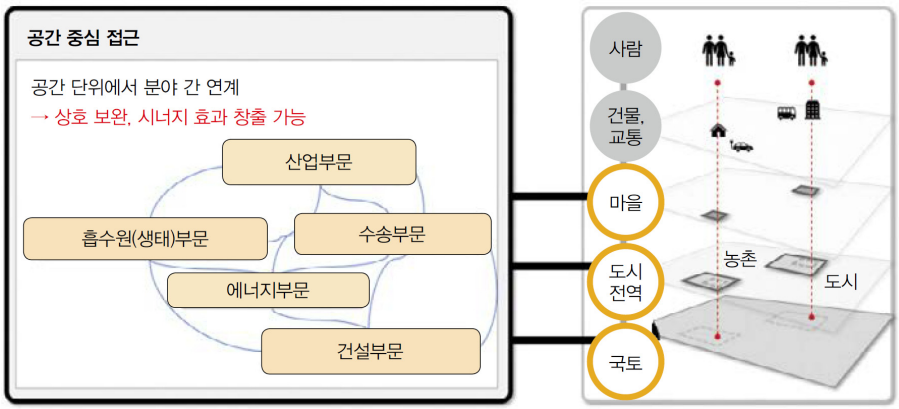
4) Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development(n.d.). Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable. https://sdgs.un.org/goals/goal11/ (접속일: 2022.10.01.)

5) 국토교통부(2021). 지역(공간) 단위 탄소중립 실현을 위한 기반 마련. 도시계획 수립 및 도시개발 추진시 공간적 탄소중립 해법 검토: 30일부터 도시개발·군기본계획수립지침·도시개발업무지침 개정안 시행. 12월 28일자 보도자료. p.1.

고자 하는 통합적 관점에서 다루어져야 한다.[6]

또한, 도시라는 공간 단위에서 탄소중립이라는 정량적 목표치를 설정함으로써 상호 보완과 시너지 효과 창출이 가능하다. 건물을 포함한 외부공간을 탄소중립 차원에서 보완적으로 활용하고, 탄소 흡수, 탄소 배출저감을 위한 에너지 생산 등의 노력을 통해 공간 단위 온실가스 감축으로 확대할 수 있는 것이다.

도시공간에서는 에너지, 건물, 수송, 농·축산, 흡수원 등 다양한 분야가 상호 영향을 주고받기 때문에 이를 하나의 시스템으로 보는 통합적 접근도 필요하다. 또한, 공간 내에서 다양한 조건과 시나리오를 구성하여 탄소 저감과 흡수 효과를 높이는 방안을 고민함으로써 실효성도 제고할 필요가 있다.



[그림 1-1] 탄소중립을 위한 공간 중심으로의 접근
출처: 박종순 외(2021). 탄소중립도시 실현을 위한 국토구상. 국토연구원. 국토 통권 479호. p.7.

6) 이명주(2020). 기후위기시대의 건축물 중심 제로에너지도시. 건축공간연구원. 건축과 도시공간. Vol.40. p.35.

2) 연구 목적

본 연구는 건축과 도시공간에서의 탄소중립을 위한 주요한 전략으로 생활권 단위에서의 최적화된 공간계획 모형을 개발하고, 이를 도시계획·개발 사업 추진시 도입·적용하는 방향을 제시하는 것을 목적으로 한다. 세부적인 내용은 다음과 같다.

(1) 생활권 단위 공간에 대한 도시계획·설계 차원에서의 탄소 배출량 저감 및 흡수 방안 발굴

생활권 탄소중립 모형 개발을 위해 우선적으로 생활권 단위 공간에 대한 도시계획·설계 차원에서의 탄소 배출량 저감 및 흡수 방안들을 발굴하는 과정이 요구된다. 그리하여 선행 문헌 연구를 통해 그간 탄소중립 도시계획을 위해 도출된 계획 기법 및 요소들에 대해 조사하고, 이를 종합적으로 분석한다.

탄소중립 계획요소의 도출은 지자체, 도시, 지역·지구, 마을 등 다양한 공간 단위 중 생활권 규모의 공간 계획·설계 시 적용 가능한 탄소 배출량 저감 및 흡수를 위한 계획 요소들로 선별하여 발굴한다.

(2) 생활권 공간에서의 탄소 배출저감 및 흡수 최적화 모형 개발

본 연구의 핵심 성과물로서 생활권 공간에서의 탄소 배출저감 및 흡수 최적화 모형을 작성하고 개발한다. 모형의 개발은 탄소중립 계획요소들을 다양한 시나리오에 따라 적용함으로써 유형화하고, 이를 통해 생활권 공간 특성별 탄소 배출저감 및 흡수 최적화 모형을 도출할 수 있도록 한다.

탄소중립 효과 분석을 위해 현행 계획기법을 적용한 생활권 기본 모형과 시나리오별 최적화 모형들과의 탄소배출량을 비교하고, 저감·흡수 결과를 분석한다.

(3) 탄소중립을 위한 지구단위계획 수립 방향 제안

탄소중립 공간계획 모형 개발을 통해 지구단위계획 수립 또는 재정비시 탄소중립에 기여할 수 있는 계획항목 및 세부 지침들을 가이드라인 형식으로 제시하고, 탄소중립 실현을 위한 도시계획 정책방향 제안으로서 토지이용, 교통, 건축물, 에너지, 공원녹지 등 생활권 공간계획 요소들을 적용한 지구단위계획 수립 방향을 제안한다.

2. 연구의 범위 및 방법

1) 연구범위

□ 생활권의 규모와 범위 설정

생활권의 규모와 범위는 소생활권(보행권), 중생활권(소도시), 대생활권(대도시)으로 분류할 수 있다. 선행연구를 종합한 결과, 본 연구에서 소생활권은 도보 10분 내외로 도달 가능한 거리인 약 600~700m의 반경과, 5,000~6,000명의 인구를 규모로 설정한다. 인구 규모는 개발밀도에 따라 10,000~20,000명까지 확대할 수 있다.

이러한 생활권의 규모와 범위 설정에 대해서는 행정중심복합도시(이하 행복도시) 내 소생활권의 면적과 인구, 공간구조와 시설들이 주요한 지향점으로 고려될 수 있다. 행복도시 내 건설된 소생활권은 사람 중심의 보행친화도시를 목표로 계획되어 탄소중립 실현을 위한 계획 요소들이 반영되어 있다. 평균적으로 행복도시 소생활권은 1백만~2백만 ㎡의 면적과 1만~2만 세대의 인구 규모를 가진다.

□ 생활권 공간계획 시 적용 가능한 탄소 배출·저감 및 흡수를 위한 계획 요소

국토 차원에서부터 지자체, 대도시, 중-소도시, 지역·지구, 마을 등 다양한 공간 위계에서 탄소 배출저감과 흡수를 위한 계획 요소들이 발굴되어 왔다. 본 연구에서는 생활권의 규모와 범위(면적, 인구, 공간구조, 시설 등)에서 적용 가능한 탄소 배출·저감 및 흡수를 위한 계획 요소들을 선별하고, 이를 활용하여 다양한 시나리오에 따른 생활권 탄소중립 모형을 개발하고자 한다.

□ 다양한 시나리오를 적용한 생활권 공간계획 모형 개발

탄소 배출을 저감하고 흡수할 수 있는 계획 요소들은 생활권이라는 한정된 공간에서 선택적으로 적용될 수밖에 없다. 이러한 선택적 적용에 대해 다양한 경우의 수를 시나리오로 개발·적용함으로써 공간계획 모형의 결과물을 제작하고 이에 대한 탄소배출 저감효과를 산출하고자 한다.

□ 탄소중립 공간계획 모형의 실현을 위한 정책 방향 제시

시나리오별 탄소중립 공간계획 모형과 최적화 모형에 대한 정책화 방안으로 지구단위계획 수립지침에서의 적용 방향을 제시하고자 한다.

2) 연구방법

(1) 문헌 조사 및 관련 정책 검토

□ 탄소중립을 위한 도시계획·설계 기법과 계획 요소 발굴 및 배출량 산정 방법 도출

도시공간에서의 저탄소 계획요소 발굴과 배출량 산정 등으로 연구를 수행한 문헌들을 조사·분석하여 계획요소들을 종합하고, 배출량 산정식과 배출계수 등 산정 방법에 필요한 기초자료들을 도출한다.

□ 생활권 단위 탄소중립 공간계획 모형 개발의 시급성과 당위성 제시를 위한 관련 정책 및 제도 여건 변화 조사

'20년도에 국가차원에서의 「2050 탄소중립 추진전략」을 시작으로 '21년에 「국토교통 탄소중립 로드맵」에서 건물과 도시 분야에서 실천해야할 전략들이 제시되었으며, 그 세부 이행을 위해 도시·군기본계획 수립과 도시개발사업 업무처리에 대한 지침들에서 탄소중립 관련 사항들에 대한 개정이 이루어졌다.

이러한 정책과 제도 여건 변화 속에서 개발사업 단위의 입체 공간을 대상으로 한 탄소중립 실천을 위한 전략 제시가 시급히 요구되고 있고 당위적인 연구 주제임을 강조한다.

(2) 분야별 전문가 자문단 구성을 통한 의견수렴

□ 생활권 공간계획에서 적용 가능한 탄소 배출량, 저감량, 흡수량에 대한 산정 방법과 배출계수 등 도출

기존에 연구된 자료들 중 배출계수와 산정 방법에 대해서는 최신화와 정확성에 대한 검증이 이루어질 필요가 있다. 선행 문헌들에서 도출된 공간계획 구성(공간구조 및 토지이용, 교통, 건축물, 에너지, 공원·녹지)에 대한 부문별 배출량 산정 공식과 배출계수 등을 재검토하고, 새롭게 만들어져야 하는 계획요소별 산정 방법도 제시하도록 한다.

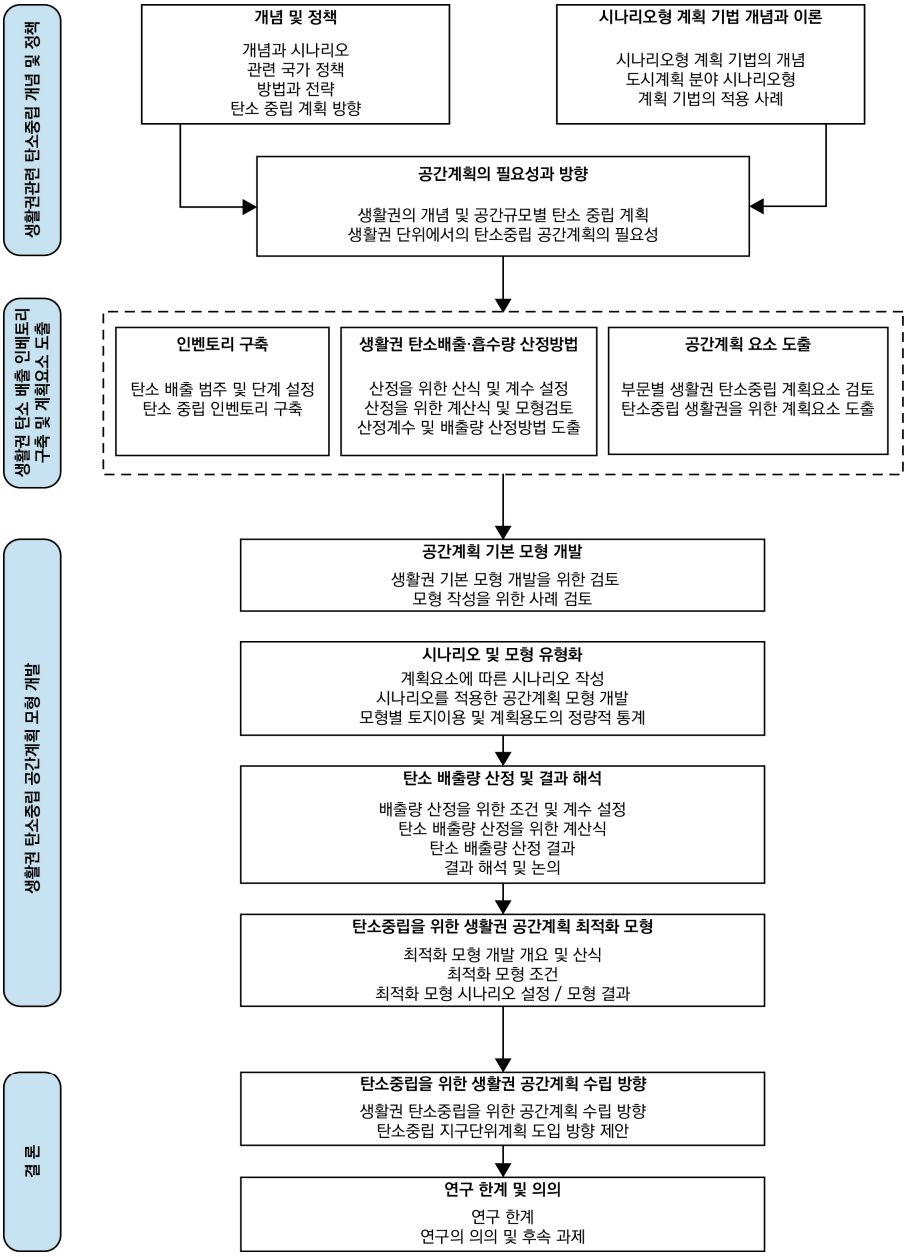
(3) 시나리오형 공간계획 기법 적용 탄소중립 모형 개발

□ 탄소중립 목표 실현을 위해 공간계획 요소들을 활용하여 다양한 시나리오 개발 및 유형별 최적화 모형 도출

□ 생활권 단위 탄소중립 공간계획 모형 개발을 위해 도시·건축 통합설계 전문 건축설계사무소와 협동 연구 수행 및 기술 협력 체계 구축

3) 연구 수행 과정

본 연구는 다음 [그림 1-2]와 같은 과정으로 수행되었다.



[그림 1-2] 연구 수행 과정
출처: 연구진 작성.

3. 선행연구 검토 및 본 연구의 차별성

1) 선행연구 검토

□ 건축·도시 공간의 저탄소를 목표로 계획과 설계 방향들을 도출하고 정책을 제안한 연구들이 다수 수행

2000년대 저탄소 도시와 관련하여 도시계획 분야에서 연구들이 활발히 진행되었다. 유광흠 외(2009; 2012)는 온실가스 감축과 친환경 도시를 위한 도시설계 요소를 도출하고 친환경 근린개발의 비용과 효과를 분석한 연구와, 기존 도시공간 개선사업에 저탄소 계획요소 도입 활성화 정책 연구를 수행한 바 있다.

조상규 외(2010)는 저탄소 공동주택의 계획·설계 요소를 도출하고, 기술 도입에 따른 비용과 온실가스 감축 효과를 분석하였고, 왕광익(2013)은 탄소중립 친환경 도시를 위한 계획요소 도출과 시업사업 추진 방안들을 제시한 연구를 수행하였다.

또한, 김승남 외(2014)는 용도지역별·건물유형별 온실가스 배출특성과 이론적 온실가스 감축률 분석 및 에너지성능·온실가스 배출 기준을 제시한 연구를 수행한 바 있다.

□ 공간계획 모형 개발과 관련하여서는 에너지 분야를 대상으로 한 연구들이 중점적으로 진행

왕광익(2016)은 행복도시를 대상으로 제로 에너지 스마트 도시 조성을 위한 모델개발 및 계획방향을 제시하고 제로 에너지 스마트 도시 조성을 위한 모델을 제안한 연구를 수행하였고, 임윤택(2016)은 U-시티 공간계획 및 설계기술 개발 R&D 연구를 수행하였으며, 지구단위계획 수립지침 개발, 체험지구 기본계획 및 실시계획 구상, 시스템 상세설계서 및 프로토타입을 제시하는 연구를 수행한 바 있다.

이명주(2017)는 공동주택에 최적화된 패시브설계 요소기술을 선정하고, 에너지효율, 에너지비용, 이산화탄소 발생에 있어 한국형 넷제로 공동주택 최적화모형을 제시하는 연구를 수행하였고, 장지인 외(2018)는 스마트/제로에너지 기술을 고려한 에너지소비저감 도시계획 기법 발굴 및 전략들을 제안하는 연구를 수행하였다.

손세형 외(2019)는 스마트 도시공간 및 시설물 통합운영관리 모델 개발 연구에서 스마트도시공간과 시설물에 대한 유형화 및 정보 구축을 통해 모바일 기술과 통합운영관리 모델 등 R&D를 수행하고 서비스 검증과 운영관리 방안을 제안하였다.

2) 선행연구 한계 및 본 연구의 차별성

□ 선행연구들에서는 배출량 산정을 위한 산식 모델들이 주로 연구결과로 제시되었으며, 실제 도시계획과 설계를 위해 필요한 시나리오를 적용한 시각화된 탄소중립 계획 모형 제시는 미흡

선행연구 검토 결과, 건축과 도시 공간에서의 탄소배출량을 추정하고, 저탄소 계획을 위한 요소들을 발굴하여 이를 적용함으로써 효과를 분석한 연구들이 수행됨을 살펴보았다. 이는 본 연구의 주요 내용인 생활권 범위를 대상으로 한 탄소배출 저감과 흡수를 위한 계획요소들을 도출하는 과정에서 많은 참고와 인용이 되었다.

반면, 본 연구의 핵심 성과물인 다양한 시나리오 적용에 따른 계획·설계 차원에서의 공간계획 모형을 개발하고 제시한 연구들은 미흡하다. 선행 연구들은 탄소배출량 산정을 위한 회귀모형 등 산술적 모형들을 제시하는 것이 주요하였기 때문이다.

□ 본 연구는 생활권 공간을 규정하고 이에 최적화된 탄소중립 계획·설계 모형을 개발하는 것으로 차별성을 가짐

본 연구에서는 탄소배출 저감과 흡수를 위한 계획요소의 적용을 생활권으로 규정된 공간에서 적용 가능하도록 선별하여 도출하고, 다양한 시나리오 구성을 통해 시각화된 공간계획 모형과 탄소 배출저감 및 흡수 성능을 비교분석하여 시각화된 공간계획 최적화 모형을 개발하는 것으로 기존 연구들과 차별성을 가진다.

[표 1-1] 주요 선행 연구 및 본 연구의 차별성

구 분		선행연구와의 차별성		
		연구목적	연구방법	주요연구내용
주요선행연구	1	•과제명: 친환경 근린개발을 위한 도시설계 기법연구 •연구자(년도): 유광흠 외(2009) •연구목적: 온실가스 감축 계량목표 설정과 실천방안 마련을 위해 친환경녹색도시 설계기법 제시 및 탄소저감 정책수립 지원	•이론적 배경 및 사례조사 •현행 도시설계기법 검토 및 변화대상 요소 도출 •친환경 도시설계요소의 비용대비 효과 계량 검증 •국내외 정책지원 사례 종합분석 및 적용방안 제안	•친환경 근린개발의 정책적·이론적 배경 •국내외 사례연구 동향 분석 •온실가스 감축과 친환경 도시설계 요소 도출 •친환경 근린개발의 비용과 효과 분석 •친환경 근린개발의 실현을 위한 정책지원 방안
	2	•과제명: 저탄소 에너지절약형 공동주택 디자인을 위한 정책방향 연구 •연구자(년도): 조상규 외(2010) •연구목적: '친환경주택의 건설기준 및 성능'에 의한 기술	•국내·외 문헌 및 정책 동향 조사 •국내 아파트 온실가스 배출 특성 분석 •저탄소 계획 및 설계요소 도입 비용과 효과 분석 •정책 제언	•저탄소 공동주택 관련 국제적 논의사항, 관련된 국내 정책·제도 조사 •친환경과 저탄소, 제로에너지 빌딩 개념 조사 •우리나라 아파트의 온실가스 배출 특성을 조사하고 온실가

구 분		선행연구와의 차별성		
		연구목적	연구방법	주요연구내용
		요소 조합이 공동주택의 디자인 요소와 결합되었을 때의 온실가스 감축 효과와 비용에 대한 실증적 근거 마련		스 배출에 영향을 미치는 영향요인 도출 •저탄소 공동주택의 계획·설계 요소를 도출하고, 기술 도입에 따른 비용과 온실가스 감축 효과 분석
	3	•과제명: 도시공간개선사업의 저탄소 계획요소 적용에 관한 연구 •연구자(년도): 유광흠 외(2012) •연구목적: 기존 도시공간의 저탄소 녹색도시 전환을 목표로 기존 도시공간 개선사업에 저탄소 계획요소 도입 활성화를 위한 정책방향과 정책과제를 제안하고자 함	•국내·외 문헌 및 사례 조사 •해외 저탄소 녹색도시공간 전환 사례분석 •저탄소 계획요소 적용가능성 검토 •인증제를 통한 저탄소 계획요소의 탄소저감 효과 분석	•도시공간 저탄소 계획요소 인벤토리 구축 •해외 저탄소 녹색도시공간 전환 사례분석을 통한 저탄소 계획요소의 적용과정 •국내 도시공간개선사업 추진과정 •국내 저탄소 계획요소 적용현황 •추가적인 저탄소 계획요소 적용가능성 검증 •도시공간개선사업의 저탄소 녹색도시화 추진방안 도출
	4	•과제명: 탄소중립 친환경도시 조성 추진계획 연구 •연구자(년도): 왕광익 외(2013) •연구목적: 기존의 저탄소 녹색도시와 차별화된 탄소중립 친환경 도시 추진을 위한 개념 정립, 계획요소 도출, 시범사업 추진방안 제시	•문헌 및 사례조사 •정책 조사 및 비교 •정책 비교분석	•탄소중립 친환경도시 이론 고찰 •국내외 사례 조사 •탄소중립 친환경도시 계획요소 도출 •탄소중립 친환경도시 시범사업 추진방안 제시
	5	•과제명: 용도지역제도를 고려한 건물부문 온실가스 배출량 관리정책 연구 •연구자(년도): 김승남 외(2014) •연구목적: 신축 건축물 에너지 성능규제의 한계 개선 및 성능기반 토지이용규제를 위한 기준 제시	•문헌 및 이론 연구 •국내외 정책 및 제도 사례연구 •계량분석 연구(에너지 및 공간정보의 통합·분석)	•건물부문 온실가스 감축정책의 주요 내용과 한계, 녹색건축 에너지 온실가스 감축효과 등 검토 •성능기반 용도지역제도 등 건축물 온실가스 감축 목적의 사례연구 •용도지역별·건물유형별 온실가스 배출특성과 이론적 온실가스 감축률 분석 및 에너지성능·온실가스 배출 기준 제시
	6	•과제명: 제로에너지 스마트 도시 조성방안 연구: 세종시 건설지역 일부 생활권을 중심으로 •연구자(년도): 왕광익(2016) •연구목적: 행복도시 제2단계 건설의 청사진으로 스마트시티기술이 종합적으로 적용되는 제로에너지 도시 조성을 추진중으로 이에 따른 기본방향과 비즈니스 모델 등 제안	•기존 문헌을 통하여 제로에너지 및 제로에너지 스마트 도시에 대한 개념과 주요 내용을 검토 •기존 연구자료의 계획기법 등 검토를 통하여 세종시 대상지역에 적합한 제로에너지 스마트 도시 조성을 위한 계획요소 등을 발굴 •제로 에너지 타운 조성을 위하여 도출된 계획요소를 통한 최적 모델을 개발하고, 이를 사례지역에 적용하여 최적의 대안을 제시	•제로 에너지 스마트 도시의 개념 정립 •제로 에너지 스마트 도시 관련 국내·외 사례 분석 •제로 에너지 스마트 도시 조성을 위한 모델개발 및 계획방향 •사례지역 제로 에너지 스마트 도시 조성 방안
	7	•과제명: U-City 공간계획 및 설계기술 개발 •연구자(년도): 임윤택 외(2016) •연구목적: -도시광역단위 U-City 공간	•행정규칙 등 법제도 검토 •시뮬레이션 기법 사례 조사 등 이론 및 문헌 고찰 •실시계획 수립 및 3차원 지도 등 성과물 제시	•도시광역단위 U-City 공간계획을 위한 기반 구축 •U-지구단위계획 수립지침 개발 •주거지형 U-City 체험지구 실시계획

구 분		선행연구와의 차별성		
		연구목적	연구방법	주요연구내용
		계획을 위한 기반 구축 -U-지구단위계획 수립지침 개발 -주거지형 U-City 체험지구 실시계획 -U-Special Zone 계획지원 시스템 상세설계서 개발		•U-Special Zone 계획지원 시스템 상세설계서 개발
	8	•과제명: 한국형 제로에너지 공동주택의 최적화모형 연구 •연구자(년도): 이명주(2017) •연구목적: 우리나라 공동주택에 최적화된 패시브설계 요소기술을 선정하고, 에너지효율, 에너지비용, 이산화탄소 발생에 있어 한국형 넷제로 공동주택 최적화모형 제시	•제로에너지건축물 개념 정립 •공동주택 표준모델 선정 •2025년 표준모델이 제로에너지 주택성능 달성을 위한 실증적 분석	•국내외 제로에너지건축물 정책 분석 •패시브 설계요소 기술 성능 강화 방안 및 에너지요구량 절감률 산정 •액티브설계 기술별 에너지소요량 절감률 산정 •넷제로 달성방법 및 에너지원 공급방식별 분석 •한국형 넷제로 표준공동주택 최적화모형 제시
	9	•과제명: 스마트/제로에너지 도시계획 전략 연구 •연구자(년도): 장지인 외 3인(2018) •연구목적: 스마트/제로에너지 기술을 고려한 에너지소비저감 도시계획 기법 발굴 및 전략 제안	•이론 고찰 및 문헌 연구 •해외 사례 연구 •시사점 도출 및 전략 제시	•지속가능한 도시형태 등 이론 고찰 •스마트/제로에너지 도시 건설 해외 사례 연구 •스마트/제로에너지 도시계획 원칙 도출 및 제안
	10	•과제명: 스마트 도시공간 및 시설물 통합운영관리 모델 개발 •연구자(년도): 손세형 외(2019) •연구목적: -도시의 통합적 관점에서 효율적으로 도시시설물을 통합적 운영 관리함으로서 도시문제를 해결하고, 산업간 융합을 통해 신사업 영역을 창출 -중국 칭화대와의 공동연구를 통한 중국 및 세계시장 진출을 위하여 스마트 도시공간 및 시설물 통합운영관리 모델 개발	•도시시설물 유형 및 특성 분석 •시설물 DB 구축 및 자료 분석 •모바일 요소기술, 통합운영관리모델 등 R&D 수행 •서비스 검증 및 운영관리 방안 제안	•스마트 도시시설물 운영관리 기술개발을 위한 기반 구축 •스마트 도시 시설물 관리를 위한 데이터베이스 구축 •스마트 도시 시설물 관리를 위한 모바일 요소기술 개발 •클라우드 서비스 환경의 도시시설물 통합운영관리 모델 개발 •시범서비스를 통한 효율화 검증 및 국내·외 보급, 확산방안 마련

본 연구	•생활권 공간 단위에서의 탄소배출량 저감 및 흡수 방안 발굴 •생활권 공간에서의 탄소중립 모형 개발 •생활권 탄소중립을 위한 제도 개선 방향 제안	•문헌 및 정책 고찰을 통한 생활권 개념 설정 및 탄소배출 인벤토리 구축 •전문가 의견수렴을 통한 생활권 탄소 중립 계획요소 도출 •시나리오형 계획 기법 적용 탄소중립 모형 유형화 및 최적화 모형 개발 •생활권 탄소중립 실효성 제고를 위한 도시계획 제도 개선 방향 제안	•생활권 탄소중립 개념 및 정책 조사 •생활권 탄소배출 인벤토리 구축 및 계획요소 도출 •생활권 탄소중립 공간계획 모형 개발 •탄소중립을 위한 생활권 공간계획 수립 방향

출처: 연구진 작성.

제2장 생활권 관련 탄소중립 개념 및 정책

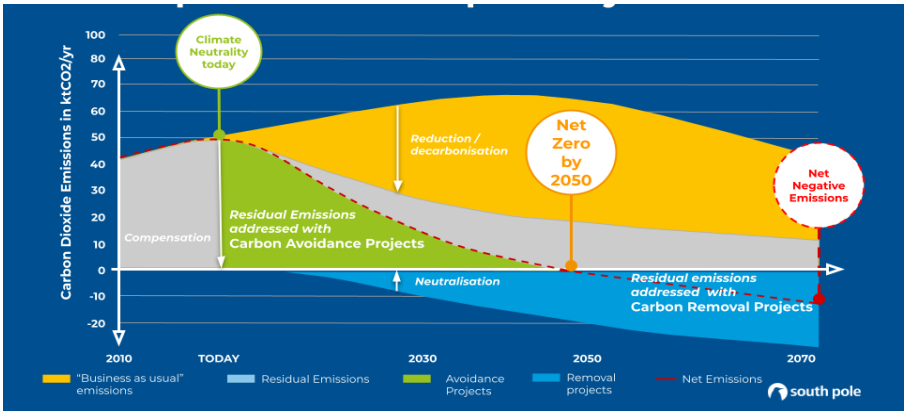
1. 탄소중립 관련 개념 및 정책
2. 시나리오형 계획 기법에 대한 개념과 이론
3. 생활권 단위 탄소중립 공간계획의 필요성과 방향

1. 탄소중립 관련 개념 및 정책

1) 탄소중립 개념과 시나리오

(1) 탄소중립의 개념

탄소중립은 대기 중 온실가스 농도가 더 이상 증가되지 않도록 순 배출량이 0이 되도록 하는 것으로, '넷-제로(Net-Zero)'라고도 불린다. 탄소중립, 또는 넷-제로를 위해서는 우선적으로 온실가스 배출을 최대한 줄이고, 남은 온실가스는 숲 복원 등으로 흡수량을 증가시키거나, 기술을 활용하여 제거하여 실질적인 배출량이 0이 되도록 하여야 한다.



[그림 2-1] 넷제로 달성 경로
출처: South Pole(2021). A simple guide to climate neutral, net zero and climate positive.
https://www.southpole.com/blog/guide-to-climate-neutral-net-zero-climate-positive(접속일: 2022.10.20)

기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 '넷제로(net-zero)'를 이산화탄소를 포함하여 1997년 12월 교토의정서에서 규정한 6대 온실가스(이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 수소불화탄소, 과불화탄소, 육불화황) 등 모든 온실가스의 순배출을 제로화하는 개념으로 정의한다.[7] 또한, 넷제로의 경우 '실질적' 온실가스 감축만 인정하는 반면, 탄소중립은 CDM 등 타지역에서 감축하는 활동 또한 온실가스 감축 활동으로 인정하는 개념으로 활용된다.

	Net zero / climate neutral	Carbon neutral	Carbon negative / carbon positive	Climate positive	Zero carbon	Zero emissions
CO2 only	✗	✓	✓	✗	✓	✗
All greenhouse gases (CO2, CH4, N2O, etc.)	✓	✗	✗	✓	✗	✓
Emissions reduced	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Emissions offset	✓	✓	✓	✓	✗	✗

[그림 2-2] 탄소중립 관련 용어 구분

출처: IndiaSpend(2020). Why India Can't Match China's Net-Zero Emissions Pledge. https://www.indiaspend.com/why-india-cant-match-chinas-net-zero-emissions-pledge/(접속일: 2022.10.20)

(2) 탄소중립을 위한 솔루션과 주요 시나리오

IPCC는 2015년 파리 협정 채택 시 합의된 1.5°C 목표의 과학적 근거를 마련(2018)하고, 2100년까지 지구 평균온도 상승폭을 1.5℃ 이내로 제한하기 위해서는 전 지구적으로 2030년까지 이산화탄소 배출량을 2010년 대비 최소 45% 이상 감축하고, 2050년경에는 온실가스 배출 넷제로를 달성하여야 한다는 경로를 제시하였다.[8][9]

2022년에 발행된 IPCC 제6차 평가보고서에서는 2020년까지 시행된 정책이 지속된다고 가정 시, 지구 온도가 2100년에 3.2℃까지 상승할 것으로 예상하였다. 또한. 1.5℃ 지구온난화 제한 목표를 달성하기 위하여 전 세계 온실 가스 순 배출량을 2019년 대비 2030년 까지 43%, 2050년까지 84% 감축해야 한다는 내용을 제시하였다. 또한 1.5℃ 상승 시점을 3년 전 특별보고서(2030-2052년)에 비해 10년(2021-2040년) 앞당겨 제시하였다. WG3 보고서에서는 시나리오 경로를 C1-C8 카테고리로 구분하였다.

7) 김익(2020). 국내IP 환경동향보고: 넷 제로(Net-zero)의 의미와 활용. 환경부·한국환경산업기술원. p.5.

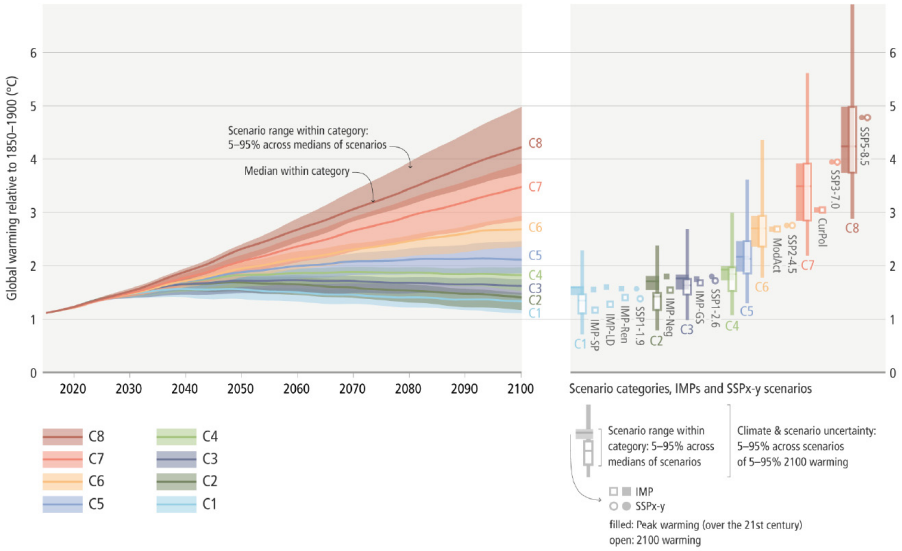
8) NET ZERO 2050 Climate Foundation(n.d.). 넷제로 2050 기후재단: 넷제로란?. http://netzero2050.or.kr/theme/sam38/html/content01.php/ (접속일: 2022.10.01.)

9) 한웅용 외(2021). 탄소중립 달성을 위한 정부 연구개발 정책 및 투자방향. 한국과학기술기획평가원. p.1.

[표 2-1] IPCC 제6차 평가보고서 WG3의 C1-C8 시나리오

범주	의미	참고
C1	- 2100년까지 50% 이상의 확률로 온난화를 1.5˚C로 제한 - 21세기 동안 67% 이하의 확률로 1.5˚C의 온난화에 도달하거나 초과	목표지점보다 더 가지 않거나 제한적적으로 목표지점보다 더 가는 식으로 온난화를 1.5˚C로 제한하는 시나리오
C2	- 2100년까지 50% 이상의 확률로 온난화를 1.5˚C로 제한 - 21세기 동안 67% 이상의 확률로 1.5˚C의 온난화를 초과	목표지점보다 더 간 다음 1.5˚C로 온난화를 되돌리는 시나리오
C3	- 21세기 전체에 걸쳐 67% 이상의 확률로 온난화 최고점을 2˚C로 제한	온난화를 2˚C로 제한하는 시나리오
C4	- 21세기 전체에 걸쳐 50% 이상의 확률로 온난화를 2˚C로 제한	일부 시나리오에서 온난화는 21세기를 지나서도 지속
C5	- 21세기 전체에 걸쳐 50% 이상의 확률로 온난화를 2.5˚C로 제한	많은 시나리오에서 온난화는 21세기를 지나서도 지속
C6	- 21세기 전체에 걸쳐 50% 이상의 확률로 온난화를 3˚C로 제한	많은 시나리오에서 온난화는 21세기를 지나서도 지속
C7	- 21세기 전체에 걸쳐 50% 이상의 확률로 온난화를 4˚C로 제한	많은 시나리오에서 온난화는 21세기를 지나서도 지속
C8	- 21세기 동안 50% 이상의 확률로 4˚C의 온난화를 초과	21세기를 지나서도 온난화는 계속 증가

출처: IPCC(2022). Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers, AR6 WG III. IPCC. pp.28-29. 참고하여 작성.



[그림 2-3] 시나리오별 21세기 예상 지구 온난화 범위

출처: IPCC(2022). Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers, AR6 WG III. p.30.

본 연구와 관련된 건물 부문을 보면, 총 탄소 배출량 중 건물이 차지하는 비중은 5.6%이나 간접적 배출까지 고려한 건물의 최종 배출은 16%로 증가함에 따라 건물 부문은 직접, 간접 배출 모두를 고려해야 하는 것이 중요함을 알 수 있다. 수송 부문은 총 배출량과 최종 수요부문 모두 15%를 차지한다. 결론적으로 IPCC는 모든 부문에 걸쳐 즉각적이고 깊은 배출량 감축 없이는 1.5℃ 목표 달성이 불가하다고 주장한다.

WRI(World Resource Institute, 세계자원연구소)는 넷제로 목표 달성을 위한 국제사회의 10가지 솔루션으로 석탄발전의 단계적 감축, 청정에너지와 에너지효율 개선에 투자, 건축물 개축, 소재의 탈탄소화, 친환경자동차로 전환, 대중교통 증가, 항공과 해운의 탈탄소화, 산림복원, 음식물 폐기물 및 쓰레기 감량, 육식 감축 및 채식증가를 제시하였다[10].

[그림 2-4] WRI가 제시한 온실가스 배출 저감을 위한 10가지 핵심 솔루션
출처: The City Fix(2019). What Does "Net-Zero Emissions" Mean? 6 Common Questions, Answered.
https://thecityfix.com/blog/net-zero-emissions-mean-6-common-questions-answered-kelly-levin-chantal-davis/ (접속일: 2022.10.20)

글로벌 에너지 차원에서는 IEA의 넷제로 2050 시나리오(NZE 시나리오)가 있는데, 글로벌 에너지 부문의 넷제로 달성을 위한 핵심축으로 에너지효율, 행태변화, 전기화, 재생에너지, 수소와 수소 기반 연료, 바이오에너지, CCUS를 제시하고 있다.[11] 전기화는 2050 넷제로 달성에 약 20% 수준의 기여를 예측하였고, 수소는 산업부문에서는 철강, 석유화학 등의 중공업의 탈탄소 이행에 중요한 역할을 수행하고 발전 부문에서는 전력 시스템의 유연성 확보를 위한 중요한 수단으로 예측하였다.

10) 김익(2020). 국내IP 환경동향보고: 넷 제로(Net-zero)의 의미와 활용. 환경부•한국환경산업기술원. p.5.

11) GS칼텍스(2021). IEA 넷제로 보고서의 우리나라 탄소중립 이행 시사점.
https://gscaltexmediahub.com/energy/column-netzero-korea-carbonneutral/ (접속일: 2022.10.01.)

2) 탄소중립 관련 국가 정책

(1) 2050 탄소중립 추진전략

탄소중립이라는 대전환 시대에 능동적으로 대응하기 위해 '20년 12월, 정부는 관계부처 합동으로 「2050 탄소중립 추진전략」을 발표하였다. 본 전략의 비전은 '적응적(Adaptive) 감축'에서 '능동적(Proactive) 대응'으로, 3대 정책 방향과 10대 과제를 제시하였다. 본 전략은 큰 방향과 과제들을 제시하고 있는 반면, 구체적인 감축 목표 및 정책은 제시하지 않고 있지는 않다.

- (3대 정책 방향) 경제구조의 저탄소화 / 신유망 저탄소 산업 생태계 조성 / 탄소중립 사회로의 공정전환
- (10대 과제) 에너지 전환 가속화, 고탄소 산업구조 혁신, 미래모빌리티로 전환, 도시·국토 저탄소화, 신유망 산업 육성, 혁신 생태계 저변 구축, 순환경제 활성화, 취약 산업·계층 보호, 지역중심의 탄소중립 실현, 탄소중립 사회에 대한 국민인식 제고

[그림 2-5] 「2050 탄소중립」 추진전략의 비전 및 전략 체계도
출처: 관계부처 합동(2020). 「2050 탄소중립」 추진전략. 10월 18일자 보도자료. p.4.

2050 탄소중립 추진전략에서는 기존 화석연료 기반 수송시스템을 친환경·자율주행차 중심으로 개편하기 위해 2030년까지 전기차 300만대, 수소차 85만대 보급을 목표로 하는 수송부문 탄소중립 중장기 로드맵을 수립하였다.

도시공간 대상의 모빌리티 혁신 분야는 대중교통 자가용 중심의 기존 교통체계를 보행자, 친환경 교통수단 중심으로 전환하고, 창의적 운송사업자 등 모빌리티 서비스 도입·확산 등 인프라 구축을 포함한다. 또한, 국토·도시 부문에서의 로드맵의 지속가능한 실천을 위해 홍보·교육을 통한 참여활성화와 국제협력을 위한 지원방안을 제시하고 있다.

참여활성화를 위해 공간기반 탄소정보체계의 효과적인 운영을 위한 소통채널을 구축하여 탄소 공간정보 공유를 확대하고, 탄소중립 융합형 전문가 육성 기반을 조성하여 관련 전문인력을 양성, 지역별 맞춤 홍보를 통한 탄소중립 인식 제고 및 참여 활성화 유도를 제시하였다.

(2) 2050 탄소중립 시나리오

국가비전으로 2050년 탄소중립이 선언된 이후 후속대응으로 '21년 10월, 정부는 관계부처 합동으로 '2050 탄소중립 시나리오'를 발표하였다. 본 시나리오는 국내 순배출량을 0으로 하는 2개 시나리오로 구성되어 있으며, 화력발전 전면 중단 등 배출 자체를 최대한 줄이는 A안과, 화력발전이 잔존하는 대신 CCUS 등 제거기술을 적극 활용하는 B안으로 시나리오를 제시하였다.

부문별로는 '배출'과 '흡수 및 제거' 부문으로 구성되어 있다. 배출 부문은 총 8개 세부로 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 수소, 탈루로 구성되어 있으며, 흡수 및 제거 부문은 총 3개 세부로 흡수원, 이산화탄소 포집 및 활용·저장(CCUS), 직접공기포집(DAC)으로 구성되어 있다.

[표 2-2] 2050 탄소중립 시나리오 최종(안) 총괄표

(단위: 백만톤CO_2eq)

구분	부문	'18년	초안			최종본		비고
			1안	2안	3안	A안	B안	
배출량		686.3	25.4	18.7	0	0	0	
배출	전환	269.6	46.2	31.2	0	0	20.7	• (A안) 화력발전 전면중단 • (B안) 화력발전 중 LNG 일부 잔존 가정
	산업	260.5	53.1	53.1	53.1	51.1	51.1	
	건물	52.1	7.1	7.1	6.2	6.2	6.2	
	수송	98.1	11.2 (-9.4)	11.2 (-9.4)	2.8	2.8	9.2	• (A안) 도로부문 전기·수소차 등으로 전면 전환 • (B안) 도로부문 내연기관차의 대체연료(e-fuel 등) 사용 가정
	농축수산	24.7	17.1	15.4	15.4	15.4	15.4	
	폐기물	17.1	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	
	수소	-	13.6	13.6	0	0	9	• (A안) 국내생산수소 전량 수전해 수소(그린수소)로 공급 • (B안) 국내생산수소 일부 부생·추출 수소로 공급
	탈루	5.6	1.2	1.2	0.7	0.5	1.3	
흡수 및 제거	흡수원	-41.3	-24.1	-24.1	-24.7	-25.3	-25.3	
	이산화탄소 포집 및 활용·저장 (CCUS)	-	-95	-85	-57.9	-55.1	-84.6	
	직접공기포집 (DAC)	-	-	-	-	-	-7.4	• 포집 탄소는 차량용 대체 연료로 활용 가정

*시나리오 간 내용이 상이한 부문은 파란색으로 표시

출처: 관계부처 합동(2021). 2050 탄소중립 시나리오안. 10월 18일자 보도자료. p.3.

□ 부문별 주요 전략[12)]

- 전환

전환 부문에 대한 감축수단은 화력발전을 대폭 축소하고 재생에너지·수소기반 발전을 확대하는 방향이다. 주요한 정책으로는 탄소비용을 가격에 반영하여 탄소중립 에너지 전환 가속화, 재생에너지 이용 확대 및 수용성 강화, 재생에너지 중심 전력공급 체계의 안전성 확보, 화석연료발전의 계획적 전환방안 마련 등이다.

- 산업

산업 부문에 대한 감축수단으로는 철강, 시멘트, 석유화학·정유, 기타 분야에서 연료 및 원료를 전환하는 것을 제시하고 있다. 이를 위해 탄소중립 핵심분야 소재·부품·장비 등 산업생태계 육성·지원, 저탄소 산업구조로의 대전환을 위한 기술개발 및 시설개선 투자 추진, 배출권거래제·녹색금융 등 시장 주도의 온실가스 감축 노력 유도 등의 정책들을 제언하고 있다.

- 건물

건물 부문에 대한 감축수단은 에너지 효율 향상, 고효율기기 보급, 스마트에너지 관리, 저탄소·청정에너지 보급, 행태 개선 등으로, 이를 위한 정책으로 건물 에너지 효율 및 수요 관리, 도시·국토 등 지역 단위의 탄소중립 실현을 제시하고 있다.

- 수송

수송 부문에 대한 감축수단으로는 수요관리 강화, 친환경 철도 전환, 친환경 해운·항공 전환, 도로 부문 전기·수소화를 제시하고 있으며, 정책 방향으로는 기존 수송 산업의 친환경 산업으로의 전환 지원, 친환경 수송수단 비중 확대를 위한 규제 및 인센티브 마련, 대중교통 확대 등 수송 수요관리 강화 등이다.

- 농축수산

농축수산 부문의 감축수단으로는 연료의 전기·수소화, 고효율 에너지 설비 보급, 바이오매스 에너지화 추진, 영농법 개선, 가축 관리, 식생활 전환이 도출되었으며, 이를 위해 정책으로 식량안보 강화 및 농어업 분야 기후적응 정책 추진, 농축수산업의 환경적 지속가능성과 생산성 동시 향상, 농수산식품 수요·공급 체계 전반의 저탄소화가 발굴되었다.

---

12) 관계부처 합동(2021). 2050 탄소중립 시나리오안. 10월 18일자 보도자료. pp.4-17. 참고하여 작성.

- 폐기물

폐기물 부문에서의 감축수단은 폐기물 감량 및 재활용, 바이오 플라스틱으로의 대체, 바이오가스의 에너지 활용, 매립지 준호기성 운영 강화가 있으며, 이를 위한 정책으로 생산·유통·소비 전 과정에서 폐기물 대폭 감축 및 재활용 확대, 폐기물의 친환경적 처리 및 탄소배출 최소화, 폐기물 통계 개선 등이 제시되었다.

- 수소

수소 부문에 대한 감축수단으로는 수소수요 증가에 따라 국내 생산 수소 생산을 통한 공급이 있으며, 이를 위한 정책으로는 수전해 수소(그린 수소) 공급기반 강화, 수소산업 생태계의 균형적 육성 등이 제시되었다.

- 탈루

탈루는 천연가스 사용 시 발생하는 기타 누출이 대부분으로 부문별 천연가스 소비 전망을 토대로 추정되었다.

- 흡수원

산림흡수원 및 임업에서는 산림순환경영 강화, 생태복원, 재해피해 방지를 통한 흡수능력 강화, 유휴 토지 조림 및 도시숲 가꾸기 등을 통한 신규조림 확대, 고부가가치 목재 이용을 통한 탄소저장고 확대가 확보수단으로 제시되었다. 해양에서는 연안 및 내륙습지 신규 조성, 바다숲 조성, 하천수변구역, 댐 홍수터 활용이 포함되었다.

- 이산화탄소 포집 및 활용·저장(CCUS)

국내외 해양 지층 등을 활용한 포집 및 저장(CCS), 광물 탄산화, 화학전 전환, 생물학적 전환 등을 통한 포집 및 활용(CCU)가 제시되었다.

- 직접 공기 포집(DAC)

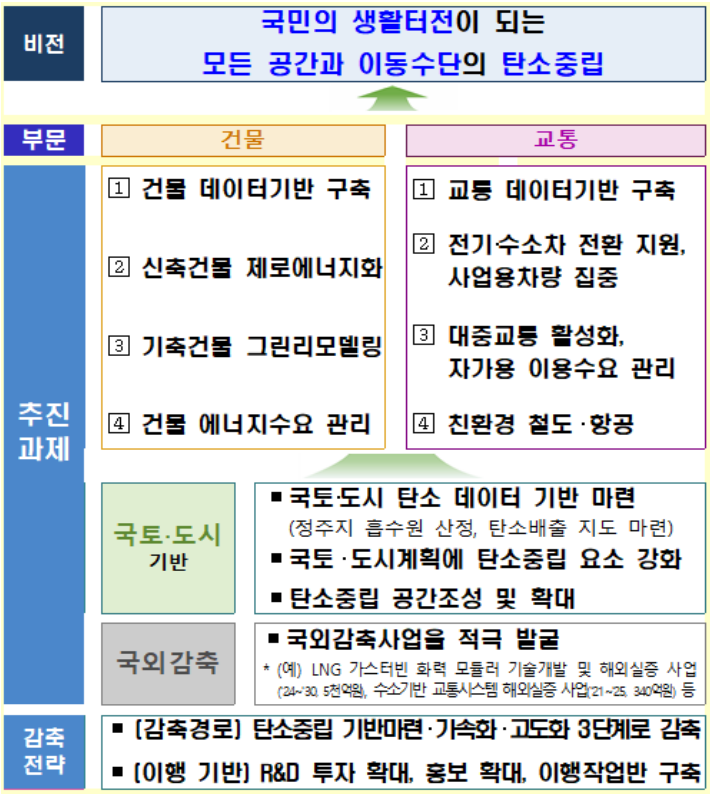
50년 잔존 내연기관차량의 연료로 활용할 수 있는 E-fuel 제조를 위한 대기 중 이산화탄소를 직접 포집하는 방식이다.

3) 도시공간에서의 탄소중립을 위한 방법과 전략

「2050 탄소중립 추진전략」('20.12)에 대응하고자 '21년 12월, 국토교통부는 '국토교통 탄소중립 로드맵'을 발표하였다. 국토교통 분야에 특화된 로드맵은 건물, 교통, 국토·도시 기반, 국외 감축 부문으로 구분하여 추진과제 및 방안들을 제시하였다.

건물 부문에서는 건물 데이터기반 구축, 신축건물 제로에너지화, 기축건물 그린리모델링, 건물 에너지수요 관리를 추진과제로 제시하였고, 교통 부문에서는 교통 데이터기반 구축, 사업용 차량 집중 전기·수소차 전환 지원, 대중교통 활성화 및 자가용 이용수요 관리, 친환경 철도·항공을 추진과제로 제시하였다.

국토·도시 기반 부문에서는 정주시 흡수원 산정, 탄소배출 지도 등 국토·도시 탄소 데이터 기반 마련, 국토·도시계획에 탄소중립 요소 강화, 탄소중립 공간조성 및 확대를 추진과제로 제시하였다.



[그림 2-6] 국토교통 탄소중립 로드맵
출처: 국토교통부(2021). 국토교통 탄소중립 로드맵. 12월자 보도자료. p.4.

(1) 건물부문 탄소배출 현황 및 감축 목표

건물 부문은 국내 탄소 총배출량의 24.7% 수준인 약 1억80백만톤을 배출하고 있으며, 직접 배출로는 건물 난방·취사 등을 위한 화석연료(도시가스, 프로판 등) 연소가, 간접 배출로는 건물에서 소비되는 전기에너지 발전을 위한 탄소 배출을 구분하고 있다.

[표 2-3] 국내 탄소 배출량 중 건물 구성비

구분		'00	'05	'10	'15	'18
건물		24.7%	26.1%	26.6%	23.3%	24.7% (1억 80백만톤)
	직접배출(화석E)	13.9%	11.5%	8.5%	7.2%	**7.2% (52백만톤)**
	간접배출(전기E)	**10.8%**	**14.6%**	**18.1%**	**16.1%**	**17.5% (1억 27백만톤)**

출처: 국토교통부(2021). 국토교통 탄소중립 로드맵. 12월자 보도자료. p.3. 참고하여 작성.

우리나라 전체에 해당하는 온실가스 감축 목표는 `30년까지 `18년 총배출량 대비 40%를 감축하고(NDC), `50년까지 탄소중립(순배출량 0)을 실현하는 것이다. 이중 건물부문에서는 직접 배출로 감축목표를 산정하며, `18년 대비 `30년까지 32.8% 감축, `50년까지 88.1% 감축(배출량: `18년 52.1백만톤 → `30년 35.0백만톤 → `50년 6.2백만톤)을 목표로 설정하였다. 건물에서 쓰는 전기에너지는 간접배출로 산정되어 에너지전환 부문의 감축목표에 포함시켰다.

(2) 건물 부문 세부 이행방안

건물 부문에 대한 탄소중립을 위한 이행방안은 탄소중립을 위한 건축물 성능개선에 초점이 맞춰져 있다.

□ 건물 데이터기반 구축

건물 데이터기반 구축 이행 방안으로는 건물성능정보 통합 차원에서 신·개축 건물의 성능을 측정·기록하여 생애주기별 관리를 지원하는 시스템을 구축하고('24~), 현재 시스템(그린투게더)을 통해 건물 에너지성능이 공개되고 있는 대상건물을 단계적으로 확대하는 등 건물성능을 공개하는 것을 제시하였다.

□ 신축건물 제로에너지화

신축건물에 대한 제로에너지화 과제에 대한 세부 이행방안으로는 제로에너지건축 의무화 대상 확대와 인증등급 상향을 가속화하고, 공공 신축건물부터 우선 추진하는 것과,

제로에너지건축 확산을 위한 규제 완화, 경제적 인센티브 등을 「녹색건축 활성화 방안」에 따라 지속 추진, 확대 검토 등 인센티브를 확대하는 것을 골자로 한다.

- (공공건물) `30년까지 대형건물(예: 연면적 1천㎡ 이상)에 제로에너지건축 3등급(에너지 자립률 60% 이상) 적용, `50년까지 全 건물 1등급 化
- (민간건물) 「녹색건축 활성화 방안」은 `25년부터 연면적 1천㎡ 이상(공동주택은 30세대 이상)에 5등급, `30년부터 5백㎡ 이상에 의무화 계획

□ 기존 건축물 그린리모델링

이와 함께 기존 건축물에 대해서도 그린리모델링을 활성화하기 위해 공공건물 지원·의무화, 체감도·인지도 제고를 전략으로 한다. 민간 확산 지원강화를 위해 민간건물의 그린리모델링 공사비 대출에 대한 지원을 지속적으로 확대하고, 타 정책과 연계를 통한 확산을 지원하는 것이 제시되었다.

(3) 국토·도시 부문 세부 이행방안: 계획수립-공간조성 탄소중립화

국토·도시 부문에서의 탄소중립 이행방안으로는 탄소중립 도시계획을 수립하고 공간을 조성하는 것을 중심으로 추진한다.

□ 국토·도시 탄소 데이터 기반 마련

국토·도시 탄소 데이터 기반 마련을 위한 세부 이행방안으로 그간 국가온실가스 인벤토리(NIR)에 미 반영된 정주지의 탄소 흡수량을 산정하고(`20~`24), 국토계획평가에 탄소중립 흡수·배출 평가지표를 추가 개선하여 계획지역의 탄소 흡수·배출량을 평가하도록 한다(`23). 또한 국토를 세분화하고(예: 1×1km 격자, 읍면동 등), 구역 내 배출·흡수원을 시각화한 탄소배출 공간지도 구축을 추진한다(`22).

□ 국토·도시계획에 탄소중립 요소 강화

국토·도시계획에서 탄소중립 요소를 강화하는 방안으로서 국토를 성장형·개발형에서 탄소중립형·에너지 감축형으로 전환하기 위해 제5차 국토종합계획을 수정하고(~'24), 도시 관련 계획(도시기본·관리계획, 도시개발계획)에 탄소중립 요소를 반영하도록 계획수립 지침을 마련한다(`21).

□ 탄소중립 공간조성 및 확대

탄소중립 공간조성 및 확대를 위해서는 건물, 수송, 에너지, 흡수원, 자원순환 등 도시 수

준의 종합적 탄소중립 실현을 위한 탄소중립도시 조성을 추진하고, 기존 도시 및 신도시에서 탄소를 흡수할 수 있는 공원·녹지 등 탄소 흡수원을 신규 확보하는 것을 전략으로 이행한다(장기미집행 공원, 신도시 녹지 등 42㎢, ~'30).

(4) 교통 부문 탄소배출 현황 및 감축 목표

수송부문의 탄소 총배출량은 98백만톤으로 우리나라 탄소총배출량(7억 2,760만톤 co2eq)의 13.7% 수준으로 내연기관 차량·항공기 등의 화석연료(휘발유·CNG 등) 사용에 따른 차량이 95%이상을 차지하고 있다[13].

[표 2-4] 수송부문 온실가스 배출 관련 주요 지표

(단위: 백만톤, %)

부문	'90	'95	'00	'05	'10	'15	'18	연평균 증가율 '90~'18
도로	30.9	58.5	64.5	76.9	81.1	90.1	94.7	4.1
철도	0.9	0.9	1.0	0.8	0.6	0.3	0.3	-3.9
항공	0.8	1.3	1.4	1.0	1.1	1.5	1.6	2.4
해운	2.4	3.6	2.8	2.8	2.3	1.6	1.0	-3.1
기타	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.6	0.5	0.3
합계	35.5	64.7	69.9	81.8	85.4	94.2	98.1	3.7

출처: 국토교통부(2021). 국토교통 탄소중립 로드맵. 12월자 보도자료. p.38. 참고하여 재작성.

현재 우리나라에서는 고속 및 광역철도 확충, BRT 확대, 환승시설 구축, 혼잡통행료 제도 시행, 원격근무/재택근무/스마트워크, 승용차 공동이용(카셰어링), 철도 전환사업, 연안 해운 전환 등을 수송부문에 대한 다각적인 접근을 통해 온실가스 감축을 노력하여 왔다. 2050년까지 수송부문 탄소 총배출량 감축은 친환경차 보급 시나리오를 기반으로 `18년 대비 `30년까지 37.8%를 감축하고, `50년까지 97.1%(시나리오1) 또는 90.6%(시나리오2) 감축을 목표로 한다.

(5) 교통 부문 세부 이행방안

교통부문 탄소중립 추진전략으로 대중교통 다양화, 편리한 환승체계, 철도중심 교통체계 강화, 연계교통강화, 내연기관 자동차 이용 억제, 물류운송 효율화, 첨단교통 확산 등을 포함하는 수요관리와 친환경차 전환 및 친환경 철도·항공·해운 등 친환경 교통수단 도입을 제시한다.

13) 국토교통부(2021). 국토교통 탄소중립 로드맵. 12월자 보도자료. p.38.

□ 교통 데이터기반 구축

교통데이터 기반 구축 이행 방안으로는 자율주행 셔틀서비스 확대 및 지능형 교통체계 시스템 구축하고, PM 및 공유차 등 공유형 교통체계를 정착시켜 교통 부문 탄소감축을 위한 교통체계 개편을 제시하고 있다. 또한, 네비게이션과 주차면 정보 연계를 통한 주차수요 관리를 통해 통행을 감소시키고 억제하여 온실가스 감축을 유도한다.

□ 전기·수소차 전환 지원, 사업용 차량 집중

탄소저감을 위한 에너지원 전환을 위한 수소차 도입은 연료전지 등 수소 산업 분야의 성장을 견인할 수 있으나, 상용화를 위한 가격 경쟁력 확보가 필요하다. 전지 등 높은 수소 연료 가격으로 인한 교통수단 전환의 어려움을 감안하여 사업용 수소차 연료보조금 제도를 도입하고, 수소화물차 기술개발 R&D 및 시범사업 추진한다. 이를 위해 대용량 중심 수소충전인프라를 확충하고, 친환경 특별교통수단 차량 및 충전 인프라 표준모델을 개발한다. 법·제도의 근거 마련을 위해 전기충전소 보급 확대를 위한 주차장법 등 관련 법령의 개선을 제시한다.

□ 대중교통 활성화, 자가용 이용수요 관리

에너지 절감 및 대기환경 개선을 위해 승용차에서 대중교통 중심의 교통체계 전환을 위해 간선급행버스체계(BRT) 구축, 광역·복합환승센터 확충, 알뜰교통카드 확산 등의 정책추진을 제시한다. 도시지역 교통 중 상당부분은 차지하는 출퇴근 교통 저감을 위해 스마트워크센터 등 재택/원격/유연근무 확산에 따른 통행수요 관리 전략을 제시한다.

□ 친환경 철도·항공

자동차에 비하여 저탄소 친환경 교통수단으로 분류되는 철도 교통 활성화를 통해 탄소저감 추진 방안을 제시한다. 주요 이행사항으로는 주요거점 간 1시간대 이동 가능한 고속철도망 구축, 광역철도망 및 도시철도망 확충, 디젤 철도차량의 전기/수소화, 도로 운송 화물을 철도로의 전환물류 유도를 제시한다. 항공 교통 수단의 탄소저감을 위해 항공기 성능 관리 개선, 바이오연료 보급 등의 정책 방안을 제시하고 있으며, 도시 공간 내에서의 도심항공교통(UAM) 인프라 구축을 제시하고 있다. 또한, 도시 집중화 및 생활물류 증가에 대응하여 도시물류 시스템 구축 등 친환경 고효율 말단배송 물류 R&D를 제시한다.

4) 「도시·군기본계획수립지침」에서의 탄소중립 계획 방향

□ 탄소중립을 위한 지침 개정안('21.12)

'21년 12월 개정한 「도시·군기본계획 수립지침」에서는 도시계획 수립 시 고려되어야 하는 탄소중립 계획요소와 계획 기준들을 제시하고 있다. 개정된 내용은 도시·군기본계획을 구성하고 있는 공간구조, 교통체계, 주거환경, 공원·녹지 등 각 부문별 계획에 탄소중립 계획방향을 반영토록 하는 것이다.

개정된 「도시·군기본계획 수립지침」에서 도시공간의 탄소중립을 위한 온실가스 저감을 위해 제시한 세부 지침들은 다음과 같다.

4-3-1. 공간구조의 설정

(2) 공간구조개편방향

⑥ 온실가스 감축 목표 달성을 위한 방향으로 도시공간구조를 설정한다.

⑦ 화석연료 소비의 최소화, 신재생에너지의 도입에 유리한 공간구조 개편 방향을 제시한다.

⑧ 보전축이 아닌 지역에서도 도시숲, 공원, 녹지, 건물 녹화 등 온실가스 흡수원을 확대해야 하며, 이 때 기존 주 요 공원 · 녹지 등과의 접근성 개선, 건물 등 인공구조물을 활용한 입체적 녹화 등을 고려한다.

⑩ 도시공간구조의 기후위기 대응력 강화를 위하여 도시 내 온실가스 배출 · 흡수 현황지도, 건물 에너지수요 지도, 바람길 지도, 교통에 따른 연료사용 관련 지도, 미기후 지도, 흡수원 분포 지도 등을 자율적으로 구축 · 활용하여 도시 내 탄소 감축 · 흡수가 최적화 되도록 공간구조개편에 적용하는 것이 권장되며, 지역의 관련 자료구축 및 수집 여건에 따라 상세 정도를 달리하여 반영할 수 있다.

4-4-1. 토지이용의 기본원칙 및 현황분석

(7) 시 · 군의 온실가스 감축 목표와 토지용도별 온실가스 배출량을 고려하여 탄소중립 달성을 위한 적정 규모와 용도의 토지수요를 예측함으로써 지속가능하고 탄소중립적인 토지이용 방침을 제시한다.

4-5-1. 교통계획

(1) 기본원칙

⑤ 교통계획은 각종 차량 및 교통시설에 의한 온실가스 과다 배출, 대기오염, 소음, 진동, 경관 저해, 자연생태계 단절 등의 문제가 없도록 계획한다.

⑥ 교통량 추정과 교통수단별 · 지역별 배분계획 수립 시 가능한 차종별 연료 및 온실가스 배출계수 등을 함께 고려하여 도시 내 교통으로 인한 온실가스 배출이 최소화되도록 한다.

⑦ 온실가스 배출과 에너지 소비를 저감하기 위하여 대중교통, 자전거, 보행 및 친환경 녹색교통 수단 확대를 추구한다.

