

생애주기 관점에서의 노후계획도시 공동주택 재건축에 따른 탄소배출저감 정책 방안 연구

Carbon Emission Reduction Policies throughout the Lifecycle of Buildings for
Reconstructed Apartment Complex of Old New-town

김성준 Kim, Sungjoon

박성남 Park, Sungnam

최가윤 Choi, Gayoon

(a u r i

기본연구보고서 2024-6

생애주기 관점에서의 노후계획도시 공동주택 재건축에 따른 탄소배출저감 정책 방안 연구

Carbon Emission Reduction Policies throughout the Lifecycle of Buildings for Reconstructed Apartment Complex of Old New-town

지은이 김성준, 박성남, 최가운

펴낸곳 건축공간연구원

출판등록 제2015-41호 (등록일 '08. 02. 18.)

인쇄 2024년 10월 31일, 발행: 2024년 10월 31일

주소 세종특별자치시 가림로 143, 8층

전화 044-417-9600

팩스 044-417-9608

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

가격: 25,000원, ISBN: 979-11-5659-473-4

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

연구진

연구책임	김성준 부연구위원
연구진	박성남 연구위원 최가운 연구원
외부연구진	강상균 중앙대학교 교수 김형규 홍익대학교 교수
연구보조원	신슬기 서울대학교 연구원

연구심의위원	염철호 선임연구위원 조영진 선임연구위원 성은영 연구위원 이승일 서울시립대학교 교수 정주철 부산대학교 교수
연구자문위원	권오인 한국부동산원 부장 김동현 부산대학교 교수 김유민 녹색도시연구소 소장 김은정 계명대학교 교수 김정인 중앙대학교 교수 김주일 한동대학교 교수 김태현 한국환경연구원 연구위원 민현준 잘그린건축연구소 소장 박민희 한국에너지기술연구원 책임연구원 박종순 국토연구원 연구위원 박창석 한국환경연구원 선임연구위원 안예현 국토연구원 연구위원 오병철 광주기후에너지진흥원 실장 윤동근 연세대학교 교수 이윤희 대전세종연구원 책임연구위원 임준홍 충남연구원 선임연구위원 천정운 전북연구원 연구위원 추용욱 강원연구원 연구위원 허재성 국토교통부 사무관

제1장 서론

탄소중립은 전 세계적으로 중요한 화두로, 도시 분야에서는 지속가능한 도시로의 변화를 위해 탄소배출 저감을 위한 에너지효율 건축물의 활성화가 강조되고 있다. 우리나라도 「탄소중립 기본법」을 제정하고 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획을 수립하는 등 2050년까지 탄소중립과 제로에너지를 달성하기 위한 노력을 기울이고 있으나, 아직은 시작단계로서 선언적인 목표들이 중심이 되어 있으며 구체적인 대응방안은 부재한 상황이다.

이러한 시점에 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」에 따라 8-90년대에 지어진 신도시들의 대규모 재정비가 가능해졌으며, 첫 번째 사례로서 1기 신도시의 재건축이 임박한 지금이 노후계획도시들의 탄소중립도시로의 전환 가능성을 가늠하는 중요한 변곡점이 될 것으로 보인다. 노후계획도시들의 재정비가 지속가능성을 확보할 수 있도록 재정비의 시작에서부터 탄소중립도시를 달성하기 위한 전략, 원칙, 규제를 포함하는 단계적 로드맵 제시가 필요한 것이다.

공동주택의 재건축은 기존 건물의 해체부터 건설, 사용까지 이어지는 전 단계에서 이산화탄소를 배출하는 과정이다. 건축물을 사용할 때 발생하는 탄소배출 저감을 위하여 국토교통부에서 공공주택에 대한 제로에너지 인증을 의무화하는 등 기준을 강화하고 있지만 구체적인 실행 계획은 여전히 부족한 상황이다. 또한 「노후계획도시정비법」의 적용 대상에 포함되는 수많은 도시들의 건축 물량이 재건축될 경우를 생각해 본다면, 기존

건축물을 해체하고 새로운 건물을 건설하는 등 다른 생애주기 단계에서의 탄소 배출 저감 노력 또한 필요하다.