(2) 주요 교통시설로의 접근성 제고

② 교통시설들은 환승시간을 단축할 수 있도록 계획하고, 이용자의 편익 증진과 온실가스 배출 및 에너지 사용량 감축을 위하여 여러 기능이 복합적으로 발휘될 수 있도록 계획을 수립한다.

4-5-2. 물류계획

(3) 생산 · 유통 · 판매 · 폐기 등 물류활동 전반에서 온실가스 감축이 가능한 녹색물류 체계를 계획한다.

4-6-2. 도심 및 시가지 정비

① 도시지역의 경우 재개발 · 재건축 및 역세권개발, 신 · 구 시가지간의 균형발전, 탄소중립 사회로의 이행 등에 대한 개발방향을 설정한다.

② 구시가지내 온실가스 감축을 위한 그린 리모델링, 녹색건축물의 확대, 그린인프라 확충 등을 위한 개발전략 및 실천수단을 강구한다.

③ 신시가지에 대한 개발계획이 있는 경우 해당 지역 내에서 탄소중립이 달성될 수 있도록 개발전략과 실천수단을 강구한다.

④ 비도시지역의 경우 취락의 정비 및 도시와의 유기적인 네트워크 개발, 탄소흡수원 확충 등 탄소중립 기여에 대한 기본방향을 설정한다.

4-6-3. 주거환경계획

(4) 주택의 에너지효율성과 자원순환, 신재생에너지 도입 잠재력 등을 고려하여 기후위기 대응을 위한 주거환경을 구축하고 온실가스를 감축할 수 있는 방안을 제시한다.

(5) 주택공급방안

② 기존 주변지역의 주택유형별 온실가스 배출 현황을 조사하고, 제로에너지건축 등 주택 에너지 효율화, 주택 주변부 식재 등과 같은 주택 내 탄소흡수원 확충 방안 등 탄소중립 지향형 주택공급 방안을 제시하는 것이 권장되며, 지역의 특성에 따라 해당 내용의 수립 여부 및 상세 정도를 달리하여 수립할 수 있다.

4-7-1. 기본방향

(1) 지속적인 발전 및 탄소중립도시로의 전환을 위하여 환경보전계획의 목표와 전략을 수립한다.

4-7-2. 탄소중립도시 조성

(1) 정부의 기후위기 대응을 위한 탄소중립 달성 및 녹색성장을 위한 정책목표에 부합되도록 하며, 국가탄소중립 녹색성장 기본계획 및 국가에너지기본계획 등 관련 국가계획과 연계되도록 한다.

(2) 탄소중립 실현을 위한 공간구조, 교통체계, 환경의 보전과 관리, 에너지 및 공원 · 녹지 등 도시 · 군계획 각 부문을 체계적이고 포괄적으로 접근하여 수립한다

(3) 온실가스 감축과 자원절약형 개발 및 관리를 위하여 한계자원인 토지, 화석연료 등의 소비를 최소화하고 이들을 효율적으로 이용할 수 있는 방안을 계획한다.

(4) 화석연료를 대체할 수 있는 다양한 신 · 재생에너지원을 확보할 수 있는 잠재력을 분석 · 반영하고, 에너지 절감을 위한 신 · 재생에너지 등 환경친화적 에너지의 공급 및 사용을 위한 대책을 수립한다.

(5) 기후변화 완화 및 적응을 위하여 지역의 지리적, 사회 · 경제여건 등 지역의 특성을 반영하여 수립하며, 지역의 특성에 따라 계획의 수립 여부 및 계획의 상세 정도를 달리하여 수립할 수 있다.

(6) 탄소중립도시 조성 계획 방안

① 탄소중립도시 조성을 위하여 계획 지표에서 제시한 연도별 온실가스 감축 목표에 따라 탄소중립 도시 조성 계획 방안을 수립하여야 한다.

② 감축 목표 달성을 위하여 필요한 감축 수단(흡수 · 포집 수단을 포함한다.)을 제시한다.

③ 감축수단 중 타부문 계획과 긴밀한 연계가 필요한 부분에 대해서는 타부문 계획 내용을 준용할 수 있다.

④ 감축수단은 가능한 한 예상 감축량을 명시하여 야 하며, 감축수단 별 감축량을 합산하여 감축목표를 달성할 수 있도록 계획하고, 감축수단을 공간적으로 배치하는 계획을 제시하는 것이 권장되나, 지역의 자료 구축 및 수집 여건에 따라 제시 여부 및 상세 정도를 달리하여 반영할 수 있다.

⑤ 지자체 탄소중립 녹색성장 기본계획. 지역에너지계획 등 유관 계획이 있을 경우, 해당 계획 내용을 언급하거나 준용할 수 있으며 해당 계획들과 일관성을 갖춰야 한다.

4-7-3. 환경친화적 개발의 유도

(1) 개발사업이 탄소중립에 기여하고 친환경적으로 이루어질 수 있도록 사업유형에 따른 온실가스 감축 대책과 자연환경보전 전략 등을 제시한다.

4-7-4. 대기환경 및 수환경의 보전

(4) 도시 내에 대기환경 쾌적성을 높이고 수환경과 연계하여 열섬 현상을 완화하도록 계획하며, 대기오염물질 및 온실가스 저감을 위한 옥상 · 벽면 녹화 및 관련 시설 설치 등의 대책방안을 제시한다.

4-7-5. 폐기물

② 폐기물의 소각처리와 매립을 최소화하고 폐기물 처리에 드는 에너지를 감축하며 자원순환을 유도하도록 온실가스 감축을 위한 대책방안을 제시한다.

4-7-6. 에너지

(1) 온실가스 감축 목표 및 지역 에너지 수요, 신 · 재생에너지 공급 비중을 고려하여 에너지원 별 공급방안을 강구한다.

(2) 집단에너지 공급시설 건설시 폐열 활용 등 효율적인 에너지 활용방안을 강구하며, 화석연료 기반 에너지 공급시설을 건설할 경우 대기오염물질 및 온실가스 감축을 위한 방안을 강구한다.

(3) 해당 시 · 군에 수소에너지 등 신에너지를 위한 에너지 공급체계 전환 관련 계획이 있을 경우 관련 기반시설 구축 내용을 수록할 수 있으며, 에너지 공급계획 및 온실가스 감축 목표 달성에 반영할 수 있다.

4-9-1. 기본원칙

(2) 환경친화적이며 지속가능한 계획의 수립

① 환경적으로 건전하고 탄소중립에 기여하며 지속가능한 도시환경이 이루어질 수 있도록 자연환경 · 경관 · 생태계 · 녹지공간 등의 확충 · 정비 · 개량 · 보호에 주력하여 계획한다.

③ 온실가스 감축 목표 달성과 연계하여 공원 · 녹지의 온실가스 흡수량을 설정하고, 이를 달성할 수 있도록 공원 · 녹지 확보 계획을 수립할 수 있으며 지역의 자료 구축 및 수집 여건에 따라 반영 여부 및 상세정도를 달리할 수 있다.

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.

4-9-3. 공원 · 녹지체계 형성

(4) 생활권별로 공원 · 녹지분포와 이용현황을 분석하고 공원 · 녹지의 지표를 설정한다.

② 계획된 공원 · 녹지시설의 조성비율과 온실가스 감축 목표에 따른 탄소흡수량을 고려하여 1인당 조성공원면적, 도시전체의 공원 · 녹지비율 등 목표년도의 공원 · 녹지지표를 제시한다.

4-9-4. 공원 · 녹지시설의 설치

(4) 공원 · 녹지에 신재생에너지 발전 및 에너지 저장 등 온실가스 감축 활동과 연계된 시설 및 설비를 설치하는 계획을 수립할 경우 해당 공원 · 녹지의 경관과 생태, 접근성 및 이용성에 영향을 미치지 않도록 계획한다.

□ 도시·군 기본계획 지침에서의 탄소중립 계획요소

위와 같이 지침에서 제시하고 있는 탄소중립과 관련하여 계획 방향에 대해 좀 더 초점을 맞춰 재정리해보면 아래의 표와 같이 정리될 수 있다. 계획 부문별로는 공간구조, 토지이용, 교통계획, 물류계획, 도심 및 시가지 정비, 주거환경계획, 대기환경 및 수환경보전, 폐기물, 에너지, 공원녹지계획 등 10가지로 구분되어 계획방향이 분류가 가능하다.

이에 따라 생활권 공간계획과 관련하여 계획방향들을 재정리하였으며, 이러한 계획방향들과 관련하여 계획 요소로 도출할 수 있는 내용들에 대해서는 비고로 정리하였다.

[표 2-5] 「도시군기본계획수립지침」에서 제시한 주요 탄소중립 계획방향

구분	주요 계획방향	비고
공간구조	·화석연료 소비 최소화, 신재생에너지 도입에 유리한 공간구조 제시 ·도시숲, 공원, 녹지, 건물 녹화 등 온실가스 흡수원 확대 ·공원녹지 접근성 개선, 인공구조물을 활용한 입체녹화	·화석연료 소비 최소화 ·신재생에너지 도입 ·흡수원 확대(공원녹지 연결, 입체녹화)
토지이용	·탄소중립 달성을 위한 적정 규모와 용도의 토지수요 예측	·적정 규모, 용도
교통계획	·차량 및 교통시설에 의한 온실가스 과다 배출, 대기오염, 소음, 진동, 경관 저해, 자연생태계 단절 등의 문제가 없도록 계획 ·차량별 연료 및 온실가스 배출계수 등을 함께 고려하여 도시 내 교통으로 인한 온실가스 배출 최소화 ·온실가스 배출과 에너지소비 저감을 위해 대중교통, 자전거, 보행 및 친환경 녹색교통수단 확대 추구 ·교통시설들이 환승시간을 단축할 수 있도록 계획하고, 이용자의 편익 증진과 온실가스 배출 및 에너지 사용량 감축을 위하여 여러 기능이 복합적으로 발휘될 수 있도록 계획 수립	·화석연료 교통 배출 최소화 ·친환경 이동수단으로 전환 ·환승 및 교통시설 복합화
물류계획	·생산·유통·판매·폐기 등 물류활동 전반에서 온실가스 감축이 가능한 녹색물류 체계를 계획	·녹색물류체계
도심 및 시가지 정비	·구시가지내 온실가스 감축을 위한 그린리모델링, 녹색건축물 확대, 그린인프라 확충 등을 위한 개발전략 및 실천수단 강구 ·신시가지 개발계획시 탄소중립 개발전략과 실천수단 강구	·녹색건축물 및 그린인프라 확충
주거환경 계획	·주택의 에너지효율성과 자원순환, 신재생에너지 도입 잠재력 등을 고려하여 기후위기 대응을 위한 주거환경을 구축하고 온실가스를 감축할 수 있는 방안 제시	·제로에너지건축물
대기환경 및 수환경 보전	·옥상·벽면 녹화 등 관련시설 설치 ·수환경과 연계하여 열섬현상 완화	·옥상·벽면 녹화
폐기물	·자원순환을 통한 폐기물 처리에 드는 에너지를 감축	·자원 재활용
에너지	·지역에너지 수요, 신재생에너지 공급 방안 강구 ·집단에너지 공급시설 건설시 폐열 활용 등 에너지 활용 효율화 강구 ·화석연료 기반 에너지 공급시설 건설시 대기오염물질 및 온실가스 감축 방안 강구	·신재생에너지로의 전환 ·집단에너지공급시설 효율화
공원녹지 계획	·자연환경·경관·생태계·녹지공간의 확충·정비·개량·보호에 주력 ·공원녹지의 온실가스 흡수량 설정, 공원녹지 확보 계획 수립 ·온실가스 흡수 효과를 고려한 수목 식재 ·도심 바람통로 및 미기후와 연계하여 연섬현상 완화를 위한 입지 및 조성 방안 강구	·탄소 흡수를 위한 공원녹지 확보 및 수목 식재 ·바람통로 및 열섬현상 고려

출처: 연구진 작성.

2. 시나리오형 계획 기법에 대한 개념과 이론

본 연구는 탄소배출 저감효과를 살펴보기 위해 공간계획 모형을 수립하고자 한다. 이를 위해 탄소 배출 저감 및 흡수 관련 계획 요소들을 다양한 경우의 수를 통해 시나리오로 개발·적용할 것이다. 이에 따라 본 절에서는 시나리오형 계획 기법에 대한 선행연구를 살펴본다.

1) 시나리오형 계획 기법의 개념

시나리오형 계획 기법은 2차 대전 이후 미 공군의 군사작전 수립을 위해 처음 등장하였다. 특정 미래를 예측하고 대책을 마련하는 전통적 접근법과 달리, 본 기법은 불확실한 미래상황을 몇 가지 중요한 변화 동인을 기반으로 극단적인 여러 경우로 가정한다. 이 중 개연성이 높은 시나리오를 선정해 모든 가능한 상황에 유연하게 대응할 수 있도록 해주는 미래예측 기법이다. 즉, 미래에 대한 다차원적 대안을 제시하여 정책결정자가 제한된 자원과 주어진 조건 내에서 전략적인 의사결정을 할 수 있도록 돕는다(교육과학기술부 2010, p.2).

시나리오형 계획 기법의 공간계획에서의 응용은 비교적 최근에 나타나고 있다. 미국의 1962년 고속도로 건설을 위한 연방정부 보조금 법에서 토지이용과 교통을 결합한 계획에에 최초로 도입되었다. 이후 1970년 국가 환경정책법에서 교통과 자원계획의 대안적 방법으로 환경의 영향 상태에 따라 가능한 행동과 결과의 예측들을 고려하는 형태로 나타났다. 도시 단위에서는 포틀랜드시가 1990년대 초반에 시나리오 기법을 계획과정에 응용하여 시나리오 공간계획을 도출하였으며, 성장의 위치와 정도·밀도 등을 다양화하여 교통 및 입지를 연동하였다(김동현 외 2013, p.27).

시나리오형 계획 기법의 특징은 동태적인 과정으로서 다른 부문들과의 관계를 고려한 총체적이고 전체적인 측면에서 불확실성을 반영한 미래를 형성할 수 있는 대안을 다양하게 제시한다(김동현 외 2013, p.28). 본 기법의 장점은 다차원적인 예측으로 환경변화 대응력이 우수하다는 점이다. 또한, 객관적 자료를 바탕으로 한 논리적 미래예측으로 신뢰도가 높으며, 전략적 대응책 마련이 용이하다. 반면, 단점으로는 광범위한 분야 적용 시 시간 및 비용이 소요된다(교육과학기술부 2010, p.2).

시나리오형 계획 기법은 해당지역의 미래에 대하여 구조적으로 차별화된 시나리오 대안을 개발하고 각각의 장단점을 알기 쉽게 제시함으로써 상호비교선택이 가능하다. 또

한, 시나리오 대안과 각각의 장단점이 주요 이해관계자들에게 제시되어 공개적인 논의 자료로 활용되므로 계획과정의 참여기회 미흡이나 전문성 결여 등의 문제점을 일정 부문 해소할 수 있어 상당한 개선효과를 기대할 수 있다. 이를 통해 시나리오별 계획의 방향과 목표를 보다 명확히 할 수 있으므로 해당지역사회가 지향하는 공공의 가치와 주변의 공감대를 형성하기 위한 전략으로 도시기본계획이나 도시재생사업 추진시 도입이 검토될 수 있다(정희윤·김선웅 2011, p.ii).

□ 시나리오 계획 기법의 단계[14)]

시나리오형 계획 기법의 체계적인 적용과 신뢰성 향상을 위해 한국적 모델이 개발되었으며 그 절차는 다음과 같다.

- 1단계: 의사결정 사안 규명
  - 알고자 하는 미래 혹은 결정하고자 하는 사안을 구체화하는 단계
  - 의사결정 사안의 요소, 범위, 기간 등을 구체화
- 2단계: 요인 파악 및 분석
  - 의사결정 사안에 영향을 미치는 요인을 파악·분석하는 단계
  - 텍스트 마이닝 이용 핵심어 추출 → 위키 기반의 온라인 토의를 활용하여 요인 도출 → STEEP(Society, Technology, Economcy, Ecology, Politics) 분석을 통해 거시환경요인 분류 및 파악 → AHP 분석을 이용한 핵심요인 도출 → 네트워크 분석을 이용한 시스템 내 네트워크 구조 및 네트워크 핵심 요인 파악
- 3단계: 불확실성 축 결정
  - 시나리오에 따라 차별화된 미래의 모습을 결정할 핵심 불확실성 요인 및 불확실성 축을 찾는 단계
  - 의사결정 사안에 영향을 주는 요인들 중 상대적으로 영향력과 불확실성이 높은 요인을 핵심 불확실성 요인으로 선정
  - 영향력이 높고 불확실성이 낮은 요인은 '미리 결정된 요인'으로 선정하고, 영향력이 높고 불확실성이 높은 요인은 '핵심 불확실성 요인'으로 선정
  - 2~3개로 선정된 불확실성 축에 있어서 두 개의 서로 반대되는 가능성을 가정하여 다수의 가능한 시나리오를 구성하고 이 중 3~4개 시나리오를 선정

14) 남상성 외(2009). 시나리오 플래닝의 한국적 적용모델 개발: 에너지 효율화 미래예측 사례를 중심으로. 한국과학기술기획평가원. pp.6-9. 참고하여 작성.

- 4단계 : 시나리오 작성
  - 3단계에서 결정된 불확실성 축을 이용하여 시나리오를 작성하는 단계
  - 미리 결정된 요인은 모든 시나리오에 공통으로 반영되도록 하고, 불확실성 축 변화에 의한 시나리오별 차별화가 잘 나타나도록 시나리오를 작성
  - 시나리오별 내용, 징후, 기회요인, 위협요인 등을 분석
- 5단계 : 전략적 함의 도출
  - 작성된 시나리오로부터 얻을 수 있는 대응 전략을 도출하는 단계
  - 각 시나리오가 현실화 되었을 때 필요한 다양한 대응 전략 도출하고, AHP를 이용하여 시나리오 공통 전략 및 최대위험 회피 전략을 도출
  - 전략맵 작성을 통해 전략을 구조화

[표 2-6] 시나리오형 계획 기법의 추진 단계

단계	특징	질문	예시
1. 의사결정 사안규명	- 무엇을 예측할 것인지에 대한 사안 규명	- 무엇을 예측할 것인가?	- 자동차 판매 증대 방안
2. 요인 파악 및 분석	- 위키(Wiki) 기반의 온라인 토의를 통한 요인·트렌드 파악 효과성 향상 - 분석적 계층화 과정 및 네트워크 구조분석 등 중요 요인 분석 기법 적용을 통한 시나리오의 현실성 향상	- 의사결정 사안에 영향을 주는 주요 요인은 무엇이고 어떤 관계가 있는가?	- 연비, 가격, 브랜드, 유가, 디자인 등 - 연비상승 → 가격상승 → 판매감소 - 디자인 열세 → 브랜드 하락 → 판매감소
3. 불확실성 축 결정	- 모호하게 정의되었던 불확실성과 영향력의 구체화를 통한 핵심 불확실성 요인 도출의 질 향상	- 어떤 요인이 의사결정 사안에 영향력이 가장 크면서 예측하기 어려운가?	- 유가, 경기, 디자인 경쟁력이 가장 영향력 있으면서 예측이 어려운 요인
4. 시나리오 작성	- 시나리오별 내용, 징후, 기회요인, 위협요인 분석	- 불확실성 축이 변화에 따라 미래 모습은 어떻게 될까?	① 유가하락, 경기상승, 디자인 우세 ② 유가상승, 경기하락, 디자인 우세 ③ 유가상승, 경기하락, 디자인 열세
5. 전략적 함의 도출	- 분석적 계층화 과정을 통한 시나리오별 전략 우선순위의 합리적 도출 - 시나리오별 전략맵 작성을 통한 대응 전략의 구조화	- 우리는 앞으로 어떻게 해야 하는가?	1순위: 연구소 인력증대 및 기술개발 2순위: 수출시장 다변화 3순위: 디자인 인력 대폭 확충 등

출처: 교육과학기술부(2010). 시나리오 기법을 적용한 과학기술미래예측 모델개발 "에너지 효율화 분야의 전략적 예측 시범 적용". 2월 4일자 보도자료. p.5. & 남상성 외(2009). 시나리오 플래닝의 한국적 적용모델 개발: 에너지 효율화 미래 예측 사례를 중심으로. 한국과학기술기획평가원. . p.6. 참고하여 작성.

2) 도시계획 분야 시나리오형 계획 기법 적용 사례

(1) 미국 Brentswood 지역 도시내부 용도지역 변경을 위한 시나리오 사례[15)]

□ 개요

본 사례는 미국 워싱턴시의 교외지역을 대상으로 용도지역상 공업지역으로 지정된 대규모 부지개발의 향후 정책방향 및 전략을 수립하는 것이다. 대상지는 1980년대 후반 급성장을 경험했으나, 다수의 소매 상업지역과 베드타운형 주거지 위주로 성장하였다.

□ 단계별 수립 과정

수립 과정은 총 5단계로 진행되었다. 1단계로 주어진 현실여건 분석과 불확실한 미래여건을 분석한다. 2단계, 지역발전을 위한 주요 요인 분석(STEEP) 및 이해관계자들의 요구에 대해 이해한다. 3단계, 시나리오 도출을 위한 평가기준을 개발한다. 4단계, 소극적·적극적으로 구분한 2개의 시나리오를 개발한다. 5단계, 평가기준에 의한 시나리오 평가를 실시한다.

□ 의사결정 사안에 영향을 주는 요인(2단계)

- 지역발전을 위한 주요 요인

첫째, 사회적 요인은 주택 가격 유지, 장소성과 지역 정체성 확보를 위한 요구이다. 둘째, 경제적 요인은 제한된 오피스 시장 수요, 오피스와 제조업 시장의 대체수요, 제한된 소매 시장, 신흥 고급주택 지역의 태동여부 등이다. 셋째, 정치적 여건은 프로젝트 대상지 외부에 대한 인프라 투자 지원 요구, 고속철도 통근자를 위한 역사건설 등이다.

- 이해관계자들의 요구

먼저 정부는 경제발전과 지역균형발전의 조화, 대중교통서비스, 고급주택의 공급, 미개발 지역의 토지비축, 장소성과 지역 정체성 부각에 대한 요구를 한다. 또한, 주민은 고급주택 및 공원 공급을 요구하고 과밀개발에 대한 반감을 갖고 있다. 마지막으로 환경 단체는 오픈 스페이스의 확보, 수자원의 보호를 요구한다.

15) 정희윤·김선웅(2011). 새로운 도시계획 수립기법 개발 및 서울시 적용방안 연구: 시나리오형 계획기법 중심으로. 서울시정개발연구원. pp.67-71. 참고하여 작성.

□ 시나리오 도출을 위한 평가기준 개발(3단계)

직주비율에 대한 영향 여부, 교통에 대한 영향 여부, 재정지원과 타당성 여부, 오픈스페이스 보전 여부, 궁극적인 편익 여부, 수용 및 공감대 여부 등과 같은 6가지 기준이 개발되었다.

□ 2개의 시나리오 개발(4단계)

소극적·적극적 개발로 구분한 2개의 시나리오를 개발했다. 소극적 시나리오는 주거 위주의 낮은 저밀도 개발이며, 적극적 시나리오는 주거·상업·오피스의 고밀도 지역중심지를 육성하는 개발이다.

[표 2-7] 미국 Brentswood 지역 도시내부 용도지역 변경 사례의 두 가지 시나리오

구분	소극적 시나리오	적극적 시나리오
특징	- 주거 위주의 낮은 저밀도 개발	- 주거·상업·오피스의 고밀도 지역중심지 육성
주요 특징	- 주거용 마을의 개념(총 1,500-2,000호) - 급행철도 미입지 - 산업기능 미입지 - 자전거 도로와 함께 2차선 도로망 - 오픈스페이스 공급 - 자연환경 보존 - 지역공원, 자연센터, 식물원 신설 - 스포츠 복합센터 신설	- 주거, 소매상가, 오피스가 혼합된 고밀도 지역중심지 육성(주택 15,000호) - 타 지역으로부터 고용기업의 이전 유도 - 오픈 스페이스의 네트워크화(보다 많은 녹지공간과 공원도로) - 주요한 교통네트워크의 변화(지역간선망 업그레이드, 급행철도 노선 이전, 철도역사에 타 수단 간 환승센터 구축, BRT 도입)
현황 및 외부여건 분석결과	- 제한된 오피스 시장 - 물류·제조업 수요 미흡 - 향후 도로에 대한 불확실한 재정지원 - 공공의 편익에 대한 인식 - 주택가격의 유지 - 장소성 창출 - 신흥 고급 주택시장의 부상 여부	- 제한된 주택시장 - 물류·제조업 수요 미흡 - 대상지 외부의 기반시설에 대한 재정투자 여부 - 공공의 편익여부 - 장소성 창출 - 철도 통근자를 위한 고속철도청의 의지
이해 관계자의 가치	- 고급 주거에 대한 요구 - 과밀개발에 대한 반감 - 지역 정체성 확보에 대한 바램 - 공원, 오픈스페이스 확보 - 수자원의 보존	- 경제발전에 대한 요구 - 대중교통서비스에 대한 요구 - TOD에 대한 요구 - 지역 정체성에 대한 요구 - 미개발지에 대한 토지 비축
미래 모습의 스토리	- 지역 오피스와 산업시장이 부재한 가운데 주택시장만이 존재 - 고밀도 개발은 방대한 도로의 개선이 필요하나 재정투입은 불확실함으로 현재보다 심한 교통혼잡 초래 우려 - 공원과 산책로에 둘러싸인 녹색의 저밀도 주택지 역할이 가장 적합	- 지역의 오피스센터 건설 - 급행철도 개설 및 고속도로, BRT 건설 - 주거밀도 증가 및 24시간 영업 전문상가 형성 - TOD 개발 - 도시의 개방공간과 함께 지역 정체성 창출

출처: 정희윤·김선웅(2011). 새로운 도시계획 수립기법 개발 및 서울시 적용방안 연구:시나리오형 계획기법 중심으로. 서울시정개발연구원. p.70. 참고하여 재작성.

□ 평가기준에 의한 시나리오 평가(5단계)

2가지 시나리오(4단계)는 앞서 개발된 평가기준(3단계)에 의해 검토되었으며, 외부요인들과 이해관계자 가치들의 적절한 결합에 의해 저밀의 주거/산업·오피스를 혼합하는 대안이 선택되었다. 이에 최종적으로 평가기준에 의해 총 4개의 최종 시나리오를 도출하였다.

□ 시사점

본 사례에서는 밀도, 용도, 교통, 환경 보존, 재정 투입 타당성(공공 편익)과 같은 요소를 주요 기준으로 시나리오가 작성되었다.

도시계획수립 분야에 적용되는 시나리오형 계획기법의 경우, 계획대상지의 공간적 규모보다 풀어야 할 정책이슈의 성격이 중요하다. 활용분야로 용도지역 변경, 토지이용(투자) 계획, 대도시기본계획, 성장관리계획 등에 주로 적용되고 있다.

또한, 미래의 불확실성이 많아서 어떤 전문가도 자신 있는 미래 예측은 어려우나, 현재 시점에서 전략적 선택이 요구되는 정책이슈에 주로 적용되고 있다. 즉, 시나리오 개발의 궁극적 목적은 미래의 지역사회를 위해 지향해야 할 정책목표의 실현을 위한 실천전략(Actions)의 우선순위를 설정하는 일에 있다고 할 수 있다.

한편, 시나리오별로 특정 주제 및 이슈가 강조되고 살아나는 시나리오 개발이 필요하나, 기능적으로 특정 분야의 편향과 이분법적인 접근(예. 경제개발 분야 vs 환경보전 분야)은 지양해야 한다(정희윤·김선웅, 2011, pp.v-vi).

[표 2-8] 미국 Brentswood 지역 도시내부 용도지역 변경 사례의 최종 시나리오

평가 기준	시나리오 1 시장의 수요 및 트렌드	시나리오 2 고급주택/공원 확보	시나리오 3 저밀의 주거/산업·오피스	시나리오 4 지역중심지 육성계획
고용시장 (직주비율)	■	■	○	●
국지적 교통	○	●	○	■
지역의 교통	■	●	○	■
기반시설의 재정투입/타당성	●	●	○	○
공장과 오픈스페이스	○	●	●	○
카운티의 이점	■	○	○	
이웃의 동의	○	●	●	■

● 긍정적 영향 / ○ 중립적 영향 / ■ 부정적 영향

출처: 정희윤·김선웅(2011). 새로운 도시계획 수립기법 개발 및 서울시 적용방안 연구:시나리오형 계획기법 중심으로. 서울시정개발연구원. p.70. 참고하여 재작성.

(2) 영국 넷제로 교통 전환을 위한 시나리오 사례[16)]

□ 목표

교통 분야는 영국 탄소 배출의 가장 큰 비율을 차지하고 있다. 또한, 영국 내 다른 분야는 1990년 이후 탄소배출이 급감하고 있으나 교통 분야는 오직 3%만 감소한 실정이다. 이에 본 연구는 2050년까지 넷제로 달성을 위한 일환으로 2030년까지 지표 수송 배출량을 80% 감소시키는 방법을 살펴본다. 대상지로는 다핵도시(Wotton City-Region), 일핵도시(Castlemore), 재생지구(Stoneborough), 5,000명 규모의 작은 시골마을(Ebsham)이라는 각기 다른 공간적 특성을 가진 4개 지역을 가상으로 설정했으며 시나리오를 적용하였다. 즉, 장소 유형으로 단일 중심 도시, 다중 중심 도시, 재생 도시 및 성장하는 카운티로 구분하여, 각 유형에 대한 배출 감소 경로와 공간 비전을 설정함으로써 운송 탈탄소화에 대한 공간 계획 및 장소 기반 솔루션이 제공할 수 있는 시사점을 도출했다.

□ 수립 과정

교통 부문 탄소배출감소를 위한 잠재요인을 확인하고자 도보·자전거·대중교통 공급과 같은 교통 계획 요소들과, 이동수요 감소 및 행동 변화 유도를 위한 공간계획 방안을 도출했다. 이후, 다른 특성을 가진 4개의 대표 장소 유형을 설정하였고, 공통의 특성과 공간적 특징을 공유하는 도시, 지역, 읍 단위를 다양하게 혼합하여 선정하였다. 각 유형의 기준 데이터는 세부 교통 모델, 분해된 탄소 데이터, 각 유형의 특징을 반영할 수 있는 실제 장소에서 질적 관찰을 통해 구축하였다. 이를 바탕으로 장소기반접근을 사용한 모델링을 통해 분석하였다.

□ 의사결정 사안에 영향을 주는 요인

'지속가능한 접근 및 모빌리티 프레임워크'가 기본적 위계로 사용되었으며, 본 프레임워크는 3가지 방안으로 구성된다.

- 대체 요인(Substitute trips): 거주지를 벗어나는 이동을 하지 않기 위한 대체 행위
  - 교통: 최대한 이동을 하지 않는 방식으로 전환하는 행위로, 교통 부문에는 라스트마일 딜리버리를 이용하거나 배달 시 유동적인 픽업·배달지를 구축하는

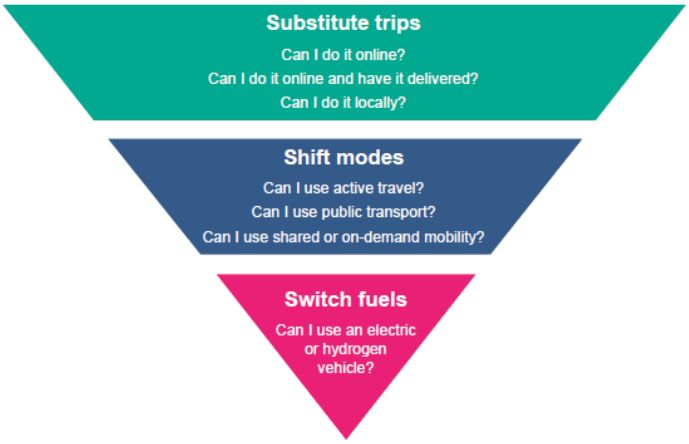
16) RTPI(2021). NET ZERO TRANSPORT – The role of spatial planning and place-based solutions. pp.2-11. 참고하여 작성.
* RTPI(Royal Town Planning Institute)는 영국왕립도시계획협회로 정책 연구를 함께 수행 중인 기관

것이 포함된다.

- 토지이용계획 및 거리 설계: 공동작업 공간을 새로 개발하거나 기존에 사용되지 않는 상점을 리모델링하여 활용하는 것이 포함된다. 또한 혼합이용 개발을 하거나, 지역 내 편의시설을 도보 15분 이동 가능한 거리에 설치하는 방식이다. 즉, 멀리 이동하지 않고 지역 내에서 해결하거나 온라인으로 수행하는 방식이다.

- 변경 모드(Shift modes): 이동이 길어질 경우, 공유 모빌리티 및 대중교통 이용
  - 교통: 이동을 해야 하는 상황에서 되도록 공유 모빌리티 및 대중교통을 이용하고 관련 인프라를 확장하는 방식이다. 공유 모빌리티로는 자전거, 전기자전거, 전기차를 공유하고, 카풀을 하는 것이 권장된다. 대중교통 측면으로는 수요응답 교통 및 공유 합승, BRT, 버스우선 교통신호체계, 셔틀과 라스트마일 연결, MaaS 활성화가 포함된다.
  - 토지이용계획 및 거리 설계: 차 없는 거리 지구 조성, 자동차에서 대중교통으로의 전환을 위한 가로 공간, 구간속도 20mph존, 주차 지역 제한, 교통 혼잡부과 지역 조성 등이 포함된다.

- 연료 변경(Switch fuels): 차량으로 이동하는 경우, 전기나 수소연료를 통한 탄소배출 저감 제로 실현
  - 교통: 기존의 이동수단에서 연료만 변경하는 것이다. 전기, 수소 연료 이용 활성화를 위해 충전소를 다양한 지역에 설치한다.
  - 토지이용계획 및 거리 설계: 탄소 저배출 지역을 설정한다.



[그림 2-7] 지속가능한 접근 및 모빌리티 프레임워크
출처: RTPI(2021). NET ZERO TRANSPORT – The role of spatial planning and place-based solutions. p.9.

[표 2-9] 지속가능한 접근 및 모빌리티 프레임워크의 세부 내용

구분		대체 요인	변경 모드	연료 변경
교통	도보	- 인프라 설치	-	-
	자전거	- 인프라 설치	- 공유	- 전기 자전거 전환
	자가용	-	- 공유(카풀)	- 전기 이동수단 충전소(가정용) + 그리드 기술의 이동수단 확대 - 전기 이동수단 충전소(전용 충전소, 상점, 업무지구, 모빌리티 허브) 설치 - 수소 연료 충전소(전용 충전소, 상점, 업무지구) 설치
	대중 교통	- 라스트마일 확대	- 모빌리티 허브(통합 네트워크) - 수요응답 교통 및 공유 합승 - BRT - 버스 우선 교통신호체계 - 자동 이동수단 셔틀 - 라스트마일 연결 - MaaS - 통합대중교통, 수요응답 및 공유 모빌리티 서비스	- 전기 이동수단 충전소(가정용) + 그리드 기술의 이동수단 확대 - 전기 이동수단 충전소(전용 충전소, 상점, 업무지구, 모빌리티 허브) 설치 - 수소 연료 충전소(전용 충전소, 상점, 업무지구) 설치
	수송	- 화물 자전거 라스트마일 딜리버리 - 가정용 배달을 위한 유동적인 픽업 및 배달지	-	- 상업용과 서비스용의 전기사용화 - 지역 내 이용과 서비스용의 전기사용화
토지 이용 계획 및 거리 설계	토지 이용	- 광범위한 지역 수요를 충족시키기 위한 혼합이용 개발 - 지역 내 여가시설 확충	-	- 저배출 지역 설정 - 깨끗한 공기 지역
	공간 이용	- 공동작업 공간(새로운 개발 또는 사용되지 않는 상점 이용)	-	-
	거리 설계	- 도보 및 자전거로 접근 가능한 지역 내 편의시설 설치(15분 내 이동)	- 적극적 이동 인프라를 우선으로 하는 신호체계 - 차 없는 거리 지구 조성 - 자동차에서 적극적 이동수단 및 대중교통으로의 전환을 위한 가로 공간 - 구간속도 20mph 존 - 주차 지역 제한 - 교통 혼잡세 부과 지역	-

출처: RTPI(2021). NET ZERO TRANSPORT - The role of spatial planning and place-based solutions. p.11. 참고하여 작성.

□ 시나리오 평가를 위한 탄소 배출 저감 산정법

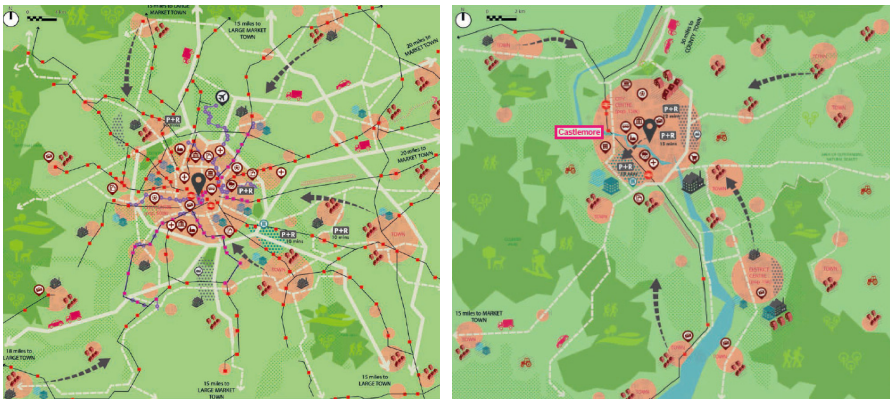
본 연구는 지방 당국에 대한 영국 영토 내에서의 배출 표를 기반으로 한 탄소 분해 세분화 모델(Carbon disaggregation model)을 사용했으며 세부 방법은 다음과 같다.

- 세분화 모델은 연구에서 조사된 4가지 유형 각각에 육상 배출량을 할당
  - 본 모델은 출발지-목적지 여행 패턴에 대한 심층 분석을 활용하여 통근 행동 및 배출량을 설정
  - NTS 내에서 관찰된 관계를 사용하여 모든 목적과 모드에 걸쳐 탄소 할당
  - 국가이동 서베이(NTS: National Travel Survey), 2011년 인구 조사 및 교통부의 지역 도로 교통 데이터에서 가져온 여행 목적 및 모드 공유 데이터 사용
- 개인 여행의 경우 그 결과는 2008년 교통부가 수행한 유사한 사례에 대해 검증되었으며, 모델에 대한 차량 배기가스 가정의 영향도 교통부의 WebTAG에서 배출 계수를 사용하여 검증
- 탄소 감소 개입 시험으로 각 유형에 대해 탄소를 분해한 후 지표 수송에서 배출을 줄일 수 있는 약 40개의 개입 고려(위의 표 '지속가능한 접근 및 모빌리티 프레임워크')
  - 각 개입에 대한 탄소 감소 영향은 이용 가능한 학술 및 실제 증거를 기반으로 모델링 되며, 각 개입은 지속가능한 접근 및 모빌리티 프레임워크의 세 가지 종류 중 하나에 배치

□ 주요 내용(다핵도시 Wotton City-Region과 일핵도시 Castlemore의 사례만 발췌)

다핵도시인 Wotton City-Region의 경우, 3백만 명의 인구가 거주하는 것으로 가정하였으며, 인근 지역에서 주요 시가지 및 업무지구로 상당한 수의 통근량이 존재한다. 이동수단은 개인 이동수단 61%, 대중교통 27%, 도보 및 자전거 12%의 비중을 차지한다. 대중교통 네트워크는 버스, 기차, 경전철로 구성되며, 새로운 도보 및 자전거 도로를 만들고 전기 이동수단을 확대할 계획을 갖고 있다.

일핵도시인 Castlemore는 15만 명의 인구가 거주하는 것으로 가정하였으며, 계속 성장해가고 있는 지역이다. 높은 주택 수요가 있으며 저밀도 도시 확장이라는 전통적 접근법을 갖고 있는 지역이다. 이동수단은 개인 이동수단 69%, 대중교통 12%, 도보 및 자전거 19%의 비중을 차지한다. 대중교통은 경전철, 버스로 구성되며, 대중교통과 적극적 이동 네트워크 사이에 통합 연계망이 좋지 않고 자전거 인프라가 제한적이다.



[그림 2-8] 다핵도시 Wotton City-Region과 일핵도시 Castlemore
출처: RTPI(2021).NET ZERO TRANSPORT – The role of spatial planning and place-based solutions. pp.5-6.

- 도출 시나리오

시나리오는 총 5개로 구분할 수 있다. 첫 번째 시나리오인 '아무것도 하지 않기'는 추가적인 이동 수요를 발생시키는 상황과 함께 교통 부문 배출의 증가로 나타난다. 두 번째 시나리오인 부정적인 탄소 개발 시나리오(단계 1)는 이를 회피하기 위해 모든 개발이 교통 부문으로부터 탄소배출 0을 만들기 위해 위치 및 설계되어야 한다. 세 번째 시나리오인 대체 요인(단계 2)은 디지털, 교통 수단, 토지 이용계획 요소 등을 통해 이동이 대체되며 이는 이동 수요를 감소시킨다. 네 번째 시나리오인 변경 모드(단계 3)는 적극적 이동 인프라 및 대중교통으로 이동수단을 변경함으로써 탄소 배출을 감소시킨다. 다섯 번째 시나리오인 연료 변경(단계 4)은 개인 이동수단, 수송 부문, 대중교통의 연료를 전기와 수소 같은 친환경 연료로 전환함으로써 탄소연료 사용을 감소시킨다. 마지막 시나리오인 '모든 것을 하기'는 문자 그대로 활용할 수 있는 모든 수단을 적용하는 것이다.

[표 2-10] 다핵도시 Wotton City-Region과 일핵도시 Castlemore의 교통 부문 80%를 위한 시나리오별 탄소 배출 경로

시나리오	결과	
	다핵도시 Wotton City-Region	일핵도시 Castlemore
1. 2020 교통 부문 '아무것도 안하기'	추가적인 이동 수요를 발생시키는 새로운 개발과 함께 연간 176ktCO2e의 탄소 배출	추가적인 이동 수요를 발생시키는 새로운 개발과 함께 연간 20ktCO2e의 탄소 배출
2. 부정적인 탄소 개발 시나리오 (단계 1)	모든 개발은 교통으로부터의 탄소배출 0을 만들고 더 광범위한 교통 네트워크로부터 탄소 배출 제거를 위해 배치 및 설계	
3. 대체 요인 시나리오	디지털, 교통 수단, 토지 이용계획 요소 등을 통해 이동이 대체됨. 이는 이동	디지털, 교통 수단, 토지 이용계획 요소 등을 통해 이동이 대체됨. 이는 이동

(단계 2)	수요를 감소시키고 연간 359ktCO2e의 탄소 배출 절감	수요를 감소시키고 연간 40ktCO2e의 탄소 배출 절감
4. 변경 모드 시나리오 (단계 3)	적극적 이동 인프라(112ktCO2e) 및 대중교통(223ktCO2e)으로 변경함으로써 이동수단을 통한 배출 감소. 이는 연간 335ktCO2e의 탄소 배출 감소	적극적 이동 인프라(7ktCO2e) 및 대중교통(4ktCO2e)으로 변경함으로써 이동수단을 통한 배출 감소. 이는 연간 11ktCO2e의 탄소 배출 감소
5. 연료 변경 시나리오 (단계 4)	개인 이동수단(535ktCO2e), 수송 부문(585ktCO2e), 대중교통(84ktCO2e)에서 탄소연료 사용 0으로 변환함으로써 연간 1,204ktCO2e 감소	개인 이동수단(64ktCO2e), 수송 부문(72ktCO2e), 대중교통(6ktCO2e)에서 탄소연료 사용 0으로 변환함으로써 연간 142ktCO2e 감소
6. 2030 교통 부문 '모든 것을 하기'	추가적인 20%의 노력을 통해 2050년까지 넷제로 달성 가능	추가적인 20%의 노력을 통해 2050년까지 넷제로 달성 가능

출처: RTPI(2021).NET ZERO TRANSPORT – The role of spatial planning and place-based solutions. pp.27-32. 참고하여 재작성.

□ 시사점

탈탄소는 자가용 의존을 감소시키고 더 건강하고 안전하며 공정한 지역사회 건설을 위한 촉매제로써 작동한다. 반면, 친환경 연료로 전환하는 경우에는 감축하고자 하는 목적의 절반 정도만 달성 가능하였다. 이는 연료 전환이 병행되어야 하지만 단순한 연료 전환보다는 지역주민의 이동 수요가 자가용에서 대중교통 및 공유 모빌리티 형태로 전환되는 것이 중요하다는 점을 시사한다.

또한, 통합적 교통 네트워크는 개인 이동수단을 위한 접근과 주차를 고려하여 설계되어야 한다. 이를 달성하기 위해서는 새로운 도로 수용량과 이동 수요의 예측되는 변화를 충족시킴으로써 기존의 접근에 결정적인 제동을 거는 것이 요구된다. 계획 시스템은 새로운 개발을 위한 촉진, 할당, 서비스 부문도 함께 살펴봐야 한다. 이러한 변화는 경제·사회·환경적 목적과 함께 이동량 감소, 이동수단 전환, 탄소배출 감소를 위한 도전적인 목적을 달성할 수 있는 장소기반 비전을 위해 교통과 토지이용계획을 결합하는 통합적 접근을 필요로 한다.

3. 생활권 단위 탄소중립 공간계획의 필요성과 방향

1) 생활권의 개념 및 공간규모별 탄소중립 계획

(1) 생활권의 개념 및 규모와 범위

□ 화석연료 사용을 최소화할 수 있는 공간 단위

해외의 근린주구나 우리나라 도시계획에서 사용하고 있는 생활권의 개념은 기본적으로 도보로 이동이 가능하고 생활할 수 있는 범위로 보고 있다. 즉, 자가용과 같은 화석연료를 사용하는 이동수단의 고려 없이 도보와 자전거 등을 중심으로 공간계획 수립이 가능한 규모가 생활권이라는 것이다. 그리하여 생활권은 탄소중립의 실현 가능성이 가장 높은 공간 단위로 평가할 수 있다.

□ 생활권의 개념

- 해외의 전통적 개념

생활권과 관련하여 과거부터 이어져 온 전통적 개념으로는 19세기 말 영국의 하워드(Ebenezer Howard)가 주창한 전원도시(Garden City)를 시초로 볼 수 있다. 대도시 주변에 전원도시의 성격을 지니는 자족적인 마을의 생활권으로서, 1920년대 미국에서 자동차가 급속도로 보급되면서 계획된 서니사이드 가든, 래드번 등의 대규모 주거지 개발에 영향을 미쳤으며 이후 페리의 근린주구 이론에도 영향을 끼쳤다(백혜선 2008).

근린주구 이론은 1929년 도시이론가 클로렌스 페리에 의해 등장하였으며, 근린주구의 규모를 '주거단위의 범위로서 한 초등학교 운영에 필요한 인구 규모를 가지는 크기'로 규정하였다. 이는 초등학교와 주민이 필요한 상업시설 및 레크리에이션 시설을 포함하며, 간선도로에 의해 구획되어지는 공동체의 한 영역으로 정의할 수 있다(조성용·최진희 2018; 백혜선 2008).

- 우리나라의 도시계획 차원에서의 생활권 개념

한국의 경우, 일제강점기·해방 이후 이루어진 주거지계획에서 생활권 개념이 처음으로 도입된 것으로 보며, '주거지계획지침'에서 생활권의 구체적 용어와 범위를 규정하고 있다(조성용 외 2018). 최근에는 자기완결적인 생활권을 구성하려는 계획방식에서 점차 인접 생활권으로의 개방과 연계하려는 의도를 통해 생활권의 범위를 보다 도시 공간으로 확장하려는 경향이 나타나고 있다(백혜선 2008).

[표 2-11] 한국 주거 생활권 개념 시기적 변화

시기	개념 변화내용	공간구성의 위계와 중심시설
1965-75	소규모 주거지중심, 생활시설 분배와 적정배치	분구(놀이터) - 주구(상점, 학교) 분구(공원) - 주구(상가, 학교)
1975-85	인보구 - 분구 - 주구 - 지구 (위계개념)	최소단위(놀이터) - 분구(유치원, 단지상가) - 주구(주구상가, 학교) - 지구(중심상업시설)
1985 이후	위계적 계획비판, 생활단위의 통합, 생활권 개념에 대한 부정	분구 - 주구 - 지구 - 지역 - 도시 소생활권 - 중생활권(3개의 소생활권 구성) 근린생활권 - 소생활권 - 중생활권 - 대생활권 근린주구 - 소생활권 - 중생활권

출처: 조성용·최진희(2018). 생활권과 지역중심 교육공간의 역할 변화에 관한 연구. 청소년시설환경. 16(1). p.18.

1960년대부터는 우리나라 최초의 아파트가 건설되며 근린주구론이 도입되었다. 1970년대에는 주거지 개발이 확대됨에 따라 주거지 계획의 생활권 설정기준과 관련된 최초의 법규인 「도시계획시설기준에 관한 규칙」이 1979년 제정되었다. 이는 초등학교가 근린주구의 중심시설이 되도록 하는 등 근린생활권에 관한 시설 및 규모 등의 기준을 규정하였으며, 2002년 12월 "도시계획시설의 결정, 구조 및 설치기준에 관한 규칙"으로 명칭이 개정되어 현재에 이르고 있다(백혜선 2008). 1980년대에는 본격적인 신시가지 조성이 시작되며 단계적·선형적 생활권이 도입되었다. 1990년의 제 1기 신도시 건설에는 가로 및 녹도 중심의 생활권이 구상되었으며, 2000년대의 제 2기 신도시 건설, 서울시 뉴타운 개발에는 생활가로 개념이 도입되었다.

[표 2-12] 국내 생활권 계획개념 흐름

구분	사회변화	생활권 계획개념 특성 및 주요사례	분석 대상지
1960	- 아파트 최초 건설	근린주구론 도입 - 한강아파트(1966)	- 한강아파트(1966)
1970	- 주거지 개발 확대	블록단위 생활권 - 반포아파트(1972), 잠실아파트(1975)	- 반포아파트(1972) - 잠실아파트(1975)
1980	- 신시가지 조성	단계적·선형적 생활권 - 과천신도시(1980), 목동신시가지(1983)	- 과천신도시(1980) - 목동신시가지(1983) - 상계신시가지(1985)
1990	- 제 1기 신도시	가로 및 녹도중심의 생활권 - 분당, 일산, 평촌, 중동신도시(1989-1990)	- 분당신도시(1989) - 일산신도시(1990)
2000	- 제 2기 신도시 건설 - 서울시 뉴타운 개발 - 그린벨트해제지구 개발	생활가로 개념 - 길음, 은평, 왕십리뉴타운(2002) - 용인동백, 화성동탄, 성남판교, 수원이외 김포 신도시(1999-2003) - 파주운정신도시(2003)	- 용인동백신도시(1999) - 화성동탄신도시(2001) - 의정부녹양지구(2002) - 길음 뉴타운(2002) - 은평 뉴타운(2002) - 파주운정신도시(2003)

출처: 백혜선(2008). 국내 주거지 생활권 계획개념 및 사례분석. 가정과삶의질학회 학술발표대회 자료집. p.125.

도시계획 상 생활권에 대한 정의는 유사하면서도 다양하게 논의되고 있다.

먼저 다양한 활동을 포함해 일상생활이 반복적으로 이루어지며 이를 영위하는데 필요한 생활 편의 및 서비스시설을 중심으로 군집된 지역적 범위로 정의할 수 있다(오병록 2012; 조성용 외 2018). 이 관점에서 생활권 계획은 반복적 일상생활의 빈도 및 이동 거리에 따라 그 위계를 구분할 수 있다(오병록 2012). 한편, 일상생활이 밀접하게 결합되는 공간이라는 점에 집중했을 때 이는 행정구획에 구애되지 않게 된다.

생활권은 주택지 개발의 기본단위이자, 행정적이고, 물리적인 일상생활뿐 만이 아닌 사회적, 심리적 요소들도 복합적으로 작용하는 범위로 정의하기도 한다(조성용 외 2018). 또한, 동질적인 공동체의 개념이 강조되는 사회단위로서 주민의 공동체 의식을 형성하게 하고 공동 서비스나 사회활동을 영위하는데 필요한 각종 시설을 주거지 주변에 확보하고 활용할 수 있는 지역적 범위로 보기도 한다(이성우 2009).

서울시 생활권 계획에서는 생활권을 통근·통학·쇼핑·여가·친교·업무·공공서비스 등 주민들의 일상적인 생활 활동이 이루어지는 공간 범위로 정의하고 있다. 생활권 공간의 기본 구성요소로 생활중심지와 배후지, 기본적인 공간단위는 행정동 경계와 자치구 경계를 넘지 않도록 설정한다. 또한, 시·구 경계지역은 계획내용의 공유를 통해 계획의 일관성과 연속성을 확보하도록 개념을 설정하고 있다(서울특별시 2019).

생활권에서 발전된 개념으로서 보행일상권도 등장하였다. 보행일상권은 디지털 대전환과 코로나19 팬데믹으로 업무공간의 시공간적 제약이 사라지고 주거가 일상생활의 중심공간으로 부상하면서 달라진 라이프스타일을 반영한 새로운 개념의 도시공간으로 정의한다. 이에 따라 기존에 '주거' 위주로 형성된 일상생활공간을 전면 개편해 도보 30분 이내 보행권 안에서 일자리, 여가문화, 수변녹지, 상업시설, 대중교통거점 등 다양한 기능을 복합적으로 누리는 자립적인 생활권을 만드는 개념으로 구체회하고 있다(한국방송뉴스 2022). 보행과 관련하여 초등학교 중심의 근린주구이론에서 지가와 시설밀도가 높고 대중교통의 이용이 용이하며 보행량이 많은 곳으로 실질적 생활권 중심이 형성되는 것으로 본다(구미경 외 2016). 즉, 단위 생활권은 하나의 보행권이 되도록 하고 가능하면 통학권·일상생활권 등과 일치하도록 설정하는 것을 원칙으로 한다(이성우 2009).

[그림 2-9] 보행 일상권의 개념
출처: 한국방송뉴스(2022). 서울시, 디지털 대전환시대 미래공간전략 '2040 서울도시기본계획' 발표. http://www.ikbn.news/news/article.html?no=137697/ (접속일: 2022.3.18.)

□ 생활권의 규모와 범위

생활권과 관련된 선행 문헌들에서는 주로 그 규모와 범위에 대해 크게 소생활권과 중생활권으로 구분하고 기술하고 있다.

- 소생활권

소생활권은 인구 0~1만 명, 면적 2-4㎢ 규모의 보행 가능한 범위로서 동사무소와 같은 기본적 공공시설과 초등학교를 이용하는 범위로 정의할 수 있다. 또한, 최소경제활동을 충족하기 위한 기본적 필요시설이 배치된 공간으로서, 일상적 생활권에 필요한 각종 서비스를 교통수단을 이용하지 않고 걸어서 접근 가능한 범위이다(오병록 2012).

또는, 인구 1~2만 명을 적정 규모로 보는 경우도 있다(구미경·양우현 2016, 장한두·손창희 2020). 이를 근린주구 이론의 생활권을 기본으로 지역간선도로로 구획되고 행정단위 동을 기준으로 구분되는 범위로 보거나(구미경·양우현 2016), 보행으로 접근 가능한 범위인 반경 700m 규모에 행정동 1.6개 규모의 근린생활권 범위로 정의하기도 한다(장한두·손창희 2020).

- 중생활권

중생활권은 인구 5~7.5만 명, 10~15㎢의 면적으로 정의될 수 있다. 또한, 지역 순환 대중교통을 이용해 10~15분 이내 이동 가능하며 경찰서나 소방서 관할 범위, 중·고등학교 이용이 가능해야 한다(오병록 2012). 또는, 5~10만 명의 인구가 거주하고, 3~4개의 소생활권이 합쳐진 규모로 정의될 수 있다(구미경·양우현 2016). 서울의 경우, 인구 10만 명 정도(최소 5만~최대 13만 명)의 규모로, 3~4개 행정동을 합친 크기로 정의된 바 있다(양재섭·남선희 2015).

[표 2-13] 생활권 규모

구분	면적(km^2)								인구(만 명)							
도시 규모	광역시		대도시			소도시			광역시		대도시			소도시		
생활권 구분	대	중	대	중	소	대	중	소	대	중	대	중	소	대	중	소
평균	84.4	29.5	56.7	17.2	6	55.1	32.4	14	33.4	14.2	31.5	10.1	2.8	24.1	7.4	2.9
최대/최소	32	59	13	28	157	3	47	275	22	115	7	58	16	2	62	214
최빈 규모	0-50	10-20	20-60	5-10	0-2	-	10-15	2-4	20-30	5-10	30-40	5-10	1-5	-	5-7.5	0-1

출처: 오병록(2012). 생활권 이론과 생활권계획 실태 분석 연구: 도시기본계획에서의 생활권계획을 중심으로. 서울도시연구. 13(4). p.12.

[표 2-14] 생활권 위계별 규모 선행연구

구분	1차 생활권	2차 생활권	3차 생활권
	소생활권	중생활권	대생활권
대한국토도시계획학회(2001)	인구는 개발밀도에 따름 / 보행권	지방소도시	대도시
김철수(1994)	1-2만 명	5-10만 명	20-30만 명
Perry(1939)	근린주구 / 5,000명, 반경 400m, 면적 160acre	-	-
국토해양부(1995)	근린주구 / 1-3천 세대, 반경 400m	-	-
이영석(1992)	5만 명	최대 30만 명	50만 명
박병주·김철수(2004)	근린생활권 / 2-3만 명	10-15만 명	30-50만 명
정삼석(2004)	행정동 기준 / 2-3만 명	10만 명	30-50만 명
양동양(2006)	근린지구 / 100,000명, 반경 1km, 면적 400ha		
이강제(1999)	근린지구, 2-4개의 근린주구		
土肥博至·御丹公哲(1985)	중학교구	지구	전지구
	2-3만 명	3-5만 명	150,000명
伊藤喜栄(2006)	5천 명 이상	1만 명 이상	

출처: 오병록(2012). 생활권 이론과 생활권계획 실태 분석 연구: 도시기본계획에서의 생활권계획을 중심으로. 서울도시연구. 13(4). p.6.

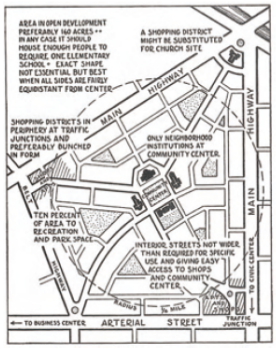
- n-분 도시

최근에는 '15분 도시', '20분 도시' 등과 같은 'n-분 도시' 개념이 새롭게 회자되고 있다. 이는 일상생활에 필요한 여러 도시기능 혹은 도시서비스가 우리의 집 주변에 매우 편리하게 배치된다는 '물리적' 시설 요소의 축으로 이해할 수 있다. 또한, 이러한 도시기능 및 도시시설에 접근하는 방식이 걸어서 15분 혹은 20분이라는 그리 길지 않은 시간이라는 점에서 '시간적' 측면에서 이해할 수 있다. 국내에서는 해외의 n-분 도시 전략계획보다 시기적으로 먼저 기초생활 인프라 혹은 생활 SOC 공급 등의 정책을 통해 본 개념에 대한 현실 논의가 상당히 진전되어 왔다. 이는 지역밀착형 생활 SOC 공급을 위해서는 국민 누구나 어디에 살든지 보편적인 돌봄·의료·교육·여가의 생활 서비스를 제공받을 수 있게

하는 것이 취지이다(박소현 2022).

가장 영향력이 있는 도시계획 모델 중의 하나인 페리의 근린주구 개념(1929)에서는 걸어서 10분 정도 걸리는 주거지 반경 내에 초등학교, 공원, 상가 등의 시설배치에 대한 기준들을 제시한다. 세부적으로 보면 하나의 초등학교 학생 1,000~1,200명에 해당하는 거주인구 5,000~6,000명의 인구를 규모로 설정하고, 어린이들이 걸어서 통학할 수 있도록 주구의 반경은 400m, 면적은 약 64ha로 한다(국토연구원 2009). 생활권의 반경을 도보 평균 13.5분에 우리 동네로 인식(10분 내외 도보) 가능한 규모인 약 600~700m 정도로 보기도 한다(김찬호·황희돈 2008). 이후 등장한 개념인 뉴어바니즘, 그린어바니즘에서는 근린의 기능과 서비스 배치가 상가나 커뮤니티센터 재배치, 녹지와 대중교통허브를 강조하는 것으로 진화하였다. 그러나 그 적정 영역의 범위가 여전히 걸어서 10분이라는 시간성과 이로 대변되는 1/2마일 반경의 거리라는 점은 변하지 않고 있다(박소현 2022).

Clarence Perry(1929)



Source: Perry, C.(1929), The Neighborhood Unit, a Scheme for Arrangement of the Family-Life Community, Regional Plan of New York and Its Environs., New York

Duany Plater-Zyberk(1994)

Source: Congress for new urbanism. (1999). The Charter of the New Urbanism.

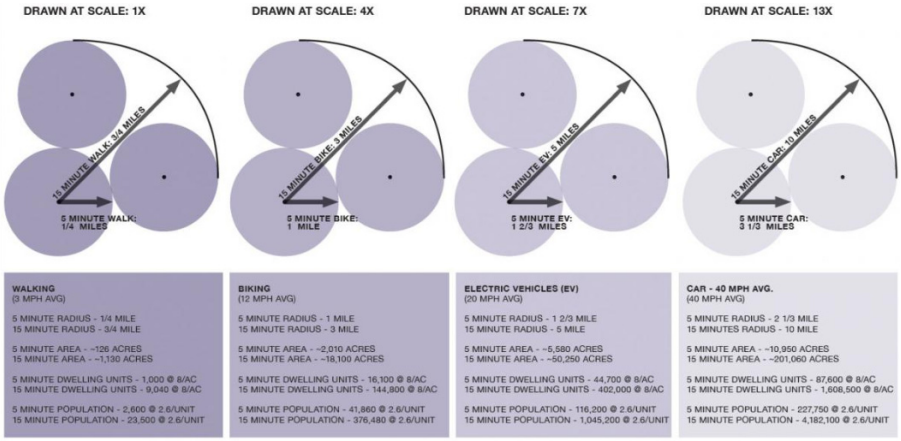
Douglas Farr(2007)

Source: Farr, D. (2008). Sustainable Urbanism: Urban Design with Nature, Wiley and Sons.

[그림 2-10] 근린주구, 뉴어바니즘, 그린어바니즘

출처: 박소현(2022). 스마트시티 글로벌 저널 2022: 스마트시티를 통한 도시구조 혁신 및 탄소중립사회 실현 방안. 국토교통과학기술진흥원. p.81.

한편, 어떤 교통수단을 이용하느냐에 따라 동일 시간에 이동할 수 있는 거리가 달라짐에 따라 'n-분 도시'라는 표현은 모호한 부분이 있다는 지적도 존재한다. 하지만 'n-분 도시'를 정의함에 있어 대체적으로 자동차를 이용한 이동은 제외되는데, 자동차를 이용한 경우 대부분의 광역권이 30분 이내 도달할 수 있기 때문에 'n-분 도시'의 지향점과 맥락이 다르기 때문이다. 사실상 자동차가 대규모로 확산되기 이전에 세워진 대부분의 도심지는 신도시와 달리 'n-분 도시'의 구조를 갖고 있다고 볼 수 있다(Andres Duany·Robert Steuteville 2021).



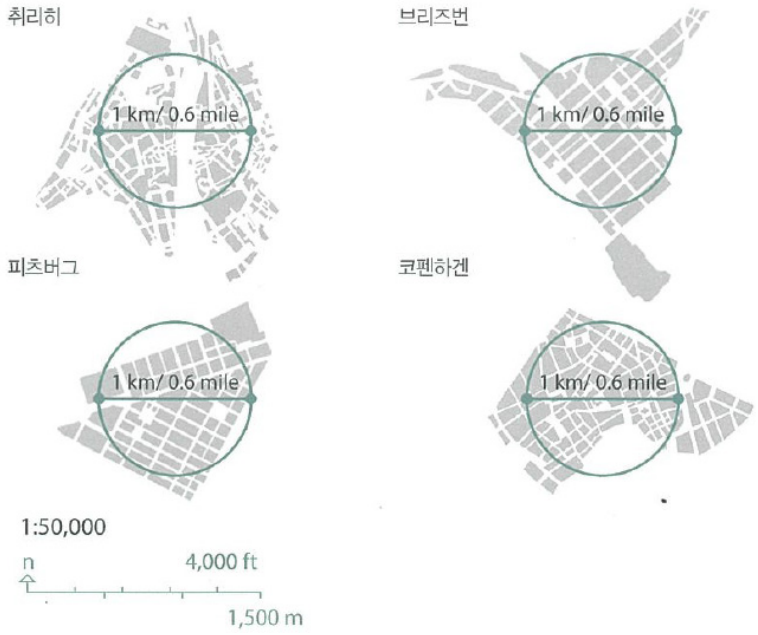
[그림 2-11] 도보, 자전거, 전기 이동수단, 자동차를 통한 15분 반경 비교
출처: Andres Duany·Robert Steuteville(2021). Defining the 15-minute city. Public Square. https://www.cnu.org/publicsquare/2021/02/08/defining-15-minute-city/ (접속일: 2022.10.19.)

국내 신도시를 보면 400미터 반경의 근린 단위가 연속적으로 이어지는 형태로 개념적으로는 10분 거리 안에 생활에 필요한 공원, 학교, 상업 기능이 연계되어 조성되어 왔다. 즉, 앞서 살펴본 n-분 도시, 근린주구 개념과 그에서 진화한 개념, 국내 신도시 모든 사례에서 공통적으로 찾을 수 있는 것은 생활 서비스가 '도보 가능 거리'에 있다는 것이다(박소현 2022).

[그림 2-12] 보행 권역으로 정리한 진화도
출처: 박소현(2022). 스마트시티 글로벌 저널 2022: 스마트시티를 통한 도시구조 혁신 및 탄소중립사회 실현 방안. 국토교통과학기술진흥원. p.82.

□ 도시에서의 보행 거리

보행자가 받아들일 수 있는 보행거리는 상대적으로 유연한 개념이다. 일반적으로는 받아들일 만한 보행거리로 500m가 도심의 규모를 결정하는 데 적용되며, 지금까지 대부분의 도심 면적은 1km x 1km로서 약 $1km^2$로 측정된다. 즉, 보행자가 걸어서 1km 이내에 도시의 모든 중요한 기능에 도달할 수 있게 한다는 것을 의미한다. 이 경우, 보행거리 1km는 도시의 크기가 커진다고 해서 변하는 것으로 보지 않는다(Jan Gehl 2020, p.121).



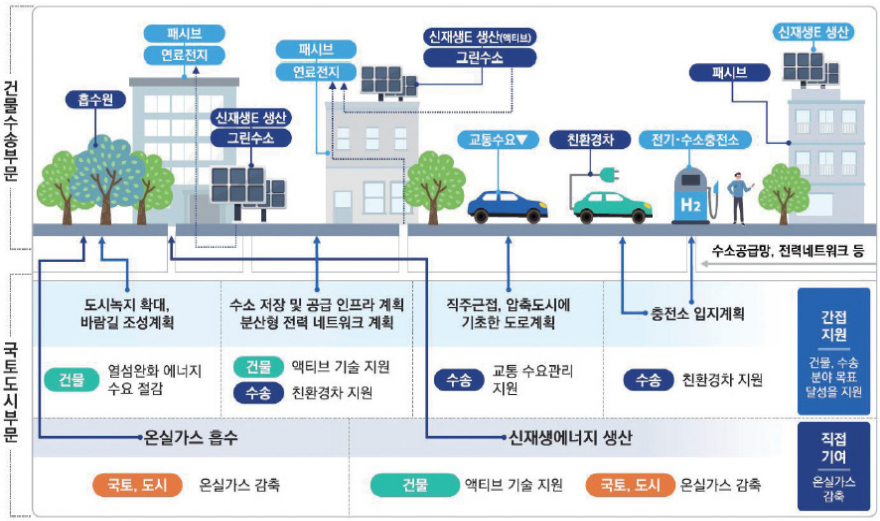
[그림 2-13] 보행자가 받아들일 수 있는 보행거리와 도시 면적 $1km^2$
출처: Jan Gehl(2020). 사람을 위한 도시. 국토연구원. p.121.

(2) 공간규모별 탄소중립 계획

□ 국토·도시 단위

국토·도시 차원에서 탄소중립을 추진하는 가장 근본적인 수단은 효율적인 공간구조를 설계하고 분야별 세부 요소를 체계적으로 적용하는 것이다. 즉, 부문별로 산재해있는 탄소 배출원을 국토·도시 부문 차원에서 통합적으로 접근하는 것이다.

직접적인 기여는 신재생에너지 시설을 설치하거나 녹지·산림 등의 탄소흡수원을 조성하는 것이다. 간접 기여는 국토·도시 계획에서 타 부문의 탄소중립 정책 추진에 필요한 기반시설을 배치 및 연계하거나, 도시 열섬 관리 또는 용도혼합을 유도하여 수송과 건물 부문의 에너지 수요를 낮추는 것이다(안예현·윤은주 2021, p.2).



[그림 2-14] 국토·도시 탄소중립 정책의 기능
출처: 안예현·윤은주(2021). 국토·도시 차원의 탄소중립 정책 방향과 과제. 국토연구원. 국토이슈리포트 46호. p.3.

국토 차원에서 보면 기존의 구조는 전 국토의 효율적인 탄소배출·흡수 관리를 위한 종합적인 접근이 부족했다. 이에 수도권이나 일부 지역에서 과도한 탄소배출이 발생했으며 인구구조, 산업별 특성, 입지 등을 고려한 체계적인 관리는 사실상 불가능한 측면이 있었다. 이에 권역별 특성에 최적화 된 탄소감축형 공간구조를 구상하고 탄소중립 거점을 육성하는 필요성이 제기되었다(안예현·윤은주 2021, p.5). 즉, 탄소저감에 불리한 수도권 일극 체제를 다핵 구조로 개편하여 지역별로 차별화된 전략과 실행수단을 마련하며, 지역 내 친환경에너지 생산과 소비의 균형을 고려하여 지역별로 완결된 탄소중립화 정책을 추진해야 한다(박종순 외 2021, p.9)는 것이다.

2021년, 행정중심복합도시건설청은 '행정중심복합도시 2040년 탄소중립 추진 전략'을 수립했다. 본 전략은 정부의 저탄소 전환 정책에 맞춰 제로에너지 도시 건설, 친환경 교통·인프라 확충, 그린에너지 도입·확산, 탄소배출과 에너지 수요관리 강화, 시민 참여와 인식 제고의 5대 전략으로 구성되어 있다. 구체적으로 보면 제로에너지 도시 건설을 위해 생활권 단위의 에너지 자립 목표를 설정하고 단독주택·공동주택 등 다양한 제로에너지 특화단지·지구를 조성해 행복도시 내 제로에너지 건축물(ZEB)을 확산할 방침이다. 친환경 교통·인프라 확충 부문에서는 자전거 이용 편의를 개선하고 친환경 차의 상시 충전 인프라를 설치하는 한편 교통 수요관리 개선을 위해 통합교통서비스(MaaS)를 확대 도입한다. 그린에너지 도입·확산 부문에서는 태양광, 수소연료전지, 지열 등 그린에너지 공급을 확대하고 P2P 에너지 거래 서비스 실증, 가상발전소 운영 등을 추진한다. 탄소배출 및 에너지 수요관리 강화 부문에서는 탄소 배출 모니터링·분석·환류를 위한 시스템을 구축하고, 기후 위기에 대한 공감대 확산을 위한 민·관·연 탄소중립 협의기구를 구성해 운영하는 방안을 제시했다.

[표 2-15] 세종시 2040 탄소중립 5대 추진 전략

전략	주요 내용
제로에너지도시 건설	- 스마트 제로에너지도시 도입 및 확산 - 제로에너지 특화 추진 - 제로에너지도시 건설 추진기반 구축
친환경 교통·인프라 확충	- 친환경차 및 대중교통 활성화 - 미래차 중심 인프라 전환 - 교통 수요관리 개선
그린에너지 도입·확산	- 블루·그린수소 도입 및 공급 확대 - 재생에너지 보급 확대 - 에너지 생산 및 거래 활성화
탄소배출 및 에너지 수요관리 강화	- 행복도시 탄소관리시스템 구축·운영(M-CAS) - 에너지 통합관리시스템 및 빅데이터 구축·활용 - 탄소흡수원 기능 강화
시민참여 및 인식 제고	- 민·관·연 탄소중립 협의기구 구성·운영 - 탄소중립 교육 및 홍보 강화 - 시민참여 지원 및 활성화

출처: 행정중심복합도시건설청(2021). 행복도시 2040 탄소중립 첫걸음 내딛다. 9월 9일자 보도자료. p.4.

단지계획 차원에서 보면 친환경 토지이용, 녹색교통 체계, 신재생 에너지, 에너지 절감 건축, 자원순환 시스템이라는 5대 기본계획요소로 구분하여 탄소중립단지 계획에 적용할 수 있다(이명식 2022).

[표 2-16] 탄소중립단지 계획 적용방안의 항목별 특징

항목	특징
친환경 토지이용	- 바람길 및 대기 순환을 고려한 시설물 배치 - 거점지역의 압축·복합고밀 개발을 통한 접근성 제고 - 기존 지형 보호 등을 통한 자연순응형 개발
녹색교통 체계	- 보행 및 자전거 활성화 시스템 도입 - 대중교통의 활성화 및 녹색교통수단의 확대 - Transit Mall(대중교통 전용지구)을 이용한 차량 이용 억제 - 공용주차공간의 녹지화 등 친환경적인 주차계획 수립
신재생 에너지	- 신재생에너지 도입 - 태양광발전시스템을 활용한 건축물 도입 - 지열에너지 및 열병합 발전소를 적용한 주거단지 계획 적용
에너지 절감 건축	- 고단열고기밀의 패시브하우스 및 신재생 에너지를 활용한 건축물 도입 - 건축물 녹화, 자연 채광 및 통풍 등의 자연에너지 활용이 가능한 건축물 도입 - 건축물 관리 시스템을 통한 냉·난방 에너지 소모의 최소화 - 태양광, 태양열, 지열, 바이오매스 등 자연친화적 신재생에너지원을 활용한 탄소저감 계획 수립
자원순환 시스템	- 높은 생태 면적률 및 자연지반 녹지율 적용 - 재활용 에너지(쓰레기, 폐기물 등)를 통한 에너지 확보 - 우수를 활용한 친수환경과 비오톱 조성 - 투수성포장을 통한 토양기능 복원 및 수자원 순환시스템 구축

출처: 이명식(2021). 탄소중립 계획요소를 활용한 단지계획. 대한건축학회. 건축. 66(1). p.19.

도시 단위에서 그린인프라에 의한 탄소흡수의 중요성이 높아짐에 따라 그린인프라 정책은 기존의 양적 확충 중심에서 탄소 흡수 기능을 향상시키는 방향으로 관심이 높아지고 있다(이은엽 2022). 한편, 도시공간에서 신재생에너지 시설을 설치하게 되면 녹지 조성에 적합한 공간은 중복됨에 따라 줄어드는 경우가 많아 서로 경합관계에 있다는 한계가 있기 때문에 상충하는 이 두 관계의 적절한 비율에 대해서는 더 논의가 필요하다(박종순 외 2021, p.8).

국토·도시 차원의 탄소중립 정책 추진에서 예상되는 문제점은 탄소 흡·배출 현황과 탄소중립 정책의 효과를 정량화하기 위한 공간 단위 데이터와 표준화된 방법이 부족하며 모니터링이 어렵다는 점이다. 또한, 같은 종류의 국토·도시 정책을 시행함에도 적용지역의 규모와 산업, 인구구성과 생활양식 등에 따라 탄소감축의 효과가 다르고, 수송 및 건물, 에너지 등 타 부문과 연계되기 때문에 계량화에 어려움이 있다(안예현·윤은주 2021, p.7). 한편, 미국, 영국, 일본 등 해외에서는 2000년대 초반부터 국토·도시 공간 단위의 탄소공간지도를 제작하여 공간계획 수립에 적극 활용하고 있다(국토교통부 2022). 이에 2022년, 국토교통부는 탄소중립공간을 조성하기 위한 국토·도시 분야의 탄소 배출 및 흡수량 데이터 기반을 마련하기 위해 탄소공간지도 구축을 발표한 바 있다.

□ 건물 단위

건물 단위의 대표적인 탄소중립 공간계획 요소는 건물 내 에너지 절감을 할 수 있는 패시브 에너지 건물, 제로에너지빌딩과 그린리모델링을 들 수 있다. 국내의 건축법 시행령에서는 단열재 설치기준을 명시하고, 에너지 절약건물에 대한 인센티브를 부여하고 있다. 또한, 건축물의 설비기준 등에서는 에너지 이용 합리화법에 의해 건축물의 각 부분별 열관류율을 지정하고 있으며 친환경건축물의 인증에 대한 규칙이 제정되어 있다. 신축건축물의 경우 건축물 에너지 절약설계 기준, 공동주택 에너지 효율등급인증제도, 친환경건축물 인증제도 등이 있다. 기존 건물 대상으로는 건축물 에너지 관리 기준, 중앙집중 공동주택의 적산 열량계 설치시공 지침, 공공기관 에너지 절약 추진 지침 등이 해당된다(이명식 2022). 디자인 및 기술적으로 보면 패시브 에너지 건물 설계, 가열 및 냉각, 산소 공급, 빗물저장 시스템 도입, 단열 및 건물의 방향 선정 등과 같은 기술과 저에너지 건축 기법의 조합을 사용하여 달성된다(장지인·황세원 2022).

한편, 우리나라는 아파트 등 공동주택 비중이 전체 주택 중 약 77%를 차지한다. 그러나 개별 공동주택 내부 부지에는 물리적으로 태양광 신재생에너지 시설을 설치할 공간과 탄소를 흡수하는 수목을 조성할 공간이 부족하다. 또한, 신축 건물과 기존 건축물에 부합하는 감축수단을 융·복합화 하여 제로에너지 건축물 수준을 목표로 설계하는 과정에서 실제 건물이 위치한 부지의 한계와 건물을 둘러싼 조건으로 인해 개별 건물 단위의 제로에너지 달성이 불가능하다는 점을 인식하곤 한다. 즉, 개별 건물 단위에서는 일정 수준 이상의 탄소감축 효과를 기대하기 어려울 수 있다. 이러한 이유로 건물부문의 온실가스를 감축하는 활동은 개별 건물을 넘어서 마을 그리고 도시로 확장되어야 함을 알 수 있다(박종순 외 2021; 이명주 2021).

□ 생활권 단위

생활권 단위에서의 탄소중립은 독립적인 최소 생활권 규모에서 온실가스 감축전략·사업들을 집약적으로 적용함으로써 해당 공간에 대한 효율적이고 효과적인 온실가스 감축 성과를 낼 수 있다. 즉, 생활권 단위는 국토·도시 단위처럼 광범위하지 않고, 탄소 감축 효과에 한계가 분명한 미시적인 건물 단위가 아님에 따라 적절한 규모에서 촘촘한 계획 구상이 가능하며 상대적으로 탄소감축 효과 계량화가 용이하다는 장점이 있다. 그러나 생활권 단위의 탄소중립은 이제 제도적 개정이 시작되었음에도 공간계획 측면의 연구는 미비한 상황이다.

개별 건물 단위를 넘어서 생활권 단위에서 탄소중립을 추진해야 하는 이유는 다음과 같다. 첫째, 모든 건물에서 탄소중립을 달성하는 것은 현실적으로 어려움이 있음에 따라, 여러 건물들을 합쳐서 탄소중립을 평가하는 것이 더 현실적이다. 둘째, 여러 동의 건물을 통합적으로 관리하는 것은 태운 열을 공유하고 전력부하를 예측함으로써 에너지 사용을 줄일 수 있는 기회를 제공한다. 셋째, 생활권 내 재생에너지원을 활용할 수 있으므로 전체 건물과 도시 밀도를 탄소중립화 할 수 있다(Abi Kallushi et al. n.d. p.1).

2022년 환경부에서는 2050 탄소중립 선언 등 탄소중립 사회로의 본격 전환에 맞춰 실제 생활이 이루어지는 도시공간 속에서 체험할 수 있는 탄소중립형 지속가능한 공간모델을 찾고자 '탄소중립 그린도시 공모사업'을 발표했다. 본 공모사업에서는 사업 대상지로 '근린생활권', '15분 거리' 등의 규모를 제시하였는데 이는 독립적 최소 생활권 규모에서 온실가스 감축전략·사업들을 집약적으로 적용함으로써 해당 공간에 대한 효율적이고 효과적인 온실가스 감축 성과를 내기 위함이다. 또한, 부산시에서는 2021년 '부산 먼저 미래로, 15분 도시 부산'이라는 비전 아래, '15분 생활권 도시', '디지털 스마트 도시', '탄소중립 그린도시'라는 3가지 전략을 제시했다. 이를 위해 지역을 60개 규모의 생활권으로 나눠 권역별로 시급한 기반시설 350개소를 우선 공급할 예정이다(부산광역시 2021).

탄소중립을 지향하는 생활권 공간계획 사례의 규모(면적 및 인구)와 각 탄소중립 목표를 살펴보면 다음과 같다.

[표 2-17] 탄소중립 지향 생활권 공간 계획 사례의 규모 및 탄소중립 목표

사례	면적(㎡)	인구(세대)	목표/성과
스웨덴 말뫼	25만	1천	100% 신재생에너지 사용
수원당수 2지구	68만4천	5천	에너지자립률 50% 이상
구리시 갈매역세권	79만8천	6천4백	에너지자립률 20% 이상
성남시 복정1지구	57만8천	4천4백	에너지자립률 20% 이상
고덕 강일 공공주택지구	6만	844	에너지자립률 65%
노원 제로에너지 공동주택	1만1천	117	에너지자립률 122%
행복도시 5-1생활권	2백7십4만	2만9천	에너지자립률 40% 이상
행복도시 6-2생활권	1백6십9만	1만4천	에너지자립률 40% 이상

출처: 연구진 작성.

2) 생활권 단위에서의 탄소중립 공간계획 필요성

앞에서 '국토-도시-건물-생활권' 공간 위계별 탄소중립 추진전략 및 한계점과 함께 디지털전환으로 인한 도시공간 및 토지이용의 변화에 따른 생활권의 중요성에 대해 살펴보았다. 종합하여 보았을 때, 탄소중립 전략은 상위로는 국가 단위에서부터 지자체(도시) 단위-개발사업(신도시) 단위-생활권(지구) 단위, 그리고 최하위로는 건물 단위까지 다양한 공간적 위계로 구분하여 추진될 수 있다. 예를 들어, 국가 단위에서는 그에 걸맞게 에너지 공급, 산업, 수송, 건물, 폐기물, 농축수산, 흡수 부문으로 구분하여 비전과 전략들을 설정한다. 또한, 하나의 도시로 인지할 수 있는 지자체 단위의 경우, 건물의 제로에너지 전환, 제로 배출 친환경 교통체계 구축, 폐기물 차원에서 자원순환 도시 구축, 플러스 에너지화, 그리고 시민참여를 정책 비전으로 도출할 수 있다. 각 공간 단위에서 가지는 역할과 관리 대상 안에서 탄소중립 전략을 수립하고 실행하는 것이다.

국토·도시 단위의 한계점으로는 탄소 흡·배출 현황과 탄소중립 정책의 효과를 정량화하기 위한 지식과 정보 부족하다는 점이 언급된다. 또한, 같은 종류의 국토·도시 정책이더라도 적용지역의 규모와 산업, 인구구성과 생활양식 등에 따라 탄소감축 효과가 다르고, 수송 및 건물, 에너지 등 타 부문과 연계되기 때문에 계량화가 어려움에 따라 정책 효과의 모니터링이 어렵고 공간적 특성을 반영한 온실가스 산정 계수가 미흡하여 공간 단위 평가체계 구축에 한계가 존재한다(안예현·윤은주 2021, p.7). 즉, 국토·도시 단위에서는 인벤토리가 너무 거대함에 따라 도시설계만으로는 종합적이고 현실적으로 관리하기가 어려운 부분이 상당수 존재한다. 또한, 개별 건물 단위에서는 일정 수준 이상의 탄소감축 효과를 기대하기 어렵다. 이에 개별 건물 단위에서 벗어나 건물군 집합개념으로 전환시키면서 도시차원의 종합적 항목을 고려할 필요가 있다.

위와 같은 국토·도시·건물 단위에서의 한계점을 고려하였을 때 생활권 단위에서의 탄소중립 추진은 주목할 만한 특징이 있다. 먼저 독립적인 최소 생활권 규모에서 온실가스 감축전략·사업들을 집약적으로 적용함으로써 해당 공간에 대한 효율적이고 효과적인 온실가스 감축 성과를 낼 수 있다는 점이다. 또한, 국토·도시 단위처럼 광범위하지 않고, 탄소감축 효과에 한계가 분명한 미시적인 건물 단위가 아님에 따라 적절한 규모에서 촘촘하게 계획 구상이 가능하며 상대적으로 탄소감축 효과 계량화가 용이하다는 장점이 있다. 여러 동의 건물을 통합적으로 관리하는 것은 태운 열을 공유하고 전력부하를 예측함으로써 에너지 사용을 줄일 수 있는 기회를 제공한다. 또한, 생활권 내 재생에너지원을 활용할 수 있으므로 전체 건물과 도시 밀도를 탄소중립화 할 수 있다.

결론적으로 탄소중립 전략은 공간적 위계에 따라 달라지며 이러한 차원에서 건축과 도시공간 분야를 포괄하면서 단일 계획을 통해 탄소중립을 실현하고자 한다면 개발사업(신도시) 단위 또는 도시관리계획 단위로 치환될 수 있는 생활권 공간 단위에서 탄소중립 전략이 적합할 것으로 사료된다. 이러한 공간 단위에서는 탄소중립에 효과적인 물리적 형태와 도입 시설들을 고려한 공간계획·설계 모형을 작성할 수 있고, 최적화를 통한 효과 제시도 원활히 이루어질 수 있다. 그러나 현재까지는 생활권 단위에 최적화된 탄소중립 계획·설계 연구가 미흡한 측면이 있다.

또한, 최근 디지털 전환에 따라 도시공간 내 복합적 토지이용이 가속화되고 있으며 생활권의 중요성이 더욱 커지고 있다. 디지털 전환의 예시로 사물인터넷(IoT), 공유경제, 클라우드 소싱, 자율주행, 인공지능 등의 기술이 실생활에 빠른 속도로 접목되고 있다. 이러한 디지털 전환은 도시 내 이동수요 및 토지이용에 급격한 영향을 주어 복합적 토지이용을 가속화시키고 있다. 토지이용의 변화는 새로운 토지이용에 대한 수요 증가, 상업·업무 지역에 대한 수요 변화, 공공기반 시설의 수요와 기능 변화, 근린주거지 내 시설의 기능과 용도 복합화로 정리할 수 있다. 즉, 디지털 전환에 따른 도시공간 내 복합적 토지이용이 공간구조의 변화를 가져오는 것이다(하우징헤럴드 2022).

[표 2-18] 탄소중립 추진을 위한 공간 위계별 특성

구분	장점
국토/도시	- 에너지, 건물, 수송, 농축산, 흡수원 등 다양한 분야를 체계적으로 적용하여 효율적인 공간구조 설계 가능 - 국토·도시공간을 이용한 '직접기여'와 타 부문의 탄소중립 정책 추진에 필요한 기반시설 배치 및 연계, 도시 열섬관리 또는 용도혼합을 유도하여 수송과 건물 부문의 에너지 수요를 낮추는 '간접기여' 가능
건물	- (신축건축물) 건축물 에너지 절약설계 기준, 공동주택 에너지 효율등급인증제도, 친환경건축물 인증제도 등 - (기존 건축물) 건축물 에너지 관리 기준, 중앙집중 공동주택의 적산 열량계 설치시공 지침, 공공기관 에너지 절약 지침 등 - 디자인 및 기술적으로는 패시브 에너지 건물 설계, 가열 및 냉각, 산소 공급, 빗물저장 시스템 도입, 단열 및 건물의 방향 선정 등과 같은 기술과 저에너지 건축 기법을 조합하여 적용
생활권	- 독립적인 최소 생활권 규모에서 온실가스 감축전략·사업들을 집약적으로 적용함으로써 해당 공간에 대한 효율적이고 효과적인 온실가스 감축 성과를 낼 수 있음 - 국토·도시 단위처럼 광범위하지 않고, 탄소 감축 효과에 한계가 분명한 미시적인 건물 단위가 아님에 따라 적절한 규모에서 촘촘한 계획 구상이 가능하며 상대적으로 탄소감축 효과 계량화 용이

출처: 연구진 작성.

제3장 생활권 탄소배출 인벤토리 구축 및 계획요소 도출

1. 생활권 단위 탄소배출 인벤토리 구축
2. 생활권 탄소배출·흡수량 산정방법 도출
3. 생활권 탄소중립 공간계획 요소 도출

1. 생활권 단위 탄소배출 인벤토리 구축

1) 생활권 공간에서의 탄소배출 인벤토리 조사

'2006 IPCC 가이드라인(이하 2006 IPCC G/L)[17]'은 기존의 온실가스 인벤토리 보고서 작성지침을 집대성하여 보완한 지침이다. 국내에서 발간된 '지자체 온실가스 배출량 산정 지침(한국환경공단 2017)' 및 '국가 온실가스 인벤토리 보고서(환경부 온실가스종합정보센터 2021)' 등 대표적인 온실가스 관련 보고서는 2006 IPCC G/L을 참고하여 작성된다.

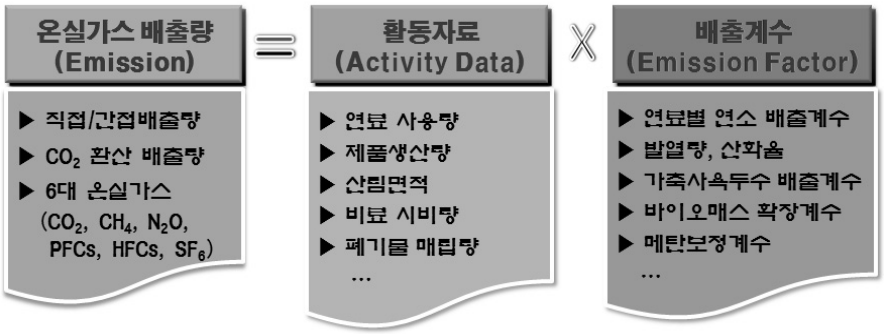
2019년에는 'IPCC 국가온실가스 배출 목록(인벤토리) 2006 지침 2019 개선보고서(이하 '2019 개선보고서')[18]'를 채택하였다. 본 보고서는 2006년에 발간한 2006 IPCC G/L을 기반으로 그동안 새롭게 개발된 기술들에 대한 설명을 추가하거나 새로운 온실가스 배출원 및 흡수원에 대한 보완적 방법론을 제공한다. 오래된 정보를 신규 정보로 갱신하고, 기존 지침을 상세화하며, 신규 배출·흡수원에 대한 지침을 추가한 것으로,

17) 영문명: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

18) 영문명: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories("2019 Refinement")

2006 지침을 대체하는 것이 아니라 함께 사용된다(기상청 2019, p.1).

인벤토리 구축을 위한 배출량은 배출 활동자료에 단위 배출계수를 곱하여 산정한다. 온실가스 배출량 산정을 위한 활동자료는 에너지로 사용되는 연료 사용량, 전력 사용량, 제품 생산량, 산림 면적, 비료 시비량, 폐기물 발생량 등이며, 대부분 국가 및 지자체 통계자료를 이용하여 획득할 수 있다. 배출계수는 활동자료 당 배출되는 온실가스 양이며, 카테고리 별 다양한 배출계수가 사용된다(한국환경공단 2017, p.12). 국가 통계 배출계수는 2022년까지는 1996 IPCC G/L, 국가고유 배출계수, 2006 IPCC G/L을 함께 사용했으나, 2023년 산출 통계부터는 기존의 1996 IPCC G/L을 2006 IPCC G/L로 업그레이드하여 사용한다. 또한, IPCC G/L은 국가배출계수 설정이 어려운 경우 적용한 것임에 따라 국내 상황을 반영한 국가배출계수 적용을 확대하는 방향으로 지속적인 보완이 있을 계획이다.



[그림 3-1] 온실가스 배출량 산정의 기본 방법
출처: 한국환경공단(2017). 지자체 온실가스 배출량 산정지침(Ver.4.1). p.12.

(1) 지자체 온실가스 배출량 산정지침[19)]

한국환경공단에서는 '15년부터 지자체 온실가스 인벤토리 구축 사업을 진행하여 매년 전국 지자체의 온실가스 인벤토리를 구축하여 제공하고 있다. 온실가스 인벤토리는 지자체별 온실가스 배출 특성을 파악하는 자료로 이용될 뿐만 아니라, 감축수단의 이행 결과를 평가하는데 중요 자료로 활용된다.

□ 지자체 인벤토리 원칙 및 적용기준

2006 IPCC G/L에서는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 수소불화탄소

19) 한국환경공단(2017). 지자체 온실가스 배출량 산정지침(Ver.4.1). pp.1-12. 참고하여 작성.

(HFCS), 과불화탄소(PFCS), 육불화황(SF_6), 삼불화질소(NF_3), 삼불화메틸오불화황(SF_5CF_3), 할로겐화에테르($C_4F_9OC_2H_5$), 기타 Halocarbons 등을 대상으로 하나, 이 지침에서는 교토의정서에서 규정한 6개 온실가스인 CO_2, CH_4, N_2O, HFCS, PFCS, SF_6 만을 산정 대상으로 한다.

지침에서는 온실가스 배출량 산정범위를 국가 배출량 통계와 동일한 '에너지', '산업공정', '농업', 'LULUCF', '폐기물' 의 5개 분야 직접배출량에 간접배출량을 추가하여 총 6개 분야로 산정한다. 지자체 통계에서 간접배출량이 추가된 이유는 배출 유발원 관리를 위한 것으로 전력·열의 경우 생산과 소비지가 다르다는 점, 폐기물은 발생지역과 처리지역이 다르다는 점을 고려한 것이다. 또한, 기존의 지자체 통계는 국가 통계를 시·도에 할당하는 방식으로 산정하였다. 그러나 2021년 제정된 「탄소중립기본법」에 의거하여 시·군·구까지 온실가스 통계를 매년 작성하게 되었다. 이에 온실가스 종합정보센터에서는 2022년 이를 시범적으로 산정하고 있다.

지자체 인벤토리는 국가 인벤토리와 달리 지자체 간 물리적 경계를 사이에 두고 인적, 물적 교류가 활발히 발생하게 된다. 따라서 인벤토리 구축 시 지자체 관리권한이나 구축 목적 등을 고려하여 배출량 산정 경계를 명확히 정의하는 것이 필요하다. 그럼에도 지역 인벤토리 산정시 활동자료, 매개변수, 산정방법론의 차이로 국가 배출량과 지자체 배출량에 차이가 발생하는데 현재는 국가 배출량 기준으로 지역 배출량(시·도 통계)을 보정하는 방식으로 해결하고 있다. 향후에는 지자체 통계를 시·군·구 단위로 작성하게 됨에 따라 Bottom-up 방식으로 추진될 예정이다.

지자체 온실가스 배출특성을 반영하기 위해서는 해당 지자체나 시설 수준의 배출계수를 적용하는 것이 가장 효과적일 수 있으나, 모든 카테고리에 대하여 이러한 배출계수를 적용하는 것은 현재 불가능하다. 따라서 이 지침에서는 일차적으로 국내에서 개발된 지자체 및 시설 수준의 배출계수 적용을 원칙으로 하나, 적용이 불가능 할 경우 국가 수준으로 개발된 국가 배출계수를 제시하며, 개발된 배출계수가 없는 항목에 대하여는 2006 IPCC G/L '기본값'을 제시하고 있다.

□ 배출량 산정단계(Tier) 설정

2006 IPCC G/L은 산정의 정확성, 효율성, 자료의 활용 가능성 등을 고려하여 한 분야에 대해 단계별로 여러 가지 배출량 산정방법론을 제시하고 있다. 그러나 인벤토리의 통일성을 위해 기준 방법론 설정이 필요함에 따라, 우리나라의 분야별 활동자료 및 국가 고유 배출계수의 활용 가능성을 고려하여 산정단계를 정하고 있다.

[표 3-1] 국내 지자체 온실가스 배출량 산정지침에서 정하고 있는 배출량 산정단계(Tier)

분류			코드	온실가스	산정단계
에너지	고정연소		1A1, 1A2, 1A4	CO_2, CH_4, N_2O	1, 2
	이동연소	도로 수송	1A3b	CO_2	1, 2
				CH_4, N_2O	2
		비도로 수송	1A3eii	-	1
		철도 수송	1A3c	CO_2	1, 2
				CH_4, N_2O	2
		수상 수송	1A3d	CO_2	1, 2
				CH_4, N_2O	2
		민간 항공	1A3a	전체	2
	탈루성 배출	고체연료	1B1a		2, 1
		석유	1B2a		1
		천연가스	1B2b		1
IPPU	전체				1(1a)
AFOLU	전체				1
폐기물	고형폐기물 매립		4A	CH_4	2
	고형폐기물의 생물학적 처리		4B	CH_4	1
				N_2O	1
	소각 및 노천소각	소각	4C1	CO_2	2a
				CH_4	1
				N_2O	1
		노천소각	4C2	CO_2	2a
				CH_4	1
				N_2O	1
	폐수처리 및 방류	하수분뇨	4D1	CH_4	2
				N_2O	1
		산업폐수	4D2	CH_4	2

출처: 한국환경공단(2017). 지자체 온실가스 배출량 산정지침(Ver.4.1). p.6.

□ 지자체 인벤토리 분류체계

2006 IPCC G/L에서 제시하는 인벤토리 분류체계는 국가 온실가스 배출량을 산정하기 위한 것이기 때문에 배출원별 관리권한, 지역 외에 위치한 배출원, 간접배출량 등에 대한 고려가 없다. 그리하여 지자체 입장에서의 실질적이고 이행 가능한 온실가스 감축 정책 수립을 위해서는 이러한 사항이 반영된 온실가스 인벤토리가 필요하며, 이를 위해서는 분류 개념이 추가되어야 한다.

지침에서는 이를 Scope1, Scope2, Scope3로 대분류를 하고 있으며 중분류는 -A,B로, 소분류는 -a,b로 구분하여 지자체 인벤토리를 구성하고 있다. Scope1은 온실가스가 직접적으로 배출·흡수되는 배출원으로 에너지 분야, 산업공정 및 AFOLU(농림업 및 기타 토지이용) 분야, 폐기물 분야로 분류한다. Scope2는 온실가스를 발생시키는 간접배출량으로 전력 사용, 열 사용, 폐기물 발생 등에 의한 온실가스 배출량을 산정대상으로 한

다. Scope3은 온실가스 관리정책에 대한 온실가스 인벤토리의 활용성을 확대하기 위한 것으로, 배출원이 해당 지역 내에 있지 않으나, 지자체의 직접적인 관리를 받는 배출원에서의 배출량을 의미하며, 직접배출원인 에너지 고정연소(자체 보일러 등), 간접배출원인 전력, 열, 폐기물 등을 대상으로 한다.

[표 3-2] 지자체를 위한 인벤토리 세분화

대분류	중분류	소분류
Scope1 (해당 지자체 행정구역 내에서 발생되는 직접 배출 및 흡수원)	Scope1-A (지자체 관리대상)	Scope1-A-a(직접관리)
		Scope1-A-b(간접관리)
	Scope1-B (지자체 비 관리대상)	
Scope2 (해당 지자체 행정구역 내에서 발생되는 간접 배출원)	Scope2-A (지자체 관리대상)	Scope2-A-a(직접관리)
		Scope2-A-b(간접관리)
	Scope2-B(지자체 비 관리대상)	
Scope3 (해당 지자체 행정구역 외에 위치한 지자체 관리대상 배출원)	Scope3-A(직접 배출원)	
	Scope3-B(간접 배출원)	

- 지자체 관리대상: 지자체에 관리권한이 있는 배출 및 흡수원
- 지자체 비 관리대상: 지자체에 관리권한이 없는 배출 및 흡수원
- 직접관리: 지자체에서 운영하거나 소유권이 있는 배출 및 흡수원
- 간접관리: 직접관리 대상은 아니나, 관련 정책수립 등의 대상이 될 수 있는 배출원
- 직접배출: 온실가스를 직접적으로 배출(예. 화력발전에 의한 전력 생산)
- 간접배출: 직접적인 온실가스 배출은 없으나, 이를 수반하는 인간의 활동(예. 전력의 사용)

출처: 한국환경공단(2017). 지자체 온실가스 배출량 산정지침(Ver.4.1). p.8.

(2) 행정중심복합도시 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안(2017)[20]

행정중심복합도시(이하 행복도시)는 '17년 기 수립된 '저탄소 청정에너지도시 조성계획'에 대한 세부이행계획과 목표 보완 등 후속조치로 '21년에 '친환경 저탄소 에너지도시 건설방안'을 수립하였다.

□ 행복도시 온실가스 배출량 산정 방법

행복도시에서는 한국환경공단의 '지자체 온실가스 배출량 산정지침'과 '지자체 온실가스 통합관리 지침'의 배출량 산정방법을 준용하여 온실가스 배출량을 산정하였다. 지자체 온실가스 배출량 산정지침에서는 온실가스 인벤토리 카테고리를 수송, 가정, 공공, 상업, 폐기물, 농업 및 가축 등으로 분류하여 적용하고 있으며, 이중 행복도시의 관리권

20) 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역. pp.10-13. 참고하여 작성.

한을 고려하여 가정, 상업, 공공, 수송부문 및 행복도시 거주민들의 하수처리시 배출되는 온실가스 배출량인 폐기물(하수처리장)에 대해 인벤토리를 구축하였다.

□ 석유제품 및 도시가스(LNG) 사용

석유제품 및 도시가스(LNG) 사용에 따른 온실가스 배출량은 연료원별 사용량에 순발열량과 배출계수의 곱으로 산정한다. CO_2의 경우 국가배출계수인 Tier2 계수를 적용하였으며, CH4, N2O의 경우 2006 IPCC G/L 기본값을 적용하였다.

- 석유제품 및 도시가스(LNG) 사용에 따른 온실가스 배출량 = 연료사용량 × 순발열량 × 배출계수

에너지원별 순발열량은 에너지법 시행규칙 제5조 1항 [별표]에 따른 국가 순발열량을 적용하였다.

[표 3-3] 석유제품 및 도시가스 온실가스 배출계수

구분	가정상업/공공기타			수송		
	kgCO2/TJ	kgCH4/TJ	kgN2O/TJ	kgCO2/TJ	kgCH4/TJ	kgN2O/TJ
휘발유	72,233	10	0.6	72,233	25	8.0
등유	71,500	10	0.6	-	-	-
경유	73,333	10	0.6	73,333	4	3.9
LPG	64,533	5	0.1	66,367	62	0.2
도시가스(LNG)	56,467	5	0.1	56,467	92	3.0

출처: 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역. p.10.

[표 3-4] 석유제품 및 도시가스 에너지원별 순발열량

구분	단위	순발열량	비고
휘발유	TJ/1,000㎥	30.3	가정상업/공공기타/수송
등유	TJ/1,000㎥	34.3	가정상업/공공기타/수송
경유	TJ/1,000㎥	35.3	가정상업/공공기타/수송
LPG	TJ/Gg	46.3	가정상업/공공기타
LNG(부탄)	TJ/1,000㎥	26.4	수송
도시가스(LNG)	TJ/10^6㎥	39.4	가정상업/공공기타/수송

출처: 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역. p.11.

[표 3-5] 도시가스 용도별 정의

용도명	정의
일반용1	주택용, 업무난방용, 냉난방공조용, 산업용, 열병합용, 열전용설비용, 수송용 및 연료전지용 이외의 용도로 사용되는 가스 중 일반용(2) 이외의 용도로 사용되는 가스에 적용(2017.6.28. 개정)
일반용2	목욕탕, 자원순환시설(폐기물처리시설 등), 수영장, 체육관(지자체에서 운영하는

	공공시설 한정), 장례식장(화장시설을 갖춘 시설)에서 사용되는 가스에 적용(2017.6.28. 개정)
업무난방용	지방세법 제104조제2호에 의한 건축물에서 난방용으로 사용되는 가스에 적용. 다만, 타 용도의 요금으로 구분된 경우에는 적용하지 않음
냉난방공조용	지방세법 제104조제2항에 의한 건축물에서 냉난방공조기기를 설치하고 하절기(5~9월) 냉방, 동절기 및 기타 월에는 난방용으로 동시에 사용되는 가스에 적용
산업용	통계청 고시의 한국표준산업분류에서 정한 제조업체의 제조공정용과 동일장소 내에 있는 부대시설에서 사용되는 가스에 적용
열전용성비용	열병합발전시스템과 연계된 열전용보일러와 집단에너지 사업법 제2조제3호에 의한 집단에너지사업자가 사용하는 열전용 보일러에 사용되는 가스에 적용
연료전지용	연료전지에 사용되는 가스에 적용
수송용	자동차관리법의 적용을 받는 자동차에 연료를 공급하기 위하여 설치된 천연가스충전소에서 원료로 사용하는 가스에 적용

출처: 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역. p.17.

□ 전력 소비

전력소비에 따른 온실가스 배출량은 전력사용량과 배출계수의 곱으로 산정한다.

- 전력소비에 따른 온실가스 배출량 = 전력사용량 × 배출계수

[표 3-6] 전력소비에 따른 온실가스 배출계수(Tier2)

구분	tCO2eq/MWh	tCO2/MWh	kgCH4/MWh	kgN2O/MWh
전력	0.46625	0.4653	0.0054	0.0027

출처: 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역. p.11.

[표 3-7] 전기소비 용도별 정의

용도명	정의
가정용 (주택용)	1. 주거용 고객 2. 계약전력 3kW 이하의 고객. 다만, 농사용전력, 가로등, 임시전력은 해당 계약종별을 적용 3. 독신자합숙소(기숙사 포함)나 집단거주용 사회복지시설로서 고객이 주택용전력의 적용을 희망할 경우 4. 주거용 오피스텔 고객
공공용	1. 유아교육법·초중등교육법·고등교육법에 따른 학교(부속병원 제외), 평생교육법에 따른 학력인정 평생교육시설 2. 한국과학기술원, 광주과학기술원, 대구경북과학기술원, 경찰대학, 육군·해군·공군사관학교, 육군3사관학교, 국군간호사관학교, 국방대학교, 공군항공과학고등학교, 기능대학, 한국농수산대학, 외국교육기관설립·운영에 관한 특별법에 따른 학력인정 외국교육기관 3. 도서관법에 따른 도서관 4. 박물관, 미술관, 과학관 5. 학생 교육원, 학생수련원 등 6. (가로등 전력) 일반 공중의 편익을 위하여 도로·교량·공원 등에 조명용으로 설치한 전등이나 교통신호등·도로표시등·해공로 표시등 및 기타 이에 준하는 전등(소형기기를 포함)
서비스업 (일반용)	1. 주택용전력, 교육용전력, 산업용전력, 농사용전력, 가로등, 예비전력, 임시 전력 이외의 고객 2. 업무용 오피스텔 고객

산업용 (제조업)	1. 산업용전력(갑) - 광업, 제조업 및 기타사업에 전력을 사용하는 계약전력 4kW 이상 300kW 미만의 고객에게 적용 2. 산업용전력(을) - 광업, 제조업 및 기타사업에 전력을 사용하는 계약전력 300kW 이상의 고객에게 적용
농림수산	1. 농사용전력(갑) - 양곡생산을 위한 양수, 배수 펌프 및 수문조작에 사용하는 전력 2. 농사용전력(을) - 다음 중 하나에 해당하는 계약전력 1,000kW 미만의 고객으로서 농사용전력(갑) 이외의 고객 3. 수산업협동조합 또는 어촌계가 단독 소유하여 운영하는 수산물 저온보관시설 등에 해당하는 고객은 농사용전력(을)을 적용

출처: 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역. p.15.

□ 열 사용

열에너지 사용에 의한 온실가스 배출량은 열에너지 사용열량(Gcal)과 배출계수의 곱으로 산정하며, 배출계수(Tier3)는 한국지역난방공사 세종지사에서 공표한 자료를 활용하였다.

열에너지 공급원별 배출계수는 지역난방, 산업단지, 소각여열에 의한 열량별로 구분하여 제시하고 있으며, 행복도시의 경우 지역난방에 의한 열원을 상용할 뿐이므로 지역난방 배출계수를 적용하였다.

- 열에너지 사용에 따른 온실가스 배출량 = 열에너지 사용량 × 배출계수

[표 3-8] 열사용에 의한 온실가스 배출계수

연도	CO2	CH4	N2O
2015	45,105	0.8102	0.0815
2016	46,025	0.8254	0.0826
2017	43,811	0.7930	0.0793
2018	43,105	07753	0.0775
2019	44,477	0.7987	0.0798

출처: 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역. p.12.

[표 3-9] 열 용도별 정의

용도명	정의
가정용(주택용)	공동주택 및 공고지역내 단독주택
공공용	공공업무시설, 학교, 의료시설, 사회복지시설, 기타 공공시설
서비스업(일반용)	주택용과 공공용에 해당되지 않는 건축물

출처: 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역. p.16.

□ 하수 처리

하수처리시 배출되는 온실가스 배출량은 CH4와 N2O가 있으며, 하수처리 방법에 따라

배출계수가 구분된다. 하수처리 공정의 온실가스 배출계수는 CH4는 BOD 부하량에 대한 CH4 발생량을 산정하고, N2O는 총질소 부하량에 대한 N2O 배출량으로 산정한다.

[표 3-10] 하수처리 공정의 온실가스 배출계수

CH4 (kgCH4/kgBOD)		N2O (kgN2O/kgT-N)
호기성 공정	혐기성 공정	
0.01532	0.18452	0.005

출처: 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역. p.13.

(3) 도시공간 계획요소를 이용한 이산화탄소 배출량 산정 모델 개발: 서울시 사례[21)]

본 모델은 도시공간 내에서 계획 및 설계를 통해 제시되는 개발안들의 탄소저감효과를 예측하고자 개발되었다. 연구에서는 이산화탄소 배출량을 산정하고, 도시공간 계획요소 자료를 구축하여 회귀분석을 활용하여 모델을 도출하였다.

□ 이산화탄소 배출량 산정

연구에서는 이산화탄소 배출량을 에너지사용량에 근거하여 산정하였다. 에너지소바량의 이산화탄소 배출량 전환은 IPCC의 석유환산톤(TOE)과 탄소배출계수(CEF)를 이용하였다.

- 사용량을 측정한 에너지원 = 전력 + 가스 + 석유(휘발유, 경유, LPG) + 상수도 + 지역난방
- 전력: 한전에서 공시하는 에너지원에 대한 이산화탄소 배출량 이용(MWh 당 0.423톤, 2006)
- 도시가스: LNG의 석유환산기준 순발열량(9550kcal)과 IPCC 탄소배출계수(0.637) 이용
- 지역난방: 지역별 온실가스 인벤토리 구축자료(국토연)에서 남서울, 상암은 1000Gcal 당 0.2톤, 강남 212.4톤, 강서 231.9톤, 노원 226.4톤 적용
- 상수: 취수, 송수 등 과정에서 에너지 소비 발생(0.587kgCO2/㎥)

□ 이산화탄소 배출 회귀모형 도출

본 연구에서 도출한 도시공간에서의 이산화탄소 배출량 산정 모델은 회귀모형으로 개

21) 김인현 외(2011). 도시공간 계획요소를 이용한 이산화탄소 배출량 산정 모델 개발: 서울시를 사례로. 한국공간정보학회. 19(6). p.14.

발되었으며, 종속변수인 계획요소로 자동차 등록대수, 상업업무지역 면적, 용적률, 건폐율, 주거지역 면적, 교통시설지역 면적, 인구밀도가 채택되었다.

- 도시공간 탄소배출량 = 0.261Vh + 0.222Cm + 0.318Fr − 0.258Cr + 0.182Fa − 0.064Rs + 0.083Rd − 0.054Pd
- Vh: 자동차등록대수 / Cm: 상업업무지역 면적 / Fr: 용적률 / Cr: 건폐율 / Rs: 주거지역 면적 / Rd: 교통시설지역 면적 / Pd: 인구밀도

(4) 저탄소 도시계획 요소별 탄소감축량 산정방법 연구[22)]

본 연구는 구체적 탄소배출 행위가 이루어지는 세부 공간유형별로 탄소배출량을 산정하고, 이를 실제 도시개발 사업지구에 적용함으로써 탄소 감축량 산식모형을 개발하였다. 도시개발 시 탄소감축을 위한 계획요소들은 크게 이산화탄소 저감/최소화, 이산화탄소 흡수, 이산화탄소 회피로 구분하였다.

- 이산화탄소 저감/최소화 계획요소: 공동주택 외피시스템(창호, 단열, 환기, 녹화) 적용, LED조명 설치, 미기후 조절, 중·우수 활용
- 이산화탄소 흡수 계획요소: 존치공원 내 수목량, 계획공원 내 수목량, 녹도 조성, 시설녹지 설치, 단지 내 조경(식재공간), 가로수 식재
- 이산화탄소 회피 계획요소: 신재생에너지의 사용, 단지 내 도로 배치, 녹색교통(보행-자전거)으로의 전환

또한 도출한 계획요소들에 대해 이산화탄소 감축량에 대한 계산식은 다음과 같이 정의하였다.

[표 3-11] 도시공간 계획요소별 이산화탄소 감축량 산정 알고리즘

부문	계획요소	산식
탄소 저감	외피시스템 적용 (Ton CO2/년)	·외피시스템 적용가구수×연간냉난방에너지사용량×에너지절약목표치×이산화탄소배출계수/1000
	LED조명 설치 (Ton CO2/년)	·Σ[13개 구역별 가로등(보안등·공원등) 설치량×일반가로등(메탈할라이드) 사용 시 전력사용량×LED 교체 시 전력 감소율×전력부문 이산화탄소배출계수/1000]
	미기후 조절 (Ton CO2/년)	·세대당 연평균 냉방소비전력(kWh)×{(기존냉방일수-바람길도입시 냉방일수)/기존냉방일수}×계획세대수×전력부문 이산화탄소 배출계수/1000
	우수 활용 (Ton CO2/년)	·Σ[13개 단지별 우수집수량(t)×상수도생산·공급 시 사용되는 전력량(kWh/t)×이산화탄소 배출계수/1000]
탄소	조경수목	·Σ(수종별 계획본수×수목개체별 연간탄소흡수량×44/12)

22) 이상문(2013). 저탄소 도시계획 요소별 탄소감축량 산정방법 연구. 환경논총 51권. p.150.

흡수	(Ton CO2/년)	·수종별 계획본수=Σ[공공·민간부문 조경면적×수종별 면적비율×수종별 식재 평균면적 원단위(식재밀도)]
탄소 회피	신재생에너지 적용 (Ton CO2/년)	·계획세대수×세대당 연간총전력사용량×신재생에너지사용목표치(%)×이산화탄소배출계수/1000
	단지 내 도로배치 (Ton CO2/년)	·Σ[구역별 단축거리(㎞)×일일통행량×구역별 통행비율×차종비율×차량규모비율×차종별 연료소비량(ℓ/㎞)×순발열량(㎉)/107×탄소배출계수×365일×44/12]
	녹색교통으로 전환 (보행·자전거)	·이용거리(㎞)×연간이용횟수×녹색교통 증가량×사업구역별통행비율×차종비율×차량규모비율×연료소비량(ℓ/㎞)×순발열량(㎉)/107×탄소배출계수×365일×44/12

출처: 이상문(2013), 저탄소 도시계획 요소별 탄소감축량 산정방법 연구. 환경논총 51권. pp.150-157. 참고하여 재작성.

(5) 탄소저감 도시계획 수립을 위한 모델 구상[23)]

본 모델은 우리나라 도시계획 실정에 맞는 탄소저감 도시계획 수립과 적용이라는 관점에서 현재 도시계획 측면에서 활용할 수 있는 모델을 구상하였다. 본 연구는 기존의 도시계획이 기후변화에 대응을 위한 탄소저감 도시로 전환되어야 한다는 점과 우리나라의 지역여건을 고려한 도시계획적 적용방안이 필요하다는 인식 하에 진행되었다.

연구에서는 주요 감축부문으로 산업, 가정·상업, 수송, 공공기타 부문을 설정하고, 상관분석으로 각 부문과 도시특성지표와의 관계를 규명하였다. 그리고 회귀모델을 구축하고 도시 유형화를 통해 부문별로 1인당 온실가스 배출량을 도출하였다. 이중 생활권 단위에 해당하는 소도시에 대한 부문별 온실가스 배출량 모델은 다음과 같다.

- <u>산업부문 1인당 온실가스배출량</u> = 1.13935 + (−0.06973 × 주거지역 면적비율) + (10.68041 × 1인당 차량등록대수) + (0.12858 × 2차산업 종사자 비율)
- <u>가정·상업부문 1인당 온실가스배출량</u> = 1.27163 + (−0.31263 × 도로율) + (1.38959 × 1인당 차량등록대수) + (4.69261 × 1인당 종사자수)
- <u>수송부문 1인당 온실가스배출량</u> = 1.60081 + (0.00760 × 간선도로 비율) + (1.49782 × 1인당 차량등록대수) + (−0.01457 × 3차산업 종사자 비율)
- <u>공공·기타부문 1인당 온실가스배출량</u> = −0.25064 + (0.00463 × 주거지역 면적비율) + (0.01355 × 도시지역 인구밀도) + (0.00675 × 녹지지역 비율)

본 연구에서 제시한 탄소배출원으로서 도시특성지표는 다음과 같다.

23) 노경식 외(2013). 탄소저감 도시계획 수립을 위한 모델구상 및 적용방안 연구. 국토지리학회지. 47(1).

[표 3-12] 탄소배출원으로서 도시특성지표

구분	세부 지표
인구	인구밀도, 도시지역인구밀도, 주간인구밀도, 고용밀도
토지이용	시가화면적비율, 주거지역면적비율, 상업지역면적비율, 공업지역면적비율
건축물 밀도	평균용적률, 주거용건축물용적률, 상업용건축물용적률, 공업용건축물용적률
산업경제	1인당 종사자수, 1차산업종사자비율, 2차산업종사자비율, 3차산업종사자비율
교통여건	도로율, 간선도로비율, 1인당 차량등록대수
녹지	녹지지역면적비율, 임야면적비율, 산림면적비율, 공원면적비율

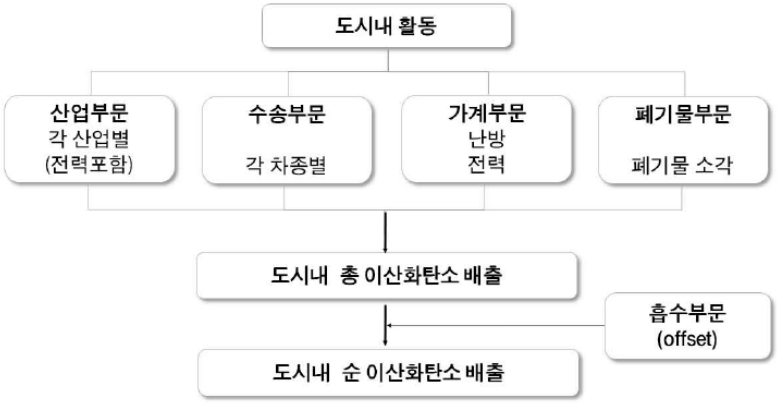
출처: 노경식 외(2013). 탄소저감 도시계획 수립을 위한 모델구상 및 적용방안 연구. 국토지리학회지. 47(1). p.6.

(6) 도시계획분야 온실가스 인벤토리 구축 방향

□ 도시, 지구 등 생활권에서의 다양한 활동에 따른 탄소 배출원 파악[24)]

본 연구는 생활권 공간에서 탄소중립 전략 수립을 위해 인간의 활동으로 발생하는 탄소 배출의 원인과 경로들을 도출하였다. 연구에서는 도시 내 활동으로서 산업부문(각 산업별), 수송부문(각 차종별), 가계부문(난방, 전력), 폐기물부문(폐기물 소각)으로 분류하였고, 이를 도시 내 총 이산화탄소 배출량으로 산정할 수 있다. 최종적인 배출량인 도시 내 순 이산화산소 량은 총 이산화탄소 배출량에서 공원녹지 등 탄소 흡수부문(offset)을 제외한 양으로 정의한다.

- 도시내 순 이산화탄소 배출량 = 산업부문 배출량 + 수송부문 배출량 + 가계부문 배출량 + 폐기물부문 배출량 – 이산화탄소 흡수량



[그림 3-2] 도시 내 활동에 따른 온실가스 배출 부문 및 산정 과정
출처: 정혜진(2011). 도시계획분야의 온실가스 인벤토리 구축 방향. 환경논총 50권. p.106.

24) 정혜진(2011). 도시계획분야의 온실가스 인벤토리 구축 방향. 환경논총 50권. pp.106-112.

□ 인벤토리 추정을 통한 온실가스 배출량 추정 및 체계 분류

정혜진(2011)은 도시내 활동에 대한 탄소배출원을 파악한 후 도시계획 분야 기능과 역할을 고려하여 온실가스 배출을 예상하고, 배출량 산정 틀과 감축목표를 설정하였다. 또한, 이를 용도지역 분류체계인 주거, 상업, 공업, 녹지(상쇄)의 틀로 분류 체계를 세분화함으로써 온실가스 배출 활동을 구분하였다.

- 석유·가스·석탄 배출량(kg) = 연료별 에너지량(TJ) × 연료별 배출계수(kg/TJ)
- 전기 배출량 = 전력소비량 × 전력간접배출계수
- 열(스팀) 배출량 = 열소비량 × [1/(1−손실률)] × 열간접배출계수
- 수도 배출량 = 수도 사용량 × 수도간접배출계수

[표 3-13] 용도별 활동 및 온실가스 배출량 산정

부문 (대분류)	최종 용도/활동 (중분류)	사용 에너지 (소분류)	산정식	활동도 자료설명
주거	난방 및 취사 등	석유	Emissions = Σi(Fueli×EFi) Emissions: 배출량, kg Fuel: 연료 종류 i의 에너지량, TJ EF: 배출계수 kg/TJ i: 연료의 종류	가정에서의 연료 연소로부터 발생하는 모든 연소배출
		가스		
		석탄		
		전기	전력소비량×전력간접배출계수 (사용단)	가정용
		열(스팀)	열소비량×[1/(1−손실률)]×열간접배출계수	
		수도	수도 사용량×수도간접배출계수	상수-가정용
상업	난방 및 취사 등	석유	Emissions = Σi(Fueli×EFi) Emissions: 배출량, kg Fuel: 연료 종류 i의 에너지량, TJ EF: 배출계수 kg/TJ i: 연료의 종류	항만, 공항, 철도를 제외한 상업용 건물에서의 연료 연소로부터 발생하는 배출, 자가생산(전기 및 열)으로 부터의 연소배출 포함
		가스		
		석탄		
		전기	전력소비량×전력간접배출계수 (사용단)	공공서비스-서비스업-사업자용
		열(스팀)	열소비량×[1/(1−손실률)]×열간접배출계수	
		수도	수도 사용량×수도간접배출계수	상수-영업용
공업/제조업 부문	에너지 산업	에너지	Emissions = MixEF Emissions: 연료별/온실가스배출량, kg GHG Mi: 연소된 연료의 양, TJ(부피나 질량으로 주어진 연료 사용량을 열량단위(TJ)로 변환)	발전 및 열생산시설
		석유		
		천연가스		석유정제
		석탄		

			EF: 연료별/온실가스별 배출계수 kg gas/TJ(CO2에 대해서 일부연료의 국내 개발 배출계수 포함) i: 연료의 종류	
		석유	생략	고체연료 제조 및 기타 에너지산업
		석탄		
	제조업 및 건설업	석유		제조업 및 건설업
		도시가스		
		석탄		
		시멘트 킬른 보조연료		
	산업공정 및 제품사용		생략	광물산업, 화학산업, 금속산업, 연료로 인한 비에너지 제품 및 용매사용, 전자산업 오존파괴물질의 대체로서 제품사용, 기타 제품제조업과 사용, 기타
	전기		전력소비량 x 전력간접배출계수(사용단)	생산부문-농림어업, 광업, 제조업
	열(스팀)		열소비량x[1/(1-손실률)]x열간접배출계수	
	수도		수도 사용량 x 수도간접배출계수	상수-업무용, 영업용, 기타
공공부문	난방 등	석유	Emissions = Σi(Fueli × EFi) Emissions: 배출량, kg Fuel: 연료 종류 i의 에너지량, TJ EF: 배출계수 kg/TJ i: 연료의 종류	공공용 시설로부터의 연소배출
		가스		
		석탄		
		전기	전력소비량 x 전력간접배출계수(사용단)	공공서비스-공공업-국군용, 유엔군용, 기타 공공용, 관공용 공공서비스-전철, 수도
		열(스팀)	열소비량x[1/(1-손실률)]x열간접배출계수	
		수도	수도 사용량 x 수도간접배출계수	상수-업무용
녹지부문	토지(배출/흡수량)	입지	$\triangle C=(C_{12}-C_{11})/(t_2-t_1)xBEFxCFx(1+R)$ * 자세한 내용은 생략	임지로 유지되는 임지
			$\triangle C_{DOM}=[(C_n-C_o)xA_{cm}]/T_{om}$	임지로 전환된 토지
		농경지	$\triangle C_G=AxG_c$	농경지로 유지되는 농경지
			$\triangle C_B=\triangle C_g+\triangle Conversion-\triangle C_L$	농경지로 전환된 토지
		초지	-	초지로 유지되는 초지
			$\triangle C_B=\triangle C_g+\triangle Conversion-\triangle C_L$	초지로 전환된 토지
		습지	-	습지로 유지되는 습지
			-	습지로 전환된 토지
		주거지	-	주거지
		기타 토지	-	기타토지

수송 부문	민간항공	생략	민간항공
	도로수송	CO_2 Emissions = Σ i(Fueli × EFi) Non-CO_2 Emissions: Σ ijk(Fuelijk × EFijk) Emissions: 온실가스 배출량, kg Fuel: 판매한 연료의의 에너지량, TJ EF: 배출계수 kg/TJ i: 연료의 종류(예. 휘발유, 경유, LPG. CNG 등) j: 차량의 종류 k: 배출저감 장치(예: 삼원촉매 장치)	승용차, 소형트럭, 중형트럭 및 버스, 이륜차
		Emissions = Σ ij(Fuelij × EFij) Emissions: NMVOCs 증발배출량, kg Fuel: 연료의 에너지, TJ EF: 배출계수 kg/TJ i: 연료의 종류(예. 휘발유, 경유, LPG. CNG 등) j: 엔진의 형태, 배출가스 저감장치, 운행 행태 등의 요소	자동차의 증발배출, 요소 촉매장치
	철도수송	Emissions = Σ i(Fueli × EFi) Emissions: 배출량, kg Fuel: 연료 종류 idml 에너지양(연료 판매량 상당), TJ EFi: 연료 종류 I의 배출계수, kg/TJ i: 연료의 종류	
	수상·항해		
	기타수송		
폐기물 부문	고형폐기물 매립	생략	관리되는 폐기물 매립, 비관리 폐기물 매립, 미분류 폐기물 매립
	고형폐기물의 생물학적 처리	CH_4 Emissions = Σ i(M_i × EF_i)x10^{-3}−R N_2O Emissions = Σ i(M_i × EF_i)x10^{-3} CH_4 Emissions: 온실가스 배출량, ton/yr Mi: 생물학적 처리 유형i에 의해 처리된 유기 폐기물의 총량, tWaste/yr EF: 처리 i에 대한 배출계수, g/kg Waste i: 퇴비화 또는 혐기성소화	고형폐기물의 생물학적 처리
	소각 및 노천소각	생략	폐기물 소각
		MSW_B=P×P_{frac}xMSW_PxB_{frac}x365x10^{-3} MSW_B: 노천 소각되는 생활폐기물	폐기물 노천 소각

		총량, tWaste/yr P: 인구수, Capita P_{frac}: 폐기물을 소각시키는 인구 비율, Fraction MSW_P: 폐기물 발생 단위당 인구수, kg Waste/Capita/day B_{frac}: 처리된 폐기물 총량에 대해 상대적으로 소각되는 폐기물 양의 비율, Fraction 365: 1년의 일수, 365day/yr	
	폐수 처리 및 방류	생략	하수처리
			폐수처리

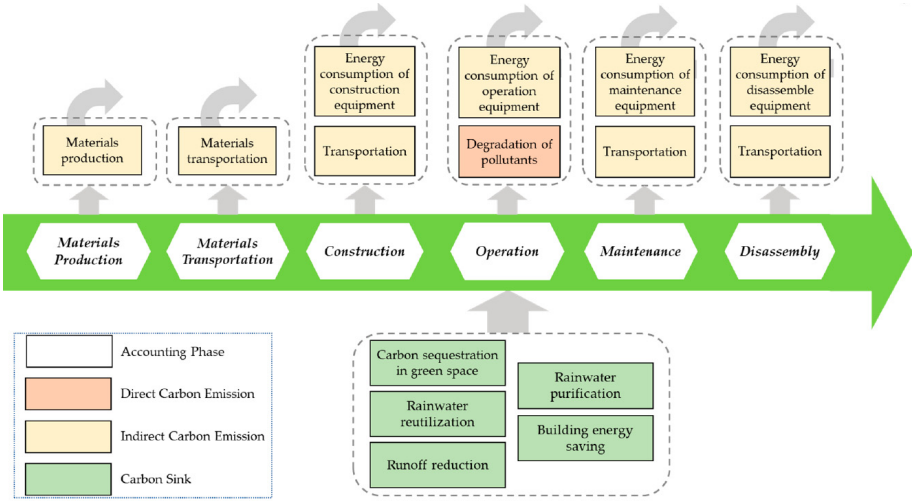
출처: 정혜진(2011). 도시계획분야의 온실가스 인벤토리 구축 방향. 환경논총 제50권. pp.108-112.