본 연구에서는 노후계획도시 공동주택의 재건축에 적용할 수 있는 탄소배출 저감요소를 선행연구 및 문헌검토를 통해 선정하고, 선도적 사례로서 1기 신도시인 분당신도시를 연구의 대상으로 하여 재건축 시 발생하는 생애주기 단계별 탄소배출량 및 에너지수요량, 선정된 탄소배출 저감요소들의 효과를 정량적으로 추정한다. 그리고 이를 통해 재건축 과정에서 노후계획도시가 탄소중립 도시로 전환되기 위한 실효성 있는 정책방향을 제시하고자 하였다.

제2장 탄소배출 저감 관련 문헌 검토 및 국내외 사례

2장에서는 노후계획도시의 재건축 과정에 적용할 탄소배출저감 계획요소 및 기술의 선정을 위해 관련된 문헌, 정책 및 법규, 국내외 사례 등을 검토하였다.

건축물에서 발생하는 탄소는 건축물을 사용하는 운영 단계에서 배출되는 운영탄소와 원자재 생산, 운송, 건축, 시공, 수선 및 폐기 과정에서 발생하는 내재탄소로 구분된다. 선행연구에 따르면 일반적으로 건축물의 전 생애 중 해체 단계에서 약 2-3%, 건설 단계에서 약 30%, 운영 단계에서 약 70%의 이산화탄소가 배출되므로, 운영탄소뿐만 아니라 내재탄소를 감축하려는 노력 또한 중요하다.

운영탄소를 감축하는 가장 중요한 수단 중 하나인 제로에너지건축물에서는 냉·난방 에너지요구량을 최소화하는 패시브 기술과 에너지소비량을 최소화하는 액티브 기술, 신·재생에너지 생산기술, 건물에너지 관리시스템 등 다양한 요소기술의 활용이 필요하다. 특히 신·재생에너지 생산은 에너지자립률을 높이는 데 필수적이며, 다양한 연구들에서 신·재생에너지 생산에 가장 활용도 및 경제성이 높은 방법으로 태양광발전을 제시하고 있다.

탄소배출 저감 관련 정책 및 법규를 살펴보면, 현재 정부는 「탄소중립기본법」, 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 기본계획에 건물부문 감축목표를 설정하고 있다. 「녹색건축물 조성 지원법」에서는 제로에너지 건축물 인증제 등을 명시하고 있으며, 재건축 건축물에는 제로에너지 건축물 5등급이 의무화 적용이 되고 있다. 「노후계획도시정비 및 지원에 관한 특별법」에서는 기본계획 수립 시 ‘저탄소 녹색도시로의 전환을 위한 추

진계획'과 '건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등 재활용 촉진계획'을 포함하여야 하며, '녹색건축 등 건축물 에너지효율화 계획'과 '건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등에 관한 계획'을 포함해야 함을 명시하고 있다.

또한 노후계획도시의 탄소배출 저감을 위해 벤치마킹 할 수 있는 관련 정책 및 기술, 계획기법을 살펴보았다. 국내외의 탄소배출 저감 관련 정책 중 친환경 건축물 인증 프로그램은 여러 국가에서 운영되고 있으며, 실제로 건물의 에너지소비량과 온실가스배출량을 줄이는 데에 효과가 있는 것으로 나타났다. 특히 건축물의 탄소배출과 관련된 해외의 정책은 크게 정부주도 정책, 정부 정책 기반 민간주도 프로그램, 정책을 강제할 수단으로서의 법안으로 구분된다. 정부주도 정책의 경우 직접적으로 탄소배출을 감축하도록 인센티브나 벌금을 부여하거나(영국), 인증 시스템의 기준을 충족하도록 하고 있으며(중국), 영국의 경우 정책의 대상이 대규모 에너지 집약적 조직으로 특정되어 있어 정책을 적용하거나 효과를 측정하기에 용이한 것으로 나타났다.