(7) 도시 생애주기 탄소배출량 예측: 중국 상하이 스펀지 프로젝트 사례[25)]

본 프로젝트는 도시공간의 전체 생애주기 관점에서 탄소 배출량을 산정하고, 탄소 흡수원 설치에 대한 효과를 추정하는 연구이다. 연구에서는 스펀지시티 시설들에 대한 탄소 배출량을 파악하기 위해 생애주기 분석인 LCA(Life Cycle Assessment)를 적용하여 자재 생산, 자재 운송, 도시 건설, 도시 운영, 유지 보수 및 해체 단계에 대한 탄소배출 인벤토리를 구축하였다.

스펀지시티 시설에서의 생애주기적 탄소배출 인벤토리는 직접 탄소배출량, 간접 탄소배출량, 그리고 탄소흡수원으로 구분하였다. 직접 탄소배출은 오염물질이 분해될 때 배출되는 CH4(메탄)와 N2O(아산화질소)의 양이며, 간접 탄소배출량에는 자재 생산, 운송, 건설, 운영, 유지보수, 분해의 전 과정에서 에너지 소비, 전력 소비, 자재 소비에 해당하는 탄소 배출이 포함된다. 자재의 생산 단계에서 발생하는 탄소배출량과 자재의 운송 단계에서 에너지를 소비하면서 발생하는 탄소배출량, 그리고 스펀지시티 시설의 건설, 운영, 유지보수 및 해체 과정에서 사용되는 장비(equipment)의 전력 소비량과 에너지 소비량이 포함된다. 탄소흡수원은 스펀지시티 시설 운영 중 녹지의 탄소격리(carbon sequestration), 빗물 활용, 빗물 유출수(runoff) 저감, 빗물 오염물질 감소, 건물 에너지 절약 등으로 구분하였다.

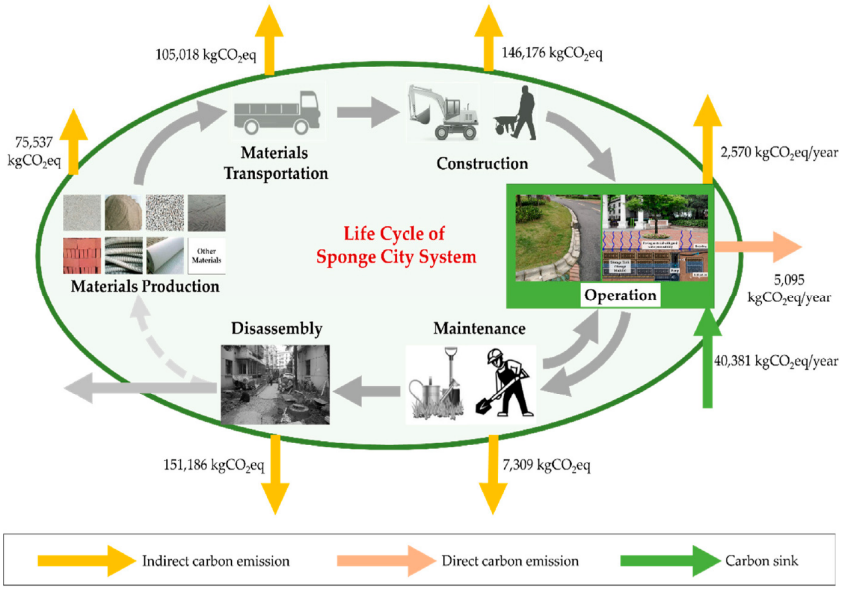
25) Lin, Xiaohu et al(2018). Prediction of Life Cycle Carbon Emissions of Sponge City Projects: A Case Study in Shanghai, China. Sustainability. 10(11). pp.4-11.



[그림 3-3] 상해 스펀지시티의 탄소배출량 산정을 위한 경계 및 인벤토리

출처: Lin, Xiaohu et al(2018). Prediction of Life Cycle Carbon Emissions of Sponge City Projects: A Case Study in Shanghai, China. Sustainability. 10(11). p.5

스펀지시티 시설의 탄소배출량과 탄소흡수원의 산정에 따르면 축적된 탄소흡수원이 전체 탄소배출량과 같아지는 시점은 18.8년 후이다(탄소 중화라고도 함). 이후의 생애주기 동안 스펀지시티 시설은 자연계에서 온실 가스를 흡수하는 탄소 배출 감소 시스템으로서 기능할 수 있다.



[그림 3-4] 스펀지시티의 탄소배출과 흡수에 대한 생애주기적 흐름

출처: Lin, Xiaohu et al(2018). Prediction of Life Cycle Carbon Emissions of Sponge City Projects: A Case Study in Shanghai, China. Sustainability. 10(11). p.11

□ 스펀지 시티의 탄소배출량 산정을 위한 분류 및 산정식

스펀지시티 시설에서의 생애주기적 탄소배출 인벤토리는 직접 탄소배출량, 간접 탄소배출량, 그리고 탄소흡수원으로 구분하였으며, 배출산정 모형은 IPCC 방법론에 근거하며 요소별 배출량 산정법이 채택되었다.

[표 3-14] 스펀지 프로젝트 탄소배출량 산정방법

분류		산정식
총 탄소배출량 (Total carbon emissions, TCE)		$TCE = (TCE_D - TCE_{ID}) - TCS$
탄소 직접배출량 (Total direct carbon emissions, TCE_D)	CH_4	$EF_J = B_0 \times MCF_J$ • EF: 메탄 배출계수 • B_0: 유기물 혐기성 분해 메탄 배출계수 • MCF: 메탄보정계수
		$CE_{CH4} = M_{COD} \times B_0 \times MCF_j \times GWP_{CH4} = 0.625M_{COD}$ • CE_{CH4}: CH_4 배출량에 해당하는 CO_2 • COD: 화학적 산소요구량 • M_{COD}: COD의 양 • GWP: 지구온난화지수
	N_2O	$CE_{N2O} = M_N \times EF_{N2O} \times GWP_{N2O} = 2.341M_N$ • CE_{N2O}: N_2O 배출량에 해당하는 CO_2 • M_N: 질소의 양 • GWP: 지구온난화지수
탄소 간접배출량 (Total indirect carbon emissions, TCE_{ID})		$TCE_{ID} = CE_{MP} - CE_{MT} + CE_{ec} + CE_{ET}$
	자재 생산	$CE_{MP} = \sum_i (M_M \times CE_{unit-M})_i$ • CE_{MP}: 자재 생산시 탄소배출량 • i: 자재 카테고리(콘크리트, 자갈, PVC파이브, 모래, 벽돌 등) • M_M: 재료 소비량 • CE_{unit-M}: 자재 단위별 탄소배출량
	운송	$CE_{MT} = \sum_i (Dist \times M \times CE_{unit-MT})_i$ • CE_{MT}: 운송시 탄소배출량 • i: 운송 수단 • Dist: 운송 거리 • $CE_{unit-MT}$: 자재 무게 및 운송 거리의 단위별 탄소배출량
	장비	$CE_{ec} = \sum_i (P_i \times T_i \times EF_{ec})_i$ • CE_{ec}: 전기 동력 장비의 탄소배출량 • i: 장비 종류 • P_i: 장비 전력

		• T_i: 자재 사용시간 • EF_{ec}: 전기 소비 배출계수 $CE_{ET} = \sum_i (E \times CE_{unit-ET})_i$ • CE_{ET}: 에너지 동력 장비의 탄소배출량 • i: 장비 종류 • E: 에너지 소비량 • $CE_{unit-ET}$: 에너지 소비 단위별 탄소배출량
탄소흡수원 (Total carbon sink, TCS)	녹지	$CE_{GA-C} = \sum_i (S_{GA} \times CS_{unit-GA} \times T)_i$ • CE_{GA-C}: 녹지의 탄소격리 용량 • i: 스펀지시티 기술시설 카테고리 • S_{GA}: 녹지 면적 • $CS_{unit-GA}$: 녹지의 탄소격리율 • T: 기간
	빗물 활용	$CS_{Reuse} = \sum_i (Q_r \times CE_{tap-water})$ $= \sum_i (Q_r \times QE \times EF_{ec})_i$ • CS_{Reuse}: 빗물 활용시 탄소흡수량 • i: 스펀지시티 특정 시설 카테고리 • $CE_{tap-water}$: 수돗물 사용시 탄소배출량 • QE: 수돗물 $1m^3$당 소비되는 전기량 • EF_{ec}: 전기 소비 배출계수
	빗물 유출수 저감	$CS_{Runoff} = \sum_i (M_{runoff} \times CE_{runoff})_i$ • CS_{Runoff}: 빗물 유출수 저감으로 인한 탄소흡수량 • i: 스펀지시티 특정 시설 카테고리 • M_{Runoff}: i를 통한 빗물 유출수 저감량 • CE_{runoff}: 배수관망으로 배출된 빗물 유출수를 통해 절약된 탄소배출량
	빗물 오염물 질 감소	$CS_{Rain-purify} = \sum_i (\sum_j (M_{rain-purify} \times CE_{rain-purify}))_i$ • $CS_{Rain-purify}$: 빗물 유출수의 오염물질 감소로 인한 탄소흡수량 • i: 스펀지시티 특정 시설 카테고리 • j: 스펀지시티 시설을 통해 감소된 오염물질 카테고리 • $M_{rain-purify}$: 감소된 오염물질의 양 • $CE_{rain-purify}$: 감소된 오염물질의 탄소배출량
	건물 에너지 절약	$CS_{Building-energy} = \sum_i (Q_{energy} \times CE_{building-energy})_i$ • $CS_{Building-energy}$: 스펀지시티 시설을 통해 절약한 건물 에너지에 해당하는 탄소흡수량 • i: 스펀지시티 특정 시설 카테고리(녹색지붕 등) • Q_{energy}: 스펀지시티 시설을 통해 절약한 에너지 • $CE_{building-energy}$: 해당 에너지 공급에 필요한 탄소배출량

출처: Lin, Xiaohu et al(2018). Prediction of Life Cycle Carbon Emissions of Sponge City Projects: A Case Study in Shanghai, China. Sustainability. 10(11). pp.5-9.

(8) 정주지 부문 온실가스 인벤토리 산정을 위한 공간 범위별 이산화탄소 흡수량 분석: 서울시 및 인천 서구 사례

홍세기 외(2021)와 최솔이 외(2021)는 2006 IPCC GL의 산정 방법을 활용하여 국내 정주지 온실가스 흡수량 산출을 위한 방법론을 제시하였다. IPCC 2006 GL에서는 정주지를 타 토지이용범주에 포함되지 않는 교통 기반시설과 다양한 규모의 인간 거주지를 포함하는 모든 개발된 토지로 정의하고 있다.

정주지 부문을 비롯한 LULUCF 부문의 온실가스 산정 대상은 CO2, CH4, N2O로, 이를 배출·흡수하는 대상에 대하여 활동자료를 구축해야 한다. LULUCF 분야의 온실가스 통계 산정 시 공통적으로 해당 지역의 바이오매스, 고사유기물, 토양에 관한 온실가스 통계를 산정하도록 권고하고 있으며, 정주지 부문의 온실가스 산정 유형을 '정주지로 유지된 정주지'와 '타 토지에서 전용된 정주지'로 구분하였다(IPCC 2006).

□ 본 연구의 정주지 구분 및 범위 설정

- 지목형(Land category)
  - IPCC의 정의에 따라 국내에서 지적상 산림지(임야), 농경지(전, 답, 과수원), 초지(목장용지), 습지(하천, 구거, 유지, 양어장) 등 타 토지에서 산정하지 않는 토지가 대상
- 도시지역형(Urban area)
  - 국토·도시계획의 기본단위이자 현재 국토이용 계획의 기반이 되는 용도지역 중 IPCC GL에서 제시하는 '교통시설과 다양한 규모의 인간 거주를 포함하는 모든 개발된 토지'에 해당하는 도시지역을 포함
- 도시 및 계획관리형(Urban & Plan management)
  - 국토계획과의 연계를 통한 도시지역 탄소흡수원 추가 확보를 위해 도시지역 외에도 인간 정주활동을 지원하는 준 도시지역을 포함하는 범위로서 용도지역상의 계획관리지역을 포함

□ 이산화탄소 흡수량 도출 방법

IPCC GL에서 명시한 Approach 1의 산정방법과 Tier 2a의 산정방법을 적용하였다. 교목의 Tier 2a 기본 계수는 2.9 tonnes C (ha crown cover)$^{-1}$ yr^{-1}이며, Tier 2에서는 초본, 관목 식생은 0으로 간주하여 고려하지 않아도 된다(Equation. 1). 산정된 탄소흡수량 값에 이산화탄소 전환계수 44/12를 곱하여 이산화탄소흡수량을 도출하였다.

- 연간 정주지 이산화탄소 흡수량 = 상록수 유형별 총 수관면적(ha) X 연간 상록수 종류별 수관면적 성장률(ha)

(9) 인벤토리 구축 자료조사 결과

위와 같이 도시 공간을 대상으로 탄소배출 인벤토리를 구축한 문헌들을 조사한 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, 인벤토리 분류가 배출원의 유형을 직접/간접으로 분류하는 것이 지자체 단위에서의 지침에 마련되어 있으나, 궁극적으로는 공간 범위 내에서 소비되는 에너지원을 목록화하는 것이 인벤토리 구축에 우선적인 과정으로 진행되어야 한다. 둘째, 주요한 소비 에너지원들은 연소되는 석유·도시가스 등 화석연료, 냉방 등 전기에너지, 열과 지역난방 등 난방에너지, 수도 공급과정에서의 에너지소비, 폐기물 처리 부문으로 정리 분류가 될 수 있겠다. 셋째, 산업공정이나 농림업에 대한 배출 인벤토리는 대상지의 토지이용 특성에 따라 포함 여부를 달리할 수 있다.

[표 3-15] 인벤토리 구축 자료조사 결과

구분	인벤토리 분류	비고
지자체 온실가스 배출량 산정지침 (2017)	·Scope1(지자체 내 직접 배출·흡수원) -에너지(고정·이동연소) / IPPU(산업공정) / AFOLU(농림업 및 기타 토지이용) / 폐기물 ·Scope2(지자체 내 간접 배출원) -전력 사용, 열 사용, 폐기물 발생 등에 의한 온실가스 배출량 ·Scope3(지자체 외 관리대상 배출원) -직접배출원인 에너지 고정연소(자체 보일러 등), 간접배출원인 전력, 열, 폐기물 등	지자체 단위
행정중심 복합도시(2021)	·가정, 상업, 공공, 수송부문 및 행복도시 거주민들의 하수처리시 배출되는 폐기물 (하수처리장) -석유 및 도시가스(LNG), 전력, 열, 폐기물	신도시 단위
김인현 외(2011)	·전력 / 가스 / 석유(휘발유, 경우, LPG) / 상수도 / 지역난방	지자체 (서울시) 단위
이상문 외(2013)	·냉난방 에너지 / 가로등 전력 / 상수도 전력	도시개발 (정비사업) 단위
노경식 외(2013)	·산업 / 가정·상업 / 수송 / 공공·기타 부문	도시계획 단위
정혜진(2011)	·주거(난방·취사) / 상업(난방·취사) / 공업·제조업(에너지, 제조업·건설업, 산업공정 및 제품사용, 전기, 열(스팀), 수도 / 공공(난방 등) / 녹지(토지 배출/흡수량) / 수송(항공, 도로, 철도, 수상, 기타) / 폐기물(매립, 처리, 소각, 폐수 방류) 부문	도시계획 단위
상해 스펀지시티 프로젝트(2018)	·직접 배출 -오염물질이 분해될 때 배출되는 CH4(메탄)와 N2O(아산화질소)의 양 ·간접 배출 -자재 생산, 운송, 건설, 운영, 유지보수, 분해의 전 과정에서 에너지 소비, 전력 소비, 자재 소비에 해당하는 탄소 배출 ·탄소 흡수원 -녹지의 탄소격리(carbon sequestration), 빗물 활용, 빗물 유출수(runoff) 저감, 빗물 오염물질 감소, 건물 에너지 절약 등	신도시 단위
홍세기 외(2021), 최솔이 외(2021)	- 정주지 부문 온실가스 인벤토리 산정을 위해 정주지 유형 구분 · 지목형, 도시지역형, 도시 및 계획관리형	도시계획 단위

출처: 연구진 작성.

2) 생활권 탄소배출 범주 및 단계 설정

(1) 도시 공간의 탄소 배출 범주

도시 공간에서의 인간 활동에 따른 탄소중립 대응을 위해서는 전 개발 과정에 걸쳐 배출량을 파악하고 이를 최소화하기 위한 계획, 설계 및 운영이 이루어져야 한다. 이러한 차원에서 생활권은 주민, 근로자, 방문객들에게 온실가스 배출량을 감축하고 삶의 질 향상을 동시에 도모할 수 있는 공간이 될 수 있다. 이를 위해 우선적으로는 도시 공간에서의 탄소배출 범주에 대해 파악이 되어야 한다. 이와 관련하여 도시기후리더십그룹인 C40의 Mark Watts는 생활권 수준에서의 탄소배출에 대한 3가지 범주를 정의한 바 있다(Mark Watts 2022, p.154).

□ 운영(Operational) 배출

첫째는 건물, 공공공간, 운송 등 생활권 공간의 운영을 통해 배출하는 범주이다. 운영 배출은 실질적으로 도시공간에서 인간활동을 통해 파악할 수 있는 직접적인 배출에 해당한다.

□ 내재(Embodied) 배출

둘째는 내재적 배출로서 건물과 기반시설의 설치 및 철거 등 건설과 해체 공정에서 발생하는 배출을 말한다. 이러한 내재적 배출은 도시 운영 부분을 제외한 도시의 시공단계와 재건축·재개발을 위한 해체 단계로 탄소중립을 위한 공간계획 모형에 포함 여부가 논의되어야 한다.

□ 소비(Consumption) 배출

마지막으로는 도시 공간 내에서 사람들이 구매한 음식, 의류 등 상품 등 소비를 통해 발생하는 배출 범주이다. 이 소비 배출에 대한 배출량 평가는 복잡한 데이터가 포함되어야 하고, 도시 공간 조성에 따른 직접적 배출과는 연관성이 낮다고 판단되기 때문에, 본 연구에서의 탄소 배출 범주에서는 배제하도록 한다.

[표 3-16] 도시 탄소배출 범주

구분	세부 내용
운영 배출 (Operational)	·건물, 공공공간 및 운송에 사용된 에너지 및 폐기물 처리 과정에서 발생하는 탄소에 대한 배출 ·생활권 전체에서 발생하는 배출량
내재 배출 (Embodied)	·건물, 기반시설 자재나 그 설치 과정에서 발생되는 배출 ·재료 추출, 제조, 조립, 유지보수, 수선, 해체, 파괴, 폐기물 및 철거로 인한 배출량 등 ·생활권 설치 전체의 라이프사이클 배출
소비 배출 (Consumption)	·생활권 내에서 사람들이 구매한 음식, 의류 및 기술처럼 상품 및 서비스를 통해 발생하는 탄소 배출

출처: Mark Watts(2022). Urban Transformation and Carbon Neutrality in Smart Cities, 스마트시티 글로벌 저널 2022 Smart City Top Agenda. 국토교통과학기술진흥원. p.154.

(2) 생활권 공간의 탄소 배출 단계

앞서 도출한 도시 공간의 탄소 배출 범주를 적용하여 생활권에서의 탄소 배출에 대한 과정을 정의하도록 한다. 이러한 탄소배출 범주와 과정의 확정을 통해 이를 매칭하여 탄소중립을 위한 계획요소 도출 등 전략들을 도출할 수 있다.

본 연구에서는 생활권 공간의 탄소 배출 과정에 대해 도시의 ① 건설 단계, ② 운영단계, ③ 해체 단계로 구분한다. 건설 단계는 기반 조성 과정에서의 토지 개발 등 공사, 건축, 운송 유형으로 구분할 수 있으며, 운영 단계는 건물에서의 전기에너지, 난방에너지, 도시가스, 공간 내 이동에 소요되는 화석 연료, 수도 에너지 등 사용되는 에너지원들의 양에 따른 탄소 배출로 구분한다. 마지막 해체 단계에서는 건물의 해체, 운송, 처리 등으로 탄소 배출 과정을 구분하도록 한다.

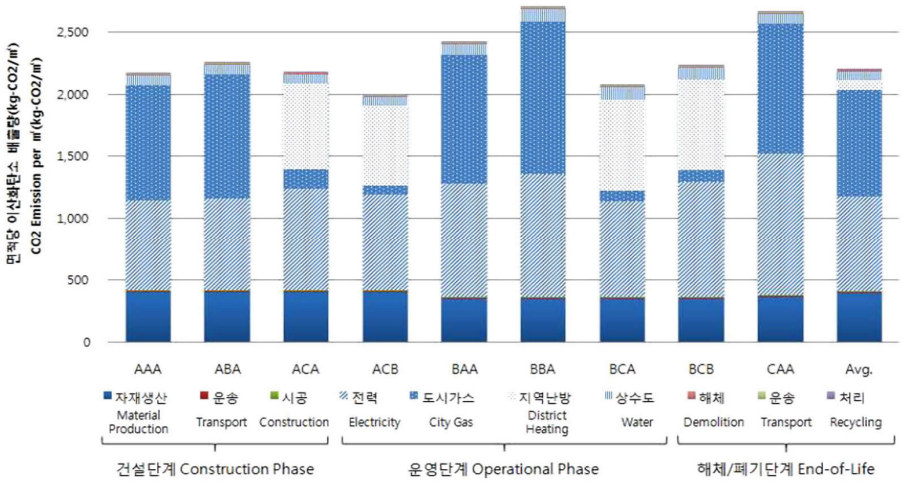
전과정 평가에 기반한 아파트의 이산화탄소 배출량을 분석한 연구에서는 건설 단계에서 18.6%, 운영 단계에서 80.3%, 해체 및 폐기단계에서 1.1%의 이산화탄소가 배출됨을 도출하였다(배은석 외 2015). 도출된 계수들은 다음과 같다.

- 건설단계 평균 이산화탄소 배출량: 410.52kg·CO2/m^3
- 단지 형태별 배출량: 판상형+계단실형 420.43kg·CO2/m^3 > 탑상형+홀형 379.61kg·CO2/m^3 > 판상형+복도형 361.93kg·CO2/m^3

[표 3-17] 전과정 평가의 유형별 이산화탄소 배출량(kg·CO2/m^3)

구분	건설단계				운영단계 (40년 수명주기 고려)					해체/폐기단계				합계
	자재 생산	운송	시공	소계	전력	도시가스	지역난방	상수도	소계	해체	운송	처리	소계	
AAA	403.52	5.83	11.08	420.43	725.45	929.74	-	73.18	1,728.37	17.43	1.92	4.71	24.06	2,172.86
ABA	403.52	5.83	11.08	420.43	742.89	993.68	-	78.41	1,814.98	17.43	1.92	4.71	24.06	2,259.47
ACA	403.52	5.83	11.08	420.43	824.08	151.46	688.87	74.80	1,739.21	17.43	1.92	4.71	24.06	2,183.70
ACB	403.52	5.83	11.08	420.43	776.82	69.65	641,51	68.37	1,556.35	17.43	1.92	4.71	24.06	2,000.84
BAA	345.83	5.02	11.08	361.93	916.95	1,035.54	-	86.42	2,038.91	14.94	1.65	4.04	20.63	2,421.47
BBA	345.83	5.02	11.08	361.93	992.63	1,223.69	-	105.17	2,321.48	14.94	1.65	4.04	20.63	2,704.04
BCA	345.83	5.02	11.08	361.93	777.61	86	730.41	101.80	1,695.82	14.94	1.65	4.04	20.63	2,078.38
BCB	345.83	5.02	11.08	361.93	932.47	94.41	730.86	95.97	1,853.71	14.94	1.65	4.04	20.63	2,236.27
CAA	363.37	5.16	11.08	379.61	1,141.78	1,044.86	-	78.70	2,265.34	15.48	1.70	4.18	21.36	2,666.31
Avg.	393.75	5.69	11.08	410.52	766.7	855.39	76.25	76.06	1,774.41	17.01	1.87	4.60	23.48	2,208.40

출처: 배은석·오규식(2015). 전과정평가에 기반한 서울시 아파트의 이산화탄소 배출량분석. 국토계획. 50(3). p.344.



[그림 3-5] 전과정 평가의 유형별 이산화탄소 배출량(kg·CO2/㎡)
출처: 배은석·오규식(2015). 전과정평가에 기반한 서울시 아파트의 이산화탄소 배출량분석. 국토계획. 50(3). p.345.

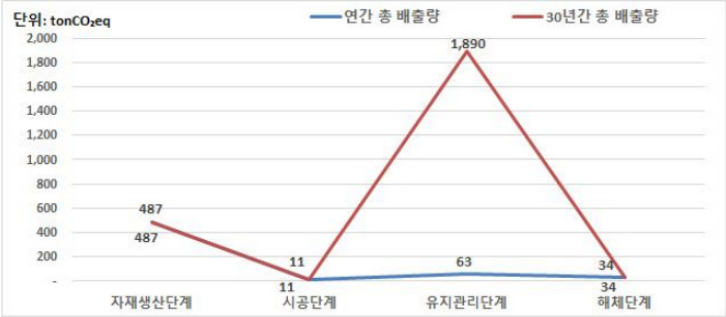
건물 전 과정을 자재생산단계, 시공단계, 유지관리단계, 해체단계로 구분하고 이산화탄소 배출량을 평가·분석한 연구가 진행되었다(조수현 2016). 연구는 연간 총 배출량과 건물의 전 생애주기에 따른 30년간의 총 배출량을 산정하였는데, 단계별 배출량 비중이 상당히 큰 격차를 보였다. 연간 배출량은 측정 시점에 따라 다르기 때문에, 생애주기 개념을 반영한 30년간 총 배출량 결과를 볼 때, 건설 단계인 자재생산단계가 487tonCO2·eq로 20.1%의 비중을 차지하였고, 시공단계에서는 11tonCO2·eq로 0.5%의 비중을 보였다. 건물의 사용단계인 유지관리단계에서는 전체 단계 중 가장 높은 비중인 78.0%(1,890tonCO2·eq)를 보임으로써 가장 배출량이 많은 단계임을 알 수 있다. 마지막으로 해체단계는 33tonCO2·eq로 1.4%의 비중을 보임으로써 시공단계와 함께 미미한 비중을 차지하였다.

- 30년 기간 단위면적당 배출량: 2,248 tonCO2·eq

[표 3-18] 건물 전생애주기 단계별 탄소배출량 평가결과

구분	자재생산 단계	시공 단계	유지관리 단계	해체 단계	연간 총 배출량 (tonCO2eq)	단위면적당 배출량 (tonCO2eq/m²)
연간 총 배출량 (tonCO2eq)	487 (81.8%)	11 (1.9%)	63 (10.6%)	33 (5.7%)	595 (100.0%)	552.6
30년간 총 배출량 (tonCO2eq)	487 (20.1%)	11 (0.5%)	1,890,285 (0.5%)	33 (1.4%)	2,423 (100.0%)	2,248

출처: 조수현(2016). 전과정평가 방법론을 이용한 건물의 전과정 탄소 배출량 평가 및 분석에 관한 연구. 한국건축시공학회 학술발표대회 논문집. 16(1). p.259.



[그림 3-6] 건물의 LCCO$_2$ 배출량 평가 결과

출처: 조수현(2016). 전과정평가 방법론을 이용한 건물의 전과정 탄소 배출량 평가 및 분석에 관한 연구. 한국건축시공학회 학술발표대회 논문집. 16(1). p.260.

공동주택 라이프사이클에서 에너지 소비와 이산화탄소 배출을 추정한 연구(이강희 외 2008)에서는 건설단계(생산, 운송, 시공), 사용/유지관리단계(전력, 지역난방, 도시가스, 유지관리), 철거/폐기단계(철거, 폐기)로 라이프사이클 단계를 구분하고, 이들에 대한 에너지소비 원단위와 CO2 배출원단위를 제시하였다. 이중 탄소배출량을 산정할 수 있는 CO2배출원단위는 단계별로 다음과 같다.

- 건설단계 CO2배출 원단위(kg·CO2/㎡): 432.7(건축자재·재료생산단계 413.2, 자재운송단계 7.4, 시공단계 12.1)
- 사용/유지관리단계 CO2배출 원단위(kg·CO2/㎡·년): 27.9(전력 15.8, 지역난방 10.6, 도시가스 0.8, 유지관리 0.7)
- 철거/폐기단계 CO2배출 원단위(kg·CO2/㎡): 0.6(철거단계 0.07, 폐기단계 0.53)

[표 3-19] 라이프사이클 에너지 및 이산화탄소 원단위

구분		에너지 소비 원단위 (단위: MJ/m^2)	CO_2 배출원단위 (단위: kg-CO_2/m^2)
건설 단계	생산단계	4,790.05 MJ/m^2	413.19 kg-CO_2/m^2
	운송단계	104.92 MJ/m^2	7.40 kg-CO_2/m^2
	시공단계	198.04 MJ/m^2	12.15 kg-CO_2/m^2
	소계	5,093.01 MJ/m^2	432.74 kg-CO_2/m^2
사용/유지관리 단계	전력	117.68 MJ/m^2·년	15.81 kg-CO_2/m^2·년
	지역난방	170.42 MJ/m^2·년	10.60 kg-CO_2/m^2·년
	도시가스	14.58 MJ/m^2·년	0.81 kg-CO_2/m^2·년
	유지관리	6.27 MJ/m^2·년	0.75 kg-CO_2/m^2·년
	소계	308.95 MJ/m^2·년	27.97 kg-CO_2/m^2·년
철거/폐기 단계	철거단계	1.07 MJ/m^2	0.07 kg-CO_2/m^2
	폐기단계	73.97 MJ/m^2	0.53 kg-CO_2/m^2
	소계	75.04 MJ/m^2	0.60 kg-CO_2/m^2

출처: 이강희·채창우(2008). 공동주택의 라이프사이클 에너지와 이산화탄소 추정에 관한 연구. 한국주거학회논문집. 19(4). p.96.

3) 생활권 단위 탄소중립 인벤토리 구축

본 연구에서는 도시공간을 구성하는 다양한 규모 중 생활권 단위에서 온실가스를 배출하는 경로를 파악하고, 이를 통해 탄소중립 실현을 위한 생활권 공간계획 요소들을 발굴하는 데 활용하고자 한다. 그리하여 도시공간에서의 온실가스 배출 경로와 관련하여 기연구된 문헌들을 조사하였으며, 이를 정리하여 생활권 인벤토리를 구축하고자 하였다. 특히, 추후 도출되는 탄소중립 공간 조성을 위한 계획 요소들을 유추하고 연계하는 과정으로서 인벤토리 구축을 고려하였다.

□ 생애주기(Life-Cycle) 차원에서의 생활권의 변화 단계

생활권 공간의 탄소배출에 대한 구조를 이해하는 것은 도시 공간으로서 생활권의 생애주기적 단계를 구분함으로써 시작할 수 있다. 선행연구들을 종합하여 볼 때, 도시공간의 생애주기 단계는 '도시 조성-도시 운영-도시 해체 단계'로 구분할 수 있다.

도시 조성 단계는 미개발지에 도시가 최초로 건설되는 단계로서, 도시 건설을 위해 이루어지는 활동들에서 이산화탄소 배출이 발생한다. 도시 운영 단계는 도시 조성이 완료된 후 도시민이 입주하고 상업과 비즈니스 등 인간 활동이 이루어지는 단계로서, 이러한 인간 활동을 통해 탄소 배출이 발생한다. 마지막으로 도시 해체 단계는 도시 조성 단계의 정반대의 활동들이 일어나게 된다.

□ 배출 구분에 따른 배출량 산정 범위 설정

앞서 선행 연구 검토결과와 같이, 생활권 탄소 배출 범주를 내재(Embodied) 배출, 운영(Operational) 배출, 소비(Consumption) 배출로 구분하였는바, 이중에서 내재 배출과 소비 배출은 생활권 공간 계획을 통한 통제가 불가능한 배출 범위이기 때문에 본 연구에서의 생활권 단위 탄소배출량 산정에서는 포함하지 않는다. 결국 공간 계획을 통해 만들어진 도시 내에서의 탄소배출 활동에 대한 배출량을 산정 범위에 포함시키도록 한다.

□ 탄소배출 활동 구분

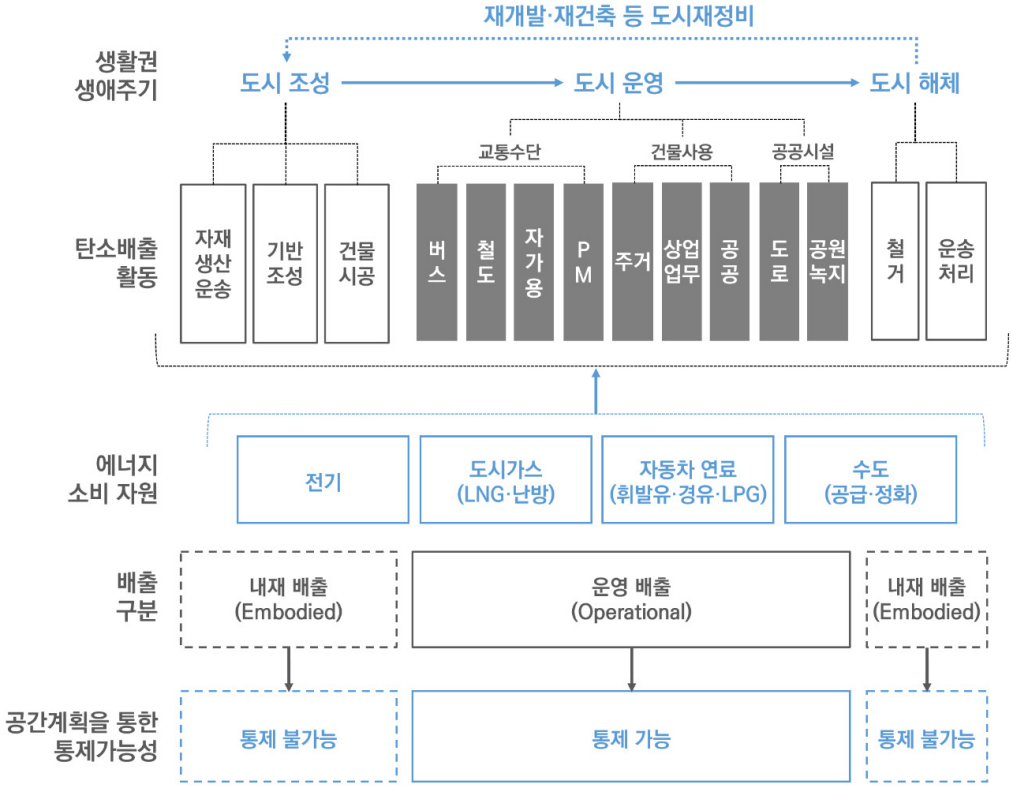
생활권 공간에서의 탄소배출 활동으로는 다음과 같이 분류하였다. 첫째, 도시 조성 단계에서의 자재 생산 및 운송, 기반 조성을 위한 토목 공사, 건축물 시공 시 발생하는 탄소배출이 해당한다. 둘째, 도시 운영 단계에서는 생활권 내 자가용, 버스, 도시철도, PM, 자전거 등 다양한 교통수단의 이동량에 따른 탄소배출과 주거, 상업, 업무, 공공 등 건축물

의 사용에 따른 탄소배출, 그리고 도로, 공원녹지 등 공공시설 운영에 따른 탄소배출이 이에 해당한다. 마지막으로 도시 해체 단계에서는 도시 조성 단계와 유사하게 철거와 운송처리에 따른 탄소배출로 구분할 수 있다.

□ 탄소배출량 산정을 위한 소비 자원

생활권에서의 에너지자원 소비는 탄소 배출과 직접적인 관계를 가진다. 탄소배출 활동은 에너지 자원별로 소비가 이루어지며, 이러한 에너지 소비가 궁극적으로 탄소배출로의 전환이 이루어지는 것이다. 최종적인 탄소배출량의 산정도 이러한 에너지 자원 소비량을 기준으로 파악한다.

생활권 단위에서 소비되는 에너지 자원은 전기, 가스(LNG), 수도, 그리고 교통수단에서 대부분 소비되는 휘발유, 경유, LPG 등 화석연료로 분류할 수 있다. 이러한 에너지 자원들이 어떠한 탄소배출 활동으로 인해 소비가 이루어지는지 파악함으로써 생활권 단위 공간계획을 통한 탄소배출 인벤토리 체계가 구축될 수 있다.



[그림 3-7] 생활권 단위 공간계획을 통한 탄소배출 인벤토리 구축
출처: 연구진 작성.

2. 생활권 탄소배출·흡수량 산정방법

1) 생활권 탄소배출·흡수량 산정을 위한 산식 및 계수 검토

(1) 건축물 부문

도시재생에서의 탄소저감 계획요소를 도출하고 탄소저감 원단위를 검토하는 연구가 진행되었다(김영환 외 2014). 본 연구는 도시재생 사례지의 기존 탄소배출량을 산정한 후 전면재개발 방식 재생의 탄소발생량을 산정하였다. 저탄소 녹색재생 기법으로 건물 부문에서 압축적 개발, 보행중심생활권, 열섬 완화, 신재생 에너지 활용, 에너지 절약 건축물을 제시하였으며, 각 계획요소별 효과와 산정식은 다음과 같다.

[표 3-20] 건축물 부문 저탄소 녹색재생 기법을 적용한 탄소배출량

저탄소 녹색재생 계획요소	저탄소 녹색재생 계획요소별 효과 및 산정식
압축적 개발	공원 녹지가 약 10~30% 증가하면 전체 배출량의 약 0.1~0.3% 저감 - 총 탄소 배출량 x 저감율 0.003
보행중심 생활권	보행자도로를 녹도로 구성할 시 1㎡당 약 2.45㎏CO_2를 저감 - 바람통로 면적 x 저감량 2.45kgCO_2 x 0.001
열섬 완화	바람통로 1㎡당 약 0.25㎏CO_2를 저감 - 바람통로 면적 × 저감량 0.25㎏CO_2 x 0.001
신재생 에너지 활용	태양광 발전은 1㎡당 약 0.0534tCO_2를 저감 - 설치면적 / 패널크기 x 저감량 0.0534tCO_2
에너지 절약 건축물	주상복합건물 LED조명으로 교체시 1세대당 연간 0.95tCO_2를 저감 - 0.95tCO_2 x 계획세대수
	패시브 하우스 32평형 기준으로 1,192.95㎏CO_2를 저감 - 주거총연면적 / 3.3m^2 / 32평 x 1,192.95㎏CO_2

출처: 김영환·박상준(2014). 도시재생사업에서 저탄소 녹색 계획요소 활용 및 탄소저감 효과에 관한 연구-청주시 도심부를 중심으로. 한국도시설계학회. 15(1). p.179. 참고하여 작성.

도시재생과정에 적용할 수 있는 탄소저감설계요소를 도출하고 구체적인 탄소저감효과를 분석한 연구도 있다(서승연 외 2013). 건물 부문의 설계로 패시브 하우스와 액티브 솔라시스템을 제시하였으며, 각 설계요소별 산정식은 다음과 같다.

[표 3-21] 건축물 부문 설계요소별 탄소저감량

설계요소	각 적용요소별 탄소저감량 산정 방식(1년 기준)
패시브 하우스	세대수 x 세대별 난방부문 탄소배출량 x 난방에너지 저감률 (세대당 난방부문 탄소배출량 1.96ton 적용, 패시브하우스 적용시 난방에너지 90% 저감)
액티브 솔라 시스템	태양집열판 면적(㎡) x 탄소저감량(kgCO2/㎡) (1㎡당 약 312.4kgCO2/㎡ 탄소저감)

출처: 서승연·이경환(2013). 탄소저감 설계기법을 적용한 도시재생모델 구축 및 적용 효과 분석 -대전광역시 서구 용문동 재건축사업 구역을 대상으로-. 대한건축학회 논문집. 29(9). p.173. 참고하여 작성.

노후도심지역의 건축물 부분에서 발생하는 탄소배출량을 산출하고자 지역단위의 탄소배출량 산정 방법과 건축물 에너지 시뮬레이션을 통한 탄소배출량 산정방법의 대상지 적용 가능성을 검토하는 연구가 진행되었다(최정만 외 2013). 건축물 탄소배출량은 2006 IPCC G/L에서 제시한 지침에 따라 산정되었다. 도시가스 사용량은 한국도시가스공사를 통하여 조사하였으며, 전력 사용량은 한국전력공사를 통하여 조사하였다. 화석계 연료(석유,석탄 등)는 건축물 별 사용데이터가 없으므로 도시가스 사용 세대와 동일한 열량을 소비한다는 가정을 통한 배출량 산출법을 제시하였다.

[표 3-22] IPCC 가이드라인을 통한 배출량 산정법

배출원	산정방법: 탄소 배출량(TCO2eq)	
기타부문 (가정/상업/공공)	도시가스	도시가스 사용량(m^3) × 순발열량(MJ/m^3) x GHG 배출계수 (kgGHG/TJ) x GWP X 10^{-9}
	전력	전기 사용량(kWh) x GHG 배출계수(tCO_{2e}/MWh) x 10^{-3}
	석유	석유류 사용량(L) x 순발열량(MJ/L) x GHG 배출계수(kgGHG/TJ) x GWP X 10^{-9}
	석탄	석탄류 사용량(kg) x 순발열량(MJ/kg) x GHG 배출계수 (kgGHG/TJ) x GWP X 10^{-9}

* GWP : 지구온난화 지수
출처: 최정만 외(2013). 노후도심 지역의 건축물 탄소배출량 산출에 관한 연구. 대한건축학회 논문집. 29(12). p.233.

본 연구는 원단위를 활용하여 배출량을 산정하였다. 원단위 활용 배출량 산정법은 에너지 사용 및 온실가스 배출에 대한 표준화된 원단위를 이용하여 온실가스 배출량을 산정하는 방법이다.

[표 3-23] 원단위를 활용한 배출량 산정법

배출원	탄소 배출량(TCO2eq) 산정방법
주거	가구 형태별 호수(호) x 지역(강남) 평균 가구형태별 원단위(TCO_{2eq}/호)
상업/공공	건물 용도별 면적(m^2) x 지역(경남) 평균 건물 용도별 원단위(TCO_{2eq}/m^2)

출처: 최정만 외(2013). 노후도심 지역의 건축물 탄소배출량 산출에 관한 연구. 대한건축학회 논문집. 29(12). p.234.

(2) 공원녹지 부문

저탄소 녹색재생 기법으로 흡수 부문에서 입체 녹화, 탄소 흡수원/공원 녹지/친수 공간 확보가 제시되었으며(김영환 외 2014), 각 계획요소별 효과와 산정식은 다음과 같다.

또한, 도시재생과정에 적용할 수 있는 탄소저감설계요소를 도출하고 구체적인 탄소저감효과가 분석되었다(서승연 외 2013). 흡수를 위한 녹지 부문 설계요소로 옥상 녹화, 벽면 녹화, 조경식재, 공원, 실개천, 투수성 포장, 중·우수시설을 제시하였으며, 각 설계요소별 산정식은 다음과 같다.

[표 3-24] 흡수 부문 저탄소 녹색재생 기법을 적용한 탄소흡수량

저탄소 녹색재생 계획요소	저탄소 녹색재생 계획요소별 효과 및 산정식
입체녹화	옥상녹화에 따른 녹지 면적 1㎡당 약 0.1~0.2㎏CO_2를 저감 - 녹화가능 면적 x 0.2㎏CO_2 x 0.001
탄소흡수원 확보	공원 및 녹지 면적의 증가에 따라 1㎡당 약 0.7~1㎏CO_2를 저감 - 공원 면적 x 1㎏CO_2 x 0.001
공원녹지 확보	생태공원 면적 1㎡당 약 0.91㎏CO_2를 저감 - 공원 면적 x 0.91㎏CO_2 x 0.001
친수공간 확보	실개천 조성 면적 1㎡당 약 0.25㎏CO_2를 저감 - 공원 면적 x 0.25㎏CO_2 x 0.001

출처: 김영환·박상준(2014). 도시재생사업에서 저탄소 녹색 계획요소 활용 및 탄소저감 효과에 관한 연구-청주시 도심부를 중심으로. 한국도시설계학회. 15(1). p.179의 표를 발췌하여 작성.

[표 3-25] 녹지 부문 설계요소별 탄소저감량

설계요소	각 적용요소별 탄소저감량 산정 방식(1년 기준)
옥상녹화	- 조성면적(㎡) x 단위면적당 탄소저감량(kgCO2/㎡) (1㎡당 약 0.826kgCO2 탄소저감)
벽면녹화	- 조성면적(㎡) x 단위면적당 탄소저감량(kgCO2/㎡) (1㎡당 약 0.11kgCO2 탄소저감)
조경식재	- 가로수 개수 x 그루당 탄소저감량(kgCO2/그루) (한 그루당 34.60kgCO2/㎡ 탄소저감)
공원	- 조성면적(㎡) x 단위면적당 탄소저감량(kgCO2/㎡) (1㎡당 약 1.73kgCO2/㎡ 탄소저감)
실개천	- 조성면적(㎡) x 단위면적당 탄소저감량(kgCO2/㎡) (1㎡당 약 0.25kgCO2/㎡ 탄소저감)
투수성포장	- 조성면적(㎡) x 단위면적당 탄소저감량(kgCO2/㎡) (1㎡당 약 0.27kgCO2/㎡ 탄소저감)
중·우수시설	- 조성면적(㎡) x 단위면적당 탄소저감량(kgCO2/㎡) (1㎡당 약 0.1kgCO2/㎡ 탄소저감, 우수저장탱크)

출처: 서승연·이경환(2013). 탄소저감 설계기법을 적용한 도시재생모델 구축 및 적용 효과 분석 -대전광역시 서구 용문동 재건축사업 구역을 대상으로-. 대한건축학회 논문집. 29(9). p.173. 참고하여 작성.

그린인프라의 이산화탄소 흡수량을 산정하는 방법 중 가장 정확도가 높은 것은 수종의 유형과 흉고직경, 근원직경 그리고 개체 수 및 수령 등으로 구성된 상대생장식을 적용하는 것이다(박효석 외 2013). 하지만 상대생장식을 적용하기 위한 정확한 자료를 구득하는 데에는 한계가 있기 때문에 이를 단순화한 영급 및 생태자연도를 이용한 방법, 수목의 총 탄소 저장량을 수령으로 나누어 추정하는 방법 등이 병행되어 사용되고 있다. 선행연구에서 사용된 탄소흡수량 산정식은 다음과 같다.

[표 3-26] 이산화탄소 흡수량 산정식

연구자	이산화탄소 흡수량 산정식
손영모 외 (2010)	Y=임목축적×줄기밀도(1+지상부 대비 지하부 비율)×바이오매스 확장계수×탄소전환계수
박은진 (2009)	Y=탄소전환계수×Σ(수목 개채수×바이오매스) * 바이오매스=a(흉고직경)b
이관규 (2003)	Y=교목활엽개체수×교목활엽수 탄소저장량 + 교목침엽개체수×교목침엽수 탄소저장량 + 관목활엽개체수×관목활엽수 탄소저장량 + 관목침엽개체수×관목침엽수 탄소저장량 * 교목활엽수 탄소저장량=0.2572×흉고직경^(2.4595×근원직경) * 교목침엽수 탄소저장량=0.3510×흉고직경^(2.4595×근원직경) * 관목활엽수 탄소저장량=0.1800×흉고직경^(1.9494×근원직경) * 교목침엽수 탄소저장량=0.1608×흉고직경^(1.9494×근원직경)
IPCC (2007)	Y=수관피복면적×2.9 tC/ha/yr

출처: 박효석 외(2014). 도시 그린인프라 확충에 따른 탄소저감 증진효과 분석: 서울시를 대상으로. 도시행정학보. 27(4). p.4.

지역별 산림의 탄소흡수의 크기와 변화는 현재 이용 가능한 자료 수준과 국가별 계수 및 모형의 개발 수준에 따라 IPCC에서 제시하고 있는 수준(Tier) 1~3의 방법 가운데 하나를 이용하여 산정하도록 하고 있다(김원주 외 2010). 이에 해당 연구는 총 이산화탄소 흡수율은 순탄소 저장량과 벌채에 따른 배출량을 모두 감안한 값으로 추정했다. 이에 일차적으로 산림통계로부터 계산된 줄기재적 순생장량(m^3/yr)에 단위재적당 바이오 매스량을 나타내는 전건비중(ton/m^3)을 곱하여 연간 바이오매스 순증가량을 산정하였다. 여기에 다시 가지와 잎 등 수간 이외의 지상부분을 포함시키기 위하여 수간 바이오매스에 대한 지상부 전체 바이오매스의 비율을 곱하여 지상부 바이오매스 증가량을 고려하였다. 또한 지상부 전체 바이오매스에 포함되어 있는 탄소비율인 탄소전환인자(0.5)와 CO_2 전환인자(44/12)를 곱하여 연간 이산화탄소 흡수율을 산정하였다.

- 전체 바이오매스 순증가량(ton) = 줄기재적 순생장량(m3/yr) x 전건비중(ton/m3) x 줄기 바이오매스에 대한 지상 바이오매스 비율 x 지상 바이오매스 전체에 대한 전체 바이오매스 비율
- CO2 흡수율(tonCO2/yr) = 전체 바이오매스 순증가량(ton/yr) x 탄소전환인자(0.5) x CO2전환인자(44/12)

(3) 교통 부문

도로 교통부문 CO2 배출량 및 감축 잠재량 산정 방법론(김현 외 2020)은 다음과 같다. 자동차 등록대수와 차종구성, 대당 주행거리, 연비 및 신차 점유율 등을 기반으로 도로 교통부문의 BAU하의 배출량을 전망한 후 친환경차 보급, 대중교통 활성화 등 2030 국가 온실가스 감축목표에서 적용된 감축 기술과 정책을 통하여 감축할 수 있는 CO2 감축량을 산정한다. 또한, 차종별, 연료별 자동차의 주행거리 추이와 연비 개선에 대한 전망값을 명시적으로 도출하여 에너지 전망과 CO2 배출량 전망에 활용함으로써 추가 정책 혹은 기술 개발 등을 통한 연비개선과 같은 효과를 산출할 수 있도록 한다. 마지막으로 감축 잠재량은 국가의 도로교통부문 감축 정책과 일관성을 갖도록 신차 보급대수, 행태 변화, 대중교통 활성화라는 이 세 가지 감축 수단에 대하여 산정한다.

도로교통부문은 크게 여객수송과 화물수송으로 구분할 수 있다. 여객 수송은 비사업용 자동차와 사업용 자동차로 구분된다. 김현 외(2020)의 연구에서 감축 잠재량 산정과 연계된 도로교통부문 에너지 소비량을 주정하는 데 있어서 우선적으로 차종을 비사업용과 사업용으로 먼저 구분하고 세부적으로 승용, 승합, 화물차로 나누었다. 세부적인 에너지 소비량을 얻기 위해 차종을 다시 연료별로 구분하여 자동차 등록대수를 산정한 후, 각 차종의 평균 주행거리와 연비를 대입하면 각 차종별 에너지 소비량을 구할 수 있다. 이러한 소비 구조를 적용하면 도로교통부문의 온실가스 배출량은 에너지 소비량에 연료별 온실가스 배출계수를 곱하여 도출할 수 있다.

$$Y_{At} = CN_{At} \times \frac{CN_{At}km}{CN_{At}} \times EF_{At}$$

Y_{At} : A 차종의 t년도 에너지 소비량, CN_{At} : t년도의 A 차종 등록대수

$CN_{At}km$: t년도 A 차종의 총 주행거리, EF_{At} : t년도 A 차종의 연비

교통수단 전과정 중 온실가스 배출량이 많은 운행 부문을 살펴보기 위해 교통수단의 전과정평가(LCA)를 실시한 연구(박경진 2017)도 있다. 이를 위해서는 철도, 도로, 항공을 이용하는 교통수단 간 에너지 원단위 및 에너지 소비량의 산출이 필요하다. 이에 운행종별, 운행구간(출발지 및 도착지), 연비, 여객교통량(승차인원), 교통량(운행횟수) 등을 살펴보았다. 이후 교통수단 간 교통분담률 및 운행횟수를 산정한다.

교통수단별 에너지 원단위는 차량별 원단위와 운행시원단위로 나눌 수 있다. 차량별 원

단위는 각 교통수단별 원단위를 산출하기 위해 연료별 발열량을 살펴볼 필요가 있다. 차량 중량, 운행거리, 속도 등은 차량별 원단위에 영향을 미친다.

운행시 에너지 원단위는 승차율이 낮아질수록 전 부문에서 운행시 에너지 원단위가 높아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 승차율이 에너지 효율성에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다.

차량별 에너지 소비량은 통행량(운행횟수)에 비례하고, 차량 중량, 연비, 연료별 발열량, 차량 정원 등의 영향을 받는다.

- 차량별 에너지 소비량의 총합(TOE/vehical) = $\sum_i$운행시 차량 1대 또는 1편성당 연비(L/km-대 또는 편성) x 운행거리(km) x 연료별 발열량 x 1TOE/10^7Kcal (i는 운행모드: 승용차, 고속버스 등)
- 운행시 에너지 소비량의 총합(TOE/일) = $\sum_i$운행시 차량 1대 또는 1편성당 연비(L/km-대 또는 편성) x 운행거리(km) x 연료별 발열량 x 1TOE/10^7Kcal (i는 운행모드: 승용차, 고속버스 등)

[표 3-27] 교통수단 전과정평가를 위한 분석 자료 중 도로 부문

설계요소	도로		
	승용차		고속 버스
운행 종별	제1종(소형)		우등, 일반
운행 구간	- 출발지: 군자, 서울, 동서울, 서서울 - 도착지: 광주, 동광주, 동광산		- 출발지: 강남, 동서울 - 도착지: 광주종합
연료	휘발유		경유
연비	9.38(km/L)		4.0(km/L)
에너지 원단위*	3.48		9.46
운행시 에너지 원단위**	정원(인)	4	31
	실제승차인원	1.55	23.4
	운행거리(km)	316.1	316.1
	25% 승차시	3.48	1.22
	50% 승차시	1.74	0.61
	75% 승차시	1.16	0.41
	100% 승차시	0.87	0.31
	실제평균 승차시	2.25	0.4
차량별 에너지 소비량	0.03		0.07
운행시 에너지 소비량	39.93		21.85

* 서울~광주 구간. 단위는 MJ/vkm

** 단위: MJ/인·km, 편도

출처: 박경진(2017). 전과정평가(LCA)에 기반한 교통수단의 환경성 분석: 호남고속철도의 온실가스 배출을 중심으로. 환경정책. p.81, 83. 참고하여 작성.

지역별로 서로 다른 통행패턴(기종점 통행, 통과 통행)을 고려하여 도로 교통부분의 이산화탄소 배출량 관리를 위한 지역별 배출량 산정 방법이 제시되었다(김태균 외 2014).

이 연구의 기초자료는 국가교통DB센터(KTDB)에서 배포하는 2010년 기준 O/D와 Network자료를 이용하였다.

□ 이산화탄소 배출량 산출식

통과교통량과 기·종점교통량을 구분한 이산화탄소 배출량 추정방법은 지역별 이산화탄소 배출량 추정을 위한 죤별 통행 중 특정지역에 해당하는 링크를 통과하는 교통량만 고려하였다.

통행배정모형을 이용한 이산화탄소 배출량 추정의 기본단위는 링크별 이산화탄소 배출량으로 구축하였으며, 수도권 네트워크의 링크연장과 도로등급을 기준으로 통행배정을 통해 얻어진 링크 통행시간, 수단별 통행량을 이용하여 도로등급별 이산화탄소 배출량을 추정하였다. 이때, 특정 시·군의 통과교통량과 기종점교통량에 의한 이산화탄소 배출량을 구분하여 추정하고, 수도권 이산화탄소의 총 배출량은 서울, 인천을 포함하여 추정하였다.

링크별 이산화탄소 배출량 산정 방법은 아래 식(2)와 같으며, 통과교통량과 기·종점교통량으로 구분하여 링크별 이산화탄소 배출량 산출식을 구축(식(3))하였다. 이와 같은 방법으로 링크별 배출량을 추정한 후 각 링크에 부여된 행정구역으로 집계하여 지역별 이산화탄소 배출량을 식(4)와 같이 추정하였다.

$$Emission_i = \sum_{m,f=1}^{n} (length_i \times volume_i^{m,f} \times EF(s_i)^{m,f}) \quad (2)$$

$$Emission_i = \sum_{t=1}^{n} \sum_{m,f=1}^{n} (length_i \times volume_i^{t,m,f} \times EF(s_i)^{m,f}) \quad (3)$$

$$Emission_K = \sum_{i=1}^{k} \sum_{t=1}^{n} \sum_{m,f=1}^{n} (length_i \times volume_i^{t,m,f} \times EF(s_i)^{m,f}) \quad (4)$$

i	: 개별링크 번호
m	: 개별수단 (1:승용차, 2:버스(노선), 3:버스(비노선), 4:소형화물, 5:중형화물, 6:대형화물)
f	: 연료별(1: *Gasoline*, 2: *Diesel*, 3: *LPG*)
t	: *O/D*구분(1:통과교통량, 2:기종점교통량)
K	: 행정구역 일련번호
$Emission_i$	: 링크 i의 CO_2 배출량
$length_i$	: 링크 i의 연장
$volume_i^{m,f}$	: 링크 i의 m수단별 f연료 교통량
$EF(s_i)^{m,f}$	: 속도(s_i)별 CO_2 배출계수
s_i	: 링크 i의 통행속도

저탄소 녹색재생 기법으로 교통 부문에서 자전거 이용 활성화 및 에너지 절약형 교통수단 이용이 제시되었으며(김영환 외 2014), 각 계획요소별 효과와 산정식은 다음과 같다.

[표 3-28] 교통 부문 저탄소 녹색재생 기법을 적용한 탄소배출량

저탄소 녹색재생 계획요소	저탄소 녹색재생 계획요소별 효과 및 산정식
자전거 이용 활성화	자전거 수단분담률 5% 증가 시 교통부문의 탄소배출량 약5% 저감 - 교통부문 탄소배출량 x 0.05
에너지 절약형 교통수단	CNG 버스는 일반 경유 버스에 비해 20~30% 탄소저감 - CNG 버스로 모두 교체시 버스탄소 발생량 x 0.3

출처: 김영환·박상준(2014). 도시재생사업에서 저탄소 녹색 계획요소 활용 및 탄소저감 효과에 관한 연구-청주시 도심부를 중심으로. 한국도시설계학회. 15(1). p.179의 표를 발췌하여 작성.

도시재생과정에 적용할 수 있는 탄소저감설계요소를 도출하고 구체적인 탄소저감효과가 분석되었으며(서승연 외 2013), 토지이용 및 교통 부문의 산정식은 다음과 같다.

[표 3-29] 교통부문 설계요소별 탄소저감량

설계요소	각 적용요소별 탄소저감량 산정 방식(1년 기준)
토지이용 및 교통	- 세대수 x 세대별 차량대수 x 차량 1대 탄소배출원단위(tCO2) x 10%(단지내차량이용감소율)

출처: 서승연·이경환(2013). 탄소저감 설계기법을 적용한 도시재생모델 구축 및 적용 효과 분석 -대전광역시 서구 용문동 재건축사업 구역을 대상으로-. 대한건축학회 논문집. 29(9). p.173. 참고하여 작성.

□ 이동 거리의 측정

교통 부문의 탄소배출량을 산정하기 위해서는 보행자의 이동 거리에 및 경로 방향성에 대한 이해가 필요하다. Scoppa, M., and Anabtawi, R.,(2021)은 표준 가로망 표현법을 사용하여 슈퍼블록 내 다양한 보행경로를 제시하였다. 본 연구에서 이동거리는 다음의 방법을 통해 계산되었다. Distance[i]는 출발지 필지(i)에서 도착지 필지(j)까지의 가장 짧은 가로망 길이(d)이며 n은 도착지의 총 개수이다.

$$Distance\ [i] \ = \ \frac{1}{n}\sum_{j \neq i}^{n} d(i,j)$$

보행자 경로 방향성(PRD(pedestrian route directness))은 각 가로망과 출발지, 목적지 집합 사이의 연결을 통해 효율성을 분석하는 것이다. 이를 위해 이전 분석에서 얻은 최단 네트워크 경로를 직선길이(출발지와 목적지를 연결)로 나누었다. 이 비율은 가능한 최단 경로보다 실제 이동 거리가 얼마나 긴지를 백분율로 표시하여 계산 및 해석이 용이하다. Route Directness[i]는 출발지 필지(i)의 직선성 값(Directness value)이다. 즉, 출발지 필지(i)에서 모든 도착지(j)까지의 최단 네트워크 거리이다. j는 내부연결성인지 외부연결성인지에 따라서 필지나 모서리일 수 있다. diE,jucl는 출발지 필지(i)에서 모든 도착지(j)까지의 유클리드 거리(the Eulicdean distance or crow-fly distance)이고 n

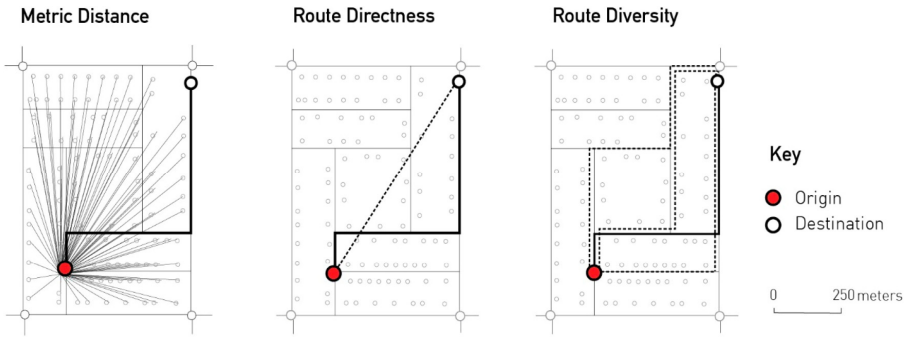
은 도착지의 총 개수이다.

$$Route\ Directness\ [i] = \frac{1}{n}\sum_{j \neq i}^{n} d_{i,j}/d_{i,j}^{Eucl}$$

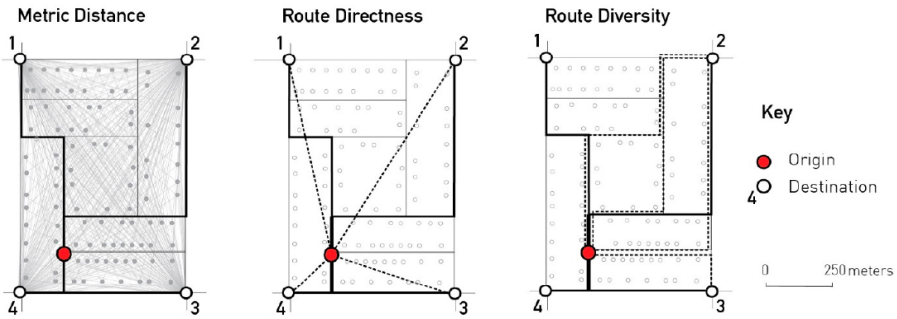
Redundancy Index는 슈퍼블록 디자인들의 경로다양성 및 효율성을 평가하기 위한 것이다. 이 가로망의 속성은 UNA(Urban Network Analysis)의 toolbox's redundancy index[56, 57]를 사용하여 파악하였다. 이 지수에 따르면 단일 최단 경로(a single shortest route)가 출발지와 도착지를 연결할 때, 다른 더 긴 경로(additional longer routes)를 실행가능한 대안으로 본다. 이 대안을 통해 도시 가로 배치의 가능성을 이해할 수 있다. Analysis of redundancy을 설정하기 위해서는 우회 비율(detour ratio)을 설정해야 한다. 이 값은 출발지와 목적지 사이를 이동할 수 있는 추가 길이를 결정하는데 사용된다. 본 연구에서 사용된 우회율 20%는 최단거리보다 최대 20% 더 긴 경로를 유효한 옵션으로 간주하여 길이를 측정하였다.

Redundancy Index [O, D]은 출발지(O)와 도착지(D) 사이의 Redundancy index를 의미한다. dmin(O,D)은 O와 D를 연결하는 최단경로이며, d(path; O,D)는 O와 D를 연결하는 경로의 길이이다. 본 연구에서는 이 합은 조건 d(path; O, D) in (dmin(O,D), 1.2dmin(O,D))을 따르는 경로로 제한된다. 따라서 이 지수는 경로의 다양성을 20% 우회 거리 내에서 이용 가능한 모든 경로와 최단 경로 사이의 비율로 표현하였다.

$$Redundancy\ Index\ [O,D] = \frac{1}{d_{\min(O,D)}}\sum_{path} d(path;O,D)$$



[그림 3-8] 내부 연결성(Inter-plot)
출처: Scoppa, M., and Anabtawi, R.(2021). Connectivity in Superblock Street Networks: Measuring Distance, Directness, and the Diversity of Pedestrian Paths. Sustainability. 13(24). p.9.



[그림 3-9] 외부 연결성(Inter-block)

출처: Scoppa, M., and Anabtawi, R.(2021). Connectivity in Superblock Street Networks: Measuring Distance, Directness, and the Diversity of Pedestrian Paths. Sustainability. 13(24). p.9.

분석을 통해 도로길이, 교차로, 블록크기는 내부/외부 경로다양성의 값과 유의미하게 연관되어 있음을 알 수 있다. 더 자세하게는 도로길이와 교차로의 경우에서 강한 양의 상관관계를 보인다. 내부/외부 경로다양성과 블록크기는 음의 상관관계를 가지며 블록이 작아질수록 경로다양성이 증가한다. 필지 사이의 거리와 필지와 모서리 사이의 거리는 모든 샘플에서 중요하지 않은 것으로 나타났다. 마지막으로 PRD의 평균값은 도로길이, 교차로, 블록크기와 약하게 연관되어 있는 것으로 나타났다.

본 연구 결과는 슈퍼블록 내에서의 이동이 보행가능한 거리 내에서 유지되는 경향이 있음을 시사한다. 슈퍼블록의 디자인과 관계없이 대부분의 경우 하나의 필지에서 이웃 필지까지의 평균거리는 500~600m 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 또한, 슈퍼블록 모서리로 이동할 때 즉, 인근지역으로 도달하는 가능성을 고려하는 경우에는 모서리는 필지에서 걸어갈 수 있는 곳에 위치하며 상당히 일정하고 평균거리는 약 720m임을 도출했다.

2) 탄소배출·흡수량 산정을 위한 산식 및 계수 검토

위에 기술한 문헌들을 포함하여 추가적 조사를 통한 탄소배출·흡수량 산정 산식 및 계수 검토 종합표는 다음과 같다.

[표 3-30] 탄소배출·흡수량 산정을 위한 계수 및 산식 조사 종합

계획 요소	이산화탄소 배출·흡수계수	탄소배출·흡수량 산정식
공간구조 및 토지이용	○ 정민선 외(2015) · 휘발유: 1L당 2.12kg의 CO2 배출	○ 정민선 외(2015) · 석유에너지와 전기에너지의 부문별 소비량에 대해 각각 탄소발생계수인 2.12 와 0.44를 곱한 후 석유와

계획 요소	이산화탄소 배출·흡수계수	탄소배출·흡수량 산정식
	· 전기: 1Kwh당 0.44kg 의 CO2 배출	전기 소비에 따른 전체 CO2배출량(tCO2)을 산정 ○ 김인현 외(2011) · 도시공간 탄소배출량 = 0.261Vh + 0.222Cm + 0.318Fr – 0.258Cr + 0.182Fa – 0.064Rs + 0.083Rd – 0.054Pd (Vh: 자동차등록대수 / Cm: 상업업무지역 면적 / Fr: 용적률 / Cr: 건폐율 / Rs: 주거지역 면적 / Rd: 교통시설지역 면적 / Pd: 인구밀도)
교통	○「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」 제15조제2항 관련 별표 12 · 휘발유: 71,600㎏CO_2 eq/TJ · 경유: 73,200㎏CO_2 eq/TJ · LPG: 64,000㎏CO_2 eq/TJ ○ European Commission(2022) · 도로: 0.108t CO2e · 해상: 0.03t CO2e · 철도: 0.065t CO2e ○ 행정중심 복합도시건설청(2021) · 휘발유: 72,233㎏CO2/TJ, 25㎏CH4/TJ, 8.0㎏N2O/TJ · 경유: 73,333㎏CO2/TJ, 4㎏CH4/TJ, 3.9㎏N2O/TJ · LPG: 66,367㎏CO2/TJ, 62㎏CH4/TJ, 0.2㎏N2O/TJ	○ 환경부(2022) – 물량 x 에너지열량 환산기준 x 국가고유배출계수 · 휘발유: 물량 x 0.00003TJ/L x 71,600㎏CO_2 eq/TJ · 경유: 물량 x 0.000035TJ/L x 73,200㎏CO_2 eq/TJ · LPG: 물량 x 0.000058 x 64,000㎏CO_2 eq/TJ ○ European Commission(2022) – (거리 x 계수)/1000 · 도로: (거리 x 0.108t CO2e)/1000 · 해상: (거리 x 0.03t CO2e)/1000 · 철도: (거리 x 0.065t CO2e)/1000 ○ 김현 외(2020) · A 차종의 t년도 에너지 소비량 = t년도의 A 차종 등록대수 x (t년도 A 차종의 총 주행거리/t년도의 A 차종 등록대수) x t년도 A 차종의 연비 ○ 노경식 외(2013) · 수송부문 1인당 온실가스배출량 = 1.60081 + (0.00760 × 간선도로 비율) + (1.49782 × 1인당 차량등록대수) + (-0.01457 × 3차산업 종사자 비율) ○ 이상문(2013) · 녹색교통 전환에 따른 이산화탄소 회피량(Ton CO2 / 년) = 이용거리(㎞) × 연간이용횟수 × 녹색교통 증가량 × 사업구역별통행비 율 × 차종비율 × 차량규모비율 × 연료소비량(ℓ/㎞) × 순발열량(㎉)/107 × 탄소배출계수 × 365일 × 44/12 · 단지 내 도로배치 조정에 따른 이산화탄소회피량(Ton CO2 / 년) = Σ[구역별 단축거리(㎞) × 일일통행량 × 구역별 통행비율 × 차종비율 × 차량규모비율 × 차종별 연료소비량(ℓ/㎞) × 순발열량(㎉)/107 × 탄소배출계수 × 365일 × 44/12] ○ 정혜진 외(2011) · 석유·가스·석탄 배출량(kg) = 연료별 에너지량(TJ) × 연료별 배출계수(kg/TJ)

계획 요소	이산화탄소 배출·흡수계수	탄소배출·흡수량 산정식
		○ 이재준·김도영(2011) · 수송부문에 대한 탄소배출량 산정을 위하여 차량대수를 예측하고 차량별 탄소배출 원단위(배출계수)를 활용
건축물	○「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」 제15조제2항 관련 별표 12/지자체 온실가스 배출량 산정지침(ver4.1)(한국환경공단 2017). p259, 263 [상업/공공/가정] (직접배출) · 석유: 74,953㎏CO_2 eq/TJ · 가스: 60,050㎏CO_2 eq/TJ (간접배출) · 전력: 0.459㎏CO_2 eq/kWh · 지역난방: 0.123tCO2eq/Gcal ○ United States Environmental Protection Agency(2022) [가정] · 전력: 5.139 metric tons CO2/가구 · 천연가스: 2.29 metric tons CO2/가구 · 액화석유가스: 0.23 metric tons CO2/가구 · 연료유: 0.28 metric tons CO2/가구	○ 환경부 (2022) [상업/공공/가정] - (석유/가스/지역난방) 물량 x 에너지열량 환산기준 x 국가고유배출계수 · 석유: 물량 x 0.000033TJ/L x 74,953㎏CO_2 eq/TJ · 가스: 물량 x 0.0000036TJ/L x 60,050㎏CO_2 eq/TJ · 지역난방: 물량 x 0.001Gcal/KWh x 0.123tCO2eq/Gcal - (전력) 물량 x 국가고유배출계수 · 전력: 물량 x 0.459㎏CO_2 eq/kWh ○ 노경식 외(2013) · 가정·상업부문 1인당 온실가스배출량 = 1.27163 + (-0.31263 × 도로율) + (1.38959 × 1인당 차량등록대수) + (4.69261 × 1인당 종사자수) · 공공·기타부문 1인당 온실가스배출량 = -0.25064 + (0.00463 × 주거지역 면적비율) + (0.01355 × 도시지역 인구밀도) + (0.00675 × 녹지지역 비율) ○ 이상문(2013) · 공동주택 외피시스템 적용시 이산화탄소 감축량 = 외피시스템 적용 가구수 x 연간냉난방에너지사용량(kWh) × 에너지절약비율 × 이산화탄소배출계수/1000
에너지	○ United States Environmental Protection Agency(2022) · 전력소비: 4.33 × 10^{-4} metric tons CO2/kWh · 휘발유: 8.887 × 10-3 metric tons CO2/갤런 ○ 김인현 외(2011) · 전력(MWh당 0.423톤) / 가스(LNG 순발열량 9,550kcal, IPCC 탄소배출계수 0.637) · 지역난방(1,000Gcal당 0.2톤)	○ 행정중심복합도시건설청(2021) · 석유제품 및 도시가스(LNG) 사용에 따른 온실가스 배출량 = 연료사용량 × 순발열량 × 배출계수 ○ 노경식 외(2013) · 산업부문 1인당 온실가스배출량 = 1.13935 + (-0.06973 × 주거지역 면적비율) + (10.68041 × 1인당 차량등록대수) + (0.12858 × 2차산업 종사자 비율) ○ 이상문(2013) · 신재생에너지 사용에 의한 이산화탄소회피량(Ton CO2 / 년) = 계획세대수×세대당 연간총전력사용량 × 신재생에너지사용목표치(%) × 이산화탄소배출계수/1000

계획 요소	이산화탄소 배출·흡수계수	탄소배출·흡수량 산정식
		○ 정혜진 외(2011) · 전기 배출량 = 전력소비량 × 전력간접배출계수 · 열(스팀) 배출량 = 열소비량 × [1/(1-손실률)] × 열간접배출계수
공원녹지	○ 환경부(2022) · 근린공원/주제공원/시설녹지 현황: 8tCO_2 eq/ha ○ United States Environmental Protection Agency(2022) · 도심 수목: 0.060 metric ton CO2/그루 · 숲: -0.84 metric ton CO2/에이커/년 ○ 김인현 외(2011) · 상수도(0.587kgCO2/㎥)	○ 환경부(2022) - 물량 x 국가고유배출계수 · 근린공원/주제공원/시설녹지 현황: 물량 x 8tCO_2 eq/ha ○ 이상문(2013) · 우수활용 시 이산화탄소 저감량 = 전단력지량별 우수집수량(T) × 상수도생산 시 사용되는 전력량(kWh/t) × 이산화탄소 배출계수/1000 · 바람길 조성을 통한 에너지소비저감량 = 세대당 연평균 냉방소비전력(kWh) × {(기존냉방일수-바람길도입 시 냉방일수)/기존냉방일수} × 세대수 × 전력부문 이산화탄소 배출계수/1000 ○ 정혜진(2011) · 수도 배출량 = 수도 사용량 × 수도간접배출계수 ○ 김원주(2010) · 대규모 공원의 경우, 면적을 기준으로 수목의 이산화탄소 흡수량 = 면적 * 8.8 tCO2/ha/yr ○ 박은진 외(2009) · 가로수의 이산화탄소 흡수량 = 개체수 * 34.6 kg/CO2/tree/year

출처: 연구진 작성.

3) 생활권 탄소배출·흡수량 산정 계수 및 배출량 산정방법 도출

생활권 공간계획에 따른 탄소 배출량 산정을 위한 계수와 산정방법을 아래의 표와 같이 최종 도출하였다. 탄소 배출과 관련한 계수들은 건물 부문, 수송 부문, 공공시설 부문으로 구분하고, 탄소 흡수와 관련한 계수는 공원녹지 부문으로 선정하여 공간계획 요소들에 대한 탄소배출량 산정에 활용한다.

탄소배출량의 산정 방법은 계수를 활용한 산정식을 도출하는 것이며, 산정식에는 기본적으로 포함되는 계수에 더하여 가상의 공간을 계획하고 모형화하는 과정에서의 산정을 위한 조건이 설정되고, 이러한 조건들이 산정식에 추가 반영되어야 한다.

[표 3-31] 생활권 탄소배출·흡수량 산정 계수 및 배출량 산정방법 도출

구분	종류			활동자료 면적/등록대수 (a)	원단위 사용량 (b)	국가고유 배출계수 CO_2 배출/흡수 계수 (c)	에너지열량 환산기준 환산 계수 (d)	탄소배출량 ($kgCO_2$)
탄소 배출	공공시설 부문							
	도로 면적(m^2)				11 kWh/m^2/년*	0.466 $kgCO_2$ eq/kWh+	-	(a) * (b) * (c)
	공원녹지 면적(m^2)				2 kWh/m^2/년**	0.466 $kgCO_2$ eq/kWh+	-	(a) * (b) * (c)
	건물 부문							
		전력 사용량	주거		124 kWh/m^2/년***	0.466 $kgCO_2$ eq/kWh+	-	(a) * (b) * (c)
			비주거		153 kWh/m^2/년***		-	(a) * (b) * (c)
		도시가스 (LNG) 사용량	주거		124 kWh/m^2/년***	56,100 $kgCO_2$ eq/TJ++	0.0000036 TJ/Kwh#	(a) * (b) * (c) * (d)
			비주거		153 kWh/m^2/년***			(a) * (b) * (c) * (d)
		지역난방 사용량	주거		124 kWh/m^2/년***	0.1226 tCO_2 eq/Gcal+++	0.000860421 Gcal/KWh##	(a) * (b) * (c) * (d)
			비주거		153 kWh/m^2/년***			(a) * (b) * (c) * (d)
	수송 부문							
		휘발유			1,065L****	71,600 $kgCO_2$ eq/TJ++++	0.0000304 TJ/L####	(a) * (b) * (c) * (d)
		경유			2,029L****	73,200 $kgCO_2$ eq/TJ++++	0.0000352 TJ/L####	(a) * (b) * (c) * (d)
		LPG			-	64,000 $kgCO_2$ eq/TJ++++	0.0000584 TJ/L####	(a) * (b) * (c) * (d)
탄소 흡수	공원 녹지 부문(ha)							
		근린공원			-	8tCO_2 eq /ha+++++	-	(a) * (c)
		주제공원			-		-	(a) * (c)
		시설녹지			-		-	(a) * (c)

[원단위 사용량 및 배출/흡수 계수, 환산계수 출처]

○ 원단위 사용량

* 수원당수2지구 기반시설 1차에너지소요량 자료 참조

** 수원당수2지구 기반시설 1차에너지소요량 자료 참조

*** 그린투게더. 세부용도 건물에너지 사용량 통계. 활용하여 연구진 도출(2021년 기준)

**** '대한석유협회(2021). 사용연료별 자동차 등록대수' 및 '한국교통안전공단. 교통부문 온실가스관리 시스템. 연료별 에너지소비량' 활용하여 연구진 도출(2018년 기준)

○ CO^2 배출/흡수 계수

\+ 지자체 온실가스 배출량 산정지침(ver4.1)(2017.12). p.262

++ [별표 12] 연료별 국가 고유 발열량 및 배출계수 (제15조제2항 관련)((환경부) 온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침)[시행 2022. 1. 1.] /지자체 온실가스 배출량 산정지침(ver4.1)(2017.12). p.57

+++ 지자체 온실가스 배출량 산정지침(ver4.1)(2017.12). p.262

++++ [별표 12] 연료별 국가 고유 발열량 및 배출계수 (제15조제2항 관련)((환경부) 온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침)[시행 2022. 1. 1.]

+++++ 환경부(2022). 탄소중립그린도시 공모 가이드라인 별첨 3. 주요 부문별 온실가스 배출량 산정 보조자료.

○ 환산계수

\# 환경부(2022). 탄소중립그린도시 공모 가이드라인 별첨 3. 주요 부문별 온실가스 배출량 산정 보조자료.

[별표] 에너지열량 환산기준(제5조제1항 관련)((산업통상자원부) 에너지법 시행규칙)[시행 2022.1.21.]

출처: 연구진 작성.

3. 생활권 탄소중립 공간계획 요소 도출

1) 부문별 생활권 탄소중립 계획요소 검토

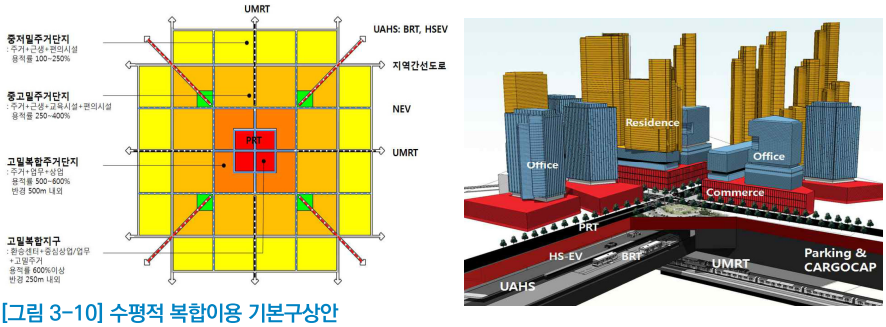
다양한 도시계획요소가 생활권 단위의 탄소중립 실현에 미치는 영향을 파악하기 위해 국내외 관련 선행연구를 검토하였다. 관련 선행연구에서는 도시계획을 통해 공간의 구성과 신기술 도입으로 탄소 발생 저감 및 탄소 흡수를 위한 계획요소를 제시하고 있다. 대부분의 논의가 도시 단위에서의 담론형태로 정리되어 있으나, 본 연구에서는 생활권 단위에서의 실효성을 중심으로 계획요소를 도출하였다.

(1) 공간구조 및 토지이용 부문

□ 복합용도계획(Mixed-Use)

복합용도계획은 여러 목적의 통행을 유발하는 토지이용시설을 수직·수평적으로 혼합 배치하여 통행발생 빈도와 이동거리를 줄임으로써 궁극적으로 화석연료 등 교통에너지 사용을 감소시키는 효과를 가져올 수 있는 공간계획 요소이다. 자족기능을 갖춤으로써 한 도시 또는 생활권 내에서 생활 필수품을 구입할 수 있고 출퇴근 거리를 줄일 수 있다. 탄소배출 저감을 목표로 한 도시계획과 관련된 여러 연구들에서 토지이용 전략 중 하나로 제시되었다(유광흠 외 2008; 이재준·최석환 2009; 이명식·이강복 2011).

생활권 공간에서의 용도 복합을 위해서는 환승역 등 교통의 결절점 주변을 도심지역, 근린지역 등으로 구분하여 상업시설, 업무시설, 주거시설, 공공시설을 적합하게 배치해야 한다. 이러한 복합용도계획은 압축적 도시개발을 통해 도시전체의 환경부하를 줄이기 위한 전략이 더불어서 요구된다(왕광익 2016).



[그림 3-10] 수평적 복합이용 기본구상안

출처: 성형곤 외(2010). 압축도시(Compact City) 중심의 미래도시 개발전략과 기본구상: 미래 교통기술의 적용과 3차원 공간 활용을 중심으로. 한국교통연구원. p.134, 138.

복합용도계획 중에는 직주근접의 복합개발이 주요한데, 직주근접으로 통근거리 최소화를 통해 교통에너지를 절감하는 계획기법이다. 가로형 상업·업무·주거의 복합토지이용 건물군 형성 방식의 복합개발을 통해 직주접근 유도가 가능하고 가로활성화를 도모할 수 있다(왕광익 2016; 이명식 2022). 통근거리를 최소화하기 위한 방안으로는 주거지와 직장 간 통근방법 우선순위를 보행 및 자전거→대중교통→개인승용차로 계획하고 통근권역을 설정하여 도보권 및 자전거 통행권 내에 직장이 위치하는 것이 고려될 수 있다(왕광익 2016, p.104).

중국 진안의 약 300가구를 대상으로 MIT와 칭화대가 실시(2010)한 근린단위 도시형태와 가구당 에너지 사용 관계 분석 결과, 근린단위 내에서 보행과 서비스를 개선시키면 가구당 이동에너지 소비를 17% 정도 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

□ 압축·고밀 개발 계획(컴팩트시티)

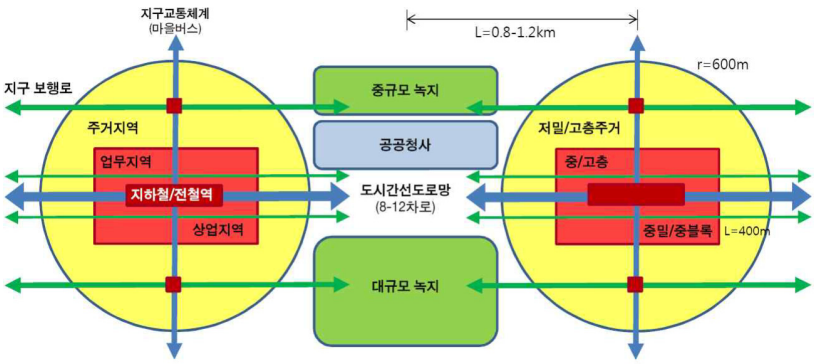
압축·고밀 개발 계획은 역세권 등 주요한 중심지를 컴팩트하고 고밀도로 개발하여 시가지 확산을 방지하고 친환경·생태 면적과 공원·녹지를 확보함으로써 지속가능한 도시형태를 구현하고자 하는 계획 방식이다. 압축·고밀 개발은 컴팩트시티라는 용어로도 불리우며, 저탄소 도시 계획요소로 복합용도계획과 같은 맥락으로 언급되고 있다(유광흠 외 2008; 이재준·최석환 2009; 이명식·이강복 2011). 그리하여 압축·고밀 개발 계획은 복합용도계획과 마찬가지로 이동거리를 최소화함으로써 교통에너지 소비를 저감하는 효과를 가져올 수 있다.

[그림 3-11] 개발밀도에 따른 모습 변화
출처: 성형곤 외 (2010). 압축도시(Compact City) 중심의 미래도시 개발전략과 기본구상: 미래 교통기술의 적용과 3차원 공간 활용을 중심으로. 한국교통연구원. p.126.

고밀도·압축적인 다핵도시는 혼합적 토지이용패턴을 가지며 사람들이 거주하고 일하고 레저활동을 추구하는 곳 사이의 거리를 가깝게 하면서 이동수요를 감소시킬 수 있다(FELIX CREUTZIG et al.(2015a); FELIX CREUTZIG et al.(2015b); Da Pan et al.(2020)). 전반적으로, 2050년에 도시 계획을 통한 온실가스 완화 잠재력은 일반적인 시나리오와 비교했을 때 약 25%이다(Creutzig et al. 2015a,b). 중국 진안의 약 300가구를 대상으로 MIT와 칭화대가 실시(2010)한 근린단위 도시형태와 가구당 에너지 사용 관계 분석 결과, 밀도가 높고 건물 면적이 작을수록 가구당 운송 에너지 사용은 12%가 감소하는 것으로 나타났다.

압축·고밀 개발 계획의 구체적인 방안으로 대중교통 중심지는 고밀집중지구로 개발하여 대중교통과 연계한 대중교통중심개발(Transit-Oriented Development, TOD)을 추진하고 주변지역은 도시의 자족기능을 향상시킴으로써, 토지이용 효율성 제고, 저밀 시가지 확대 방지, 탄소배출 저감 및 에너지 효율성 극대화를 도모할 수 있다.

대중교통중심개발(TOD)은 고밀도 압축 및 복합개발 지역에 대중교통 이용 접근성을 제고하고 보행이용을 촉진시킴으로써 도시 전체의 자가용 이용을 억제하고 에너지 소비를 최소화할 수 있는 도시개발 방식이다. 다수의 연구에서 저탄소 도시계획 요소로 다루어졌다(유광흠 외 2008; 이재준·최석환 2009; 이명식·이강복 2011; 김유민·이주형 2013; 왕광익 2016).



[그림 3-12] 대중교통중심개발(TOD) 개념도
출처: 서민호 외(2011). 녹색도시 구현을 위한 대중교통회랑 구축방안 연구. 국토연구원. p.x.

도시 중심부에 대중교통중심센터(TOD Center) 및 대중교통전용지구(Transit mall)을 구성하여 대중교통 이용을 유도하고 그 주변지역은 직주근접을 위한 복합개발을 통해 수송에너지의 절감과 효율적 토지이용을 가능하게 한다. 대중교통중심센터(TOD

Center)는 대중교통 결절점이자 상업·공공 기능이 집중한 곳으로, 도보나 자전거로 10분 이내에 대중교통센터에 도착할 수 있도록 교통체계를 구축하는 것을 계획원칙으로 한다. 대중교통전용지구(Transit mall)은 대중교통만으로 접근이 용이하도록 해야 한다.

한편, 우리나라의 경우 도시지역의 밀도자체가 매우 높기 때문에 압축적 토지이용을 통한 통행수요 억제효과를 도모하는 데에는 한계가 있으며, 오히려 주거지의 밀도 자체는 정책적으로 억제해야 할 필요하다는 견해도 있다(유광흠 외 2009).

□ 신재생에너지를 고려한 공간계획

신재생에너지를 고려한 공간계획은 생활권 내 에너지자립도를 높임으로써 탄소배출량을 저감하기 위한 지원 전략으로서, 탄소배출을 야기하는 에너지소비 차원이 아닌 에너지생산을 통해 외부로부터의 에너지원 공급을 낮추고 화석연료에서 신재생에너지로 전환을 위해 관련 발전시설 등 인프라를 제공하는 것으로 목적으로 한다.

이러한 공간계획은 생활권 내 옥외 공간에 적정 면적을 확보함으로써 탄소중립을 위한 공간계획들과 조화를 이루는 도입이 요구된다. 그리하여 신재생에너지 기반시설의 구축과 효율적 배치를 위하여 신재생에너지의 기반이 전제된 토지이용계획 수립이 필요하다.

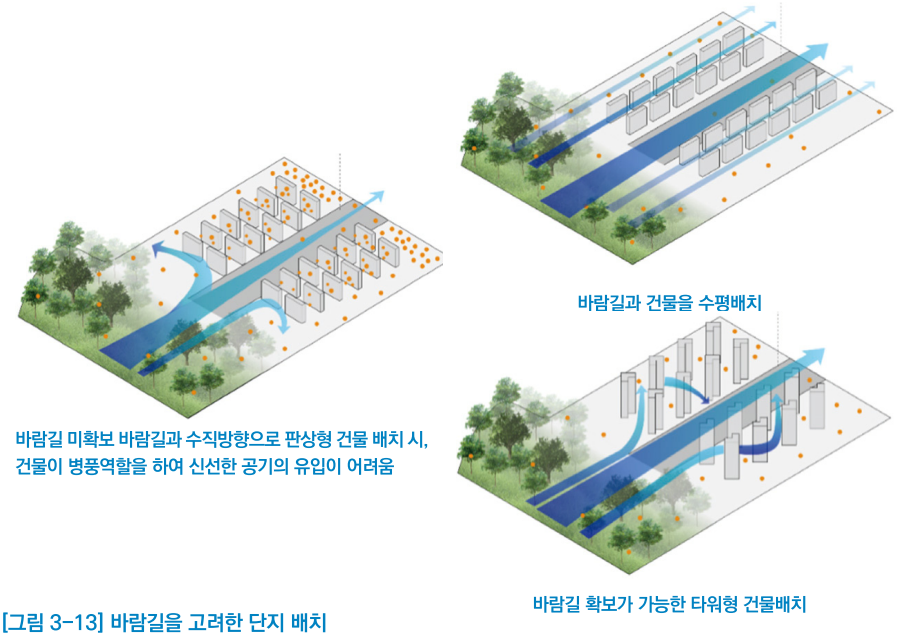
개발된 다양한 신재생에너지를 도시전역에 전달하고 사용하기 위해서는 계획수립대상지의 기후, 풍속 등 자연 환경적 특성을 고려해야 한다(박재홍·고재경 2008, p.17). 예를 들어 풍부한 태양광을 갖춘 지역이라면 가급적 건물 상층부가 적극 활용되도록 중저밀의 개발이 유용하며, 풍속이 강한 지역이라면 압축도시의 개념을 도입하여 고층건물을 적극 활용해야 한다.

생활권 공간에서 도입 가능한 재생에너지원으로는 태양광·태양열, 지열·수열, 풍력 에너지 등이 있으며, 이러한 에너지원들에 대한 생활권 내 효율적인 운영과 소비를 위해 마이크로그리드 등 관련 인프라 구축이 공간계획 시 함께 고려되어야 한다.

글로벌 urbanization wedge, 특히 아시아에서 에너지 효율화를 이룬 도시화는 BAU 시나리오보다 에너지 사용을 25% 이상 줄일 것이다. 휘발유 가격 상승에 따라 도시형태가 수정되는 것은 도시에서 글로벌 에너지 사용을 26% 또는 190EJ까지 줄일 수 있으며, 기후변화 완화를 위한 저비용 또는 마이너스 비용의 urbanization wedge를 구성할 수 있다.(Creutzig, F., G. et al., 2015b).

□ 기후 환경을 고려한 공간계획

기후 환경을 고려한 공간계획은 지역의 바람길과 일조를 중심으로 하여 이들을 효과적으로 활용함으로써 에너지 저감을 유도하는 설계 기법이다. 바람길은 더운 지역에 환기를 통한 시원함을 제공함으로써 열섬효과를 저감할 수 있고 미세먼지 등 대기오염 완화 효과도 있다. 이를 통해 여름철 냉방에너지를 저감하는 것을 기대할 수 있다.



[그림 3-13] 바람길을 고려한 단지 배치
출처: 성선용 외(2020). 바람길 도입을 위한 국토·환경 계획 법·제도 연계방안. 국토정책브리프. p.5.

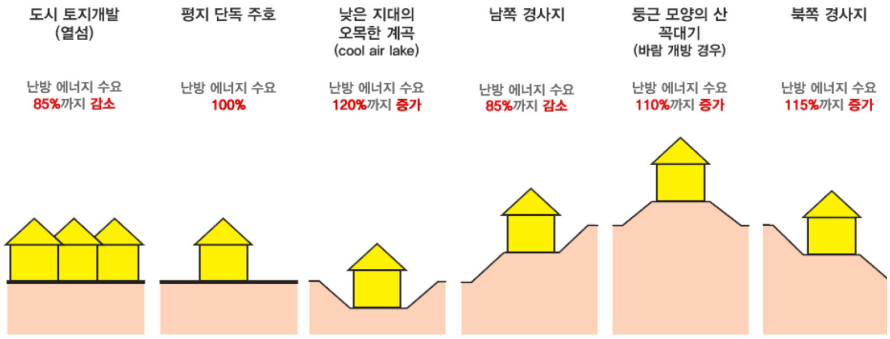
바람길과 대기순환을 고려한 건축물 배치를 통해 인공적인 바람길을 확보하여 에너지를 절감할 수 있는 계획기법이 필요하다. 산지 및 구릉지 하단부를 횡으로 완전 가로막는 건물배치를 지양하고 계절별 주 풍향과 대향 건축물 군에 의한 바람의 영향을 예상하여 시설을 배치해야 한다(유광흠 외 2009; 왕광익 2016).

그러나 바람길 이용 등의 효과나 실효성은 국가별 기후 특성에 의해 크게 영향을 받기 때문에 에너지 소비 측면에 있어서의 효과는 여름철 냉방 에너지 부하와 겨울철 난방 에너지 부하의 상대적인 비중에 따라서 상반된 결과가 나타날 수 있다(유광흠 외 2009, p.77). 즉, 여름철 냉방 에너지 부하의 절감이 더 효과적인 상황이라면 바람길 조성 등을 통해 전체적인 온실가스 감축 효과를 기대할 수 있을 것이나, 반대로 겨울철 난방에너지 부하가 더 큰 경우 바람기 특성이 온실가스 배출을 증가시키는 역작용이 있을 수 있기 때

문이다(유광흠 외 2009, p.78).

중국 진안의 약 300가구를 대상으로 MIT와 칭화대가 실시(2010)한 근린단위 도시형태와 가구당 에너지 사용 관계 분석 결과, 근린단위 전체에서 건물의 용적이 커지면 겨울바람의 쿨링효과로 인해 7.5%의 운영에너지 소비를 줄이고, 7%의 가정용 운송 에너지 사용을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

반면, 도시의 열섬에 위치하는 건축물의 경우 난방에너지 수요의 절감을 기대할 수 있다. 산자락 아래의 오목한 저지대의 경우 차가운 공기가 연못처럼 고이기 때문에 난방에너지가 20%정도 더 소비된다(유광흠 외 2009, p.77).



[그림 3-14] 지형에 다른 에너지 저감 효과
출처: 유광흠 외(2009). 친환경 근린개발을 위한 도시설계 기법연구. 건축도시공간연구소. p.77.

일조는 바람길과 마찬가지로 주거공간의 쾌적성에 중요한 환경적 조건 중 하나로서, 일조량이 높을수록 조명의 사용량을 낮추고, 겨울철 난방 운영을 줄일 수 있어 에너지 소비 저감을 기대할 수 있다.

이러한 기후 환경을 고려한 공간계획은 생활권 내 건물과 오픈스페이스의 적절한 배치를 통해 만들어낼 수 있다. 이를 위해 자연지형 활용 방법에 따라 에너지 소비의 차이를 검토하고, 일조와 채광을 고려한 건축물의 배치에 따라서도 에너지 소비를 고려하여 계획한다(김유민·이주형 2013; 이명식 2021).

(2) 교통계획 부문

대중교통 시스템을 개선하고 활동적 이동(걷기 및 자전거)을 지원하는 기반시설을 구축하면 자동차 이동을 줄일 수 있다. 사례연구에 따르면 활동적 이동은 환경에 따라 도시교통에서 발생하는 온실가스 배출량을 2%-10% 줄일 수 있다(FELIX

CREUTZIG(2016); Zahabi et al.(2016); Keall et al.(2018); IGES(2019); Neves and Brand(2019); Bagheri et al.(2020); Ivanova et.(2020); Brand, et al.(2021)). 사례연구에 따르면, 도시형태의 변화가 환경에 따라 교통관련 온실가스배출량을 4-25% 정도 감소시킬 수 있다(Creutzig et al. 2015a,b; Pan et al. 2020). 저탄소 강도 교통수단으로의 전환, 주차관리, 혼잡부담금, 스마트성장 정책, 행동대책(behavioral measures)과 같은 옵션을 통하여 온실가스를 20~50% 감축할 수 있다(Creutzig, F., and Coauthors, 2015a).

□ 대중교통 이용 증진: 환승시스템 개선

대중교통 환승시스템 개선은 교통수단을 편리하게 이용하게 함으로써 이용을 증진시키고 통행시간 감소를 도모할 수 있는 방법이다. 그리하여 궁극적으로 자가용 이용을 대중교통 이용으로 전환함으로써 교통에너지 소비를 저감시킬 수 있다.

주요한 시설로는 복합환승센터가 있으며, 대중교통 역사와 버스정류장과 택시승합장의 거리를 최소화하고, 입체통로계획을 통해 교통수단 간 편리한 환승시스템 구축 등 다양한 계획기법이 적용될 수 있다(왕광익 2016, p.105).

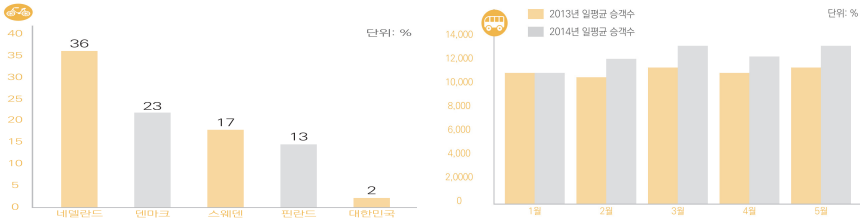
[그림 3-15] 복합환승센터 개념도
출처: 박경아 외(2014). 행정중심복합도시 복합환승센터 개발 기본구상 연구. 한국교통연구원. p.51.

□ 도로다이어트

도로다이어트는 차선을 줄임으로써 자가용의 이용을 줄이도록 유도하는 것으로, 예를 들어 기존의 2차선도로를 1차선으로 줄이거나, 신도시 건설시 도로 수요 예측 대비 차선을 적계 계획하는 방법으로 생활권의 도로계획을 설정하는 방법이다.

행복도시의 경우 보행친화도시를 지향하고 보행자들의 이동 편리성 증대를 위해 6차선 이상의 큰 도로의 수를 줄이고 4차로 이하의 도로들로 도시설계를 구현하였다. 이를 통해 보행이동성 증진과 함께, 자가용 이용을 줄이도록 유도하고자 하였다.

탄소중립과 관련하여 도로다이어트의 효과는 비동력 교통수단 활성화를 통해 보행자의 가로 이용 빈도수가 증가하는데 자전거 수단분담률이 '14년 기준 네덜란드 36%, 덴마크 23%, 스웨덴 17%, 핀란드 13%로 우리나라의 2%보다 매우 높았고, 대중교통 활성화를 통해 대중교통 이용 승객수가 사업 전 대비 크게 증가하는 것을 볼 수 있다(오성훈 외 2019, pp.10-11).



[그림 3-16] 도로 다이어트의 효과: 좌) 자전거 수단분담률('14년) / 우) 연세로 버스 승객 수 변화
출처: 오성훈 외(2019). 2018 서울시 도로다이어트 현황과 평가. 건축공간연구원. pp.10-11

□ 교통 수단 다변화: 첨단 스마트·녹색 교통수단으로 전환

기존 화석연료 중심의 교통 수단에 대해 보행, 자전거, 그리고 첨단 스마트·녹색 교통수단으로 전환하는 것은 교통에너지를 저감하는 효과를 기대할 수 있다. 교통 부문에서 탄소 배출의 주요 부문인 개인차량 이용을 줄이기 위해서는 간선급행버스 등의 기존 신교통시스템과 더불어 자율주행자동차, 1인 승용차, 수소차 등의 첨단 스마트 교통체계 도입을 적극 검토하고(왕광익, 2016), 저속형 소규모 전기자동차, 전기자전거 등 화석연료에서 전기에너지로의 전환이 가능한 교통수단들이 도입되어야 한다.

도시 규모별로는 수용인구 10만명 내외인 경우 1인 승용차, 수소차 등의 스마트 교통 수단을 도입하고, 수용인구 30만명 내외인 경우 자동궤도차(AGT) 등의 경전철 및 바이모달 트램 등의 신교통수단 도입을 제안하였다(왕광익, 2016).

□ 자전거이용 활성화

적극적인 자전거 이용 활성화를 위한 인프라 구축은 자전거 전용로, 자전거 주차장, 공용자전거 등을 통해 실현될 수 있다. 이명식·이강복(2011)은 실질적인 자전거 이용의 활

성화를 위해 자전거도로 계획을 레져형 자전거도로와 교통수단형 자전거도로의 두 개의 차원으로 구상하였다.

레져형 자전거도로의 경우, 거주민의 적극적인 이용을 유도하기 위해 공원이나 수공간과의 연계 필요성을 강조하였다. 교통수단형 자전거도로는 자전거와 버스 및 지하철 역 등의 대중교통과 연계를 원활히 이루어지도록 계획되어야 한다(왕광익 2016; 이명식 2022). 자전거 도로 구축뿐만 아니라 자전거를 주차할 수 있는 주차시설 및 자전거 이용자들을 위한 편의시설 계획이 통합적으로 고려되어야 한다(유광흠 외 2009; 왕광익 2016).

캐나다 몬트리올에서는 자전거가 교통부분 온실가스 배출에 미치는 영향, 구체적으로 통근 자전거 수송분담이 근린 단위의 건조환경 유형(인구밀도, 고용밀도, 토지이용 다양성 등)별로 어떻게 진화하였는지에 대한 연구가 진행되었다. 인구밀도, 고용밀도, 자전거 네트워크 밀도, 대중교통 접근성, 토지이용 혼합도가 변수로 사용되었다. 연구 결과, 자전거 인프라의 증가는 교통부분에서 온실가스 배출량을 1.75% 감소시키는 것으로 나타났다. 또한, 자전거 네트워크 길이가 7% 증가하면 온실가스 배출량이 거의 2% 감소하는 것으로 나타났다(Zahabi, S. A. et al. 2016).

□ 보행 활성화

보행 활성화를 위하여 보행과 대중교통 접근체계를 강화시키고 보행자 도로를 구축하여 차량통행 감소를 유도할 수 있다. 보행으로 대중교통까지의 접근성을 강화하기 위해서 구체적으로는 지하철 및 광역버스까지 보행 도달거리를 약 10분 거리 내로 설정하고, 버스정류장은 주거지역에서 300m 내외의 거리에 배치하는 방안이 있다(왕광익 2016; 유정민·김정아 2020).

보행자 도로의 녹화를 통해 탄소흡수원을 확충할 수 있으며, 녹지와 연계시켜 생태 네트워크 구축 효과를 기대할 수 있다(유광흠 외 2009). 또한, 거주자의 일상생활 공간으로서 기능하기 때문에 보행자 도로의 녹화나 주변 환경 개선은 주거환경의 질을 증진시킨다.

유럽 7개 도시를 대상으로 활동적 이동(걷기, 자전거, 전기자전거)이 도시에서 CO_2를 얼마나 절약할 수 있는지에 대한 Brand et al.(2021)의 연구는 일상생활 이동에 있어서 자전거 이용자의 탄소배출량은 이용하지 않는 사람보다 84% 낮음을 밝혔다. 전과정 탄소배출량은 자전거이용이 추가될 때마다 14% 감소하고, 자동차 이용을 피할수록 62% 감소하였다. 자전거 이용자의 상위 10%는 전과정 탄소배출량의 59%를 차지하였다. 규칙적인 자전거 이용은 출퇴근이나 사회적 이동에 대한 전과정 탄소배출량 감소와 밀접한 관련을 보였다.

중국 진안의 약 300가구를 대상으로 MIT와 칭화대가 실시(2010[26])한 근린단위 도시형태와 가구당 에너지 사용 관계 분석은 가로변에 상점이 있는 경우, 인도뿐만 아니라 보행자 전용도로를 확보해야 한다고 주장한다. 이러한 도로들은 보행경험과 삶의 질을 높혀주는 것 뿐만 아니라 이동시 에너지 소비를 줄일 수 있어야 한다. 근린단위 내 street-level 상점이 많은 도로비율이 높을수록 자동차 소유가 낮아지고, 오토바이 소유가 높아지면서 이동시 에너지 소비와 배출량이 줄어든다. 이를 통해 가구당 이동 에너지 사용량의 10%를 감소시킬 수 있는 것으로 나타난다.

이러한 교통수단 다변화와 자전거, 보행 활성화를 통해 생활권의 도로와 가로 공간은 다양한 형태로 개선이 이루어질 수 있다. 예를 들어 자가용 이동량의 감소로 도로 폭이 감소하는 등 도로다이어트가 일어날 경우들을 염두에 두고 생활권 공간계획에 대한 시나리오들이 설정되어야 하겠다.

[그림 3-17] 자율주행차와 PM을 고려한 가로 공간
출처: 조상규 외(2021). 스마트도시 기술 및 서비스 특성을 고려한 공간계획 방향 연구. 건축공간연구원. p.151.

(3) 건축물계획 부문

□ 패시브하우스 설계

건축물 부문의 온실가스 감축을 위해서는 냉·난방에 소비되는 에너지를 절감하는 것이 가장 중요하다. 패시브 하우스는 기계적 냉난방이 아닌 단열 및 기밀성을 높임으로써 건

26) MIT(2012). Making the Clean Energy City in China: Year 2 Report.

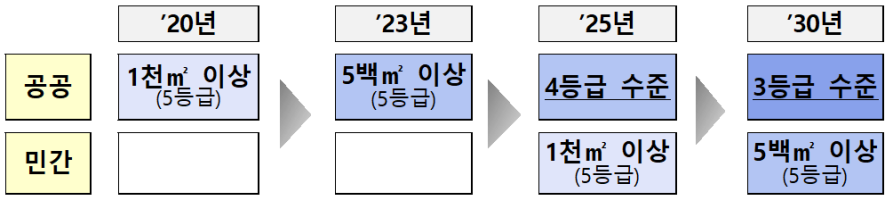
물의 냉난방 성능과 실내쾌적성을 확보하며 에너지 소비를 최소화(15W/㎡ 이하)시키는 건물을 의미한다. 패시브 하우스는 기존 건물 난방 에너지 대비 효율적인 에너지 절감이 가능하며 기본적으로 전체 에너지 중 건물용으로 사용되는 에너지가 약 25%이다. 이중 난방용으로 사용되는 에너지의 비중은 약 75%임을 볼 때 패시브 하우스의 적극적인 도입이 가장 많은 양의 에너지를 절감할 수 있는 부분이다(이명식 2021).

건축물의 단열성능 및 기밀성 향상을 위하여 자연채광 시스템 도입, 폐열회수 환기장치 도입, 신·재생 에너지 설비 등이 없이도 고단열·고기밀 시공 및 폐열회수 환기장치 도입 등의 방법으로 건축물의 난방에너지 소비를 크게 절감할 수 있다. 또한 건축물 벽면과 옥상을 녹화함으로써 냉·난방 에너지의 절감을 기대할 수 있다(유광흠 외 2009, p.80).

중국 진안의 약 300가구를 대상으로 MIT와 칭화대가 실시(2010)한 근린단위 도시형태와 가구당 에너지 사용 관계 분석 결과, 남향 파사드 면적을 줄이면 태양열 지수를 7% 포인트 감소시켜서 여름철 냉방부하를 줄일 수 있다.

□ 제로에너지 건축물 조성

신축건축물에 대한 에너지자립 성능 기준은 지속적으로 상향되고 있다. 공공건축물의 경우 이미 '20년도부터 에너지자립률 20% 이상(제로에너지건축물 인증 5등급)을 달성하도록 의무화가 시작되었으며(1천㎡이상), 민간건축물의 경우 '25년부터 에너지자립률 40% 이상(제로에너지건축물 인증 4등급) 달성하도록 하는 제로에너지건축물 의무화 로드맵이 시행 중이다.



* 세부 적용대상은 면적·용도·용적률 고려하여 확정(공동주택 30세대 이상은 '25년 의무화)

[그림 3-18] 제로에너지건축물 의무화 로드맵
출처: 국토교통부(2021). 2050년 탄소중립 달성을 위한 녹색건축 활성화 방안 발표. 6월 2일자 보도자료. p.5.

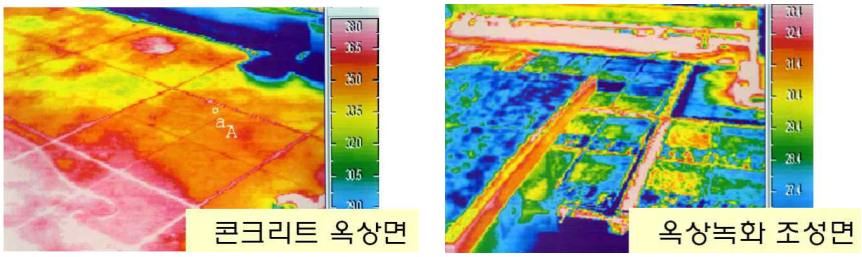
제로에너지 건축물의 조성 등 건축물계획 부문에서는 탄소중립과 관련된 공간계획 차원에서의 별도의 제약이나 기법은 없다. 건축물의 성능 강화는 경제성 차원에서 고려가 될 뿐 공간적으로는 변화가 이루어지지 않기 때문이다.

그리하여, 본 연구에서는 제로에너지건축물 로드맵을 준수하여 에너지자립률을 선정하고 탄소중립 효과를 추정하기로 한다.

□ 건축물 옥상녹화와 벽면녹화

옥상녹화와 벽면녹화는 주요한 저탄소 건축물 계획요소로 여러 연구에서 자주 언급된다(유광흠 2009; 김석택, 2010; 김유민·이주형 2013; 왕광익 2016; 이명식 2021). 건물의 옥상녹화와 벽면녹화는 여름에는 냉방효과를 갖고 겨울에는 보온효과를 가지며 건물에서 사용되는 에너지를 줄여 이산화탄소 발생량을 감소시킨다.

또한, 옥상녹화는 건조한 건물보다 4~5℃ 정도 온도를 낮추고, 녹화벽면은 여름철 외부 최고 지표온도보다 약 20℃ 낮은 것으로 나타나 도심열섬현상을 완화할 수 있는 효과가 있다. 이는 조성된 녹지를 통하여 도심 대기오염물질의 자정작용을 하는 등 온실가스 저감 효과를 가진다. 상대적으로 녹지가 부족한 도심 내 시민들에게 삶의 질을 향상시킬 수 있는 이점도 가진다.



[그림 3-19] 콘크리트 옥상면과 옥상녹화 조성면의 열 변화 비교
출처: 김석택(2010). 도심옥상녹화를 통한 온실가스 저감방안. 울산발전연구원. p.41.

더불어 건축물에 대한 옥상과 벽면 등 녹화면적의 증대는 탄소 흡수원으로서의 기능도 가능하다. 단, 건축물을 활용한 녹화는 탄소흡수능이 높은 교목이나 관목들의 식재는 용이하지 않고, 옥상부분의 경우 녹화를 통한 탄소흡수 기능을 부여할지, 태양광패널 설치를 통한 신재생에너지 발전 공간으로 활용할지에 대한 선택이 요구된다.

(4) 에너지계획 부문

□ 태양광·태양열 발전

태양을 에너지원으로 하는 에너지 생산 시스템은 태양광 계열 시스템과 태양열 계열 시스템으로 나눌 수 있다. 태양광 계열 시스템은 광전효과에 의해서 태양광을 직접 전기 에너지로 변환하는 시스템으로, 보통의 발전시스템과 달리 발전기를 따로 가동할 필요가 없어 무연료, 무공해, 무소음, 무진동을 특징으로 한다. 태양열 시스템은 집열기를 통해 빛 에

너지를 열에너지로 전환시키며 집열, 축열, 공급을 통해 에너지를 생산하는 방식이다(유광흠 외 2009, p.81).

태양열 온수 시스템의 경우, 집열판에서 뜨거워진 물을 펌프를 이용하여 지하실에 있는 축열탱크에 저장하여 사용한다. 태양열 시스템은 태양광 시스템과 마찬가지로 무연료, 무공해, 무소음, 무진동의 친환경에너지로 생산 및 설치의 경제성이 높다(유광흠 외 2009, p.81).

중국 진안의 약 300가구를 대상으로 MIT와 칭화대가 실시(2010)한 근린단위 도시형태와 가구당 에너지 사용 관계 분석은 고층건물을 건설할 때 건폐율과 용적률이 더 큰 PV 면적을 수용하기 위해 수정되어야 한다고 주장한다. 현재의 슈퍼블럭 설계에서는 PV 면적의 90%를 통해 한 가구가 필요한 전기의 10%만 지원할 수 있다면, 다른 유형의 근린단위 형태는 35% 이상을 지원한다. PV 설치는 가정용 운영 에너지 소비의 5%를 감소시킬 수 있다. 또한, 풍력발전을 위해 지붕공간을 사용하는 것은 PV 설치만큼 효과적이지 않다.

[그림 3-20] 태양열·태양광 융복합 시스템(좌) 및 태양광 설치 주택단지(우)
출처: (좌) 권영식(2016).태양열 과열방지 기술을 적용한 태양열·태양광 융복합 시스템 상용화. 미래창조과학부. p.10 /
(우) 경남연합일보(2020). 경남도, 2000가구 주택용 태양광 설치 지원.
http://www.gnynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=322283/ (접속일: 2022.09.16.)

□ 풍력 발전

최근 도시 규모에서 건축물에 설치할 수 있는 소형 풍력발전 시스템이 새로 개발되고 있다. 소형 풍력발전기는 고강도 탄소섬유 재질의 날개로 구성된 초경량화, 저소음화 기술과 풍속 50m/s까지 연속운전 가능한 제어기술 등에 의해 도시에서 해안지역까지 다양한 장소에서 안정된 발전을 할 수 있다(유광흠 2009, p.52).

소형 풍력발전기를 통해 공동주택 단지 및 공동주택 옥상부, 그리고 공동주택 바람길을 활용한 풍력발전을 실용화할 수 있게 되었다. 국내의 에코 대림3리터 하우스, 일본 홋카이도에 있는 제로 에미션 하우스(Zero Emission House) '세키스이 하우스'는 풍력발전기로 에너지를 조달한다.

[그림 3-21] 소형풍력 발전기
출처: 투데이에너지(2010). 소형풍력발전 시장 진단.
http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=51804(접속일: 2022.09.16.)

□ 지열 발전

지열발전은 친환경 설비로 이산화탄소 저감과 열섬현상을 완화시킬 수 있다. 지열 에너지 시스템은 지중에 저장된 열에너지를 이용해서 냉·난방 등에 활용한다. 지열은 토양, 지하수, 지표수 등에 저장되어 있으며, 여름에는 실내의 높은 온도를 지중으로 방출하고 겨울에는 지중으로부터 열을 흡수하는 난방 시스템을 지열발전이라 한다.

냉·난방 및 급탕을 동시에 이용하는 것이 가능하여 냉·난방 에너지의 약 30% 정도를 절감할 수 있을 것으로 기대된다(유광흠 외 2009, p.82). 지중열교환기는 내구성이 높아 수명이 대략 50년 정도 되며 유지비가 저렴하지만, 설치부지를 기존 공동주택에 확보하는 것에 한계가 있으며 설치비가 비싸다는 단점이 있다(왕광익 외 2014).

□ 수소 연료전지 발전

도시공간에서 소비되는 에너지만큼 재생에너지를 통해 에너지자립을 실현하는 것은 한계가 있다. 그리하여 수소를 활용한 연료전지 발전은 생활권 내 에너지 자립을 위해 필수적인 신재생에너지 인프라로 도입이 고려되어야 한다.

수소 연료전지는 기후 여건의 영향을 받지 않아 재생에너지 대비 발전효율이 높고, 소요면적도 태양광발전 시설 대비 소규모로 설치가 가능하여 여유 부지가 부족한 도시 공간에 도입·운영이 적합하다.

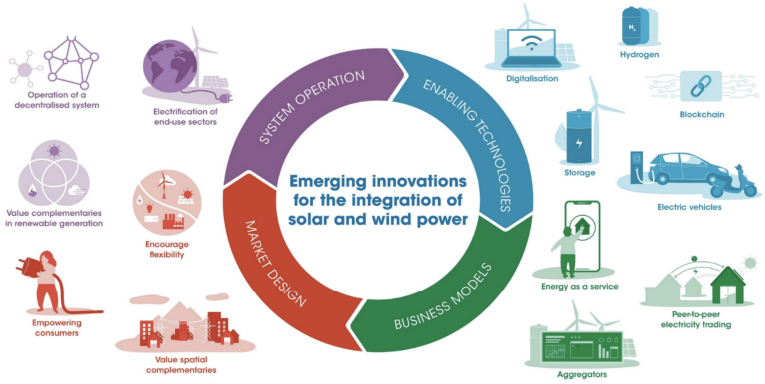
반면, 연료인 수소의 공급 특성에 따라 온실가스가 발생한다는 문제와 수소충전소와 시설 복합시 위험물 저장 및 처리 시설로서 「주택건설기준 등에 관한 규정」 제9조의2(소음 등으로부터의 보호)에 따라 최소 25~50미터 이상 주거시설로부터 이격거리를 두어야 한다는 제약이 있을 수 있다. 그리하여 이러한 사항들을 고려하여 공간계획에 반영이 이루어져야 할 것이다.

[그림 3-22] 수소 연료전지 발전소 등 에너지시설이 복합된 주거 공간
출처: 조상규 외(2021), 스마트도시 기술 및 서비스 특성을 고려한 공간계획 방향 연구, 건축공간연구원, p.155.

□ 에너지 전환

에너지 전환은 현재 자동차 등 교통수단으로 대표되는 화석연료 에너지를 전기에너지와 신재생에너지로 대체함으로써 탄소배출을 줄이는 것이다. 생활권 공간에서는 개인용, 대중교통 차량에서 소비되는 화석연료를 전기자동차와 수소연료자동차로 전환함으로써 탄소배출을 저감할 수 있다.

이와 더불어, 냉난방에너지 등 전기를 소비하는 분야에 대해서도 신재생에너지로 전환함으로써 에너지자립을 높이고 탄소배출을 저감하는 것도 에너지 전환에 해당한다. 난방에너지의 경우 개별 화석연료 난방에서 보다 효율성이 높은 열병합발전을 통한 지역난방 공급 등 집단에너지 시스템 설치를 통한 에너지 전환이 주요한 방법이다.



[그림 3-23] 재생에너지 전환을 위한 4대 요소
출처: World Economic Forum(2021). Why renewables are the cornerstone of the global energy transition. https://www.weforum.org/agenda/2021/04/why-renewables-are-the-cornerstone-of-the-energy-transition/ (접속일: 2022.10.22)

(5) 녹지계획 부문

□ 녹지 면적 확충을 통한 흡수원 증대

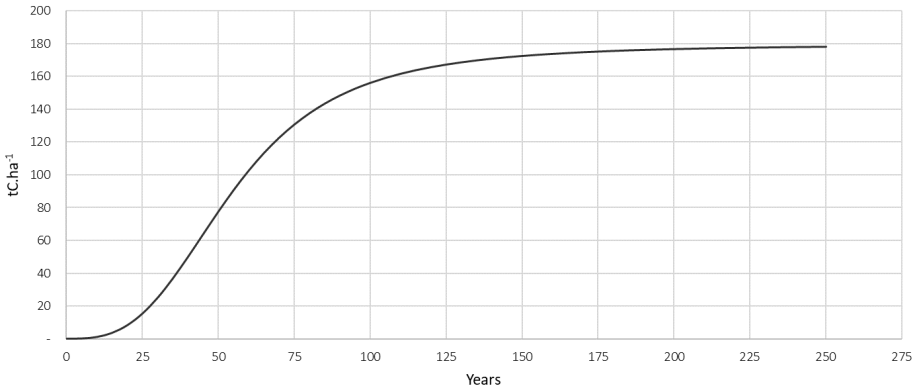
공원녹지계획 부문은 탄소 배출량의 저감이 아닌 탄소를 흡수함으로써 탄소중립을 실현하는 수단이다. 도시공간 단위에서 탄소흡수량을 높이기 위해서는 도심 내 유휴공간, 공원녹지, 개발제한구역 등을 대상으로 흡수원 조성면적을 확대하거나, 흡수기능을 개선하는 방향으로 탄소흡수원 확보전략을 적극적으로 모색하는 것이 중요하다.

[표 3-32] 수종별 연간 탄소흡수량(위: 교목 / 아래: 관목)

수종	직경(cm)							
	4	6	8	10	12	14	16	18
가시나무	0.8	1.8	3.0	4.5	6.3	8.4	10.7	13.3
동백나무	0.2	0.6	1.4	2.6	4.4	-	-	-
먼나무	0.3	0.8	1.5	2.4	3.6	-	-	-
배롱나무	0.3	0.6	0.9	1.2	1.6	2.0	2.5	-
후박나무	0.6	1.3	2.3	3.6	5.2	7.1	9.3	11.8

수종	근원직경(cm)				
	1	2	3	4	5
사철나무	8.2	27.6	56.1	92.6	136.6
산철쭉	7.0	22.3	43.9	71.0	103.1
조팝나무	9.4	29.2	56.9	91.2	131.6
화살나무	7.3	24.5	49.41	81.5	120.0
회양목	9.0	28.4	55.5	89.3	129.2

출처: 산림청(2018). 도시림 탄소흡수와 다원편익 증진을 위한 조성 및 평가기술 개발. p.47, 55. 참고하여 재작성.



[그림 3-24] 1헥타르 당 forest의 탄소 흡수량 변화

출처: Stack Exchange(2020). https://earthscience.stackexchange.com/questions/19646/do-trees-capture-more-co2-during-a-fast-growth-stage(접속일: 2022.10.22)

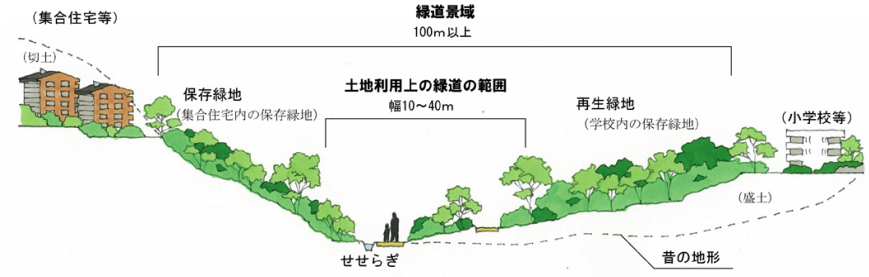
복합용도계획과 압축적·고밀도 계획과 대중교통중심개발(TOD) 등의 효율적인 토지이용을 통해 추가적으로 확보한 토지를 공원, 녹지, 친수공간 등으로 조성하거나 탄소흡수

림 식재, 도로변 완충녹지, 인공지반 녹화와 가로녹화 등을 통해 탄소흡수원을 확대 및 확보하는 것을 기대해볼 수 있다.

단, 한정된 공간 내에서 녹지 면적을 확보함으로써 다른 탄소중립 기능을 하는 공간들이 감소하기 때문에, 이에 대한 다양한 시나리오를 통한 최적화 전략이 마련되어야 한다.

□ 공원녹지 네트워크 공간

그린웨이는 녹지 네트워크의 주요 요소로 광의적 개념은 산책이나 자전거를 이용한 사람들의 이동통로부터 야생동식물의 생태통로까지를 포함한 도시전체의 공원, 녹지 체계를 구축하는 다양한 스케일의 선형 오픈스페이스를 의미한다(한봉호 외 2014). 그린웨이는 도시민의 공원녹지 접근성을 제고하며 생활권에서 여유 및 휴식공간을 제공한다. 이러한 기능은 도시민의 건강증진과 함께 문화, 생태, 여가적인 추구 등 정주환경 개선과 함께 저탄소 녹색생활을 유도한다(박재홍·고재경 2008). 그린 매트릭스는 그린웨이의 구축 방법으로 언급되는 계획요소로 슈퍼블록 내 녹지들을 연결하는 것이다(이재준 외 2004; 김도형·박승규 2019). 일본의 친환경 도시 조성에서 자주 적용되는 계획기법으로, 일본의 도시녹지법(都市緑地法)에 따르면 지구 내의 녹도(緑道)를 주골격으로 하여 아파트, 학교, 기업용지 등의 수퍼블록 내 경사면 녹지와 가옥림 녹지 등을 공원녹지 등의 공공녹지와 연결하고, 역사적 유적, 수계 등과도 결합시켜 재구축하여 모든 구성요소들이 지구 전체의 공간구성요소가 되게 하는 시스템을 말한다(국토연구원 2006). 일본 요코하마시 인근의 코호쿠 신도시는 그린 매트릭스 시스템을 도입하여 공원과 녹도를 연결시키고 이 녹도에 면한 보존림 및 학교나 집합주택용지 등이 대형 민간 개발용지를 지정하여 공공과 민간이 공동으로 대규모 녹지시스템을 만들어낼 수 있도록 유도하였다(김홍렬·조세환 2015; 김도형·박승규 2019, p.53).



[그림 3-25] 일본 요코하마 코호쿠 신도시의 그린매트릭스 개념도
출처: City of Yokohama(2019). まちづくり方針の実現4-2. https://www.city.yokohama.lg.jp/tsuzuki/kurashi/machizukuri_kankyo/machizukuri/naritachi/jitsugenshosai/nt-4-2.html/ (접속일: 2022.10.01.)

2) 탄소중립 생활권을 위한 계획요소 도출

(1) 계획요소 도출을 위한 전문가 의견수렴

□ 전문가 자문 개요

탄소중립 계획요소 도출을 위해 도시, 건축, 조경, 교통, 에너지 등 관련분야에서 지식과 경험이 풍부한 학계, 민간, 공공 전문가 11명으로 전문가 자문단을 구성하였다. 전문가 의견수렴은 2022년 5월 31일(화) ~ 6월 20일(월)의 기간 동안 이메일을 이용해 설문문항 안내자료를 발송하여 회신 받았다. 전문가 의견수렴을 위한 설문문항은 앞에서 정리한 생활권 단위 탄소중립 공간계획 5개 부문의 계획요소에 관한 내용으로 구성하였다. 전문가 설문의 실효성을 높이기 위해 설문 대상자에게 연구내용 설명을 위한 화상회의 개최 및 유ㆍ무선 전화통화를 실시하였다. 설문조사 대상자 중 관련분야 전문가 11명의 의견을 회신 받아 분석을 실시함으로써 생활권 단위 탄소중립 계획요소 풀을 고도화하였다.

[표 3-33] 조사 개요

구분	내용
조사대상	도시, 건축, 조경, 교통, 에너지 분야 전문가(총 11명)
조사방법	비대면 회의 및 온라인 조사
조사기간	2022년 5월 31일(화) ~ 6월 20일(월)

출처: 연구진 작성.

□ 생활권단위 탄소중립 공간계획 계획요소에 대한 의견종합

생활권 단위 공간계획을 실현하기 위해서는 문헌연구를 통해 정리한 5개부문 19개 탄소중립 계획요소를 종합ㆍ정리하여 실질적으로 적용가능한 계획요소의 도출이 필요하다. 공간구조 및 토지이용 부문에서는 용도복합과 압축ㆍ고밀개발을 종합하여 주요 계획요소로 고려할 필요가 있다. 신재생에너지 설치공간 확보 계획요소는 별도의 공간 확보를 고려하기 보다는 건축물 및 에너지 부문에서 고려하여야 하며, 기후환경을 고려한 도시설계 요소는 공원녹지 확충 및 배치와 밀접한 관련이 있다.

교통계획 부문에서의 탄소중립 계획요소 도출의 핵심은 이동수단의 화석연료 저감에 있다. 대중교통 이용 증진, 도로다이어트. 교통수단 다변화를 통해 이동수단의 화석연료 사용을 줄일 수 있을 것으로 기대되며, 이를 통한 탄소저감효과가 기대된다. 자전거 이

용 및 보행 활성화는 교통계획부문에서 최우선으로 고려되어야할 계획요소이다.

생활권 단위 공간계획의 관점에서 건축물계획 부문과 에너지계획부문의 계획요소를 별개의 요소로 고려하기보다는 건축물의 신에너지생산 개념으로 종합하는 것이 바람직하다. 또한, 공원녹지 계획 부문의 계획요소는 공원녹지 확충을 중심개념으로 고려하여 공간계획 과정에서 그린네트워크를 고려할 필요가 있다.

[표 3-34] 부문별 생활권 탄소중립 계획요소 선정 결과

구분	탄소중립 계획 요소 pool	전문가 주요의견	탄소중립 계획요소 도출	비고
공간구조 및 토지이용	용도 복합	- 용도복합과 압축 · 고밀개발을 종합하는 공간계획요소 고려 필요 - 신재생에너지 설치는 건축물 · 에너지부문으로, 기후환경을 고려한 도시설계는 공원녹지 확충으로 종합 필요	용도복합 · 압축적개발	탄소 저감
	압축·고밀 개발			
	신재생에너지 설치 공간 확보			
	기후환경을 고려한 도시설계			
교통 계획	대중교통 이용 증진	- 생활권 단위에서 교통부문의 탄소중립 구현은 화석연료 저감이 핵심 - 대중교통이용, 도로다이어트, 교통수단 다변화 등은 자전거 및 보행 활성화와 연계	이동거리 최소화	탄소 저감
	도로 다이어트			
	교통수단 다변화			
	자전거 이용 활성화			
	보행 활성화			
건축물 계획	패시브하우스 설계	- 건축물 에너지 사용 저감과 신재생에너지 생산을 종합하는 계획요소 고려 필요 - 수소 등 신에너지와 태양열 등 재생에너지에 관한 계획은 건물단위 에너지생산으로 고려 바람직	건물 신재생에너지 생산	탄소 저감
	제로에너지 건축물 조성			
	건축물 옥상/벽면 녹화			
에너지 계획	태양광 · 태양열 발전			
	풍력발전			
	지열발전			
	수소 연료전지 발전			
	에너지 전환			
공원녹지 계획	공원녹지 면적 확충	- 공원녹지 확충을 통해 그린 네트워크 및 기후환경 고려 계획요소 종합	공원녹지 확충	탄소 흡수
	그린 네트워크			

출처: 연구진 작성.

(2) 탄소중립 공간계획 요소 도출

□ 공간구조 및 토지이용

용도복합 · 압축적 개발을 통해 일단의 공간에서 다양한 활동을 할 수 있기 때문에 시민의 이동이 최소화될 수 있다. 일터, 주거, 쇼핑간 이동거리 및 빈도 최소화 효과가 기대되어 용도복합을 이용한 도심 고밀도 개발을 유도를 통한 차량 이동거리를 단축시킨다. 이는 통행발생 빈도 및 이동거리 최소화를 통한 화석연료 소비 저감을 의미한다.

또한, 압축고밀 개발, 대중교통중심개발은 도시민의 이동을 최소화 시킬 수 있다. 압축고밀 개발은 동일한 면적의 중저밀도 개발보다 에너지 소비 효율 및 온실가스 배출 원단위가 낮음이 여러 연구를 통해 확인되어지고 있어 가급적 컴팩트한 개발을 통해 에너지 소비의 효율성 증가 유도가 필요하다. 제한된 공간적 범위에서 압축·고밀 개발을 통해 녹지, 신재생에너지 등의 공간을 마련할 수 있는 기회를 얻어낼 수 있으며, 생활권 간 연결 시 이를 중심 축으로 대중교통 활성화와 같은 연계 계획이 가능하다. 국토· 도시의 압축 고밀 개발은 지속가능한 국토성장의 관점에서 균형 있는 국토관리에 기여하는 주요요소로, 한정된 국토도시의 탄소저부하를 갖는 도시용량을 최적화하는 전략으로, 교통(운반과 이동)과 에너지의 공급 및 교류 용량을 최적화하여 과도한 도시 확장을 방지로, 흡수원 훼손 최소화 및 탄소배출 저감효과가 기대되는 계획요소로 판단된다.

단, 복합용도계획을 통해 도시 이동이 얼마만큼 감소시킬 수 있는 지, 이러한 감소가 교통 부문의 탄소감축에 어느 정도 기여하는 지는 개별 도시 혹은 생활권별로 상이할 것으로 판단된다. 일극의 지나친 압축고밀 개발은 도심의 혼잡교통을 발생시킬 수 있어, 개별 도시를 대상으로 모의실험을 실시하고, 최적 압축, 개발 밀도를 설정하는 것이 필요하다.

문헌연구를 통해 정리한 공간구조 및 토지이용 부문의 계획요소 중 신재생에너지를 고려한 공간계획은 건축물 및 에너지부문과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 기후 환경을 고려한 공간계획은 공원녹지 계획부문으로 여타의 계획요소와 함께 논의되어야 할 필요가 있다. 전문가 의견을 수렴하여 공간구조 및 토지이용 부문의 생활권 단위 탄소중립 계획요소를 용도복합 · 압축적 개발로 종합하고, 공간계획 시뮬레이션의 주요요소로 반영하였다.

□ 교통계획

교통계획 부문에서는 교통에너지 절감의 차원에서 대중교통, 보행, 자전거 통행을 최우

선으로 하는 조치가 반드시 필요하다. 자전거와 보행 활성화는 중ㆍ단거리 자동차이용 저감 화석연료 사용 저감효과가 있다. 교통수단 다변화 및 자전거 이용 증대와 보행활성화는 연계하여 단거리 보행활성화 수요를 확대할 수 있도록 교통수단 다변화 및 자전거 동선과 연계한 보행 활성화 생활권계획을 탄소중립 기여에 매우 높은 효과를 기대할 수 있다. 자전거 이용 활성화는 대표적인 녹색(대체)교통 시스템으로 차량 운행에 따른 탄소배출을 크게 줄여주는 계획 요소이며 특히 유럽에서는 보행환경과 함께 극히 활성화 돼있다.

도로다이어트는 인위적인 차량 혼잡과 속도 저하를 유도하여 차량 집중을 우회적으로 감소시키는 효과가 있다. 개인승용수단의 이용을 불편화하고 대중교통, 자전거, 보행을 우선적으로 하는 계획요소로써 자동차이용 저감, 자전거 및 보행촉진 효과를 가진다. 도심지 내 대중교통 및 자전거 등 교통수단을 유도하기 위한 도로 다이어트가 필요하다. 도로다이어트를 통해 개인승용 수단의 수요 감축을 통한 탄소감축과 도로다이어트 이후 남는 유휴부지를 탄소흡수원 확보를 위한 녹지 및 공원사업을 병행하면 개인교통수요 감축과 탄소흡수원 확보로 탄소감축을 위해 높은 효과를 가지는 요소가 될 수 있다.

교통수단의 다변화는 이동의 선택지를 풍부하게 하여 개인차량 운행을 줄이는 효과가 있기 때문에 탄소중립에 기여한다. 개인차량의 운행도 친환경수단으로 변화하더라도 여럿이 이용하는 대중교통 수단의 에너지 효율이 높기 때문에 다변화의 대상은 대중교통 중심이 되었을 경우 효과가 크게 나타날 것이다.

대중교통 이용증진, 도로다이어트, 교통수단 다변화, 자전거 및 보행 활성화 등 각각의 계획요소는 다양한 방법으로 생활권 단위 탄소중립 실현에 기여할 것으로 기대된다. 생활권에서 사용되는 이동수단에서 배출되는 탄소를 저감하기 위해서는 각 요소들이 복합적으로 적용할 필요가 있으나, 탄소중립 실현을 위한 교통계획의 핵심요소는 이동수단의 화석연료 사용 저감으로 종합할 수 있다.

□ 공원녹지계획

일반적으로 '공원녹지'라 함은 '도시공원과 시설녹지'를 의미하며, 이는 도시계획시설의 하나로 공급계획에 따라 조성되고 있으나 장기 미집행률이 가장 높은 시설로, 시설집행률 제고를 위한 정책적 지원이 중요하다. 생활권을 구성하는 녹지 중 도시계획시설에 의한 공원녹지율은 일부분으로, 탄소중립 실현을 위한 계획적 접근을 위해서는 가로수, 하천, 공공조경공간은 물론, 생활권내 산림, 농경지, 초지, 습지에 이르기까지 포괄적 녹지에 대한 종합적 관리가 요구된다.

공원녹지의 경우, 초지, 잔디밭의 경우 탄소배출원이 될 수 있기 때문에 단순한 공원녹지의 면적 보다는 질적 수준에 대한 평가가 필요하다. 식재의 연령에 따른 탄소 포집량의 한계가 존재하여 탄소 중립이라는 기능적인 측면 만을 고려할 경우 논란이 발생할 수 있다. 또한, 생활권 내 집중설치와 분산설치 중 보다 적합한 전략의 선정은 생활권의 구성과 규모, 범위, 기능 등을 종합적으로 고려해야 할 필요가 있다. 공원녹지 면적 확충에 따른 흡수원량이 사실 에너지전환이나 교통수요 감축에 비하여 탄소중립 기여 정도가 절대량으로 비교하면 부족할 수 있으나, 생활권계획에서 짜투리 토지를 이용한 다양한 흡수원 확보가 가능할 것으로 판단되므로 계획요소로서 가치는 높을 것으로 판단된다.

□ 건축물 및 에너지 계획

앞선 문헌연구에서 정리한 바와 같이 패시브하우스 설계와 제로에너지 건축물 조성은 개념의 분리가 필요하나, 생활권 단위 탄소중립의 관점에서 에너지 사용 저감을 통한 탄소배출 저감효과에 집중할 필요가 있다. 또한, 공간계획 과정에서 적용가능성을 고려하면 건축물의 에너지 저감과 에너지계획을 함께 고려할 필요가 있다.

즉, 건축물의 신재생에너지 생산설비 설치는 '전용' 설치공간이 아닌 도로, 공원, 학교 등 공공 부지 활용과 같은 통합적인 관점에서의 접근이 필요하다. 생활권계획에서 신재생에너지 설치공간 확보는 현재로서는 태양광, 지열, 연료전지 설치 등으로 제한적인 상황이지만 향후 그린수소 공급이 경제성을 가지고 활성화되는 시점에서는 생활권계획에서 탄소중립 분산형 에너지로서 연료전지 입지 확보를 위한 공간계획으로서 가치가 높아질 것으로 예상된다.

신재생에너지 공급과 마찬가지로 재생에너지 발전 역시 제로에너지 건축물을 조성하기 위한 기본적인 방식이다. 재생에너지 '발전'으로 한정한다면 보편적으로 적용 가능한 태양광이, 지역적 특성에 따라서는 풍력, 수력 등이 탄소중립에 크게 기여할 수 있다. 생활권계획에서 태양광 주민조합 구성을 통한 자투리 공간이나 공용이용시설을 활용한 태양광발전사업을 통한 주민소득증대와 한전전력 사용 저감을 위한 사업을 병행하면 지속가능한 에너지 생산구조를 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

신에너지로서 대표적인 수소 연료전지 사업에 있어 기존에 연료전지는 대부분 도시가스 개질을 사용하여 기존 도시가스 보일러보다 탄소배출이 많아질 수 있으므로, 향후 블루, 그린수소 공급이 활성화되는 시점까지는 미온적 효과로서 입지적으로 가능한 곳에서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

제4장 생활권 탄소중립 공간계획 모형 개발

1. 생활권 탄소중립 공간계획 기본 모형 개발
2. 탄소중립 공간계획 시나리오 및 모형 유형화
3. 탄소 배출량 산정 및 결과 해석
4. 탄소중립을 위한 생활권 공간계획 최적화 모형

1. 생활권 탄소중립 공간계획 기본 모형 개발

1) 생활권 기본 모형 개발을 위한 검토

(1) 생활권 규모 선정

□ 행복도시 생활권 규모 비교

생활권을 대상으로 도시계획들이 이루어진 세종시 내 건설지역인 행정중심복합도시의 생활권 계획별 면적과 주택용지, 인구 등을 비교 분석한다. 사례 분석 결과, 일반적으로 토지면적은 100~150만㎡, 인구는 250~370인/ha의 규모를 형성하고 있다.

반면 1-5生(2,492,748㎡), 4-1生(3,253,076㎡), 5-1生(2,741,213㎡) 등 중심 생활권과 특정 생활권은 200만㎡ 이상 규모로 계획된 사례도 있으며, 중심공원과 산지를 포함할 경우 평균보다 면적이 증대되는 것을 알 수 있다.

[표 4-1] 행복도시 생활권 현황 비교

	면적 (㎡)	주택용지 (㎡)	인구 (인/ha)	비고
1-3	1,141,376	664,591 (58.2%)	28,205 (424/ha)	
2-1	1,704,361	842,769 (49.4%)	29,876 (354/ha)	

2-2	1,489,221	631,612 (42.4%)	25,112 (398/ha)	
2-3	1,235,552	577,566 (46.7%)	16,923 (293/ha)	
3-1	1,506,227	302,844 (20.1%)	12,851 (326/ha)	
3-2	1,337,852	461,863 (34.5%)	18,551 (372/ha)	
5-2	1,792,315	468,292 (26.1%)	16,852 (328/ha)	
6-2	1,642,746	925,603 (56.3%)	62,262 (655/ha)	고밀 복합개발
6-4	1,000,743	438,378 (43.8%)	10,642 (243/ha)	공동주택 위주용지

출처: 행정중심복합도시건설청(2022). 제62차 행복도시건설사업 개발계획 변경 중 인구 및 토지이용계획 활용하여 작성
※ 인구(인/ha)는 주택용지 면적으로 산정

□ 보행 중심 생활권의 규모 비교

이러한 생활권의 면적 규모는 보행 중심의 생활권으로의 형성을 위한 목적에 따라 계획되고 있는 것이 추세이다. 보행 중심의 생활권 규모를 크게 3가지로 구분하고 그 특성을 살펴보았을 때, 반경 500m 규모, 반경 600m 규모, 반경 700m 규모를 보행 중심 생활권의 크기로 가정해보고자 한다.

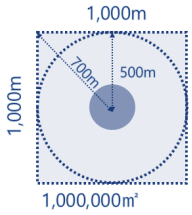
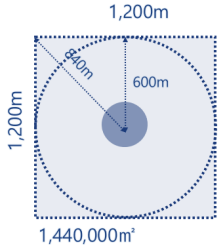
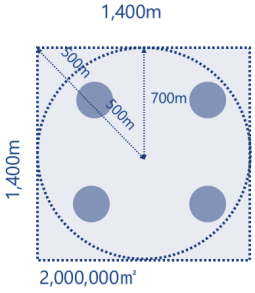
먼저 반경 500m 규모의 생활권은 생활권 면적이 100만㎡ 규모로 단일 중심지역으로 도보 약 8분 거리로 커뮤니티 시설들을 이용할 수 있는 특성을 가진다. 둘째, 반경 600m 규모의 생활권은 생활권 면적이 144만㎡ 규모로 역시 단일 중심지역으로 도보 약 10분 거리로 커뮤니티 시설들을 이용할 수 있는 특성을 보인다. 셋째, 반경 700m 규모의 생활권은 그 규모가 약 200만㎡에 가로세로 길이가 1,400m에 달해 단일 코어가 아닌 4분할된 코어가 제안될 수 있다. 이러한 다핵 생활권은 보행 이동성이 편리해질 수 있으나, 단일 생활권의 특성이 감소하게 된다.

□ 생활권 기본 모형의 규모 선정

본 연구에서는 생활권 기본 모형의 규모를 도보 10분 거리인 반경 600m로 정한다. 보행 중심의 이동이 가능한 거리를 600m, 도보 10분 거리로 정함으로써 이를 탄소중립 실현을 위한 공간 규모로 규정한다.

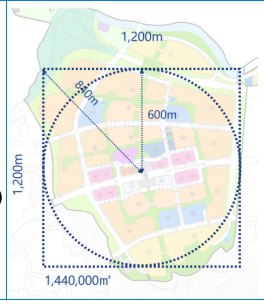
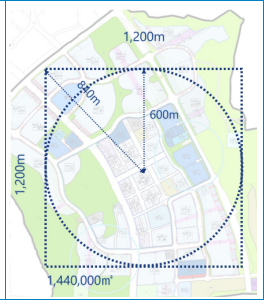
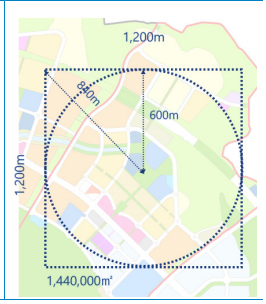
앞서 사례로 언급한 행복도시 생활권들과 비교해 보면, 이들 사례가 보행 중심의 크기임을 가늠하게 한다. 도시 외곽에 대규모 오픈스페이스가 조성된 점을 감안하면, 이동 출발지인 주거지역으로부터의 크기는 반경 600m로 설정한 규모가 적절함을 보여준다.

[표 4-2] 보행중심 도시를 위한 생활권 규모 비교

	반경 500m	반경 600m	반경 700m
보행중심의 생활권 규모			
	협소 생활권	보행 10분 생활권	다핵 생활권
생활권 특성	-도보권 범위 0.5km: 도보 8분 -단일 코어 -중심·복합 커뮤니티 -생활권 면적: 100만 ㎡	-도보권 범위 0.6km: 도보 10분 -단일 코어 -중심·복합 커뮤니티 -생활권 면적: 144만 ㎡	-도보+교통 범위 1.0km -4개 커뮤니티 코어 -커뮤니티 중심 -생활권 면적: 200만 ㎡

출처: 연구진 작성.

[표 4-3] 반경 600m 생활권 규모와 행복도시 사례 비교

	6-2	5-1	5-2
행복도시 생활권 규모 (반경 600m)			

출처: 연구진 작성.

2) 모형 작성을 위한 사례 검토

본 절에서는 문헌연구를 통해 생활권 공간단위에서의 탄소배출량 및 감축률 분석 자료를 정리하고, 지구단위계획 및 도시개발계획 분석을 통해 생활권의 토지이용 비율을 도출하였다.

(1) 생활권 공간에서의 탄소배출 저감 계획 사례

□ 저탄소 녹색시범마을 계획

동탄2신도시 에너지자립마을, 검단신도시 제로에너지타운, 탕정신도시 저탄소녹색마을, 송산그린시티 탄소중립마을 등의 사례를 통해 저탄소 생활권의 탄소배출량과 감축량 및 감축률을 정리하였다. 동탄2신도시 에너지자립마을 2,934세대의 총 탄소배출량은 122,847TC로, 난방 및 급탕, 전력사용을 포함하는 가계부문의 비중은 약 81.4%이다. 검단신도시 제로에너지타운 1,312 세대의 총 탄소배출량은 62,158TC로 가계부문의 비중은 83.7%이며, 탕정신도시 저탄소녹색마을 4925세대의 총 탄소배출량 314,402TC 중 가계부문 비중은 87.8%이다. 송산그린시티 탄소중립마을 2,125세대의 총탄소배출량은 101,548TC이며, 가계부문은 83.7%를 차지한다. 저탄소 생활권으로 조성된 지역의 가구당 평균 탄소배출량은 약 45.19TC로 확인된다.

[표 4-4] 저탄소 녹색시범마을 부문별 탄소배출량

(단위: TC)

구분			동탄2신도시 에너지자립마을	검단신도시 제로에너지타운	탕정신도시 저탄소 녹색마을	송산그린시티 탄소중립마을
가계	열수요	난방	90,824	47,663	238,916	77,911
		급탕	7,777	3,829	13,458	6,21
	전력		1,447	510	23,717	897
소계			100,048	52,002	276,091	85,018
수송	승용차		11,091 (12,745*)	4,958 (5,686*)	18,616 (21,386*)	8,032 (9,227*)
	승합차		1,358	604	2,277	982
	버스		1,493	649	2,558	1,104
	화물차		6,020	2,688	10,104	4,360
소계			21,616	9,627	36,325	15,673
폐기물	소각 폐기물		1,183	529	1,986	857
탄소흡수			-	-	-	-
합계			122,847	62,158	314,402	101,548

*: 승용차에 택시를 포함하는 경우 탄소배출량

출처: 이재준·김도영(2011). 신도시내 저탄소 녹색시범마을 시나리오별 탄소감축률 분석. 국토계획. 46(6). pp.163-173. 참고하여 재작성.

저탄소 생활권은 각각의 탄소배출원에 대한 계획요소를 도입하였다. 가계부문에서는 패시브하우스, 태양열, 지열, 풍력 등의 계획요소를 적용하였고, 수송부문은 공용차량 활용, 자전거 급행도로, 대중교통활성화, 녹색교통수단 등의 계획요소를 도입하였다. 폐기물 소각 과정에서 발생하는 탄소배출을 저감을 위해 쓰레기 재활용을, 탄소흡수원 확충을 위한 탄소흡수 우수종 식재를 계획요소로 도입하였다[27]. 탄소저감 계획요소 도입 효과로 평균 1가구당 최소 20.01TC에서 최대 42.28TC의 탄소배출량을 감축하는 것으로 나타났다.

27) 이재준·김도영.(2011). 신도시내 저탄소 녹색시범마을 시나리오별 탄소감축률 분석. 국토계획. 46(6). pp.163-173.

[표 4-5] 저탄소 녹색시범마을 탄소감축량

(단위: TC)

구분			도입 계획요소	동탄2신도시 에너지자립마을		검단신도시 제로에너지타운		탕정신도시 저탄소 녹색마을		송산그린시티 탄소중립마을	
				최소	최대	최소	최대	최소	최대	최소	최대
가계	열수요	난방	패시브하우스	8,992	29,972	4,719	15,729	23,653	78,842	7,713	25,711
			태양열, 지열 등	16,366	24,341	8,589	12,774	43,053	64,029	14,040	20,880
		급탕	태양열, 지열 등	1,555	3,111	766	1,532	2,692	5,383	1,242	2,484
	전력		태양광, 풍력 등	72	579	26	204	1,186	9,487	45	359
소계			-	26,986	58,002	14,099	30,238	70,583	157,742	23,040	49,434
수송	승용차		공용차량 활용	0	892	0	398	0	1,497	0	646
			자전거 급행도로	1,275	5,480	569	2,445	2,139	9,196	923	3,968
			대중교통 활성화	637	1,912	284	853	1,069	3,2087	461	1,384
	승합차		공용차량 활용	0	95	0	42	0	159	0	69
	버스		녹색교통수단	747	1,045	325	454	1,279	1,791	552	773
	화물차		-	-	-	-	-	-	-	-	-
소계			-	2,659	10,374	1,177	4,192	4,487	15,851	1,936	6,839
폐기물	소각 폐기물		쓰레기 재활용	200	946	89	423	336	1,589	145	686
탄소흡수			탄소흡수 우수종 등	6,521	6,521	2,615	2,615	7,284	7,284	3,570	3,570
합계			패시브하우스 등	36,633	70,268	17,980	37,468	82,690	182,466	28,691	60,529

출처: 이재준·김도영(2011). 신도시내 저탄소 녹색시범마을 시나리오별 탄소감축률 분석. 국토계획. 46(6). pp.163-173. 참고하여 재작성.

□ 행복도시 저탄소 에너지도시 계획

행정중심복합도시의 연도별 온실가스 배출량과 연도별 행복도시내 인구수를 비교하여 1인당 온실가스 배출량을 산정하였다. 분석결과 총 배출량은 745,896 tCO2,eq이며, 용도별 배출 비중은 가정 부문의 온실가스 배출이 287,101 tCO2,eq로 38.5%, 상업 부문 24.0%, 수송 부문 19.2%, 공공 부문 17.6%, 기타 부문 0.8%의 순서로 확인되었다.[28)]

28) 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역.

[표 4-6] 행복도시 용도별 이산화탄소 배출량

(단위: tCO_2eq)

연도	수송	가정	상업	공공	기타	소계
2014	35	54,689	44,373	52,415	3,178	154,690
2015	25,796	111,973	71,958	82,449	4,510	296,685
2016	40,714	156,691	101,678	96,985	4,415	400,484
2017	49,863	197,615	124,397	103,877	4,468	480,219
2018	75,418	256,481	152,907	115,009	1,843	601,658
2019	142,994	287,101	178,770	131,261	5,771	745,896

*기타 부문은 행복도시 관내에서 솝된 에너지 소비량 중에서 수송, 가정, 상업, 공공 부문이 아닌 산업, 농림수산, 제조업 등에서 전력 등을 통하한 배출량

출처: 행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역. p.35.

□ 경기도 신도시 사례

김포, 하남, 시흥 등 신도시 사례 분석을 통해 이산화탄소 배출 비율이 가장 높은 부문은 가구부문으로 나타나며, 수송, 사업 부문의 순으로 확인된다. 각 지역별 공원·녹지 등 흡수원의 면적 또는 비중에 따라 생활권 단위에서의 온실가스 저감효과가 나타난다.

[표 4-7] 신도시지역 생활권 단위 온실가스 배출량

도시 내 활동		김포한강도시		하남미사보금자리사업		시흥군자도시개발사업	
		이산화탄소 배출량 (tCO2)	비율(%)	이산화탄소 배출량 (tCO2)	비율(%)	이산화탄소 배출량 (tCO2)	비율(%)
배출량	가구부문	552,436	46.6	365,369	41.5	111,671	31.2
	공공부문	118,467	10.0	114,064	12.9	67,970	19.0
	상업부문	25,616	2.2	19,124	2.2	92,540	25.8
	산업부문	64,100	5.4	100,813	11.4	-	0.0
	수송부문	404,010	34.0	267,204	30.3	81,668	22.8
	폐기물부문	22,086	1.9	14,608	1.7	4,465	1.2
총 CO2배출량 (A)		1,186,717	100.0	881,181	100.0	358,314	100.0
흡수부문 (B)		2,970	0.3	1,166	0.1	1,289	0.4
순 CO2배출량(C=A-B)		1,183,747	99.7	880,015	99.9	357,025	99.6

출처: 이성룡 외(2011). 경기도 저탄소 녹색도시 계획기준 연구. 경기개발연구원. p.92. 참고하여 재작성.

(2) 도시계획·개발 사업의 토지이용 분석

□ 지구단위계획의 토지이용

지구단위계획의 용도별 토지이용은 총개발면적 대비 주거, 상업, 도로, 공원녹지 등의 토지비율로 살펴보았다. 분석결과 용도별 평균 토지이용 비율은 주거 40.09%, 상업 10.28%, 도로 35.12%, 공원녹지 44.11%로 확인된다.

[표 4-8] 지구단위계획의 토지이용계획

(단위: ㎡)

분류		총개발면적	주거	상업	도로	공원녹지
부산 에코델타 스마트시티[29]		2,191 ·	367 16.75%	246 11.23%	522 23.82%	638 29.12%
수원 당수지구[30]		970.644 ·	420.258 43.30%	279.28 28.77%	172.832 17.81%	257.236 26.50%
대구 연경[31] (2007~2020)		1,505,176 ·	479,053 31.83%	29,356 1.95%	263,587 17.51%	286,827 19.06%
행정중심 복합도시[32]	1-1	5,312,256 ·	2,490,504 46.88%	73,040 1.37%	612,306 11.53%	2,489,152 46.86%
	1-3	1,141,376 ·	851,246 74.58%	31,943 2.80%	751,654 65.86%	258,187 22.62%
	1-2	2,244,174 ·	1,166,489 51.98%	64,974 2.90%	905,096 40.33%	1,011,538 45.07%
	1-4	2,033,659 ·	1,179,152 57.98%	118,031 5.80%	1,419,419 69.80%	736,476 36.21%
	1-5	2,492,748 ·	394,931 15.84%	1,539,369 61.75%	1,918,362 76.96%	558,448 22.40%
	2-1	1,704,594 ·	1,173,820 68.86%	27,409 1.61%	252,133 14.79%	495,685 29.08%
	2-2	1,489,221 ·	864,797 58.07%	66,344 4.45%	187,754 12.61%	555,549 37.30%
	2-4	1,748,511 ·	127,167 7.27%	1,114,239 63.73%	189,497 10.84%	507,105 29.00%
	2-3	1,232,949 ·	866,858 70.31%	10,804.50 0.88%	200,646 16.27%	366,091 29.69%
	4-1	3,253,076 ·	1,202,024 36.95%	107,249 3.30%	2,214,828 68.08%	1,943,803 59.75%
	4-2	5,561,455 ·	1,119,801 20.14%	189,425 3.41%	2,214,690 39.82%	3,317,063 59.64%
	5-2	1,792,315 ·	871,321 48.61%	57,637 3.22%	289,177 16.13%	829,158 46.26%
	6-3	2,853,814 ·	711,641 24.94%	101,147 3.54%	306,671 10.75%	2,035,669 71.33%
	6-4	1,000,743 ·	679,716 67.92%	104,074 10.40%	696,232 69.57%	210,397 21.02%
용도별 토지이용 비율		-	41.82%	9.71%	52.50%	36.56%

출처: 연구진 작성.

□ 도시개발사업의 토지이용

2기 수도권 및 지방 신도시, 3기 신도시, 지방 신도시 등 도시개발사업의 토지이용 비율을 살펴보면, 각 용도별 토지이용 평균비율이 주거 28.91%, 상업 7.57%, 도로 17.82%, 공원녹지 25.21%로 확인된다.

29) 「부산 에코델타 스마트시티 시행계획(안)」 (시행 2018.12.26.)

30) 「수원당수 공공주택지구 지정 변경(3차) 및 지구계획 변경(2차)[고시문]」 (시행 2021.09.29.)

31) 「대구연경 공공주택지구 지구계획 변경(7차) 승인 및 지형도면 고시」 (시행 2019.09.02.)

32) 행정중심복합도시건설청(n.d.). 지구단위계획.
https://naacc.go.kr/WEB/contents/N1010400000.do/ (접속일: 2022.10.01.)

[표 4-9] 도시개발사업의 토지이용계획

(단위: ㎡)

분류		총개발면적	주거	상업	도로	공원녹지
계룡 하대실[33] (2014~2023)		209,748	25,788 12.29%	82,550 39.36%	35,079 16.72%	48,089 22.93%
당진 수청[34] (2014~2021)		486,075	245,773 50.56%	14,854 3.06%	112,414.6 23.13%	67,100 13.80%
진천 성석[35] (2019~2025)		371,115	172,738 46.55%	7,785 2.10%	71,034 19.14%	46,901 12.64%
충주 안림[36] (2019~2027)		476,317	178,904 37.56%	12,672 2.66%	120,174 25.23%	71,461 15.00%
광명 유통[37]		297.237	29.932 10.07%	234.834 79.01%	71.247 23.97%	204.902 68.94%
남양주양정[38] (2019~2027)		2,063,088	624,329 30.26%	35,126 1.70%	318,827 15.45%	597,244 28.95%
서울 마곡[39] (2007~2022)		3,666,582	595,268 16.23%	388,108 10.59%	650,282 17.74%	761,298 20.76%
울산 울산역세권[40] (2008~2020)		833,416	43,586 5.23%	128,337 15.40%	249,570 29.95%	152,795 18.33%
홍성 내포신도시[41] (2007~2022)		9,951,729	2,638,239 26.51%	794,316 7.98%	1,749,417 17.58%	2,158,448 21.69%
부천 종합운동장[42] (2017~2024)		490,847	70,226 14.31%	40,235 8.20%	85,058 17.33%	100,911 20.56%
2기 수도권 신도시[43]	성남 판교	8,922	2,370 26.56%	277 3.10%	1,570 17.60%	3,351 37.56%
	화성 동탄1	9,035	2,825 31.27%	485 5.37%	1,517 16.79%	2,526 27.96%
	화성 동탄2	24,039	7,650 31.82%	1,094 4.55%	4,214 17.53%	7,537 31.35%
	김포 한강	11,744	4,043 34.43%	425 3.62%	2,258 19.23%	3,634 30.94%
	파주 운정	16,610	6,054 36.45%	573 3.45%	3,259 19.62%	4,538 27.32%
	광교	11,304	2,085 18.44%	558 4.94%	1,648 14.58%	4,950 43.79%
	양주 (옥정회천)	11,171	4,192 37.53%	321 2.87%	1,929 17.27%	3,217 28.80%
	위례	6,773	2,482 36.65%	551 8.14%	1,120 16.54%	1,779 26.27%
	고덕 국제화	13,419	3,906 29.11%	566 4.22%	2,417 18.01%	3,431 25.57%
	인천 검단	11,181	4,153 37.14%	609 5.45%	1,651 14.77%	3,281 29.34%
2기 지방 신도시[44]	대전도안	6,109	1,923 31.48%	377 6.17%	1,558 25.50%	1,694 27.73%
	아산 (배방탕정)	8,793	2,134 24.27%	896 10.19%	1,829 20.80%	2,291 26.05%
3기 수도권 신도시[45]	남양주 왕숙	8,654	2,137 24.69%	127 1.47%	1,287 14.87%	3,001 34.68%
	남양주 왕숙2	2,393	622 25.99%	27 1.13%	409 17.09%	799 33.39%
	하남 교산	6,314	1,471 23.30%	14 0.22%	1,025 16.23%	2,208 34.97%
	인천 계양	3,332	659 19.78%	37 1.11%	539 16.18%	901 27.04%
	고양 창릉	7,890	1,819 23.05%	57 0.72%	1,192 15.11%	3,050 38.66%
	부천 대장	3,420	729 21.32%	56 1.64%	614 17.95%	960 28.07%
	광명 시흥[46]	12,710	3,079 24.23%	472 3.71%	0.00%	3,851 30.30%
	안산 장상	2,213	504 22.77%	16 0.72%	367 16.58%	803 36.29%
용도별 토지이용 비율		-	28.91%	7.57%	17.82%	25.21%

출처: 연구진 작성.

33) 「계룡 하대실지구 실시계획 인가 및 지형도면 고시」 (시행 2021.10.21.)

(2) 생활권 기본 모형의 토지이용 구성

□ 토지이용 계획 기준

기본 모형의 규모 설정에 이어 내부 토지이용과 시설에 대한 위치 선정과 면적 배분을 하기 위하여 도시계획·개발 사업들에 대한 기반시설 설치 기준들을 조사하였다.

연구의 특성 상 행복도시 계획지표 기준과 공공주택 지구의 계획 기준을 참고하여 토지이용을 설정한다. 공원녹지 비율의 경우에는 탄소중립 도시모델의 성격을 반영하여 상향된 비율로 토지이용을 구성할 수도 있다.

[표 4-10] 계획·개발사업 별 기반시설 설치 기준

구 분	행복도시 계획지표 기준	공공주택지 지구	도시개발사업	비 고
관련 법령		·공공주택특별법	·도시개발법 도시개발 수립지침	
계획인구 (인)		·통계청 장래인구 추계 및 지자체 상위계획 고려		
인구밀도 (인/ha)	·200~300인/ha 내외 (주택용지 기준)	·200인/ha ·고밀도 경우 200인/ha 이상 가능)		·주택용지 비율로 산정

34) 「당진 수청2지구 도시개발구역 실시계획 인가 및 지형도면 고시」 (시행 2021.12.16.)

35) 「진천 성석지구 도시개발사업 구역지정(변경), 개발계획 수립 및 지형도면 고시」 (시행 2021.03.12.)

36) 「충주 안림지구 도시개발사업 개발계획 수립 및 지형도면 고시」 (시행 2021.01.08.)

37) 「광명 유통단지 도시개발사업 실시계획인가 및 지형도면 고시」 (시행 2020.05.20.)

38) 「남양주 양정역세권 도시개발구역 지정 고시」 (시행 2019.03.28.).

39) 서울특별시고시 제2010-339호, 마곡 도시개발구역 개발계획변경수립, 실시계획변경인가 고시, p.2

40) 울산도시공사. 경부고속철도 울산역 역세권 도시개발사업 지구단위계획 설명서.

41) 「충청남도(내포) 신도시 개발사업에 따른 개발계획 및 실시계획」 (시행 2020.09.29.)

42) 「부천종합운동장 일원 역세권 융복합개발사업 실시계획」 (시행 2021.11.01.)

43) 「제2기 수도권신도시 건설안내」 (시행 2017.09.15.)

44) 「제2기 지방신도시 건설안내」 (시행 2017.02.28.)

45) 3기 신도시(n.d.). 토지이용계획.
https://www.3기신도시.kr/kor/CMS/Contents/Contents.do?mCode=MN033 (접속일: 2022.10.21.)

46) 시흥신문(2021). '광명시흥지구' 주택건설용지 307만9천㎡에 7만호 건립 계획.
http://www.shnews.net/news/articleView.html?idxno=39093/ (접속일: 2022.10.01.)

상업용지 (㎡)	·3% 내외			
공원·녹지	·20~30% ·1인당 30㎡ 이상	·20% 이상, 1인당 6㎡ 이상, 주택면적의 12% 중 큰 면적		·공원녹지법 시행령 별표
공공청사	·생활권별 1~2개소	·소·중·대 생활권별 복합커뮤니티 조성 기준 적용		·복합커뮤니티 등
교육시설	·5개소 (유2/초2/중1/고1) ·초교 개소수는 종합적 여건에 따라 조정			·국토의 계획 및 이용에 관한 법률 ·초: 근린주거구역 2개당 1개 ·중·고: 근린주거구역 3개당 1개
주차장	·0.6% 이상 (2~3개소)			·주차장 조례
복지시설				·광역복지시설 (의료복지기능)
의료시설				
특징	·법적 기준이 아닌 건설기본계획의 시설 총량에서 생활권 별로 분배	·공공에서 추진 ·3기 신도시 등 적용 모델	·민간사업 이므로 기부채납 시설 비율 높음	

출처: 연구진 작성.

□ 행복도시 생활권 별 토지이용 현황 분석

앞서 파악한 바와 같이, 행복도시 생활권의 규모가 본 연구에서 작성하는 생활권 기본 모형과 유사하기 때문에 토지이용과 시설의 설정에서도 행복도시 생활권에서의 토지이용 현황을 분석하고, 이를 참고하여 기본 모형을 설정하고자 한다.

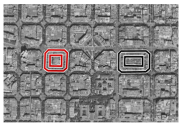
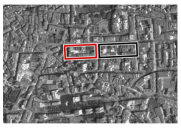
행복도시 8개 생활권에 대한 토지이용 특성 분석 결과는 아래와 같으며, 이러한 분석 결과 행복도시 생활권 토지이용별 평균 수치를 산정하였다.

- 행복도시 생활권 용도별 면적 평균: 주택 41.3% / 상업 2.2% / 공원녹지 26.0% / 교육시설 4.6% / 문화복지 4.2% / 기반시설 20.6 %

□ 블록의 규모

해외 도시에서의 생활권 단위에서의 블록 규모들을 살펴보았다. 스페인 바르셀로나는 110m×110~165m, 폰테베드라는 60m×145~179m, 프랑스 파리는 70m×65~135m, 미국 포틀랜드는 50m×60m 규모의 블록들로 구성되어 있음을 확인하였으며, 평균적으로 60~110m×130~150m의 소·중규모 블록 사이즈와 가로변 6층 이하 휴먼스케일의 건물들이 도시구조를 형성하는 것으로 표준 블록의 규모를 가늠한다.

[표 4-11] 해외 보행친화적 블록 사례

구분	스페인 바르셀로나	스페인 폰텝베드라	프랑스 파리	미국 포틀랜드
블록 사례				
블록 크기	110m×110~165m	60m×145~179m	70m×65~135m	50m×60m

출처: 연구진 작성.

□ 생활권 기본 모형의 토지이용계획도 작성

신시가지 개발 기준, 토지이용 및 기반시설 사례 검토 등을 기반으로 생활권 기본모형의 토지이용계획 비율을 다음과 같이 선정한다. 토지이용 구성은 주거, 상업, 공원녹지, 학교, 공공청사, 도로, 기타로 이루어지도록 한다.

- 생활권 기본 모형의 용도별 면적 비율: 주택 40~45%, 상업 3% 내외, 공원녹지 20~25%, 교육시설 4~5%, 문화·복지·청사 등 공공시설 5%, 나머지는 도로 등 기반시설 면적으로 충당

인구는 공원녹지와 도로 등 오픈스페이스와 공공시설을 제외한 개발부지인 주택면적 기준 250인/ha 당 기준을 적용하여 14,500인으로 설정한다. 생활권 면적은 1.2km×1.2km 로 144만㎡로 설정한다.

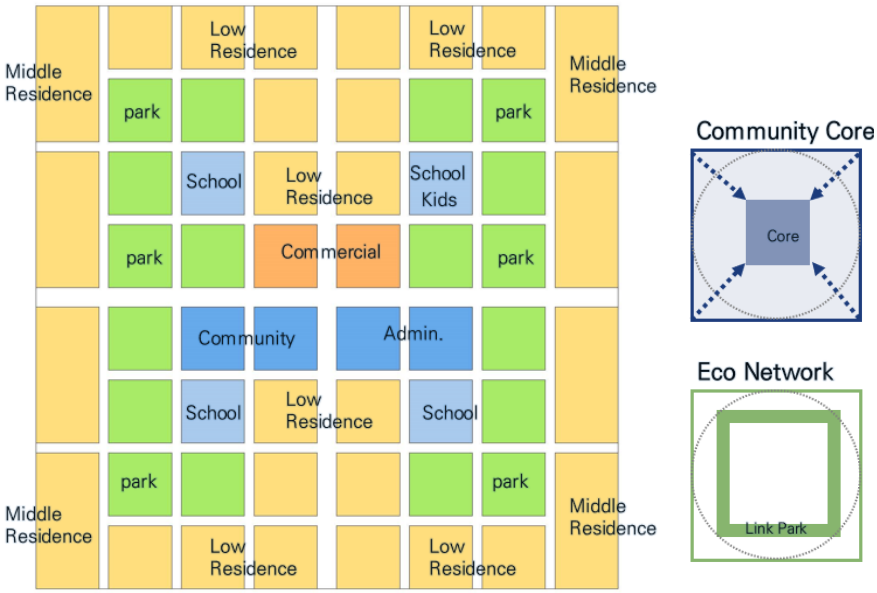
블록의 규모는 130m×130m로 설정하며, 이 규모를 기준으로 토지이용 비율에 맞게 시설들을 배분한다. 상업·업무는 2개 블록, 학교는 초교 2, 중학교 1, 고교 1로 4개 블록, 주민센터 등 공공시설은 4개 블록으로 배분한다.

기본 모형은 상업·업무와 공공시설, 학교가 생활권 중심으로 배치하는 것을 계획 원리로 하며, 그 주변으로 공원들을 배치하였다. 이를 통해 주거지역도 고밀주거, 중밀주거, 저밀주거로 구분하고 중심과 상업·업무에 인접할수록 고밀주거를 배치하고 배후지역은 중밀주거, 생활권 외곽으로는 저밀주거를 배치하는 계획 원리를 적용하였다.

[표 4-12] 행복도시 생활권별 토지이용 현황 분석

구분		1-3 生	2-1 生	2-2 生	2-3 生	3-1 生	3-2 生	6-2 生	6-4 生
인구	인	28,205	29,876	25,112	16,923	12,851	18,551	62,262	10,642
	인/ha	424	354	398	293	326	372	655	243
세대수 (호)		11,282	11,950	10,044	6,769	5,140	7,420	23,180	4,735
총 면적 (㎡,%)		1,141,376.7 100.0	1,704,361.0 100.0	1,489,221.0 100.0	1,235,552.9 100.0	1,506,227.0 100.0	1,337,852.0 100.0	1,642,746.0 100.0	1,000,743.0 100.0
주택 (㎡,%)		664,591.6 58.2	842,769.0 49.4	631,612.0 42.4	577,566.1 46.7	302,844.8 20.1	461,863.2 34.5	925,603.0 56.3	438,378.0 43.8
상업 (㎡,%)		19,384.7 1.7	11,320.1 0.7	19,256.5 1.3	10,804.5 0.9	121,392.9 8.1	45,434.7 3.4	27,487.0 1.7	17,992.0 1.8
산업용지 (㎡,%)		0.0	7,680.0 0.5	0.0	0.0	10,882.0 0.7	0.0	0.0	0.0
공원녹지 (㎡,%)		195,348.0 17.1	447,646.6 26.3	483,564.5 32.5	336,174.0 27.2	321,733.6 21.4	318,628.2 23.8	220,956.0 13.5	240,774.0 24.1
유보지 (㎡,%)		0.0	0.0	0.0	0.0	47,141.0 3.1	0.0	0.0	6,557.0 0.7
시설용지 (㎡,%)		85,706.9 7.5	116,281.0 6.8	143,095.9 9.6	72,993.6 5.9	237,704.0 15.8	205,810.7 15.4	70,819.0 4.3	63,420.0 6.3
	교육시설	62,215.0 5.5	97,061.0 5.7	105,366.0 7.1	59,320.5 4.8	34,538.8 2.3	69,644.1 5.2	57,792.0 3.5	53,495.0 5.3
	복지 문화시설	12,279.9 1.1	2,508.0 0.1	23,776.0 1.6	0.0	185,885.0 12.3	14,959.9 1.1	2,070.0 0.1	0.0
	청사 등	11,212.0 1.0	16,712.0 1.0	13,953.9 0.9	13,673.1 1.1	17,280.2 1.1	121,206.7 9.1	10,957.0 0.7	9,925.0 1.0
공공기반시설 (㎡,%)		176,345.2 15.5	278,664.3 16.4	211,692.1 14.2	238,014.7 19.3	464,528.7 30.8	306,115.2 22.9	397,881.0 24.2	233,622.0 23.3
	도로	173,252.9 15.2	261,170.1 15.3	190,446.0 12.8	226,036.3 18.3	280,631.8 18.6	297,674.3 22.3	270,126.0 16.4	199,381.0 19.9
	주차장 등	3,092.3 0.3	14,354.2 0.8	21,246.1 1.4	11,978.4 1.0	183,896.9 12.2	8,440.9 0.6	127,755.0 7.8	34,241.0 3.4

출처: 행정중심복합도시건설청(2022), 제62차 행복도시건설사업 개발계획 변경 중 인구 및 토지이용계획 활용하여 작성



[그림 4-1] 탄소배출량 산정을 위한 생활권 기본 모형의 공간계획 도면
출처: 연구진 작성.

[표 4-13] 생활권 기본 모형의 용도별 면적 및 구성

구분		계획 (인, ㎡)	비율 (%)	비고
인구		14,500	·	250인/ha (주택면적기준)
세대수		6,565	·	세대당 2.5인 기준
주 거		629,200	43.7	· 단독/공동 주택
상 업		34,848	2.4	3% 내외
공공 용지	공원녹지	304,200	21.1	1인당 30㎡ 이상
	공공시설	135,200	9.4	· 기타 커뮤니티 시설
	학교	67,600	4.7	초교 2, 중교 1, 고교 1
	청사·복지	67,600	4.7	주민센터 1개소, 복지시설 1개소
	도로·주차장	336,552	23.4	

출처: 연구진 작성.

2. 탄소중립 공간계획 시나리오 및 모형 유형화

1) 계획요소 특성에 따른 공간계획 시나리오 작성

생활권 공간계획에 따른 탄소배출량 비교분석을 위한 대안적 모델 개발을 위해 시나리오를 작성한다. 시나리오는 공간계획 요소들을 대상으로 앞서 개발한 기본 모형을 기준으로 정량적 변화를 통해 유형화하도록 한다. 모형 작성을 위한 계획요소는 앞서 도출한 바와 같이 첫째, 토지이용 부문으로서 생활권을 컴팩트화하는 용도복합·압축적 개발, 둘째, 교통 부문으로서 생활권 내 이동거리를 최소화, 셋째, 탄소흡수원을 확보하기 위한 공원녹지 면적을 확충하는 것이다.

- 도입 계획요소: 용도복합·압축적 개발(컴팩트화) / 이동거리 최소화 / 공원녹지 확충(흡수원 확보)
- (용도복합·압축적 개발) 도시 순밀도를 높여 용도별 면적을 줄이고, 이를 통해 수평 이동거리를 줄임으로써 화석연료 이동수단을 적게 이용하는 효과 예상
- (이동거리 최소화) 생활권 내 도로를 통한 블록 구획으로 도로를 다이어트하거나 이동을 최적화하고, 이를 통해 이동거리를 최소화함으로써 화석연료 소비를 줄이는 효과 예상
- (공원녹지 확충) 공원녹지 면적이 클수록 탄소흡수원을 많이 확보할 수 있어 탄소흡수량을 증대시키고, 이를 통해 탄소 배출량을 저감하는 효과 예상

시나리오는 계획요소의 변화 조합으로 공간계획 상 관계를 형성할 수 있다. 시나리오는 총 5가지로 작성 가능하며, 시나리오별 계획요소 변화 구성과 그에 따른 공간계획 특성은 다음과 같다.

- (시나리오 1) 용도복합·압축적 개발 / 이동거리 감소,공원녹지 면적 증가
- (시나리오 2) 용도복합·압축적 개발 / 이동거리 및 공원녹지 면적 증가
- (시나리오 3) 도시기능 분산 개발 / 이동거리 및 공원녹지 면적 증가
- (시나리오 4) 용도복합·압축적 개발 / 이동거리 및 공원녹지 면적 감소
- (시나리오 5) 도시기능 분산 개발 / 이동거리 증가, 공원녹지 면적 감소

계획요소의 산정 방법도 제시한다. 첫째, 용도복합·압축적 개발은 계획 모형 별로 순밀도를 산정하고 순밀도가 높으면 계획요소 수준이 높고, 순밀도가 낮으면 계획요소 수준

이 낮은 것으로 구분한다. 둘째, 이동거리 최소화는 인구 수를 기반으로 한 주거지역에서 상업, 업무, 학교, 공공시설 등 목적지로 통행하는 거리의 총합으로 이러한 이동거리가 길고 짧음으로 유형을 구분한다. 셋째, 공원녹지의 확충은 생활권 내 오픈스페이스를 포함한 공원녹지 면적이 크고 적음을 구분하여 유형을 설정한다.

[표 4-14] 탄소중립 계획 요소를 적용한 공간계획 시나리오

시나리오	(토지이용 부문) 용도복합· 압축적 개발	(교통 부문) 이동거리 최소화	(공원녹지 부문) 공원녹지 확충	공간계획 특성
기본 모형	-	-	-	· 공간계획 시나리오 기준
시나리오 1	▲	▽	▲	· 용도복합·압축적 개발 · 이동거리 감소,공원녹지 면적 증가
시나리오 2	▲	▲	▲	· 용도복합·압축적 개발 · 이동거리 및 공원녹지 면적 증가
시나리오 3	▽	▲	▲	· 도시기능 분산 개발 · 이동거리 및 공원녹지 면적 증가
시나리오 4	▲	▽	▽	· 용도복합·압축적 개발 · 이동거리 및 공원녹지 면적 감소
시나리오 5	▽	▲	▽	· 도시기능 분산 개발 · 이동거리 증가, 공원녹지 면적 감소
산정 방법	· 순밀도 산정(연면적÷주거·비주거 부지 면적)	· 목적통행별 이동거리 산정	· 공원녹지 면적 산정	
탄소배출과의 관계	· 압축도가 높을수록 이동거리 감소에 따른교통부문 탄소배출 저감	· 이동거리 감소에 따른 교통부문 탄소배출 저감	· 공원녹지 면적 증가로 수목 등 탄소흡수원 확대에 따른탄소흡수 효과 증대	

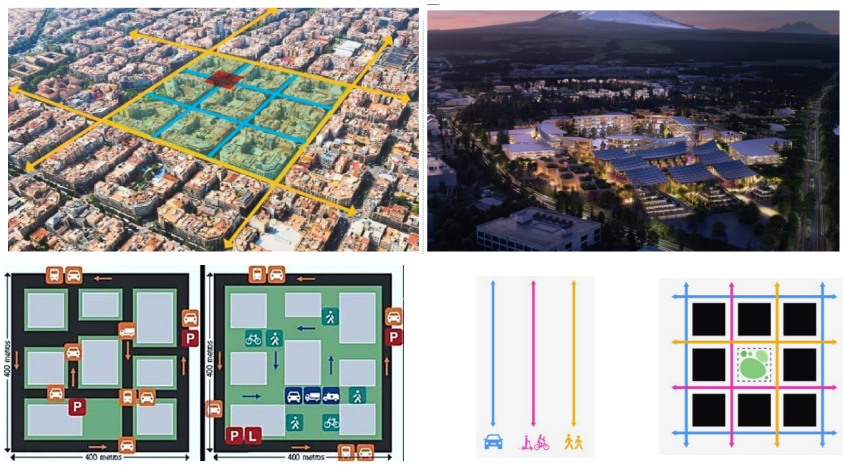
출처: 연구진 작성.

2) 계획요소 시나리오를 적용한 공간계획 모형 개발

(1) 공간계획 모형 유형화를 위한 디자인 검토

□ 도로 체계 검토

가로체계의 다양화는 도시특성을 구분할 수 있고 교통에너지 소비를 결정지을 수 있는 가장 우선적인 계획적 수단이다. 이러한 가로 체계의 검토에서는 가로의 연장과 비율, 자동차 가로와 보행 가로 등 특성 구분 등을 수행하고 이를 공간계획 유형화에 반영하도록 한다.

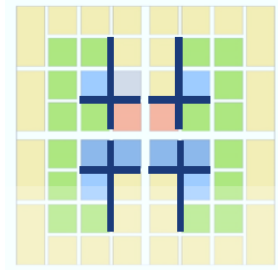
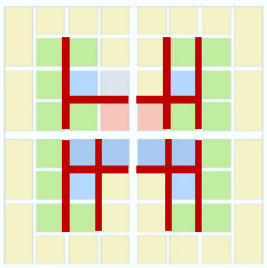
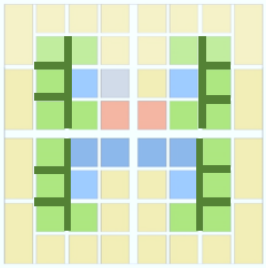


[그림 4-2] 생활권 가로에 대한 체계와 기능의 다양화 사례

출처: BAW(2019). Barcelona Superblocks.
https://barcelonarchitecturewalks.com/barcelona-superblocks/(접속일: 2022.10.21); treehugger8(n.d.). https://www.tree-hugger8.net/bjarke-ingels-group-and-toyota-are-building-wild-woven-and-wood en-city-future-4856873(접속일: 2022.10.21.); merca2(2017). SuperBlock: La propuesta del Ayuntamiento de Barcelona para ordenar el tráfico. https://www.merca2.es/2017/01/30/superblock-la-propuesta-barcelona-10094/(접속일: 2022.10.21.)

차량 이동을 최소화하기 위해 흔히 사용되는 도로 다이어트는 탄소 저감을 위한 주요한 계획 요소로 작용할 수 있다. 이러한 도로 다이어트는 가로 체계를 조정함으로써 궁극적으로 도로율을 감소시킨다. 블록을 합침으로써 가로 체계를 변화시키고, 도로율을 감소시킬 경우 차량 중심에서 보행 중심으로의 도시로 지향함을 판단할 수 있다.

[표 4-15] 도로 다이어트에 따른 체계 변화 검토

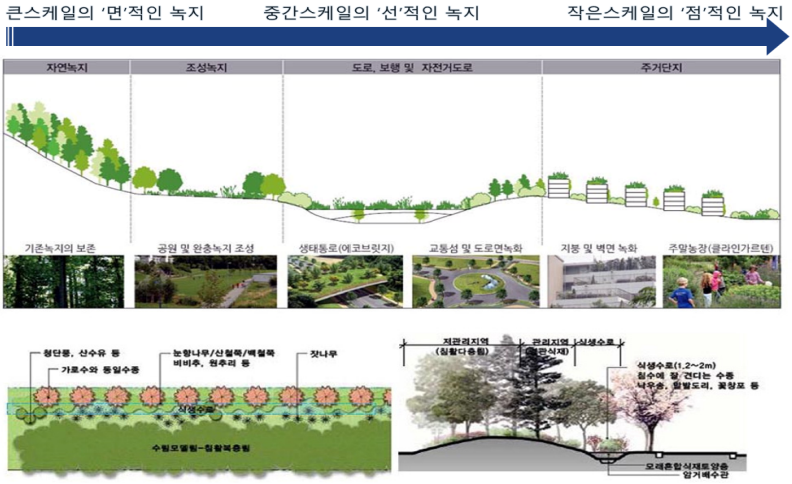
보행자 전용도로	가로환경 개선 (일방 통행)	가로 공원화
		

출처: 연구진 작성.

□ 공원녹지 체계 검토

도시 공간에서 공원녹지 등 오픈스페이스의 면적은 많을수록 좋겠으나, 한정된 토지면적에서의 효율성을 위해서는 최대한의 탄소 흡수 등 중립 효과를 보일 수 있도록 계획하는 것이 바람직하다. 이러한 효과는 공원녹지율에 해당하는 절대 면적을 높이는 방법과 공원녹지 내에 다층식재 등 탄소흡수원을 압축적으로 확충하는 방법으로 달성할 수 있다.

또한, 도시 규모에 따라서도 공원녹지율을 높이고 확충하는 방안이 달라질 수 있는데, 면적인 녹지, 선형 녹지, 점적 녹지 등 도시 스케일에 따라 적용가능한 방안을 모색할 필요가 있다.



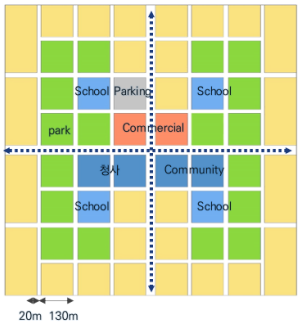
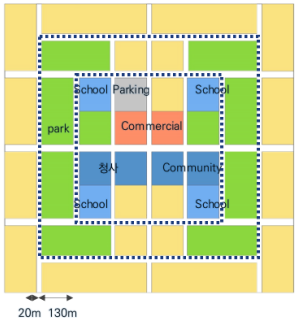
[그림 4-3] 도시 규모에 따라 적용가능한 공원녹지 확보 방안
출처: 연구진 작성.

(2) 공간계획 모형 유형화를 위한 국내외 사례 검토

□ 해외 생활권 공간 형태 사례

MIT에서 개발한 Energy Proforma 웹 툴에서는 전 세계와 중국 도시를 대상으로 도시형태를 조사하고 이를 유형화하였다. 유형은 6개로 판상형 형태의 건축물들로 배치구조를 이루는 Walk Up Slab Enclaves, 소규모 블록형 건축물로 이루어진 Small Perimeter Blocks, 판상형과 타워형 건축물이 혼합된 Urban Grid Mixes, 대규모 블록형과 타워형 건축물이 혼합되어 고밀도를 이루는 High Density Perimeter Blocks, 보행 중심으로 용도혼합이 이루어져 도시형태를 구성하는 Urban Sponges, 마지막으로 초고층 건축

[표 4-16] 공간계획 모형 개발을 위한 디자인 검토

생활권 모형	가로 체계	오픈스페이스 체계	토지이용 비율
	보행자 가로체계 + 소규모 블록	분구별 중심 공원형	·주택: 43.5% ·상업: 2.4% ·공원: 21.7% ·학교: 4.8% ·청사: 4.8% ·도로: 22.6%
	순환가로 + 보행자가로 + 소규모블록	선형 공원형	·주택: 43.7% ·상업: 2.5% ·공원: 22.8% ·학교: 5.0% ·청사: 5.0% ·도로: 20.6%
	순환가로 + 소규모블록 + 메가블록	중앙 공원형 1	·주택: 46.1% ·상업: 2.8% ·공원: 25.0% ·학교: 4.9% ·청사: 4.9% ·도로: 16.2%
	순환가로 + 메가블록	중앙 공원형 2	·주택: 45.5% ·상업: 2.8% ·공원: 26.0% ·학교: 5.2% ·청사: 5.2% ·도로: 15.2%

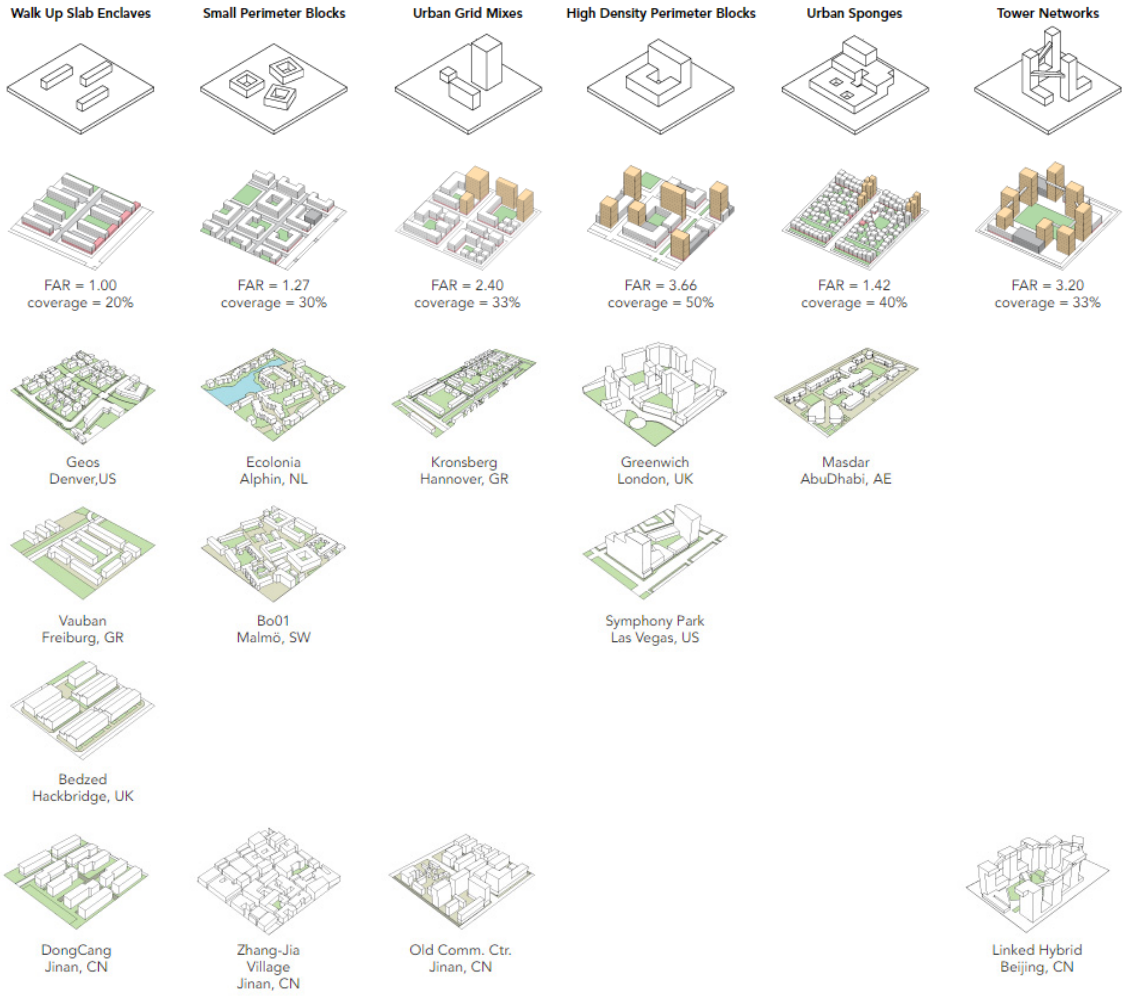
출처: 연구진 작성.

물들이 연결되어 도시형태를 구성하는 Tower Networks 이다.

도시형태 모형 작성을 위해 우선적으로 각 유형별로 Prototype을 제작하고 용적률(FAR)과 건폐율(coverage)을 기본 설정하였다. 그리고 다양한 도시 형태를 분석하기 위해 용적률과 건폐율 변화에 따른 공간 모형을 추가 제작하였다.

이러한 도시 형태 모형을 제작하기 위해 다년에 걸쳐 세계 주요 도시들의 도시형태와 중국의 베이징과 진안시의 도시형태 사례를 조사하여 이를 공간 모형에 적용하였다.

□ 국내 생활권 공간 형태 사례



[그림 4-4] MIT Energy Proforma에서 제시한 Clean-Energy 도시 분석을 위한 유형화 결과
출처: Energyproforma(n.d.). CLEAN ENERGY CITY PATTERNS. http://energyproforma.mit.edu/webtool3/learning(접속일: 2022.10.01.)

[표 4-17] Clean-Energy 도시 형태 관련 International Cases & China Cases

유형	International Cases	China Cases
Walk Up Slab Enclaves	· Geos Denver, US · Vauban Freiburg, GR · Bedzed Hackbridge, UK	· DongCang Jinan
Small Perimeter Blocks	· Ecolonia Alphin, NL · Bo01 Malmö, SW	· Zhang-Jia Village Jinan
Urban Grid Mixes	· Kronsberg Hannover, GR	· Old Comm. Ctr. Jinan
High Density Perimeter Blocks	· Greenwich London, UK · Symphony Park Las Vegas, US	-
Urban Sponges	· Masdar AbuDhabi, AE	-
Tower Networks	-	· Linked Hybrid Beijing

출처: Energyproforma(n.d.). CLEAN ENERGY CITY PATTERNS.
http://energyproforma.mit.edu/webtool3/learning(접속일: 2022.10.01.)

국내의 생활권 공간 형태에 대한 사례는 1-2기 신도시, 행복도시 생활권, 택지개발지구들에 대한 역세권과 주거지역 등의 생활권 범위에서의 토지이용과 공간 구조 사례들을 조사하고, 다양한 생활권 공간계획 대안들을 마련하기 위해 참고하였다.

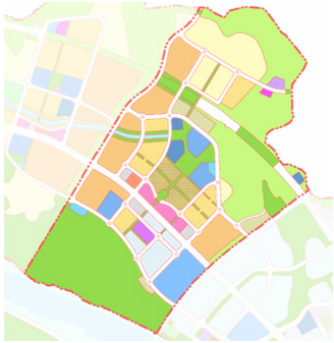
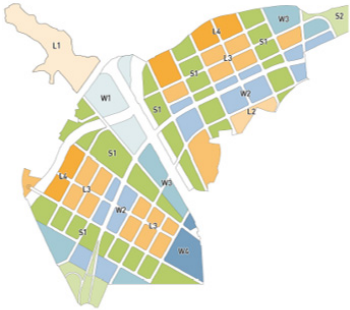
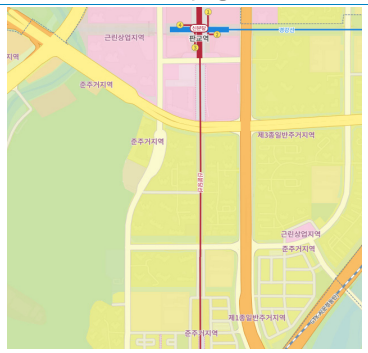
1-2기 신도시들에서는 다양한 도시 형태를 찾아볼 수 있었다. 분당 수내동은 상업(근린)·업무가 작게 분산되어 있고, 외곽에 대형 공원·녹지가 조성된 형태이다. 판교 백현동도 이와 유사하게 대규모 공원·녹지와 상업업무(역세권)이 한쪽으로 치우쳐 생활권이 형성되어 있는 사례다. 광교 이의동은 주거중심지역으로, 공원·녹지 체계가 네트워크로 구축되어 있고, 상업업무(역세권)가 남측에 위치하고 있는 형태를 보이고 있다.

(3) 탄소중립 계획요소 시나리오를 적용한 공간계획 모형 개발

공간계획 시나리오를 기반으로 국내외 생활권 모형들의 형태를 참고하여 6개의 대안적 모델을 개발하였다. 다양한 도시형태를 제시하기 위해 고밀복합형, 중앙집중형, 분산형, 선형, 방사형, 격자 기반 혼합형의 형태적 개념을 제시하였고, 국내외 주요 도시에서의 생활권 범위에서의 가로 체계를 활용하여 계획 모델을 작성하였다.

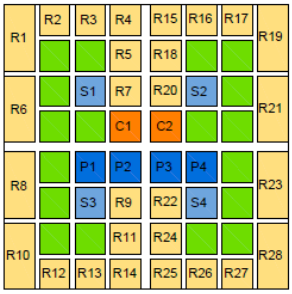
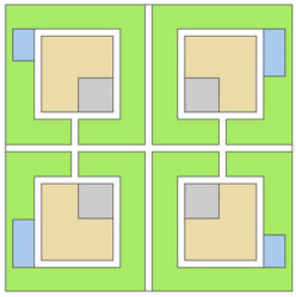
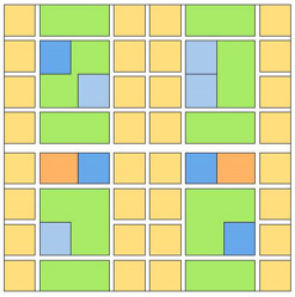
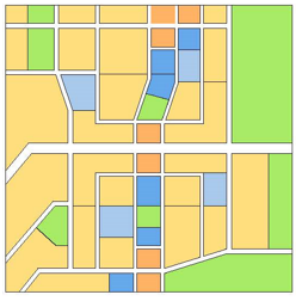
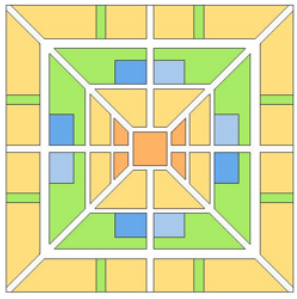
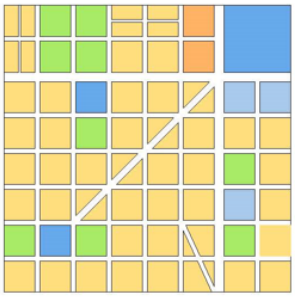
탄소배출량 비교를 위해 기본 모형의 인구(14,500명), 생활권 면적(144만㎡), 연면적(1,145,232㎡)을 다른 모형들에도 동일하게 적용하여 공간계획을 작성하였다.

[표 4-18] 국내 생활권 공간 형태 사례

구분	분당 수내동	행복도시 5-2生
생활권 모형 (1.2km× 1.2km)	 · 상업(근린)·업무가 작게 분산 · 외곽에 대형 공원·녹지 조성	 · 상업(근린)·업무가 중심가로에 집중 · 외곽에 대형 공원·녹지 조성
구분	**행복도시 6-2生**	**과천 택지개발지구**
생활권 모형 (1.2km× 1.2km)	 · 상업(근린)·업무가 작게 분산 · 네트워크화 된 선형 공원·녹지 조성	 · 상업(근린)·업무가 지역별로 분산 · 블록 중심의 면적 공원·녹지 조성
구분	**판교 백현동**	**광교 이의동**
생활권 모형 (1.2km× 1.2km)	 · 대규모 공원·녹지와 상업업무(역세권)이 한쪽으로 치우쳐 모여 있음	 · 주거중심지역으로, 공원·녹지 체계가 네트워크로 구축 · 상업업무(역세권)가 남측에 위치

출처: 연구진 작성.

[표 4-19] 탄소중립 계획 요소 시나리오별 공간계획 모형 개발

기본 모형	모형 1: 고밀복합형	모형 2: 중앙집중형
 · 시나리오 기준 모형 · 상업업무, 공공시설, 학교가 생활권 중심으로 배치 · 배후지역으로 공원녹지 배치 · 도시외곽으로 저밀주거 배치	 · (시나리오 1) ▲ | ▽ | ▲ · 고밀복합의 기반시설-주거 Mixed-Use · 뉴욕, 베이징 모델	 · (시나리오 2) ▲ | ▲ | ▲ · 비주거 시설의 중앙 집중 · 외곽으로 주거와 공원녹지 배치 · 세종시 5-2生 모델
모형 3: 분산형	**모형 4: 선형구조**	**모형 5: 방사형**
 · (시나리오 2) ▲ | ▲ | ▲ · 비주거 시설의 균등 분산 · 선형의 주거와 공원녹지 배치 · 과천 택지개발지구 모델	 · (시나리오 3) ▽ | ▲ | ▲ · 선형의 공간 구조로 비주거의 적절한 분산 · 외곽에 대규모 공원 배치 · 분당 수내 생활권 모델	 · (시나리오 4) ▲ | ▽ | ▽ · 방사형 구조로 중앙에 상업·업무 배치 · 루프 형태의 공원녹지에 공공시설 위치 · 프랑스 파리 모델
모형 6: 격자 기반 혼합형		
 · (시나리오 5) ▽ | ▲ | ▽ · 비주거시설의 외곽 집중 및 일부 분산 · 공원녹지의 점적 배치 · 스페인 바르셀로나 모델		

출처: 연구진 작성.

3) 모형별 토지이용 및 계획요소의 정량적 통계

(1) 모형별 토지이용 및 계획요소 특성

기본모형을 포함한 전체 모형별 토지이용과 계획요소의 특성은 다음과 같다. 전반적으로 압축도시인 모형 1이 공원녹지를 제외한 모든 면적들이 작고, 선형으로 기능이 분산되어 있는 모형 4가 주거부지와 건축면적이 혼합형인 모형 6이 비주거부지와 대지내 오픈스페이스 면적이 큰 것이 특징이다.

- (특성 1: 주거부지 면적) 모형 4(선형)가 가장 크고 모형 1(고밀복합형)이 가장 작음
- (특성 2: 개발부지 중 주거부지를 제외한 비주거부지 면적) 모형 6(혼합형)이 가장 크고 모형 1(고밀복합형)이 가장 작음
- (특성 3: 공원녹지 면적) 모형 1(고밀복합형)이 가장 크고 모형 6(혼합형)가 가장 작음
- (특성 4: 도로 면적) 모형 6(혼합형)이 가장 크고 모형 4(선형)이 가장 작음
- (특성 5: 대지 내 오픈스페이스) 대지 내 오픈스페이스는 건물 부지에서 건축면적을 제외한 면적으로서 모형 6(혼합형)이 가장 크고, 모형 1(고밀복합형)이 가장 작음
- (특성 6: 건축 면적) 건축 면적은 모형 4(선형)이 제일 크고, 모형 1(고밀복합형)이 가장 작음

[표 4-20] 모형별 토지이용 및 계획요소의 정량적 통계

구분	토지이용 및 계획 요소		기본 모형	모형 1 고밀복합형	모형 2 중앙집중형	모형 3 분산형	모형 4 선형	모형 5 방사형	모형 6 혼합형
토지이용 (㎡)	1	주거 부지	644,160	301,056	568,848	540,800	717,303	652,102	712,667
	2	비주거부지	174,240	143,244	148,189	184,600	172,763	143,709	196,700
	3	공원 녹지	313,632	748,800	489,660	422,800	323,706	311,344	152,100
	4	도로	307,968	246,900	233,303	291,800	226,228	332,845	378,533
	계		1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000
개발규모 (㎡)	5	대지내 오픈스페이스	551,179	375,368	500,658	510,770	566,880	530,675	587,091
	6	건축 면적	267,221	68,932	216,379	214,630	323,186	265,136	322,276
	연면적		1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232

출처: 연구진 작성.

[그림 4-5] 모형별 토지이용 및 공간계획 특성
출처: 연구진 작성.

(2) 탄소중립 계획요소의 정량화

□ 순밀도

순밀도는 용도복합·압축적 개발 계획요소와 관련하여 도시의 압축도를 설명할 수 있는 방법으로 본 연구에서 주요 계획요소로 활용하며 그 계산식은 다음과 같다.

$$D = \frac{FAR}{Area} \qquad \langle \text{수식 } 14 \rangle$$

- *FAR*: 건물 총 연면적
- *Area*: 주거+상업업무+학교+공공청사 부지 면적

□ 이동거리

○ 생활권 내 이동을 위한 화석연료 교통수단의 선택 기준

본 연구에서 설정한 생활권의 규모는 1.2km×1.2km로써 반경 600m의 원을 포함할 수 있는 크기이다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 생활권 내에서 보행으로 이동하고자 하는 최대 거리를 600m로 설정한 이유로 생활권 규모에 대한 설명이 될 수 있다.

- (이동거리 산정 조건) 주거→상업·업무 등 목적통행에 따른 이동거리가 600m 미만 시 보행·자전거를 이용하여 화석연료 소비가 없으며, 이동거리가 600m 이상일 경우 자가용 및 버스로 이동하여 화석연료를 소비함
- $If(d \leq 600m, \text{보행·자전거}, If(d > 600m, \text{자가용·버스})) \qquad \langle \text{수식 } 15 \rangle$

○ 이동거리 측정 방법: 유클리디안 거리 vs 맨하탄 거리

반면, 이는 중심에서 600m 떨어진 곳을 이어 원을 그린 개념으로 실제 보행이 이루어지는 경로는 유클리디안 거리(Euclidean Distance)[47]라고 하는 최단 거리는 아니다. 보행은 장애물이 없는 경우, 예를 들어 공원녹지 등 오픈스페이스가 형성되어 있는 공간에서는 직선으로 가로질러 보행자가 이동할 수 있지만, 그렇지 않은 대부분의 경우에는 가로망 형성에 맞춰 이동한다. 그리하여 실제 이동 거리의 측정은 기하학적 경로인 맨하탄 거리(Manhattan's Distance)의 측정 방식을 따르도록 한다.

즉, 가로망을 기준으로 최적 경로를 설정하며, 최소화된 거리를 찾아 보행 또는 자전거를 선택할지, 자가용과 버스 등 화석연료를 선택할 지를 결정하도록 한다. 이 때의 기준

47) 두 점 사이의 거리를 측정하는 방법 중 하나로, 두 점 간 직선거리를 구할 수 있음. 피타고라스 정리와 유사한 개념의 산정 방식임.

은 오픈스페이스만 있어 가로지를 수 있는 경우 유클리디안 거리 또는 장애물이 있어 가로망을 따라 이동해야 하는 경우 맨하탄 거리가 600m 미만인지, 이상인지에 따라 구분짓는다.

$$d_E = \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + \ldots + (a_n - b_n)^2} \qquad \langle \text{수식 } 16 \rangle$$

- $d_E =$ 유클리디안 거리

$$d_M = |(a_1 - b_1)| + |(a_2 - b_2)| + \ldots + |(a_n - b_n)| \qquad \langle \text{수식 } 17 \rangle$$

- $d_M =$ 맨하탄 거리
- (이동거리 측정 조건 1) 오픈스페이스로 인해 가로지를 수 있는 경우 직선 최단거리(유클리디안 거리) 방식으로 측정
- (이동거리 측정 조건 2) 장애물로 인해 가로지를 수 없는 경우 가로망을 따른 최단 거리(맨하탄 거리) 방식으로 측정

※ $(x_1, y_1) \rightarrow (x_2, y_2)$에서 **푸른색 선**이 유클리디안 거리, **붉은색 선**이 맨하탄 거리로 측정하는 방식

[그림 4-6] 유클리디안 거리와 맨하탄 거리의 비교

출처: packtpub(n.d.). Calculating the distance. https://subscription.packtpub.com/book/data/9781787121515/3/ch03lvl1sec33/calculating-the-distance(접속일: 2022.10.21)

□ 정량화 결과

○ 순밀도 및 이동거리

순밀도 분석 결과, 고밀복합형인 모형 1(2.58)이 가장 높고 모형 6(1.26)이 가장 낮은 것으로 나타났다. 모형별로는 모형 1(2.58) → 모형 2(1.60) → 모형 3(1.58) → 모형 5(1.44) → 기본 모형(1.4) → 모형 4(1.29) → 모형 6(1.26) 순이다.

이동거리는 생활권 인구가 이동하는 거리로 산정시 혼합형(8,263.0)이 가장 길고 모형 4(3,702.6)가 가장 짧은 것으로 분석되었다. 구체적으로는 모형 6(8,263.0) → 기본 모형(6,065.4) → 모형 1(5,497.3) → 모형 5(5,398.3) → 모형 3(5,323.4) → 모형 2(4,804.1) → 모형 4(3,702.6) 순이다. 이러한 결과를 판단 시 순밀도와 이동거리, 인구 반영 이동거리는 상관성을 가지는 것으로 파악할 수 있다.

○ 공원녹지·오픈스페이스

토지이용상 공원녹지면적이 넓고 건축면적도 적은 고밀복합형(모형 1)가 가장 넓은 면적을 확보하였고, 공원녹지면적과 건축면적이 넓은 혼합형(모형 6)이 공원녹지+대지내 오픈스페이스면적이 가장 소규모인 것으로 분석되었다. 이는 혼합형이 공원녹지 면적이 가장 작은 것이 주요한 원인이다.

[표 4-21] 모형별 토지이용 및 탄소중립 계획요소의 정량적 통계

구분	토지이용 및 계획 요소	기본 모형	모형 1 고밀복합형	모형 2 중앙집중형	모형 3 분산형	모형 4 선형	모형 5 방사형	모형 6 혼합형
토지 이용 (㎡)	주거 부지	644,160	301,056	568,848	540,800	717,303	652,102	712,667
	비주거 부지	174,240	143,244	148,189	184,600	172,763	143,709	196,700
	공원 녹지	313,632	748,800	489,660	422,800	323,706	311,344	152,100
	도로	307,968	246,900	233,303	291,800	226,228	332,845	378,533
	계	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000
개발 규모 (㎡)	대지내 오픈스페이스	551,179	375,368	500,658	510,770	566,880	530,675	587,091
	건축 면적	267,221	68,932	216,379	214,630	323,186	265,136	322,276
	연면적	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232
계획 요소	순밀도	1.40	2.58	1.60	1.58	1.29	1.44	1.26
	이동거리 (km)	122.2	22.6	151.9	157.6	133.8	101.8	264.6
	인구 반영 이동거리 (km)	6,065.4	5,497.3	4,804.1	5,323.4	3,702.6	5,398.3	8,263.0
	공원녹지+대지내 오픈스페이스 (㎡)	864,811	1,124,168	990,318	933,570	890,586	842,019	739,191
	인구 (명)	14,500	14,500	14,500	14,500	14,500	14,500	14,500

출처: 연구진 작성.

3. 탄소 배출량 산정 및 결과 해석

1) 배출량 산정을 위한 조건 및 계수 설정

가상의 공간에 대한 계획 모형의 탄소 배출량 산정을 위해서는 산정을 위해 필요한 조건과 산정식, 그리고 산정식에 도입되는 계수들이 필요하다. 수송분담률, 목적통행별 인구이동, 자동차 연료별 소비량, 건물에너지 사용량 등 배출량 산정을 위한 조건과 계수 등 조건과 계수들을 다음의 과정을 통해 설정한다.

□ 보행·자전거 vs 자가용·버스

근린주구나 생활권에서 보행을 위한 블록과 가로망 디자인은 중요하다. 본 연구는 탄소중립 생활권 조성의 주요 전략으로 자가용·버스 등 화석연료를 사용하는 교통수단의 이용을 최소화하는 보행과 자전거로 생활권 내 이동을 대체할 수 있는 공간 형태를 제안하는 것을 목표로 한다. 그리하여 화석연료 또는 비화석연료인 교통수단에 대한 이동의 선택으로서, 생활권 내 도로 부문에서의 이동에 따른 탄소 배출량을 산정하기 위해 화석연료 교통수단과 보행·자전거로의 이동경로와 거리를 구분·산정해야 한다.

- (생활권 이동을 위한 교통 수단) ① 비화석연료 수단: 보행·자전거 ② 화석연료 수단: 자가용·버스

□ 화석연료 교통수단 중 자가용과 버스의 수송분담률

앞서 생활권 내에서 화석연료를 사용하지 않는 보행·자전거로의 이동과 화석연료를 사용하는 자가용과 버스를 선택하는 기준을 설정하였다. 실제 교통 부문 탄소배출량을 산정하기 위해서는 화석연료 교통수단별 수송분담률이 설정되어야 한다.

국토교통부에서는 매년 「교통부문수송실적보고」 자료를 공시하고 있으며, 본 연구에서는 그 안에서 교통수단의 수송분담률 통계를 근거로 자가용 68%, 버스 32%로 화석연료 교통수단을 분담하여 배출량을 산정하도록 한다.

- (화석연료 교통수단 별 분담 조건) 자가용 수송 분담율: 68% / 버스 수송 분담율: 32%

□ 목적 통행별 이동량 배분: 통근·쇼핑 vs 통학 vs 공공서비스

앞서 제시한 목적 통행에 따른 이동은 추가적으로 몇 가지의 조건이 고려되어야 한다. 우선적으로 전체 이동량 중에서 목적 통행의 비율로서, 전체 이동량 중에서 ① 통근과 쇼

핑에 대한 목적 통행인 상업·업무지로의 이동량, ② 통학에 대한 목적 통행인 학교로의 이동량, ③ 공공서비스 이용을 목적 통행으로 하는 공공시설로의 이동량에 대한 비율이 구분되어야 한다.

이러한 목적 통행별 이동량 배분은 생활권의 토지이용과 거주자의 생활패턴에 따라 다르기 때문에 특정 통계를 참고하여 배분한다기 보다는 본 모형의 구축이 완료된 후 추후 실제 생활권 또는 계획 수립시 목적 통행별 이동량 배분이 가능할 경우 이러한 수치를 구제적으로 입력하여 탄소배출량 산정이 가능하도록 모형을 선정하도록 한다.

본 연구에서는 기본모형 탄소배출량 산정을 위해 목적 통행별 이동량에 대해 ① 통근·쇼핑 인구 50%, ② 통학 인구 25%, ③ 공공서비스 이용 인구 25%로 배분하도록 한다.

- (목적 통행별 이동량 배분) 통근·쇼핑 인구: 50% / 통학 인구: 25% / 공공서비스 이용 인구: 25%

[표 4-22] 각 주거지블록에서 목적지별 이동 비율

구분	상업·업무	초등학교	중학교	고등학교	공공청사1	공공청사2	공공청사3	공공청사4
비율 (%)	50.00	12.50	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25

출처: 연구진 작성.

□ 자가용·버스에 대한 사용 연료 배분

생활권 기본모형 탄소배출량 산정을 위한 조건의 마지막으로 화석연료 교통수단의 연료별 배분이 설정되어야 한다. 현재 교통수단에 쓰이는 화석연료는 ① 휘발유, ② 경유, ③ LPG. ④ 천연가스(LNG 또는 CNG)로 분류될 수 있다. 이에 따라 자가용은 휘발유, 경유, LPG 연료를 소비하고, 버스는 경유만 사용하는 것으로 한다. 추후 타 화석연료를 고려할 경우 이를 배출량 산정식에 추가하여 반영하도록 한다.

연료별 비율은 국토교통부에서 발표한 '21년 8월말 현재 사용연료별 자동차 등록대수 통계를 참고하여 그 비율을 다음과 같은 조건으로 배분한다.

- (연료별 비율) 자가용: 휘발유 60%, 경유 30%, LPG 10% / 버스: 경유 100%

□ 이동수단 별 연료 소비량

생활권 내 화석연료 이동수단으로 설정된 자가용과 버스의 연료 소비량 조건도 요구된다. 연료소비량은 연료별/차종별 공인 연비를 고려하여 합리적으로 설정한다.

- 1인당 자가용 연료 소비량: 휘발유 0.1 L/km / 경유 0.1 L/km / LPG 0.1L /km
- 1인당 버스 연료 소비량: 경유 0.02 L/km

□ 생활권 내 블록별 인구 설정

생활권 내 주거지역별 인구를 설정하는 과정도 필요하다. 블록의 이동거리는 인구 규모에 비례하기 때문이다. 탄소 배출량은 전체 인구가 이동한 거리에 따라 산정되기 때문에, 이러한 블록별 인구 비율의 차등화는 가중치의 역할을 한다.

이러한 블록별 가중치는 일반적으로 통념화되고 있는 도시 중심일수록 밀도가 높고, 도시 외곽일수록 밀도가 낮은 계획적 원리를 준용하여 설정하며, 이는 총 연면적 대비 해당 블록의 개발밀도에 따른 연면적의 비율로 산정한다.

- 주거 블록별 가중치: 해당 블록 연면적 ÷ 생활권 총 연면적

[표 4-23] 생활권 모형에서의 각 주거 블록별 가중치

구분		기본 모형		모형 1		모형 2		모형 3		모형 4		모형 5		모형 6	
R1	R28	2.1	2.1	25.1		0.9	1.1	0.9	1.9	0.4		6.6		0.4	2.8
R2	R29	2.9		25.1		1.5	2.6	0.9	0.9	1.3		2.2		0.9	2.8
R3	R30	2.9		25.1		1.6	6.1	0.9	1.6	5.0		2.2		2.2	0.9
R4	R31	2.9		24.8		1.2	4.2	0.9	0.9	2.4		4.0		2.6	1.9
R5	R32	4.8				2.6	2.9	1.9	0.9	0.9		4.0		2.2	1.0
R6	R33	4.1				2.5		1.9		3.0		7.1		2.6	1.0
R7	R34	5.8				2.0		1.9		10.7		4.0		0.4	2.8
R8	R35	4.1				2.7		1.9		4.1		2.2		0.9	2.8
R9	R36	4.8				5.8		2.8		3.1		2.2		2.8	2.8
R10	R37	2.1				3.8		4.7		1.2		4.0		5.6	1.9
R11	R38	4.8				2.1		4.7		10.4		7.1		0.9	1.9
R12	R39	2.9				3.4		2.8		4.2		4.8		1.9	0.3
R13	R40	2.9				1.4		4.7		8.5		4.0		2.8	1.3
R14	R41	2.9				2.7		5.6		3.8		2.2		5.6	0.9
R15	R42	2.9				3.8		5.6		2.1		2.2		2.0	0.9
R16	R43	2.9				3.4		4.7		9.3		4.0		2.0	0.9
R17	R44	2.9				9.9		5.6		3.0		4.8		0.9	0.9
R18	R45	4.8				2.0		5.6		2.8		7.1		1.9	0.9
R19	R46	2.1				5.0		5.6		2.0		4.0		2.8	0.9
R20	R47	5.8				0.8		5.6		1.4		2.2		1.6	0.1
R21	R48	4.1				2.0		4.7		6.9		4.4		1.6	3.2
R22	R49	4.8				2.1		4.7		3.1		3.5		2.8	2.8
R23	R50	4.1				1.2		4.7		5.9		4.0		0.9	2.8
R24	R51	4.8				4.0		4.7		1.0		7.1		1.9	2.4
R25	R52	2.9				9.4		1.9		3.4				2.8	1.9
R26	R53	2.9				2.7		1.9						1.0	0.9
R27	R54	2.9				2.7		1.9						1.0	0.9

출처: 연구진 작성.
단위: %

□ 건물 용도별 에너지 사용량

건물 부문 탄소배출량 산정은 건물 용도별 에너지 사용량을 기초로 한다. 생활권 내 건물 용도는 주거, 상업업무, 학교, 공공청사로 구성된다. 건물 용도별 에너지 사용량은 국가통계포털(KOSIS)에서 연도별로 제공하고 있는 건물에너지사용량 데이터를 활용하여 산정하였다. 이 데이터는 건축법에 따른 건축물 용도별로 분류되어 있는데, 주거는 공동과 단독주택에 대한 데이터, 상업·업무는 1종 근린생활시설, 학교는 교육연구시설, 공공청사는 업무시설의 연간 에너지사용량 데이터를 적용하였다.

- 주거: (공동주택) 47.2 / (단독주택) 55.7 kWh/㎡·년
- 상업·업무: (1종 근린생활시설) 61.6 kWh/㎡·년
- 학교: (교육연구시설) 37.4 kWh/㎡·년
- 공공청사: (업무시설) 49.8 kWh/㎡·년

□ 건물부문 신재생에너지 생산량

생활권 탄소중립 공간계획의 실현가능성을 높이기 위해 탄소 저감 전략으로서 건물부문의 신재생에너지 생산을 고려하도록 한다. 현재에도 보편적으로 많이 활용되고 있으며, 제로에너지건축물 의무화 제도가 시행됨에 따라 향후 공공과 민간 건축물의 신재생에너지 생산을 통한 에너지 자립률 강화는 확대될 것이다.

건물부문의 신재생에너지 생산은 태양광 발전시설의 건물 옥상부분에 설치하는 것을 전제로 한다. 또한 태양광 발전량의 산정을 위해서는 태양광 패널의 발전성능, 옥상부분의 설치가능면적, 일조확보비율, 일일발전시간, 순발전율 등과 같은 조건을 설정한다.

- PV 발전량(kWh/㎡): 0.223
- 설치가능 면적비율: 0.25
- 일조확보비율: 0.5
- 일일발전시간: 3.4 h
- 순발전율: 0.95
- 전기에너지 탄소배출 계수: 0.459 kgCO2eq/kWh

[표 4-24] 배출량 산정을 위한 조건 및 계수

구분	조건 및 계수	비고
자가용과 버스의 수송분담률	• 자가용 수송 분담율: 68% / 버스 수송 분담율: 32%	• 국토부「교통부문수송실적보고」자료 중 철도를 제외한 비율
목적 통행별이동량 배분	• 통근·쇼핑 인구: 50% / 통학 인구: 25% / 공공서비스 이용 인구: 25%	
자가용·버스 사용 연료 배분	• 자가용: 휘발유 60%, 경유 30%, LPG 10% / 버스: 경유 100%	• 사용연료별 자동차 등록대수 통계(국토부, '21년 8월)
이동수단 별 연료 소비량	• 1인당 자가용 연료 소비량(L/km): 휘발유 0.1 / 경유 0.1 / LPG 0.1 • 1인당 버스 연료 소비량(L/km): 경유 0.02	• 자동차 공인 연비 고려
생활권 내 블록별 인구 설정	• 주거 블록별 가중치: 해당 블록 연면적 ÷ 생활권 총 연면적	• 상업업무 주변으로 밀도가 높고, 외곽은 밀도가 낮은 계획적 원리 적용
건물 용도별 에너지 사용량	• 주거: (공동) 47.2 / (단독) 55.7 kWh/㎡·년 • 상업업무: (1종근생) 61.6 kWh/㎡·년 • 학교: (교육연구) 37.4 kWh/㎡·년 • 공공청사: (업무) 49.8 kWh/㎡·년	• 건물에너지사용량통계(국가통계포털(KOSIS), '21년)
건물부문 신재생에너지 생산량 산정 계수	• PV 발전량(kWh/㎡): 0.223 • 설치가능 면적비율: 0.25 • 일조확보비율: 0.5 • 일일발전시간: 3.4 h • 순발전율: 0.95	• PV 발전량: '21년 국제에너지 엑스포 전시제품 통계
공원녹지 부문 탄소 흡수량 산정 계수	• 수목의 탄소 흡수량으로0.8kgCO2eq/㎡·년으로 산정	• 환경부·국립산림과학원 자료

출처: 연구진 작성.

2) 탄소 배출량 산정을 위한 계산식

(1) 모형별 총 탄소 배출량

생활권 공간계획 기본 모형을 포함한 유형별 탄소 배출량을 산정하기 위해 기본적인 계산식을 작성하는 것이 요구된다. 앞서 생활권 내 탄소배출 인벤토리 구축 과정에서 도출된 바와 같이 도시가 운영되는 단계에서는 ① 교통수단 이용으로 소비되는 화석연료를 통한 배출, ② 건물 사용으로 인한 에너지 소비 등에 따른 배출로 분류한다.

여기에서, ③ 건물부문 신재생 발전을 통한 탄소 저감 효과와 ④ 공원녹지부문에서의 흡수량까지 포함하여 생활권 내 배출량을 산정하는 기본 틀이 된다. 배출량 산정을 위한 기본 산정식은 아래와 같이 제시한다.

$$E_T = E_{Tr} + E_{Bd} - (RE_{Bd} + S_{Gr}) \qquad \langle \text{수식 } 19 \rangle$$

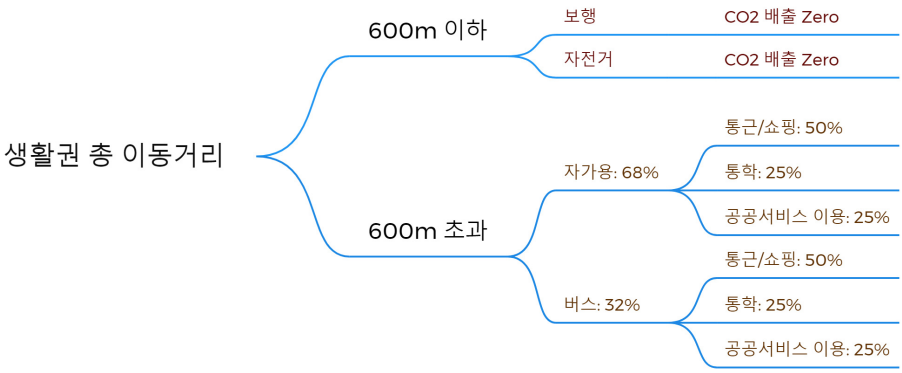
- E_{Tr} = 교통부문 배출량
- E_{Bd} = 건물부문 배출량
- RE_{Bd} = 건물부문 신재생 발전을 통한 탄소저감량
- S_{Gr} = 공원녹지부문 흡수량

(2) 교통부문 배출량

□ 배출량 산정을 위한 이동거리 시나리오

본 연구에서 생활권 내 화석연료 소비와 관련된 이동은 토지 용도 구분에 따른 통근, 통학과 쇼핑, 그리고 공공서비스의 이용 등 목적 통행을 기반으로 한다. 통근과 쇼핑은 주거지에서 상업·업무지로의 이동이며, 통학은 주거지에서 학교로의 이동, 공공서비스의 이용은 주민센터, 복지센터 등 공공시설로의 이동으로 정의한다.

앞서 조건들을 고려하여 총 이동거리의 산정 단계를 나열해 보면 아래와 같다. 총 이동거리의 산정 과정에서 첫 번째로, 화석연료 교통수단의 선택 기준 평가를 통해 보행·자전거를 수단으로 하는 600m 이하 거리는 제외한다. 둘째로, 자가용과 버스의 수송 분담률에 따른 평가가 진행된다. 셋째로, 목적 통행에 따른 이동 구분을 통해 목적지에 따른 이동량을 배분한다.



[그림 4-7] 배출량 산정을 위한 이동거리 시나리오
출처: 연구진 작성.

□ 교통부문 배출량 산정

생활권 내 총 이동거리는 이러한 목적 통행의 총 합으로서 다음과 같은 산정식으로 계산할 수 있다. 이동거리의 산정은 주거지역에서 목적통행 간 최단 이동거리로 계산하는 것을 원칙으로 한다. 초등학교의 경우에는 2개가 배치되어 있기 때문에 주거지역에서 가까운 거리의 초등학교를 향해 이동하는 방식으로 하였다.

예시적으로 기본 모형 생활권의 모든 블록들과 이동거리를 측정하는 상업업무 블록, 초·중·고등학교 블록, 공공시설 블록 간 거리 측정 결과는 다음과 같다. 일부 블록에서 산정할 수 있는 장애물이 없이 공원을 거쳐 대각선으로 가로질러갈 수 있는 유클리디안 거리 결과도 함께 표시하였는데, 이 경우 600m 초과에서 600m 이하로 보행·자전거 이동으로 전환된 경우는 R23↔S2 하나로 나타났다. 주거 블록에서 목적지로의 이동거리가 가장 긴 경우는 R28↔S1, R19↔S3로 1,462m이다.

앞서 제시한 조건들을 조합하면 교통부문 배출량에 대한 산정식을 구할 수 있다. 도로부문의 배출량 산정을 위해서는 생활권 내 가능한 총 이동거리를 산정하고, 총 이동거리에 탄소배출계수를 적용하면 된다.

$$E_{Tr} = 2d_{ij} \times t_j \times P_i \times (r_{car} \sum k f_k v_k \beta_k + r_{bus} f_{bus} \beta_{bus}) \times 14,500 \times 365 \quad \langle \text{수식 } 20 \rangle$$

- d_{ij} = 주거지역 i에서 목적지 j(상업업무, 학교, 공공청사)으로 이동거리
- t_j = 목적지 j의 방문 비율
- P_i = 주거지역 i의 인구 비율(가중치)
- r_{car} = 자가용 이용 비율
- f_k = 1인당 k연료의 자가용 연료소비량
- v_k = 연료별 자가용 비율
- β_k = 자가용 연료별 탄소배출계수
- r_{bus} = 버스 이용 비율
- f_{bus} = 버스의 연료 소비량
- β_{bus} = 버스 연료 탄소배출계수
- 연료별 탄소배출 계수: 휘발유 2.2/경유 2.6/LPG 3.7 kgCO2eq/kWh

[표 4-25] 생활권 기본 모형의 블록 간 거리 산정 결과 예시

	상업·업무 1	상업·업무 2	초등 학교1	중학교	고등 학교	초등 학교2	공공 시설1	공공 시설2	공공 시설3	공공 시설4
R1	822	994	526/375	994	994	1462	846/622	994	1166	1314
R2	748	920	452/336	920	920	1388	772	920	1092	1240
R3	596	768	448/300	768	916	1236	768	768	940	1088
R4	596	620	448/334	620	916	1188	768	768	792	940
R5	448	472	300/212	472	768	940	620	620	644	792
R6	522/454	694	374/308	824	694	1162	546/387	694	866	1014
R7	148	320	148/148	468	616	788	468	468	492	640
R8	694	866	694/495	1162	374/308	824	374/308	522	694	842
R9	468	492	616	788	148/148	468	296	148	320	468
R10	994	1166	994/756	1462	526/375	994	674	822	994	1142
R11	620	644	768	940	300/212	472	448	448	472	620
R12	920	1092	920	1388	452/336	920	600	748	920	768
R13	768	940	916	1236	448/300	768	600	596	768	916
R14	768	792	916	1188	448/334	620	596	596	620	1068
R15	620	596	620	448/334	1188	916	940	792	768	768
R16	768	596	768	448/300	1236	916	1088	940	768	768
R17	920	748	920	452/336	1388	920	1240	1092	920	772
R18	472	448	472	300/212	940	768	792	644	620	620
R19	994	822	994	526/375	1462	994	1314	1166	994	846/622
R20	320	148	468	148/148	788	616	640	492	468	468
R21	694	522/454	824	374/308	1162	694	1014	866	694	546/387
R22	492	468	788	616	468	148/148	468	320	148	296
R23	866	694	1162	694/495	824	526/375	842	694	522	374/308
R24	644	620	940	768	472	300/212	620	472	448	448
R25	792	768	1188	916	620	448/334	768	620	596	596
R26	940	768	1236	916	768	448/300	916	768	596	600
R27	1092	920	1388	920	920	452/336	1068	920	748	600
R28	1166	994	1462	994	994	526/375	1142	994	822	674

출처: 연구진 작성.
* 유클리디안 거리가 산정되는 경우 / 이하 표기

(3) 건물부문 배출량

건물부문의 배출량 계산식은 건물 용도별 연면적에 따른 에너지 사용량과 전기에너지 탄소배출계수를 곱산한 값을 합하여 산정하도록 구성된다. 에너지 사용량은 국가통계 포털(KOSIS)에서 TOE 단위로 집계되고 있기 때문에, 이를 전기에너지인 kWh 단위로 전환하여 계산할 수 있도록 한다.

$$E_{Bd} = (FA_A \times EC_A \times \beta_E) + (FA_D \times EC_D \times \beta_E) + (FA_C \times EC_C \times \beta_E) + (FA_E \times EC_E \times \beta_E) + (FA_P \times EC_P \times \beta_E)$$ 〈수식 21〉

- $FA_A =$ 공동주택 연면적
- $EC_A =$ 공동주택 에너지 사용량
- $\beta_E =$ 전기에너지 탄소배출계수 : 0.459 kgCO2eq/kWh
- $FA_D =$ 단독주택 연면적
- $EC_D =$ 단독주택 에너지 사용량
- $FA_C =$ 상업업무 연면적
- $EC_C =$ 상업업무 에너지 사용량
- $FA_E =$ 교육시설 연면적
- $EC_E =$ 교육시설 에너지 사용량
- $FA_P =$ 공공청사 연면적
- $EC_P =$ 공공청사 에너지 사용량

(4) 건물부문 신재생에너지 생산을 통한 저감량

건물부문에서의 배출량과 함께 신재생에너지 생산을 통한 저감량도 공간계획 모형에서 주요한 탄소배출량 산정 요소가 된다. 계산식에서는 신재생에너지를 태양광으로 한정하고, 설치가능 면적비율, 일조확보 비율, 일일발전시간, 순발전율, 그리고 공간계획을 통한 변인인 건폐면적을 포함하고, 연간 생산량으로 산정한다.

$$RE_{Bd} = PV_G \times AA \times SA \times GH \times NG \times BC \times \beta_E \times 365$$ 〈수식 22〉

- $PV_G =$ 태양광 발전량

- $AA =$ 설치가능면적비율
- $SA =$ 일조확보비율
- $GH =$ 일일발전시간
- $NG =$ 순발전율
- $BC =$ 건폐면적
- $\beta_E =$ 전기에너지 탄소배출계수

(5) 공원녹지부문 탄소 흡수량

공원녹지 부문의 탄소 흡수량은 토지이용 상 공원녹지와 건물 부지 내 건축 면적을 제외한 오픈스페이스 부지 면적을 포함하여 산정하는 계산식으로 구성한다.

$$S_{Gr} = (Area_P + Area_{BdP}) \times \beta_{Gr} \qquad \langle \text{수식 } 23 \rangle$$

- $Area_P =$ 공원녹지면적
- $Area_{BdP} =$ 건물부지내오픈스페이스면적
- $\beta_{Gr} =$ 공원녹지탄소흡수계수
- 수목의 탄소 흡수 계수: 0.8kgCO2eq/㎡·년 (환경부·국립산림과학원)

3) 탄소 배출량 산정 결과

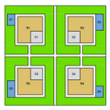
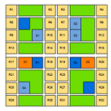
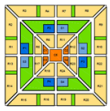
(1) 총 배출량 산정 결과

생활권 기본 모형과 유형화에 따른 6개의 모델들의 탄소배출량과 흡수량이 주어진 조건과 산식에 따라 아래와 같이 산정되었다.

배출량과 흡수량을 고려한 총 배출량은 고밀복합형인 모형 1에서 가장 높게 나타났고, 선형인 모형 1에서 가장 낮게 나타나는 것으로 분석되었다. 모형 1의 경우, 건물부문 배출량은 가장 낮은 반면, 건물의 신재생 생산으로 인한 탄소 저감량은 더욱 크게 감소한 영향을 받았다. 모형 4의 경우에는 건물 부문 배출량이 가장 높은 반면, 건물 신재생 생산에 따른 탄소 저감량은 더욱 크게 증가한 것이 기인한다.

- (모형별 총 배출량 순위) 모형 1(고밀복합형) → 모형 3(분산형) → 모형 2

[표 4-26] 모형별 공간계획 특성 및 탄소배출량 산정 결과

구분	세부	기본모형	모형 1 고밀복합형	모형 2 중앙집중형	모형 3 분산형	모형 4 선형	모형 5 방사형	모형 6 혼합형
공간계획 모형								
토지이용 (㎡)	주거 부지	644,160	301,056	568,848	540,800	717,303	652,102	712,667
	비주거 부지	174,240	143,244	148,189	184,600	172,763	143,709	196,700
	공원녹지	313,632	748,800	489,660	422,800	323,706	311,344	152,100
	도로	307,968	246,900	233,303	291,800	226,228	332,845	378,533
	계	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000	1,440,000
개발규모 (㎡)	대지내 오픈스페이스	551,179	375,368	500,658	510,770	566,880	530,675	587,091
	건축 면적	267,221	68,932	216,379	214,630	323,186	265,136	322,276
	연면적	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232	1,145,232
계획 요소	순밀도	1.40	2.58	1.60	1.58	1.29	1.44	1.26
	이동거리 (km)	122.2	22.6	151.9	157.6	133.8	101.8	264.6
	인구 반영 이동거리 (km)	6,065.4	5,497.3	4,804.1	5,323.4	3,702.6	5,398.3	8,263.0
	공원녹지+대지내 오픈스페이스 (㎡)	864,811	1,124,168	990,318	933,570	890,586	842,019	739,191
	인구 (명)	14,500	14,500	14,500	14,500	14,500	14,500	14,500
탄소배출량 (kgCO2eq/년)	교통 부문	765,785.4	694,059.0	606,545.3	672,100.4	467,472.1	681,566.6	1,043,241.2
	건물 부문	25,555,541.2	25,172,691.1	25,351,546.2	25,552,712.5	25,917,116.2	25,809,929.1	25,698,439.0
	계	26,321,326.6	25,866,750.1	25,958,091.5	26,224,812.9	26,384,588.3	26,491,495.7	26,741,680.2
탄소흡수량 (kgCO2eq/년)	건물 신재생에너지 생산 부문	4,030,818.2	1,039,779.6	3,263,903.6	3,237,526.8	4,875,002.9	3,999,370.0	4,861,284.0
	공원녹지+대지내 오픈스페이스 부문	691,849.0	899,334.7	792,254.4	746,856.0	712,468.8	673,615.5	591,352.7
	계	4,722,667.2	1,939,114.3	4,056,158.0	3,984,382.8	5,587,471.7	4,672,985.5	5,452,636.7
배출량 총계 (kgCO2eq/년)		21,598,659.5	23,927,635.7	21,901,933.5	22,240,430.2	20,797,116.5	21,818,510.3	21,289,043.6

출처: 연구진 작성.

(중앙집중형) → 모형 5(반사형) → 기본 모형 → 모형 6(혼합형) → 모형 4 (선형)

- (모형 1) 건물부문 배출량은 가장 낮은 반면, 건물의 신재생 생산으로 인한 탄소 저감량은 더욱 크게 감소
- (모형 4) 건물부문 배출량이 가장 높은 반면, 건물 신재생 생산에 따른 탄소 저감량은 더욱 크게 증가

(2) 교통 부문 탄소배출량 산정 결과

□ 600m 이하 제외시 탄소배출량

부문별 탄소배출량 산정 결과 중 교통 부문의 배출량 결과는 다음과 같다. 우선적으로 교통부문의 배출량 산정은 기본 방법론인 600m 이하의 거리는 제외하고 탄소배출량을 산정한 방법과, 600m 이하 제외 없이 전체 이동거리를 포함하여 산정한 방법을 모두 계산하여 제시하였다.

기본 방법론인 600m 이하 시 제외의 경우에는 모형 4인 선형이 가장 배출량이 적게 나타났고, 모형 6인 혼합형에서 가장 많이 배출되는 것으로 분석되었다. 이는 선형 구조로 도시기능이 고르게 분포하는 모형이 접근성이 우수하고 이동거리가 짧은 것으로 해석할 수 있으며, 모형 6의 경우 도시 기능이 생활권 경계로 치우친 구조로 이동량이 최대화 됨으로써 배출량이 높은 것으로 해석할 수 있다.

- (600m 이하 제외) 모형 4 → 모형 2 → 모형 3 → 모형 5 → 모형 1 → 기본 모형 → 모형 6 순으로 적게 나타남
- 선형구조로 도시기능이 분포하는 모형이 화석연료 교통수단의 이동량 최소화, 도시기능이 생활권 경계로 치우친 경우 이동량 최대

□ 보행 친화 모형 발굴

보행 친화적인 모형을 평가하기 위해 전체 이동거리 중 보행·자전거로 이동하는 600m 이하 비율을 모형별로 분석해 보았다. 그 결과, 모형 4(선형)가 보행·자전거 이동 비율이 42.6%로 가장 높게 나타났으며, 모형 6이 19.1%로 가장 낮게 나타났다. 교통부문 탄소배출량 결과와 비교해보면, 기본 모형이 배출량 순위에 비해 보행·자전거 이동 비율 순위가 높아졌고, 모형 5와 모형 1의 순위가 낮아졌다.

- (보행 친화적 모형) 보행·자전거로 이동하는 600m 이하 목적통행 비율이 높은 모형은 모형 4

- 보행·자전거 이동 비율(%): 모형 4(42.6) → 모형 2(39.7) → 모형 3(37.4) → 기본 모형(32.8) → 모형 5(24.3) → 모형 1(21.7) → 모형 6(19.1)

□ 목적통행별 탄소배출량

건축물 용도별 목적통행 발생에 따른 탄소배출량을 분석해 보았다. 상업업무로의 이동은 모형 1인 고밀복합형이 용도복합으로 인해 주거지와의 수평적 이동거리는 0이다. 반대로 가장 많은 배출량을 보인 모형은 혼합형이다.

초등학교 등 교육시설과 공공청사 등도 용도복합과 외곽지역 기능배치에 따른 이동거리에 기인하여 탄소배출량이 산정되었다.

용도 전반적으로는 모형 4인 선형이 배출량이 가장 적고, 모형 6인 혼합형이 가장 많은 배출량을 보이고 있다.

- (상업업무) 모형 1(고밀복합형)이 탄소배출량이 가장 적고, 모형 6(혼합형)이 가장 많음 → 용도복합과 외곽지역 기능배치에 따른 교통에너지 영향

[표 4-27] 교통 부문 탄소배출량 산정 결과

(kgCO2 eq/년)	기본모형		모형 1 고밀복합형		모형 2 중앙집중형		모형 3 분산형		모형 4 선형		모형 5 방사형		모형 6 혼합형	
	600m 이하 제외	전체 포함	600m 이하 제외	전체 포함	600m 이하 제외	전체 포함	600m 이하 제외	전체 포함	600m 이하 제외	전체 포함	600m 이하 제외	전체 포함	600m 이하 제외	전체 포함
상업업무	345,213	544,441	0	137,302	126,701	388,247	157,590	408,177	82,604	264,218	266,472	363,057	485,412	598,811
초등학교	52,984	116,321	93,158	118,963	90,581	128,051	73,653	129,580	31,821	85,245	42,113	89,491	130,748	162,034
중학교	67,314	83,132	117,214	123,348	84,392	92,290	79,627	93,911	61,988	78,664	51,989	68,247	88,260	96,360
고등학교	68,867	84,004	117,090	123,224	68,924	85,185	66,548	81,486	62,970	78,589	69,980	82,356	67,768	83,500
공공청사 1	61,152	81,235	91,537	95,836	67,398	76,610	106,325	111,817	45,875	55,795	69,900	82,251	105,069	122,660
공공청사 2	54,552	75,002	91,684	95,983	56,477	67,288	42,769	69,842	34,247	47,358	61,055	71,763	55,326	97,313
공공청사 3	54,552	75,002	91,537	95,836	32,792	54,358	43,302	69,948	23,744	42,686	55,428	69,781	110,658	129,326
공공청사 4	61,152	81,235	91,840	96,104	41,000	56,052	102,286	108,889	25,923	43,260	64,630	73,766	-	-
공공청사 5	-	-	-	-	38,280	57,723	-	-	42,480	53,234	-	-	-	-
공공청사 6	-	-	-	-	-	-	-	-	55,819	65,263	-	-	-	-
총 계	765,75	1,140,372	694,059	886,597	606,545	1,005,806	672,100	1,073,649	467,472	814,312	681,567	900,713	1,043,241	1,290,003

출처: 연구진 작성.

- (초등학교) 모형 4(선형)가 가장 적고, 모형 6(혼합형)이 가장 많음
- (중학교) 모형 5(방사형)가 가장 적고, 모형 1(고밀복합형)이 가장 많음 → 학교와 공공청사도 입체 복합화 필요
- (고등학교) 모형 4(선형)가 가장 적고, 모형 1(고밀복합형)이 가장 많음
- (공공청사) 대부분 모형 4가 탄소배출량이 가장 적고, 모형 6과 모형 1, 모형 3이 배출량이 높은 수준

(3) 건물 부문 탄소배출량 산정 결과

건물에너지 사용에 따른 배출량 산정 결과로 모형 1(고밀복합형)이 가장 적게 나타났고, 모형 4(선형)가 가장 배출량이 높은 것으로 분석되었다. 이는 동일한 연면적에서 건물에너지 사용량이 높은 주거형태의 면적을 줄임으로써 탄소배출량을 저감시킬 수 있는 관계에 기인한다.

예를 들어 모형 1은 에너지 사용량이 낮은 공동주택 비율이 높은 대신, 에너지 사용량이 높은 단독주택과 상업업무 면적이 최소화됨으로써 건물부문 탄소배출량이 가장 적게 산정되었다.

- (건물에너지 사용에 따른 배출량) 모형 1 → 모형 2 → 모형 3 → 기본 모형 → 모형 6 → 모형 5 → 모형 4 순으로 적게 나타남
- 동일한 연면적에서 건물에너지 사용량이 높은 주거형태의 면적을 줄임으로써 탄소배출량을 저감시킬 수 있음
- 모형 1은 에너지 사용량이 낮은 공동주택 비율이 높은 대신, 에너지 사용량

[표 4-28] 건물 부문 탄소배출량 산정 결과

	건물에너지 사용량 (kgCO2eq/㎡년)	기본모형	모형 1 고밀복합형	모형 2 중앙집중형	모형 3 분산형	모형 4 선형	모형 5 방사형	모형 6 혼합형
공동주택	47.2	17,923,796.3	19,525,160.5	19,055,406.6	17,939,489.5	15,918,275.3	16,512,737.8	17,131,122.5
단독주택	55.7	1,890,064.5	-	554,448.6	1,871,542.0	4,257,165.9	3,555,518.2	2,825,646.9
상업업무	61.6	2,954,095.4	2,461,752.7	2,954,100.1	2,954,093.2	2,954,089.8	2,954,104.0	2,954,102.3
교육시설	37.3	1,194,843.8	1,194,846.1	1,194,844.6	1,194,849.9	1,194,845.7	1,194,837.0	1,194,837.0
공공청사	49.8	1,592,741.2	1,990,931.8	1,592,746.3	1,592,738.0	1,592,739.5	1,592,732.1	1,592,730.3
탄소배출량 계 (kgCO2eq/년)		25,555,541.2	25,172,691.1	25,351,546.2	25,552,712.5	25,917,116.2	25,809,929.1	25,698,439.0

출처: 연구진 작성.

이 높은 단독주택과 상업업무 면적이 최소화됨으로써 건물부문 탄소배출량을 낮추는 구조

(4) 건물 신재생에너지 생산을 통한 탄소 저감량 산정 결과

본 연구에서는 생활권 내에서 공간계획을 통해 통제 가능한 탄소흡수원으로 공원녹지를 통한 탄소흡수와 건물 옥상부에 태양광발전시설을 설치함으로써 전기에너지 소비 저감을 통한 탄수배출 저감량을 계산식에 포함하고 있다.

건물 신재생에너지 생산은 설치공간인 옥상면적에 비례하기 때문에 건폐면적이 큰 저밀 주거의 비율이 높을수록 생산량에 유리한 구조가 된다. 이에 따라 모형 4(선형)가 가장 탄소 저감량이 크고, 모형 1(고밀복합형)이 탄소 저감량이 가장 작게 결과가 나타났다.

생활권 공간에서 신재생에너지 생산을 통한 탄소배출 저감 전략은 교통, 건물 등에서의 기본적인 배출량을 최소화하고, 이에 더하여 탄소중립 목표 달성을 위해 부가적으로 추진해야 하는 사항으로, 이러한 저감 전략이 강하게 요구될 시에는 건축물 형태도 건폐율이 낮은 고층형에서 건폐율이 높은 저층형으로 유도하는 것이 필요하다.

- 건물 신재생에너지 생산은 옥상면적에 비례 → 건폐면적이 큰 저밀 주거 비율이 높을수록 유리
- 모형 4(선형) → 모형 6(혼합형) → 기본 모형 → 모형 5(방사형) → 모형 2(중앙집중형) → 모형 3(분산형) → 모형 1(고밀복합형) 순
- (탄소 저감량) 건폐면적과 신재생 생산량에 비례하여 산출
- 건물부문의 신재생에너지 생산을 통한 탄소배출 저감을 위해서는 고밀압축 형태보다는 저층으로 분산된 형태로 개발 필요
- 신재생에너지 발전 조건: PV 발전량(kWh/㎡) = 0.223 / 설치가능면적비

[표 4-29] 건물 신재생에너지 생산에 따른 탄소배출량 산정 결과

	기본모형	모형 1 고밀복합형	모형 2 중앙집중형	모형 3 분산형	모형 4 선형	모형 5 방사형	모형 6 혼합형
건폐면적 (지붕면적)	267,221	68,932	216,379	214,630	323,186	265,136	322,276
신재생 생산량 (kWh/년)	8,781,739	2,265,315	7,110,901	7,053,435	10,620,921	8,713,224	10,591,033
탄소 저감량 (kgCO2eq/년)	4,030,818	1,039,780	3,263,904	3,237,527	4,875,003	3,999,370	4,861,284

출처: 연구진 작성.

율 = 0.25 / 일조확보비율 = 0.5 / 일일발전시간 = 3.4 / 순발전율 = 0.95

(5) 공원녹지를 통한 탄소흡수량 산정 결과

생활권 공간에서 공원녹지 확보를 통한 탄소 흡수는 유일한 수단이기는 하지만 그리 높은 수준의 흡수능을 가지는 것은 아니다. 그럼에도 불구하고 도시 및 생활권 공간에서는 쾌적한 주거환경을 위해 공원녹지가 필수적으로 조성되어야 한다. 이러한 측면을 고려하여 탄소중립 생활권 계획을 위해 적절한 공원녹지의 확보와 배치가 요구된다.

탄소 흡수량은 공원녹지와 건물부지 내 오픈스페이스의 면적과 비례한다. 그리하여 건폐면적이 작은 압축고밀의 건축물 형태일수록 공원녹지 면적 확보에 유리하다.

분석 결과, 고밀복합형인 모형 1의 탄소흡수량이 가장 많았고, 탄소흡수원 면적이 가장 작은 모형 6(혼합형)이 가장 흡수량이 적었다.

공간 구성 원리 상으로 볼 때, 건물부지 내 오픈스페이스 면적은 건폐면적과 부지면적에 동시에 영향을 받는데, 부지면적이 클수록 공원녹지 면적은 협소해지기 때문에 공간 계획 시 이러한 요소들을 종합적으로 고려하여야 한다.

- 탄소 흡수량은 공원녹지 면적, 건물부지 내 오픈스페이스 면적과 비례 → 압축고밀 형태일수록 공원녹지 면적 확보에 유리
- 모형 1(고밀복합형) → 모형 2(중앙집중형) → 모형 3(분산형) → 모형 4(선형) → 기본 모형 → 모형 5(방사형) → 모형 6(혼합형) 순
- 공간 구성 원리 상 건물부지 내 오픈스페이스 면적은 공원녹지 면적과 건폐면적에 반비례
- 모형 6(혼합형)의 경우 공원녹지 면적이 가장 작고, 건폐 면적이 크기 때문에 탄소 흡수원 확보에 불리

[표 4-30] 공원녹지를 통한 탄소흡수량 산정 결과

	기본모형	모형 1 고밀복합형	모형 2 중앙집중형	모형 3 분산형	모형 4 선형	모형 5 방사형	모형 6 혼합형	탄소흡수 계수
공원녹지 면적(㎡)	313,632	748,800	489,660	422,800	323,706	311,344	152,100	0.8kg CO2/년
건물부지 내 오픈스페이스 면적(㎡)	551,179	375,368	500,658	510,770	566,880	530,675	587,091	
탄소흡수원 계(㎡)	864,811	1,124,168	990,318	933,570	890,586	842,019	739,191	
탄소 흡수량 (kgCO2eq/년)	691,849	899,335	792,254	746,856	712,469	673,615	591,353	

출처: 연구진 작성.

4) 결과 해석 및 논의

모형별, 그리고 부문별 탄소배출량에 대한 결과들을 앞서 제시하였고, 이에 대한 해석과 시사점들을 논의하고자 한다.

□ 부문별 배출량 비중

생활권 내에서 발생하는 배출량 부문에서는 건물 부문에서 발생하는 탄소배출량이 절대적인 비중을 차지함을 알 수 있다. 건물부문 배출량 다음으로는 건물 신재생 생산을 통한 탄소저감량이 크고, 마지막으로 공원녹지·오픈스페이스에서의 흡수량과 교통부문에서의 배출량은 유사한 비중을 나타내었다.

생활권은 주거중심의 공간이며 주거를 지원하는 공공시설과 판매시설들이 주요한 건물 용도이다. 생활권의 탄소배출 인벤토리 구조는 국가 전체의 인벤토리에 비해 건물에서의 배출량이 대부분을 차지하는 단순한 면을 고려하여야 한다. 수송부문은 국가 전체에서 13.7%의 비중을 차지하지만, 생활권 내에서 교통부문에서의 배출량은 미미할 수 밖에 없는 구조이다.

□ 밀도를 고려한 입지 선정

생활권 내에서도 밀도는 차등화되는데, 일반적으로 중앙이나 중심지 주변으로는 고밀 주거가, 외곽지역으로는 단독주택 등 저밀주거를 배치한다. 만일 인구가 많은 주거지역과 목적통행에 따른 이동거리가 멀어진다면 배출량 차이는 커질 것이다.

이렇듯 교통부문은 목적통행별 이동거리와 이동량이 중요한 요인이며, 이동거리가 짧은 지역에 인구밀도를 높게 설정하고 토지이용을 배치하는 것이 중요하겠다.

- 교통부문은 목적통행별 이동거리와 이동량이 중요한 요인이며, 이동거리가 짧은 지역에 인구밀도를 높게 설정하고 토지이용을 배치하는 것이 중요

□ 에너지사용량이 낮은 건물용도

생활권 내 건물에너지 사용량은 에너지 사용량이 높고 낮은 건물 용도의 배분을 어떻게 하느냐에 따라 달라진다. 에너지사용량의 대부분을 차지하는 주거용도의 경우 에너지 사용 원단위가 낮은 공동주택이 유리하기 때문에, 건물 에너지 사용량에 대한 저감 전략이 필요할 시에는 건물용도의 배분이 고려되어야 한다.

- 건물에너지 사용량은 용도 배분에 따라 차등화되며, 주거용도는 에너지사용 원단위가 낮은 공동주택이 유리

□ 건물 신재생 발전을 통한 탄소중립 전략

건물의 신재생에너지 중 태양광 발전은 건축면적이 커질수록 증가하기 때문에, 건물부문에서의 충분한 태양광 발전을 통한 에너지 자립률을 제고하고 탄소중립 목표를 달성하기 위해서는 무조건적인 압축고밀 개발보다는 건축면적이 넓은 유럽식의 저층형 도시형태와 적절한 조화가 이뤄져야 함을 시사한다.

- 탄소중립 목표를 달성하기 위해서는 건폐율이 낮은 초고층 건축물의 도입과 함께 건축면적이 넓은 유럽식의 저층형 도시형태와 적절한 조화가 이뤄져야 함

□ 탄소흡수원 확보를 통한 생활권 환경 조성

앞서 공원녹지 부문 탄소흡수량 부문에서 언급한 바와 같이, 공원녹지 면적이 커지면 건물부지가 줄어들기 때문에 오픈스페이스 면적도 줄어들게 된다. 그러나, 건폐면적이 낮은 고밀압축 개발을 통해 건물부지내 오픈스페이스 면적의 감소를 상쇄시킬 수 있어 이를 흡수원 확보를 위한 전략으로 활용할 필요가 있다.

- 공원녹지 면적이 커지면 건물부지 내 오픈스페이스는 줄어들게 되나, 고밀압축 개발을 통해 흡수원 최대화 가능

배출량 비중	▪ 건물 부문에서 발생하는 탄소배출량이 절대적인 비중 차지 ▪ 건물부문 배출량 → 건물 신재생 생산을 통한 탄소저감 → 공원녹지·오픈스페이스, 교통부문 배출량 비중 순
밀도 고려 입지 선정	▪ 교통부문은 목적통행별 이동거리와 이동량이 중요한 요인이며, 이동거리가 짧은 지역에 인구밀도를 높게 설정하고 토지이용을 배치하는 것이 중요
건물용도 배분	▪ 건물에너지 사용량은 용도 배분에 따라 차등화되며, 주거용도는 에너지사용 원단위가 낮은 공동주택이 유리
건물 신재생 발전	▪ 건물의 신재생에너지 중 태양광 발전은 건축면적이 커질수록 증가하기 때문에, 탄소중립 목표를 달성하기 위해서는 맹목적인 압축고밀 개발보다는 건축면적이 넓은 유럽형 도시형태와 적절한 조화가 이뤄져야 함
탄소흡수원 확보	▪ 공원녹지 면적이 커지면 건물부지 내 오픈스페이스는 줄어들게 되나, 고밀압축 개발을 통해 흡수원 최대화 가능

[그림 4-8] 탄소배출량 산정 결과 해석
출처: 연구진 작성.

4. 탄소중립을 위한 생활권 공간계획 최적화 모형

1) 최적화 모형 개발 개요 및 산식

본 연구에서는 생활권 탄소중립 공간계획 요소들을 기반으로 배출량을 최소화할 수 있는 모형(Optimization Model)을 제안하고자 한다. 모형은 설정된 조건을 기반으로 교통부문, 건물부문, 공원녹지부문의 탄소배출의 총합을 최소화하는 공간 배치를 도출한다.

최적화 모형의 원리는 교통 부문은 이동거리에 따른 탄소배출량, 건물 부문은 주거 유형별 배출 원단위와 건폐면적에 따른 신재생에너지 발전량, 공원녹지 부문은 공원녹지와 대지내 오픈스페이스 면적에서의 탄소흡수 원단위에 따른 흡수량을 고려하여 이들의 총합을 최소화하는 모형이다.

〈수식 23〉은 교통 부문, 건물 부문, 공원녹지 부문의 탄소배출량 및 흡수량의 총합을 최소화하는 목적함수이다. 토지이용 배치에 관한 제약조건으로, 〈수식 24〉는 배치된 주거모듈의 총 수용인구가 전체 계획인구 P이상이어야 함을 의미한다. 〈수식 25〉는 각각의 모듈은 주거 모듈 또는 비주거 모듈 가운데 하나의 토지이용을 가질수 있음을 나타내는 제약식이며, 〈수식 26〉은 비주거 모듈의 용도별 개수는 지정된 개수를 만족해야 함을 나타낸다. 〈수식 27〉은 공원녹지의 최소비율을 정해주기 위한 제약식이다.

이동에 관한 제약조건으로 〈수식 28〉은 각 주거모듈에서 비주거 모듈의 용도별로 이동이 가능하게 해야 함을 의미하며, 〈수식 29〉는 그리드 j에 비주거 모듈 k가 배치되었을 때만 주거모듈 i에서 그리드 j로 이동하여 용도 k의 이용이 가능함을 나타내는 제약식이다.

2) 최적화 모형 조건

분석을 위한 모형은 전체 규모를 동일하게 설정하였고, 주거지 밀도 차등화를 위해 저밀-중밀-고밀 주거를 설정하였다. 저밀 주거는 생활권 외곽의 단독주택 주거지를, 중·고밀 주거는 생활권 중심지인 상업업무 주변에 입지하는 공동주택 주거지를 염두하여 개발 규모를 설정하였다.

[표 4-31] 최적화 모형 도출을 위한 산식 및 계수

Minimize	$\sum(\alpha p_n x_{in} z_{ijk} r_k d_{ij} + x_{in} c_n) - \beta(M - \sum(x_{in} + y_{ik}))$ 〈수식 24〉 • 교통 부문, 건물 부문, 공원녹지 부문의 탄소배출량 및 흡수량의 총합을 최소화하는 목적함수
Subject to	$P - \sum p_n x_{in} \leq 0$ 〈수식 25〉 • 배치된 주거모듈의 총 수용인구가 전체 계획인구 P 이상 $\sum x_{in} + \sum y_{ik} \leq 0$ 〈수식 26〉 • 각각의 모듈은 주거 모듈 또는 비주거 모듈 가운데 하나의 토지이용을 가질수 있음 $f_k - \sum y_{ik} \leq 0$ 〈수식 27〉 • 비주거 모듈의 용도별 개수는 지정된 개수를 만족해야 함 $M - \sum_{i,n,k}(x_{in} + y_{ik}) > G$ 〈수식 28〉 • 공원녹지 면적의 최소 비율을 설정함 $\sum x_{in} - \sum z_{ijk} \leq 0$ 〈수식 29〉 • 각 주거모듈에서 비주거 모듈의 용도별로 이동이 가능하게 해야 함 $z_{ijk} - y_{jk} \leq 0$ 〈수식 30〉 • 그리드 j에 비주거 모듈 k가 배치되었을 때만 주거모듈 i에서 그리드 j로 이동하여 용도 k의 이용이 가능함
계수	x_{in} 그리드i에 주거모듈n의 입지 여부 d_{ij} 그리드i에서 j까지의 이동거리 y_{ik} 그리드i에 비주거모듈k의 입지여부 z_{ijk} 주거모듈 그리드i에서 그리드 j의 비주거모듈k로 이동 유무 f_k 비주거모듈k의 필요 그리드수 r_k 비주거용도 k에 대한 이동 비율 p_n 모듈n의 인구 α 인구 1명당 단위 거리 이동에 따른 탄소배출량 c_n 모듈n의 건물부분 탄소배출량 (배출량-재생에너지 발전 및 부지내 공원을 통한 흡수량) β 공원 모듈당 탄소흡수량 M 전체 모듈 개수 P 계획 인구

[표 4-32] 탄소배출 최적화 모형의 주거 유형별 조건

	저밀 주거 모듈	중밀 주거 모듈	고밀 주거 모듈
건폐율 (%)	50	30	15
용적률 (%)	50	150	250
건축면적 (㎡)	9,000	5,400	2,700
연면적 (㎡)	9,000	27,000	45,000
비건축면적 (㎡)	9,000	12,600	15,300

출처: 연구진 작성.

블록 형태는 속성 최적화 분석 과정의 효율성을 위해 공간계획 모형의 블록 형태인 8×8 형태에서 5×5 블록 형태로 간결화하였으나, 변수에 따른 최적화 모형 제시에는 큰 무리가 없는 것으로 사료된다.

3) 최적화 시나리오 설정

최적화 모형 산정을 위해 교통 부문과 공원녹지 부문에 대한 시나리오를 설정하였다.

□ 교통 부문 시나리오

교통 부문 시나리오는 공간계획 모형과 동일하게 목적통행에 대한 이동거리가 600m 이하일 경우에는 탄소배출이 발생하지 않는 조건을 고려한 시나리오다. 이를 통해 보행권이 우수한 생활권과 그렇지 않은 생활권의 조건에 따른 최적화 모형의 토지이용 배치를 비교해볼 수 있다.

이동 거리 산정 방식은 그리드 중심에서 중심으로 맨하탄 거리 산정 방식을 적용하였으며, 목적통행 용도에 따라 이동 비율을 계획 모형과 동일하게 설정하였다.

- 모든 이동은 그리드 중심에서 중심으로 맨하탄 거리를 통해 이동하는 것으로 가정
- 상업업무, 공공시설, 학교에 대한 이동 비율 설정: 0.5 / 0.25 / 0.25
- (시나리오 1) 자동차 의존도가 높아 모든 이동에 있어 자동차를 이용하여 탄소를 배출하는 시나리오
- (시나리오 2) 보행환경이 잘 구축되어 600미터 이하의 거리는 보행·자전거로 이동하여 탄소를 배출하지 않는 시나리오

□ 공원녹지 부문 시나리오

두 번째로는 최소 공원녹지 비율을 설정하여 공원녹지를 확보하는 시나리오다. 생활권

공간계획 모형의 경우 약 20% 정도를 적정 공원녹지비율로 설정하고 모형을 디자인하였다. 그리하여 최적화 모형에서도 생활권 주거환경에 필요한 공원녹지 면적을 20% 이상 확보하는 조건을 설정하고 모형을 도출하였다.

이러한 공원녹지 부문 시나리오는 교통 부문 시나리오 1, 2를 적용하여 최적화 모형을 도출하였다.

[표 4-33] 최적화 모형의 부문별 시나리오

	교통 부문	공원녹지 부문
시나리오 1	•보행환경이 잘 구축되어 600미터 이하의 거리는 보행·자전거로 이동하여 탄소를 배출하지 않는 시나리오	•교통 부문 시나리오 1에서 공원녹지율 최소 20%이상 조건을 설정한 시나리오
시나리오 2	•자동차 의존도가 높아 모든 이동에 있어 자동차를 이용하여 탄소를 배출하는 시나리오	•교통 부문 시나리오 2에서 공원녹지율 최소 20%이상 조건을 설정한 시나리오

출처: 연구진 작성.

4) 최적화 모형 결과

(1) 교통부문 시나리오를 적용한 최적화 모형 결과

□ 시나리오 1: 이동거리 600m 이하 보행·자전거 이용

600m 이하 거리를 보행·자전거로 선택함으로써 탄소배출을 최소화하는 시나리오 1을 적용한 최적화 모형의 총 탄소배출량은 16,134,826 kgCO2eq/년으로 앞서 분석한 7가지의 공간계획 모형들의 최소 배출량 모형인 모형 4(선형)의 20,797,116 kgCO2eq/년에 비하여 약 77.6% 수준까지 탄소배출을 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

교통부문의 배출은 모형 4의 467,472 kgCO2eq/년에서 162,865 kgCO2eq/년으로 34.8%의 비율로 크게 감소하였다. 이러한 시나리오 1의 토지이용 배치 특성은 상업·업무를 생활권 중심에 배치하고, 그 주변으로 고밀주거와 저밀주거가 혼합하여 배치가 이루어졌다.

600미터 이하는 탄소배출이 발생하지 않기 때문에 상업용도까지 도보로 이동할 수 있는 지역에 고밀주거를 배치하고 그 주변으로 저밀주거로 배치하는 결과가 도출되었다. 배치 가능한 개수가 많은 공공시설은 도보로 이동이 가능한 주거모듈이 많도록 분산되어 배치되어 있음을 볼 수 있다.

- (배출량 비교) 탄소배출이 가장 적은 모형 4(선형) 대비 77.6% 수준으로 감소
- (교통부문 배출) 모형 4의 467,472→162,865 kgCO2eq/년으로 크게 감소(34.8%)
- (배치 특성) 블록 수가 적은 상업 용도는 접근성을 고려하여 중앙에 배치하고 그 보행권 내에 고밀 주거 배치, 공공용도는 분산시켜 배치

□ 시나리오 2: 모든 이동거리를 자동차로 이용

생활권 내 모든 이동을 자동차를 이용하는 시나리오 2를 적용할 경우에는 시나리오 1과 비교하여 570,028 kgCO2eq/년으로 약 3.5% 증가하게 된다. 이는 순수하게 교통부문에서 증가하는 배출량이 반영된 것이다.

시나리오 2의 토지이용 배치 특성은 시나리오 1과 달리 생활권 중심에 입지하는 상업업무 주변으로 고밀주거가 배치된다는 것이다. 이에 따라 중밀과 저밀주거는 공원녹지와 함께 도시 외곽으로 배치된다.

공공시설과 학교는 시나리오 1과 배치와 동일하게 도보권 내에 도달이 가능한 주거모듈을 늘릴 수 있도록 분산배치되는 결과를 나타냈다.

- (배출량 비교) 시나리오 1 대비 약 3.5% 탄소 배출량 증가(순수하게 교통부문 증가량이 반영)
- (배치 특성) 상업시설의 주변으로 고밀 주거 배치 및 공공시설 분산 배치

(2) 공원녹지부문 시나리오를 적용한 최적화 모형 결과

□ 시나리오 1: 이동거리 600m 이하 보행·자전거 이용 + 공원녹지율 20% 이상

교통부문 시나리오 1에서 공원녹지 비율을 20% 이상으로 조건 설정 시 탄소배출량은 17,127,422 kgCO2eq/년으로 공원녹지 비율이 없는 조건과 비교하여 약 6.2%가 증가하였다.

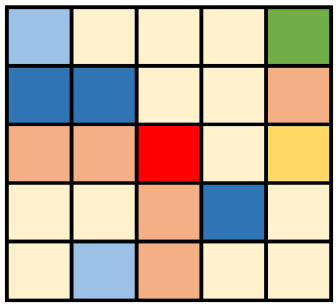
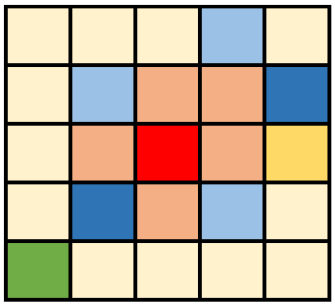
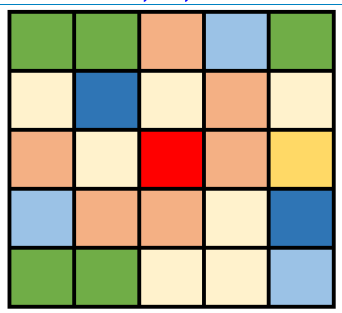
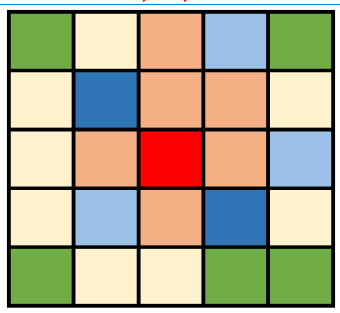
교통부문이 103,897 kgCO2eq/년이 감소하였고, 반면 공원녹지부문이 147,456 kgCO2eq/년이 증가하였다. 교통부문의 감소는 주거블록의 감소가 주요한 원인이 되고, 공원녹지부문의 배출 증가는 공원녹지 면적의 확대가 기인한다.

공원녹지율 20% 조건을 적용한 시나리오 1의 토지이용 배치 특성은 교통부문 시나리오 1의 배치 특성과 큰 차이를 보이지 않는다. 고밀주거와 중·저밀주거가 고르게 분포하고,

공공시설과 학교가 주거지역과 어우러져 배치가 되었다. 이동거리에 영향을 미치지 않는 공원녹지는 생활권 외곽으로 배치된다.

- (배출량 비교) 교통부문 시나리오 1과 비교하여 약 6.2% 탄소 배출량 증가 (교통부문 배출량은 감소, 공원녹지부문 배출량은 증가)
- (배치 특성) 교통부문 시나리오 1과 유사, 이동거리에 영향을 미치지 않는 공원녹지가 가장 외곽으로 배치

[표 4-34] 시나리오별 최적화 모형 결과 비교

	시나리오 1 600m 이하는 보행·자전거 이동	시나리오 2 모든 이동을 화석연료 교통수단 이용	범례/단위
교통부문 시나리오 적용 최적화 모형			
교통 부문 (배출)	162,865	732,893	kgCO2eq/년
건물 부문 (배출-저감)	16,008,825	16,008,825	
공원녹지 부문 (흡수)	36,864	36,864	
총 계	16,134,826	16,704,854	
공원녹지 부문 시나리오 적용 최적화 모형 (공원녹지율 20% 이상)			
교통 부문 (배출)	58,968	685,157	kgCO2eq/년
건물 부문 (배출-저감)	17,252,773	17,252,773	
공원녹지 부문 (흡수)	184,320	184,320	
총 계	17,127,422	17,753,610	

출처: 연구진 작성.

□ 시나리오 2: 모든 이동거리를 자동차로 이용 + 공원녹지율 20% 이상

교통부문 시나리오 2에서 공원녹지 비율을 20% 이상으로 조건 설정 시 탄소배출량은 17,753,610 kgCO2eq/년으로 공원녹지부문 시나리오 1 대비 약 3.7% 증가하였다. 이 역시 순수하게 교통부문 배출량 증가분이 반영된 결과다.

공원녹지부문의 시나리오 2의 토지이용 배치 특성은 교통부문의 시나리오 1과 2의 특성 차이와 유사하게 생활권 중심의 상업업무 주변으로 고밀주거가 배치되고 있다. 그리고 중밀주거가 사라지고 저밀주거가 외곽으로 배치된다.

- (배출량 비교) 교통부문 시나리오 1과 비교하여 약 3.7% 탄소 배출량 증가 (순수하게 교통부문 증가량이 반영)
- (배치 특성) 교통부문 시나리오 2와 유사, 중밀주거가 사라지고 저밀주거가 외곽으로 배치

제5장 결론 및 제언

1. 탄소중립을 위한 생활권 공간계획 수립 방향
2. 연구의 한계 및 의의

1. 탄소중립을 위한 생활권 공간계획 수립 방향

본 연구에서는 국토 및 지역 단위, 건물 단위에서의 탄소중립 전략과 더불어서 주요 도시계획 및 개발 단위이자 인간의 거주공간이 주를 이루는 생활권 규모를 대상으로 탄소중립을 위해 필요한 공간계획 수립 방향을 제시하는 것이 주요 목적이다.

연구에서는 수행한 생활권 공간계획 모형들에 대한 계획요소를 적용한 탄소배출량을 산정하고, 배출량을 최소화할 수 있는 최적화 모형을 개발함으로써 연구 결과를 해석하고 시사점들을 논하였다.

본 결론에서는 연구 결과와 시사점을 토대로 생활권 단위에서 탄소중립을 위한 공간계획 수립을 위한 방향에 대해 제시하고자 한다.

1) 생활권 탄소중립을 위한 공간계획 수립 방향

□ 핵심 기능 배치 방향

생활권 내에는 주거 시설, 상업·업무 시설, 교육 시설, 공공 시설의 기능이 주요하게 포함되는 데, 이중 핵심 기능으로서의 역할은 주거지역에서 이동하는 목적통행 비율이 높은 상업·업무 시설이라고 판단할 수 있다. 그리하여 이러한 핵심 기능을 생활권 중심에 위치하도록 하여 가장 이동거리가 짧은 공간 구조가 형성될 수 있도록 계획이 이루어져야 한다.

- 생활권 내 이동량이 많은 상업·업무 등 용도를 생활권 중심에 배치

□ 주거 배치 방향

생활권 내 토지이용의 대부분을 차지하는 주거용도의 부지는 생활권 중심에 위치하는 상업·업무 주변으로 고밀주거를 우선적으로 인접시킨다. 이는 앞서 논의한 것처럼 인구 이동량이 많은 부지일수록 상업·업무와 가까이 배치시킴으로서 교통부문 탄소배출량을 줄이기 위한 것이다.

더불어서, 고밀주거의 배치와 함께 신재생 생산을 통한 탄소저감 효과를 고려할 때 건축면적이 넓은 중·저밀주거도 적절히 배분하여 세대수를 확보하는 방안을 강구하도록 한다.

- 상업·업무 주변으로 고밀주거와 일부 저밀주거 배치
- 건물에서의 신재생 생산을 통한 탄소저감 효과를 고려하여 고밀주거 외에도 중·저밀주거를 적절히 배분

□ 학교 및 공공시설 배치 방향

학교와 공공시설도 주거부지와 인접하여 교통부문 탄소배출량을 저감하도록 배치한다. 학교와 공공시설은 상업·업무와 달리 블록 수가 많기 때문에 개별 시설들을 주거지역 주변으로 분산시키는 배치 방향을 설정하도록 한다.

- 학교와 공공시설은 주거지역 주변으로 분산시켜 이동거리를 줄이도록 배치

□ 공원녹지 확보 방향

공원녹지는 목적통행에 따른 이동이 없기 때문에 주거지역에 인접할 필요가 없다. 또한, 공원녹지의 탄소흡수원으로서의 기능은 건물부지를 활용한 탄소배출량 저감량에 비해 효과가 낮을 수 있다. 그리하여 공원녹지는 생활권 외곽에 분포하거나 저밀주거지로 대체될 수 있다.

반면, 공원녹지의 확보는 단순히 탄소흡수원의 역할보다는 쾌적한 주거환경을 위해 필수 불가결한 토지이용으로서 타 용도로 대체되지 않고 최소한의 비율로 토지이용을 구성하도록 하는 철학이 필요하다.

- 공원녹지의 확보는 단순히 탄소흡수원의 역할보다는 도시공간에서 공원녹지의 순기능을 위해 반드시 필요한 토지이용으로서의 역할을 우선 고려하는 공간 계획 필요

핵심 기능 배치	▪ 생활권 내 이동량이 많은 상업·업무 등 용도를 생활권 중심에 배치
주거 배치	▪ 상업·업무 주변으로 고밀주거와 일부 저밀주거 배치 ▪ 건물에서의 신재생 생산을 통한 탄소저감 효과를 고려하여 고밀주거 외에도 중·저밀주거를 적절히 배분
학교 및 공공시설	▪ 학교와 공공시설은 주거지역 주변으로 분산시켜 이동거리를 줄이도록 배치
공원녹지 확보	▪ 공원녹지의 확보는 단순히 탄소흡수원의 역할보다는 도시공간에서 공원녹지의 순기능을 위해 반도시 필요한 토지이용으로서의 역할을 우선 고려하는 공간 계획 필요

[그림 5-1] 연구 결과에 따른 생활권 탄소중립 공간계획 수립 방향
출처: 연구진 작성.

2) 탄소중립 지구단위계획 도입 방향 제안

탄소중립 생활권 공간계획을 정책적으로 추진하기 위하여 지구단위계획제도에 반영하는 방향을 제시하였다. 세부적인 도입 방향은 아래와 같다.

□ 생활권 규모 지구단위계획 수립 시 탄소중립 모델 적용

지구단위계획은 초기 수립 시 도시·건축 통합계획 방식의 마스터플랜 용역이 수행되며 MP+엔지니어링+설계사무소가 통합하여 지구단위계획의 방향과 토지이용계획을 마련하도록 한다.

이러한 토지이용계획 결정 과정에서부터 탄소중립을 위한 계획 요소들을 대상지 여건에 맞춰 적절히 조합하고, 대안 검토와 시뮬레이션을 통해 최소화된 계획안을 작성하도록 한다.

□ 지구단위계획 시행지침에 탄소중립 원칙 제시

지구단위계획은 시행지침, 결정조서, 결정도면으로 구성되며, 이중 시행지침 제1편 총론에 지구단위계획의 목적, 범위, 구성, 기본원칙, 계획 방향 등을 수록하도록 한다.

계획 방향 부분에 탄소중립을 위한 원칙으로서 '오픈스페이스에서의 배출량과 흡수량, 신재생에너지 생산량 확보를 위한 적절한 압축적 개발, 이동거리 최소화' 등을 제시하도록 한다.

□ 이동거리 최소화를 위한 수평적 토지이용 분배 및 수직적 용도용적제 활용

생활권 내 이동거리 최소화를 위해 상업·업무용도를 중심에 배치하고 주거용도가 공공시설 및 학교시설 등 비주거용도의 배치 사이에 위치하는 토지이용 배치를 권장하도록 한다.

압축 수준이 증가하면 건물 신재생에너지 생산량의 감소로 탄소배출 저감에 불리한 바, 용도용적제를 활용하여 이동거리를 줄이기 위한 용도혼합화를 꾀하되, 높이 제한 등을 통해 건폐면적을 확보하는 방향을 제안한다.

□ 신재생에너지 생산량 및 에너지 자립률 기준 제시를 통한 탄소중립 수단 마련

지구단위계획 시행지침 일반 규정사항으로 '생활권의 탄소중립과 에너지자립에 관한 사항'을 추가하고 용지별 성능기준을 명시하는 등 건축물과 오픈스페이스를 활용한 탄소중립 수단을 마련하도록 한다.

단, 민간부문에 대한 규제로 사업성과 계획 실현성이 낮아지는 점을 극복하기 위해 자립률에 따른 건축기준 완화 등 인센티브를 병행하여 제시한다.

[표 5-1] 「지구단위계획 수립 지침」 개정 방향

기존	개정안
제1장 총칙 제2절 지구단위계획의 성격 1-2-6. 지구단위계획은 인간과 자연이 공존하는 환경친화적 환경을 조성하고 지속가능한 개발 또는 관리가 가능하도록 하기 위한 계획이다.	제1장 총칙 제2절 지구단위계획의 성격 1-2-6. 지구단위계획은 인간과 자연이 공존하는 환경친화적 환경을 조성하고 지속가능한 개발 또는 관리를 통해 탄소중립을 실현하기 위한 계획이다.
제2장 지구단위계획구역의 지정 및 지구단위계획의 수립 제3절 지구단위계획 수립의 일반원칙 2-3-4. 쾌적하고 편리한 환경이 조성되도록 지역현황 및 성장잠재력을 고려하여 적절한 개발밀도가 유지되도록 하는 등 환경친화적으로 계획을 수립하여야 하며, ~~~	제2장 지구단위계획구역의 지정 및 지구단위계획의 수립 제3절 지구단위계획 수립의 일반원칙 2-3-4. 쾌적하고 편리한 환경이 조성되도록 지역현황 및 성장잠재력을 고려하여 적절한 개발밀도가 유지되도록 하는 등 환경친화적으로 계획을 수립하여야 하며, 탄소중립 목표 달성을 위해 요구되는 계획 방향과 원칙들을 제시하도록 한다.
제3장 지구단위계획 수립기준(공통) 제1절 일반원칙 3-1-1. 지구단위계획은 다음 각 호의 사항을 고려하여 수립한다. ~~~ (신설)	제3장 지구단위계획 수립기준(공통) 제1절 일반원칙 3-1-1. 지구단위계획은 다음 각 호의 사항을 고려하여 수립한다. ~~~ (9) 탄소 배출량 저감 및 탄소 흡수원 확보
제9절 건폐율·용적률·높이 등 건축물의 규모 3-9-2. 건폐율은 다음을 고려하여 계획한다. ~~~ (신설)	제9절 건폐율·용적률·높이 등 건축물의 규모 3-9-2. 건폐율은 다음을 고려하여 계획한다. ~~~ (3) 건물에 신재생에너지 발전시설을 설치할 필요가 있을 때에는 건폐율을 완화할 수 있다.

기존	개정안
제11절 건축물의 형태와 색채 3-11-4. 가로변 건축물의 지붕형태에 대한 통일성을 부여할 필요가 있거나 옥상공간을 정원화하여 녹지공간을 보완할 필요가 있는 경우에는 지붕의 형태와 옥상부분의 처리기준을 제시한다.	제11절 건축물의 형태와 색채 3-11-4. 가로변 건축물의 지붕형태에 대한 통일성을 부여할 필요가 있거나 옥상공간을 정원화하여 녹지공간을 보완할 필요가 있는 경우, 옥상부에 신재생에너지 발전시설을 설치할 필요가 있는 경우에는 지붕의 형태와 옥상부분의 처리기준을 제시한다.
제13절 공개공지 등 대지내 공지 3-13-1. 다음의 경우에는 건축선 지정 등을 통하여 대지내 공지를 확보하는 방안을 검토한다. ~~~ (신설)	제13절 공개공지 등 대지내 공지 3-13-1. 다음의 경우에는 건축선 지정 등을 통하여 대지내 공지를 확보하는 방안을 검토한다. ~~~ (6) 신재생에너지 발전시설 설치를 위해 옥외공간을 확보할 필요가 있는 경우
제14절 공원 및 녹지 3-14-1. 공원 및 녹지를 계획하는 경우에는 다음 사항을 고려한다. ~~~ (신설)	제14절 공원 및 녹지 3-14-1. 공원 및 녹지를 계획하는 경우에는 다음 사항을 고려한다. ~~~ (6) 공원 또는 녹지는 신재생에너지 발전시설 설치를 고려하여 계획하여야 한다.
제4장 주거형 지구단위계획 수립기준 제1절 토지이용계획 ~~~ (신설)	제4장 주거형 지구단위계획 수립기준 제1절 토지이용계획 ~~~ 4-1-11. 생활권 내 이동거리 최소화를 위해 주거와 상업·공공·교육 등 비주거시설을 인접하여 배치시키고, 고밀 개발시 입체적 토지이용으로 계획하도록 한다.

출처: 연구진 작성

2. 연구의 한계 및 의의

1) 연구 한계

본 연구에서는 생활권에서 탄소중립을 실현하기 위한 공간계획 방향을 제시하기 위해 가상의 모형들을 개발하고 조건과 시나리오를 적용한 시뮬레이션 방법론을 활용하면서 도출된 몇 가지 연구의 한계를 가진다.

□ 가상 공간 대상 연구 범위의 한계

첫째, 가상의 공간을 대상으로 하는 모형 개발은 배출량 산정을 위한 가정 및 조건, 활용하는 계수에 따라 배출량과 흡수량의 산정 결과가 달라질 수 있는 한계를 가진다.

□ 철도, 광역 통과교통이 교통부문 배출량에서 미반영

생활권 공간 내에서의 배출량을 한정함에 따라 철도 등 광역 교통과 간선도로를 이용하는 통과교통 등이 배제되어 교통부문 배출량이 국가나 지역의 탄소배출 비율에 비해 적어지는 차이가 발생하였다.

2) 연구의 의의 및 후속 과제

□ 연구의 의의

앞에서 제기한 한계점에도 불구하고, 본 연구의 내용과 분석 결과에 대한 의의는 분명하다. 첫째, 생활권 탄소배출량 산정을 위한 기틀과 체계를 구축함으로써 방법론을 확립하였다는 점이다. 그리하여 추후 공간 단위 탄소배출량 산정이 필요하거나 연구 수행 시 본 연구의 틀을 활용할 수 있다.

둘째, 탄소배출 최적화 모형을 제시하고 시각화함으로써 도시개발 및 계획 사업 시 모형 결과를 적용하거나 참고할 수 있는 결과물을 도출하였다는 점이다.

마지막으로, 지구단위계획 제도의 적용 방향을 제시함으로써 정책화에 기여할 수 있다. 「도시·군기본계획 수립지침」이 탄소중립 방향으로 개정된 것처럼, 지구단위계획의 탄소중립으로의 전환을 위해 본 연구에서 제시한 수립 방향이 제도화되어야 한다.

□ 후속 과제

본 연구의 수행 과정에서 발굴된 후속 과제는 다음과 같다. 첫째, 다양한 공간 규모로 확장된 탄소중립 계획모형 개발 연구가 수행되어야 한다. 본 연구에서 다루지 못한 광역 교통과 통과 교통에 따른 배출량을 반영할 수 있는 규모의 탄소중립 공간계획 모형 연구를 통해 실효성을 제고할 수 있다.

둘째, 건물부문 탄소중립 실현을 위한 후속 연구가 긴요하다. 생활권 공간 범위에서는 건물부문에서의 탄소 배출량이 거의 대부분을 차지하여 가장 중요한 배출원으로 강조되고 있다. 또한, 도시공간 내 생활권 등 인간 활동이 많고 도시 기능이 집약되어 있는 범위일수록 건물부문의 에너지 자립 등 감축 전략이 중요하기 때문에 건물부문 탄소중립 실현을 위한 심도있는 연구 수행이 이루어져야 한다.

마지막으로는 실측 데이터를 활용한 탄소중립 공간계획 연구의 필요성이다. 본 연구의 가장 큰 한계는 가상의 공간을 대상으로 하였다는 점이다. 그리하여 본 연구에서 정립한 인벤토리 구축 및 배출량 분석 방법을 기반으로 향후에는 도시 공간에서 실측 가능한 데이터를 활용한 배출량 산정 등 보다 실효적인 연구를 모색할 필요가 있다.

참고문헌

「광명 유통단지 도시개발사업 실시계획인가 및 지형도면 고시」 (시행 2020.05.20.)

「계룡 하대실지구 실시계획 인가 및 지형도면 고시」 (시행 2021.10.21.)

「남양주 양정역세권 도시개발구역 지정 고시」 (시행 2019.03.28.).

「당진 수청2지구 도시개발구역 실시계획 인가 및 지형도면 고시」 (시행 2021.12.16.)

「대구연경 공공주택지구 지구계획 변경(7차) 승인 및 지형도면 고시」 (시행 2019.09.02.)

「부산 에코델타 스마트시티 시행계획(안)」 (시행 2018.12.26.)

「부천종합운동장 일원 역세권 융복합개발사업 실시계획」 (시행 2021.11.01.)

「서울특별시고시 제2010-339호, 마곡 도시개발구역 개발계획변경수립, 실시계획변경인가 고시」

「수원당수 공공주택지구 지정 변경(3차) 및 지구계획 변경(2차)[고시문]」 (시행 2021.09.29.)

「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」 (시행 2022.1.1.)

「제2기 수도권신도시 건설안내」 (시행 2017.09.15.)

「제2기 지방신도시 건설안내」 (시행 2017.02.28.)

「진천 성석지구 도시개발사업 구역지정(변경), 개발계획 수립 및 지형도면 고시」 (시행 2021.03.12.)

「충주 안림지구 도시개발사업 개발계획 수립 및 지형도면 고시」 (시행 2021.01.08.)

「충청남도(내포) 신도시 개발사업에 따른 개발계획 및 실시계획」 (시행 2020.09.29.)

관계부처 합동(2021). 2050 탄소중립 시나리오안. 10월 18일자 보도자료.

경남연합일보(2020). 경남도, 2000가구 주택용 태양광 설치 지원. http://www.gnynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=322283 (접속일: 2022.09.16.)

국토교통부(2018). 부산 에코델타 스마트시티 시행계획(안).

국토교통부(2021). 수원당수 공공주택지구 지정 변경(3차) 및 지구계획 변경(2차)[고시문].

국토교통부(2021). 2050년 탄소중립 달성을 위한 녹색건축 활성화 방안 발표. 6월 2일자 보도자료.

국토교통부(2021). 지역(공간) 단위 탄소중립 실현을 위한 기반 마련. 도시계획 수립 및 도시개발 추진시 공간적 탄소중립 해법 검토: 30일부터 도시개발·군기본계획수립지침·도시개발업무지침 개정안 시행. 12월 28일자 보도자료.

국토교통부(2021). 국토교통 탄소중립 로드맵. 12월자 보도자료.

국토교통부(2022). 우리 지역 탄소중립수준을 한눈에, 탄소공간지도 만든다. 9월 20일자 보도자료.

국토연구원(2009). 국토용어해설 근린주구. https://library.krihs.re.kr/bbs/content/2_431 (접속일: 2022.4.28.)

국토연구원(2006). 월간국토 용어풀이.

교육과학기술부(2010). 시나리오 기법을 적용한 과학기술미래예측 모델개발 "에너지 효율화 분야의 전략적 예측 시범적용". 2월 4일자 보도자료.

구미경·양우현(2016). 도시 저층주거지의 생활권 중심 분석. 한국주거학회논문집, 27(6), 19-29.

권영식(2016). 태양열 과열방지 기술을 적용한 태양열·태양광 융복합 시스템 상용화. 미래창조과학부.

그린투게더(n.d.). 세부용도 건물에너지 사용량 통계. 2021년 기준. https://www.greentogether.go.kr/sta/sta010101.do (접속일: 2022.4.28.)

기상청(2019). IPCC, 온실가스 배출·흡수량 산정 지침 개정. 5월 13일자 보도자료.

김도형·박승규 (2019). 대전광역시의 지속가능한 공원녹지 정책방향. 한국지방행정연구원.

김승남·조상규·김영현(2014). 용도지역제도를 고려한 건물부문 온실가스 배출량 관리정책 연구. 건축도시공간연구소.

김원주(2010). 공원녹지분야의 탄소흡수원 화보 및 탄소저감방안. 서울시정개발연구원.

김유민·이주형(2013). 탄소중립 녹색도시 구현을 위한 계획지표 설정에 관한 연구. 한국생태환경건축학회논문집. 13(2).

김익(2020). 국내IP 환경동향보고: 넷 제로(Net-zero)의 의미와 활용. 환경부•한국환경산업기술원.

김인현·오규식·정승현(2011). 도시공간 계획요소를 이용한 이산화탄소 배출량 산정 모델 개발: 서울시를 사례로. 한국공간정보학회. 19(6).

김찬호·황희돈(2008). 신도시 근린생활권 계획 기준에 관한 연구. 국토계획. 43(4).

김동현·이수재·이명진·서혜정(2013). 기후변화 적응형 공간계획방법의 개발과 모의적용 연구(I). 한국환경정책·평가연구원.

김석택 (2010). 도심옥상녹화를 통한 온실가스 저감방안. 울산발전연구원

김영환·박상준(2014). 도시재생사업에서 저탄소 녹색 계획요소 활용 및 탄소저감 효과에 관한 연구–청주시 도심부를 중심으로. 한국도시설계학회. 15(1).

김태균·홍기만·백바름·우왕희·홍영석·조중래(2014). 통과교통량을 고려한 이산화탄소 배출량 추정 방안 연구. 대한교통학회. 32(4).

김홍렬·조세환 (2015). 한·일간 주민참여형 돗히공원 조성·관리 유형 및 특성 비교 분석.

국토계획. 50(6).

김현·안영환·유태종·유승직(2020). 국가 온실가스 감축 정책과 기술의 효과 연구: 도로 교통부문 CO2 배출량 및 감축 잠재량 산정 방법론. 기술혁신학회지, 23(2).

노경식·왕광익·유선철·민경주·이건원·김세용·권용우(2013). 탄소저감 도시계획 수립을 위한 모델구상 및 적용방안 연구. 국토지리학회지. 47(1).

남상성·황병용·최한림(2009). 시나리오 플래닝의 한국적 적용모델 개발: 에너지 효율화 미래예측 사례를 중심으로. 한국과학기술기획평가원.

대한석유협회(2021). 사용연료별 자동차 등록대수.

박경아·윤장호·장원재·박진영·김경욱·송병근·강소정(2014). 행정중심복합도시 복합환승센터 개발 기본구상 연구. 한국교통연구원.

박경진(2017). 전과정평가(LCA)에 기반한 교통수단의 환경성 분석: 호남고속철도의 온실가스 배출을 중심으로. 환경정책. 25(3).

박소현(2022). 스마트시티 글로벌 저널 2022: 스마트시티를 통한 도시구조 혁신 및 탄소중립사회 실현 방안. 국토교통과학기술진흥원.

박은진·강규이(2009). 도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안. 경기개발연구원.

박재홍·고재경 (2008). 탄소중립도시 구현을 위한 계획적 접근방안. 경기개발연구원. CEO Report.

박종순·안예현·윤은주·홍나은(2021). 탄소중립도시 실현을 위한 국토구상. 국토연구원. 국토 통권 479호.

박효석·오규식·이상헌(2014). 도시 그린인프라 확충에 따른 탄소저감 증진효과 분석: 서울시를 대상으로. 도시행정학보. 27(4).

배은석·오규식(2015). 전과정평가에 기반한 서울시 아파트의 이산화탄소 배출량분석. 국토계획. 50(3).

백혜선(2008). 국내 주거지 생활권 계획개념 및 사례분석. 가정과삶의질학회 학술발표대회 자료집.

부산광역시(2021). 부산 먼저 미래로, '15분 도시'로 갑니다. https://www.busan.go.kr/news/totalnews01/view?dataNo=65484&gugun=Next / (접속일: 2022.5.26.)

부산광역시(2021). 15분 도시란?. https://www.busan.go.kr/15vision (접속일: 2022.5.26.)

산림청(2018). 도시림 탄소흡수와 다원편익 증진을 위한 조성 및 평가기술 개발.

서민호·정진규·이백진(2011). 녹색도시 구현을 위한 대중교통회랑 구축방안 연구. 국토연구원.

서승연·이경환(2013). 탄소저감 설계기법을 적용한 도시재생모델 구축 및 적용 효과 분석 –대전광역시 서구 용문동 재건축사업 구역을 대상으로–. 대한건축학회 논문집. 29(9).

서울도시계획포털(2021). 마곡 도시개발사업.

서울특별시(2015). 2030 서울플랜.

서울특별시(2019). 2030 서울생활권계획 권역생활권 계획–도심권.

성선용·남성우·박종순(2020). 바람길 도입을 위한 국토·환경 계획 법·제도 연계방안. 국토정책브리프

성형곤·박지형·이짓헌·박정욱·이승호·강지원(2010). 압축도시(Compact City) 중심의

미래도시 개발전략과 기본구상 – 미래 교통기술의 적용과 3차원 공간 활용을 중심으로-. 한국교통연구원.

손세형·Yonglin Xue(2019). 스마트 도시공간 및 시설물 통합운영관리 모델 개발. 성균관대학교 산학협력단.

시흥신문(2021). '광명시흥지구' 주택건설용지 307만9천㎡에 7만호 건립 계획. http://www.shnews.net/news/articleView.html?idxno=39093/ (접속일: 2022.10.01.)

안예현·윤은주(2021). 국토·도시 차원의 탄소중립 정책 방향과 과제. 국토연구원. 국토이슈리포트 46호.

양재섭·남선희(2015). 서울시 생활권계획 수립과정 모니터링. 서울연구원.

오병록(2012). 생활권 이론과 생활권계획 실태 분석 연구: 도시기본계획에서의 생활권계획을 중심으로. 서울도시연구. 13(4).

오성훈·김성준·허재석(2019). 2018 서울시 도로다이어트 현황과 평가. 건축공간연구원.

왕광익·유선철·노경식·민경주(2013). 탄소중립 친환경도시 조성 추진계획 연구. 국토연구원.

왕광익·노경식(2014). 친환경 에너지타운 추진을 위한 국내외 추진현황 검토 및 정책과제 연구. 국토연구원.

왕광익(2016). 제로에너지 스마트도시 조성방안 연구: 세종시 건설지역 일부 생활권을 중심으로. 국토연구원.

유광흠·조상규·오성훈·성은영(2009). 친환경 근린개발을 위한 도시설계 기법연구. 건축도시공간연구소.

유광흠·서선영(2012). 도시공간개선사업의 저탄소 계획요소 적용에 관한 연구. 건축도시공간연구소.

유정민·김정아(2020). 2050 서울시 탄소배출 제로를 위한 비전과 추진전략. 서울연구원.

윤서연(2022). 디지털 전환 시대, 시민 생활 변화에 따른 도시공간의 변화와 전망. 국토연구원. 국토 490호.

이강희·채창우(2008). 공동주택의 라이프사이클 에너지와 이산화탄소 추정에 관한 연구. 한국주거학회논문집. 19(4).

이명식·이강복 (2011). 저탄소 기술 계획 요소를 활용한 탄소 중립 단지 조성에 대한 연구. 대한건축학회 논문집 – 계획 및 설계. 27(10).

이명식(2022). 탄소중립 계획요소를 활용한 단지계획. 대한건축학회. 건축. 66(1).

이명주(2017). 한국형 제로에너지 공동주택의 최적화모형 연구. 세종대학교 박사학위논문.

이명주(2020). 기후위기시대의 건축물 중심 제로에너지도시. 건축공간연구원. 건축과 도시공간. Vol.40.

이상문(2013). 저탄소 도시계획 요소별 탄소감축량 산정방법 연구. 환경논총 51권.

이상문(2012), 탄소중립도시, 조경.

이성룡·이외회·장윤배·고재경·이동훈(2011). 경기도 저탄소 녹색도시 계획기준 연구. 경기개발연구원.

이성우(2009). 미국의 광역경제권과 생활권: 한국의 광역경제권 및 농촌지역 생활권 구축에 대한 함의. 한국농촌경제연구원.

이은엽(2022). 탄소중립을 위한 그린인프라 조성방안. 대한건축학회. 건축. 66(1).

이재준·최석환(2009). 기후변화 대응을 위한 지구단위계획 차원에서의 탄소완화 계획요소 개발에 관한 연구. 국토계획. 44(4).

이재준·김도영(2011). 신도시내 저탄소 녹색시범마을 시나리오별 탄소감축률 분석. 국토계획. 46(6).

이재준·이상문·전영옥·변병설·허준(2004). 신행정수도 생태도시 조성방안. 한국토지공사

임윤택·손세형·남광우·김한준·최일식(2016). U-City 공간계획 및 설계기술 개발. 국토교통부·국토교통과학기술진흥원.

장지인·남성우·박진규·신수민(2018). 스마트/제로에너지 도시계획 전략 연구 – 계획기법을 중심으로 -. 소소한 행복연구 중간보고자료.

장지인·황세원(2022). 스마트시티 전략을 통한 탄소중립 건축도시디자인. 대한건축학회. 건축. 66(1)

장한두·손창희(2020). 도시·주거환경의 문제인식과 생활권관리 방향에 관한 연구. 주거환경(한국주거환경학회논문집), 18(3).

정민선·조희선·변병설(2015). 도시특성요소가 온실가스 배출에 미치는 영향 – 수도권 지역을 중심으로. 국토지리학회지. 49(3).

정혜진(2011). 도시계획분야의 온실가스 인벤토리 구축 방향. 환경논총 50권.

정희윤·김선웅(2011). 새로운 도시계획 수립기법 개발 및 서울시 적용방안 연구:시나리오형 계획기법 중심으로. 서울시정개발연구원.

조상규·이진민(2010). 저탄소 에너지절약형 공동주택 디자인을 위한 정책방향 연구. 건축도식공간연구소.

조상규·김영현·박성남·남성우·윤호선·문보람·이제승(2021). 스마트도시 기술 및 서비스 특성을 고려한 공간계획 방향 연구. 건축공간연구원.

조성용·최진희(2018). 생활권과 지역중심 교육공간의 역할 변화에 관한 연구. 청소년시설환경. 16(1).

조수현(2016). 전과정평가 방법론을 이용한 건물의 전과정 탄소 배출량 평가 및 분석에 관한 연구. 한국건축시공학회 학술발표대회 논문집. 16(1).

증권플러스 인사이트(2021). http://insight.stockplus.com/articles/5523/ (접속일: 2022.10.01.)

최솔이·함보영·송철호·박은빈·김지원·이우균(2020). 국내 정주지 온실가스 인벤토리 산정을 위한 활동자료 구축 방법 개발 및 시범 적용 연구: 인천 서구를 중심으로. 한국기후변화학회. 11(3).

최정만·오대석·김형도·최기선·유영찬(2013). 노후도심 지역의 건축물 탄소배출량 산출에 관한 연구. 대한건축학회 논문집. 29(12).

탄소중립녹색성장위원회(n.d.). 탄소중립이란. https://www.2050cnc.go.kr/base/contents/view?contentsNo=9&menuLevel=2&menuNo=11 (접속일: 2022.03.18.)

투데이에너지(2010). 소형풍력발전 시장 진단. http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=51804(접속일: 2022.09.16.)

한국교통안전공단(n.d.). 교통부문 온실가스관리 시스템. 연료별 에너지소비량(2018년 기준).

한국방송뉴스(2022). 서울시, 디지털 대전환시대 미래공간전략 `2040 서울도시기본계획` 발표. http://www.ikbn.news/news/article.html?no=137697/ (접속일:

2022.03.18.)

한국지식재산연구원(n.d.). ‘탄소중립과 지식재산’ IP 학술정보 네트워크 분석자료 소개. https://www.kiip.re.kr/webzine/2112/KIIP2112_focus02.jsp/ (접속일: 2022.3.18.)

한국환경공단(2017). 지자체 온실가스 배출량 산정지침(Ver.4.1).

한봉호·곽정인·박석철·허지연(2014). 도시녹지 네트워크 강화를 위한 가로녹지 조성계획 연구. 한국환경생태학회. 28(2).

한웅용·전은진·손영주(2021). 탄소중립 달성을 위한 정부 연구개발 정책 및 투자방향. 한국과학기술기획평가원.

환경부(2022). 지역 중심의 탄소중립 이행을 위한 「탄소중립 그린도시」사업 공모 가이드라인(안).

행정중심복합도시건설청(2022), 제62차 행복도시건설사업 개발계획 변경.

행정중심복합도시건설청(n.d.). 지구단위계획. https://naacc.go.kr/WEB/contents/N1010400000.do/ (접속일: 2022.10.01.)

행정중심복합도시건설청(2021). 행복도시 2040 탄소중립 첫걸음 내딛다. 9월 9일자 보도자료.

행정중심복합도시건설청(2021). 친환경 저탄소 에너지도시 건설방안 연구 용역.

홍세기·함보영·최솔이·김휘진·하람·박수경·이우균(2021). 정주지 부문 온실가스 인벤토리 산정을 위한 공간 범위별 이산화탄소 흡수량 비교 분석 - 서울시를 대상으로 -. 한국기후변화학회. 12(6). 767-776.

Abi Kallushi, Jeffrey Harris, John Miller, Matt Johnston, Ab Ream(n.d.). Think Bigger: Net-Zero Communities. 2012 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.

Andres Duany·Robert Steuteville(2021). Defining the 15-minute city. Public Square. https://www.cnu.org/publicsquare/2021/02/08/defining-15-minute-city/ (접속일; 2022.10.19.)

Bagheri, M., M. N. Mladenović, I. Kosonen, and J. K. Nurminen(2020). Analysis of potential shift to low-carbon urban travel modes: A computational framework based on high-resolution smartphone data. Sustainability. 12. 5901.

BAW(2019). Barcelona Superblocks. https://barcelonarchitecturewalks.com/barcelona-superblocks/(접속일: 2022.10.21)

Brand, C., Dons, E., Anaya-Boig, E., Avila-Palencia, I., Clark, A., de Nazelle, A., Gascon, M., Gaupp-Berghausen, M., Gerike, R., Götschi, T., Iacorossi, F., Kahlmeier, S., Laeremans, M., Nieuwenhuijsen, M.J., Pablo Orjuela, J., Racioppi, F., Raser, E., Rojas-Rueda, D., Standaert, A., Stigell, E., Sulikova, S., Wegener, S. and Luc Int Panis(2021). The climate change mitigation effects of daily active travel in cities. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 93, 102764.

City of Yokohama(2019). まちづくり方針の実現4-2. https://www.city.yokohama.lg.jp/tsuzuki/kurashi/machizukuri_kankyo/machizukuri/naritachi/jitsugenshosai/nt-4-2.html/ (접속일: 2022.10.20.)

DA PAN·LEI TAO·KANG SUN·LEVI M.VOLSTON·DAVID J.MILLER·TONG ZHU·YUE QIN·YAN ZHANG·DENISE L.MAUZERALL·MARK A.ZONDLO(2020). Methane emissions from natural gas vehicles in China. Nature Communications. 11, 1–10.

Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development(n.d.). Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable. https://sdgs.un.org/goals/goal11/ (접속일: 2022.10.19.)

Energyproforma(n.d.). CLEAN ENERGY CITY PATTERNS. http://energyproforma.mit.edu/webtool3/learning(접속일: 2022.10.01.)

European Commission(2022). Tool to support the calculation of GHG emission avoidance from CCS projects under the Innovation Fund (v3.1).

FELIX CREUTZIG·PATRICK JOCHEM·OREANE Y. EDELENBOSCH·LINUS MATTAUCH·DETLEF P. VAN VUUREN·DAVID MCCOLLUM·JAN MINX(2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation? Science, 350, 911–912.

FELIX CREUTIZIG·GIOVANNI BAIOCCHI·ROBERT BIERKANDT·PETER-PAUL PICHLER·KAREN C.SETO(2015). Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. Proceedings of the national academy of sciences, 6283–6288.

FELIX CREUTZIG(2016). Evolving Narratives of Low-Carbon Futures in Transportation. Transport Reviews. 36(3). 341-360.

IGES(2019). Sustainable Lifestyles Policy and Practice: Challenges and Way Forward - Annex: Case Studies.

Ivanova, D., J. Barrett, D. Wiedenhofer, B. Macura, M. Callaghan, and F. Creutzig(2020). Quantifying the potential for climate change mitigation of consumption options. Environmental Research Letters, 15, 093001.

GS칼텍스(2021). IEA 넷제로 보고서의 우리나라 탄소중립 이행 시사점. GS칼텐스 미디어허브. https://gscaltexmediahub.com/energy/column-netzero-korea-carbonneutral/ (접속일: 2022.10.19.)

IndiaSpend(2020). Why India Can't Match China's Net-Zero Emissions Pledge. https://www.indiaspend.com/why-india-cant-match-chinas-net-zero-emissions-pledge/(접속일: 2022.10.20)

IPCC(2022). Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers, AR6 WG III.

Jan Gehl(2020). 사람을 위한 도시. 국토연구원.

Keall, M. D., C. Shaw, R. Chapman, and P. Howden-Chapman(2018). Reductions in carbon dioxide emissions from an intervention to promote cycling and walking: A case study from New Zealand. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 65, 687–696.

KDI 경제정보센터(2022). 탄소중립 – CCUS편. https://eiec.kdi.re.kr/publish/reviewView.do?idx=106&ridx=11&fcode=000020003600001/ (접속일: 2022.10.01.)

Lin, Xiaohu et al(2018). Prediction of Life Cycle Carbon Emissions of Sponge City Projects: A Case Study in Shanghai, China. Sustainability. 10(11).

Mark Watts(2022). Urban Transformation and Carbon Neutrality in Smart Cities, 스마트시티 글로벌 저널 2022 Smart City Top Agenda. 국토교통과학기술진흥원.

merca2(2017). SuperBlock: La propuesta del Ayuntamiento de Barcelona para ordenar el tráfico. https://www.merca2.es/2017/01/30/superblock-la-propuesta-barcelona-10094/(접속일: 2022.10.21.)

MIT(2012). Making the Clean Energy City in China: Year 2 Report.

NET ZERO 2050 Climate Foundation(n.d.). 넷제로 2050 기후재단: 넷제로란?. http://netzero2050.or.kr/theme/sam38/html/content01.php/ (접속일: 2022.10.01.)

Neves, A., and C. Brand(2019). Assessing the potential for carbon emissions savings from replacing short car trips with walking and cycling using a mixed GPS-travel diary approach. Transportation Research Part A: Policy and Practice. 123, 130-146.

packtpub(n.d.). Calculating the distance. https://subscription.packtpub.com/book/data/9781787121515/3/ch03lvl1sec33/calculating-the-distance(접속일: 2022.10.21)

RTPI(2021). NET ZERO TRANSPORT – The role of spatial planning and place-based solutions.

Scoppa, M., and Anabtawi, R.(2021). Connectivity in Superblock Street Networks: Measuring Distance, Directness, and the Diversity of Pedestrian Paths. Sustainability. 13(24).

South Pole(2021). A simple guide to climate neutral, net zero and climate positive. https://www.southpole.com/blog/guide-to-climate-neutral-net-zero-climate-positive(접속일: 2022.10.20.)

Stack Exchange(2020). https://earthscience.stackexchange.com/questions/19646/do-trees-capture-more-co2-during-a-fast-growth-stage(접속일: 2022.10.22)

The City Fix(2019). What Does "Net-Zero Emissions" Mean? 6 Common Questions, Answered. https://thecityfix.com/blog/net-zero-emissions-mean-6-common-questions-answered-kelly-levin-chantal-davis/ (접속일: 2022.10.20.)

treehugger8(n.d.). https://www.tree-hugger8.net/bjarke-ingels-group-and-toyota-are-building-wild-woven-and-wooden-city-future-4856873(접속일: 2022.10.21.)

UN(2019). Global Sustainable Development Report.

United States Environmental Protection Agency(2022). Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References. https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references (접속일: 2022.6.10.)

World Economic Forum(2021). Why renewables are the cornerstone of the global energy transition. https://www.weforum.org/agenda/2021/04/why-renewables-are-the-cornerstone-of-the-energy-transition/ (접속일: 2022.10.22)

Zahabi, S. A. H., A. Chang, L. F. Miranda-Moreno, and Z. Patterson(2016). Exploring the link between the neighborhood typologies, bicycle infrastructure and commuting cycling over time and the potential impact on commuter GHG emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 47, 89-103.

3기 신도시(n.d.). 토지이용계획. https://www.3기신도시.kr/kor/CMS/Contents/Contents.do?mCode=MN033 (접속일: 2022.10.21.)

A Study on Spatial Planning Model of Living Area Unit for Carbon-Neutral 2050

SUMMARY

Nam, Seongwoo
Kwon, Ohkyu
Moon, Boram

Chapter 1. Introduction

'Carbon neutrality' has been emphasized as a key global and national policy agenda and issues related to building and urban space for carbon neutral are emerging. The international community has recognized the seriousness of the climate change problem and has made efforts to adopt the Kyoto Protocol(1997) and the Paris Agreement(2015) to solve it. The Korean government has established 'the 2050 Carbon Neutral Roadmap' as a strategy to reduce greenhouse gases in buildings and urban spaces, and has been promoting various tasks for carbon neutral in buildings, transportation, land, cities, and overseas reduction by 2050.

In December 2021, the Ministry of Land, Infrastructure and Transport revised and implemented 'Guidelines for the Establishment of Basic Plans for Cities and Guns' and 'Guidelines for urban development' to realize carbon neutral at the regional and urban levels in the case of establishing 'Basic Plans for Cities and Guns' and an urban development plan.

As the importance of carbon emission management at the regional and urban levels increases, a carbon neutral strategy is needed for the space unit including individual buildings. Furthermore, it is necessary to prepare a spatial strategy according to the reorganization of the urban planning legislation. To this end, it is necessary to urgently conduct research to prepare a planned and designed alternative that combines urban planning and carbon neutral strategies.

As a major strategy for carbon neutral in architecture and urban space, this study aims to develop an optimized spatial planning model at the living area level and to present the direction of introduction and application when promoting urban planning and development projects. In detail, the study focused on finding ways to reduce and absorb carbon emissions in urban planning and design, developing a model to optimize carbon emission and absorption in living area unit, and proposing a direction to establish a district unit plan for carbon neutral.

In detail, the study focused on three major points; (1) finding ways to reduce and absorb carbon emissions in urban planning and design for living area unit space, (2) developing a model to optimize carbon emission and absorption in living space, and (3) proposing a direction to establish a district unit plan for carbon neutral.

Chapter 2. Concepts and Policies on Carbon Neutral in the Living Area Unit

In December 2020, the Korean government announced the "2050 Carbon Neutral Strategy". The vision of this strategy is from 'adaptive reduction' to 'proactive response', and three policy directions and ten tasks were presented. In addition, the Ministry of Land, Infrastructure and Transport announced the 'Carbon Neutral Roadmap for Land and Transport'. The roadmap specialized in the field of land and transportation is divided into buildings, transportation, national and urban infrastructure, and overseas reduction sectors. The ‘Guidelines for the Establishment of Basic Plans for Cities and Guns’ revised in December 2021 shall reflect the direction of carbon-neutral plans in sectoral plans such as spatial structure, transportation system, residential environment, parks and green areas. By planning sector, the planning directions are classified into 10 categories: spatial structure, land use, transportation plan, logistics plan, urban

maintenance, residential environment plan, atmospheric and water environment conservation, waste, energy, and park green plan.

The most fundamental means of promoting carbon neutral in land and cities at the macroscopic level is to design an efficient spatial structure and systematically apply detailed elements in each field. On the other hand, typical carbon-neutral space planning elements of the building unit at the microscopic level include passive energy buildings, zero energy buildings, and green remodeling that can save energy in the building. The carbon-neutral strategy can be implemented in a variety of spatial hierarchies, ranging from national to local(urban) to development project(new town) to living area unit(district) and building at the bottom.

However, it lacks knowledge and information to quantify the effects of carbon absorption and emission at the national and urban level, and it is difficult to quantify due to differences in carbon reduction effects depending on the size, industry, population composition, and lifestyle of the applied area. In other words, as the inventory is too large at the national and urban level, there are many parts that are difficult to manage comprehensively and realistically only with urban design. In addition, it is difficult to expect a carbon reduction effect above a certain level due to its size at the individual building unit. Accordingly, it is necessary to comprehensively consider the urban level while changing the perspective from the individual building unit to the concept of building group collection. It is necessary to prepare an empirical carbon-neutral policy and system that considers the increase in demand for new land use, changes in demand for commercial and business areas, changes in demand and functions of public infrastructure, and complexation of functions and uses of facilities in neighborhood dwellings.

Chapter 3. Building of Carbon Emissions Inventory in Living Area Unit and Planning Elements

In this study, among the various scales constituting the urban space, the path of emitting greenhouse gases from the living area unit was identified, and elements of living area space planning were discovered. In relation to the greenhouse gas emission path in urban

space, existing literature was investigated and organized to establish an inventory of the living area unit. In particular, inventory construction was considered as a process of inferring and linking planning elements for the creation of a carbon-neutral space derived later.

The results of a survey of documents that have built a carbon emission inventory for urban spaces are summarized as follows. First, listing energy sources consumed within the space range should take precedence over inventory construction. Second, the main sources of energy consumption can be organized into fossil fuels, electric energy, heating energy, water supply energy, and waste disposal. Third, the inventory of emissions from industrial processes or agriculture and forestry depends on the land use characteristics of the target site.

A planning element pool was formed by conducting literature studies and case studies to derive carbon-neutral space planning elements in the living area unit. Most of the existing discussions are organized in the form of discourse at the urban level, but in this study, planning factors were summarized focusing on the effectiveness at the living area unit. In order to derive carbon-neutral planning elements, an advisory group of experts in related fields such as cities, architecture, landscaping, transportation, and energy was formed to collect opinions. Through this, elements of carbon-neutral space planning such as space structure and land use, transportation plan, park green area plan, building and energy plan were derived.

Chapter 4. Development of Carbon-Neutral Space Planning Model for Living Area Unit

In order to develop a carbon-neutral spatial planning model for living area unit, the scale of living areas suitable for research purposes was established, and related cases were reviewed to create a spatial planning scenario according to the characteristics of planning elements. A spatial planning model applied with a planning element scenario and an optimization model were developed.

First, in order to select the size of the living area unit, the size of the living area unit of National Agency for Administrative City and the size of the walking-centered living area unit were compared and analyzed. In this study, the scale of the basic model of the

living area unit is set at a radius of 600m, a 10-minute walk away.

Through literature research, the analysis data of carbon emissions and reduction rates in the living area unit were summarized, and the land use ratio in the living area unit was derived through the analysis of the district unit plan and the urban development plan. Through the low-carbon green pilot village plan and the National Agency for Administrative City low-carbon energy city plan, the plan to reduce carbon emissions in living space unit, the district unit plan, and the land use of urban development projects were investigated and analyzed.

Based on this, a scenario was prepared to develop an alternative model for comparative analysis of carbon emissions according to the space plan of the living area unit. Scenarios were categorized through quantitative changes based on the basic model developed earlier for spatial planning elements. As previously derived, the planning factors for the model are (1) to develop a comprehensive and compressed use of land to compact the living area unit, (2) to minimize the travel distance within the living area unit as a transportation sector, and (3) to expand the park green area to secure carbon absorption sources. A spatial planning model was developed by constructing a scenario that reflects changes in spatial planning through a combination of planning factors.

Finally, an optimization model that can minimize emissions was proposed based on the elements of carbon-neutral space planning in the living area unit. Based on the set conditions, the model derived a spatial arrangement that minimizes the sum of carbon emissions in the transportation sector, the building sector, and the park green sector.

Chapter 5. Conclusions and Recommendations

The direction of establishing a space plan for the living area unit for carbon neutral summarized through this study is as follows.

- To place commercial and business districts with a large amount of movement at the center of the living area unit
- To place high-density residential and some low-density residential areas around commercial and business districts
- To place proper distribution of medium and low-density dwellings in addition to high-density dwellings in consideration of the effect of

reducing carbon through renewable energy production in buildings

- To distribute schools and public facilities around residential areas to reduce travel distance
- To require a space plan that prioritizes the role of land use necessary for the net function of park green areas in urban spaces rather than simply the role of carbon absorption sources

In order to promote the carbon-neutral living area unit space plan in policy, the application of the carbon-neutral model is required when establishing a district unit plan for the size of the living area unit. In addition, it is necessary to present the principle of carbon neutral in the implementation guidelines of the district unit plan. Furthermore, horizontal land use distribution and vertical floor space system can be used to minimize the distance traveled within the living area unit. In addition, it is necessary to reflect the carbon-neutral space plan per living area unit in the district unit planning system, such as preparing carbon-neutral means by presenting standards for renewable energy production and energy independence.

This study developed virtual models and used a simulation methodology with conditions and scenarios to suggest a spatial planning direction to realize carbon neutrality in the living area unit. Although it has various significance, such as laying the foundation for calculating carbon emissions, visualizing carbon emission optimization models, and suggesting policy application plans, research based on actual data on various spatial scales, including building units, needs to be continued.

Keywords :

Carbon Neutral, Living Area, Spatial Planning, Optimization Model, District Unit Planning