다음으로 사례 분석에서 도출된 기술 및 계획기법을 구분하고, 재건축 단지의 특성을 고려하여 재건축시 적용 가능한 기술을 선별하였다. 단지 스케일을 넘어서는 도시 단위의 계획기법, 물리적인 환경 조성 외의 계획기법은 제외하였고, 향후 재건축 단지에 적용할 필요성이 있다고 판단되는 계획기법은 포함시켰다. 선정된 계획기법은 신재생에너지 설비, 에너지 효율 건축물, 기후 변화 및 흡수원 확대, 자원순환, 관리 등이며, 여기에 포함되는 기술 등의 탄소 저감요소들의 효과 또한 여기에서 정리된 내용을 바탕으로 추정하였다.

제3장 분당신도시 재건축 생애주기별 탄소 배출량 추정

3장에서는 1기 신도시인 분당신도시를 대상으로 하여 재건축으로 인해 발생할 내재탄소와 운영탄소를 추정하였다. 해체 단계와 건설 단계는 연면적과 배출단위를 이용하여 추정하였으며, 운영탄소의 추정을 위해서는 에너지 소비량 예측 모델을 구축하였다.

해체 단계 이산화탄소는 건축물의 해체 시 72.4%로 가장 많이 배출되는 것으로 나타났으며, 배출량은 206.5 kton으로 추정되었다. 건설 단계의 이산화탄소는 용적률을 150% 상향하여 재건축할 경우 6,570 kton의 이산화탄소가 배출될 것으로 추산되며, 해체 단계 발생량의 32배에 달하는 양이다. 건설단계 탄소 발생량의 96%를 자재생산이

차지하는 것으로 나타나, 탄소배출량이 적은 자재를 사용하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

운영탄소 추정의 대상이 되는 에너지원은 전기에너지와 가스에너지, 난방에너지의 세 가지로, 각각 개별 모형을 구성하고 월별 소비량을 추정한 후 최종 에너지 추정 소요량을 합산하여 탄소 배출량을 산정하였다. 주거용 건축물 에너지 소비량 모형은 건물 특성, 단지의 사회경제적 특성, 단지의 열섬현상 방지 효과 벡터 등을 변수로 사용하여 설계하였으며, 2023년도 실측 에너지 소비량과 추정된 에너지 소비량을 비교하여 설명력을 검증하였다. 검증 결과 세 가지 에너지 모두 평균 1-2% 내외의 오차율을 보여 모형의 설명력은 충분한 것으로 나타났다.

분석의 대상은 분당 신도시 내 아파트 단지 115개로, 재건축 후 에너지 소비량을 추정한 결과 대부분 큰 폭의 에너지 소비량 증가를 보였으나 연면적이 81.1% 증가한 반면 에너지 소비량은 상대적으로 적은 66.9%의 증가율을 보였다. 또한 아파트 단지 간의 편차가 크게 나타났는데, 이는 추정 모형은 분당 아파트 단지 전체를 대상으로 하는 반면 결과 값은 개별 단지를 대상으로 적용했을 때 발생할 수 있는 오류로 보이며, 이러한 오류의 원인은 아파트 단지의 건축적 특성 변수 중 에너지 소비량과 반대의 방향성을 띄는 변수의 영향을 많이 받는 단지가 있기 때문이다.

운영 단계의 이산화탄소 배출량은 66.9%로 에너지 소비량의 증가보다 이산화탄소 배출량의 증가가 큰 것으로 나타났으며, 전기에너지는 76.1%, 난방에너지는 56.3%, 가스에너지는 81.1% 증가하는 것으로 나타났다. 가장 많이 증가하는 것은 가스에너지이지만 총 배출량의 2.4%만을 차지하므로 전체 증가에는 큰 영향을 미치지 못하며, 전기에너지가 전체 배출량의 53.84%를 차지하고 증가율도 높아 배출량 증가를 전인하는 가장 큰 요인으로 나타났다. 난방에너지는 전체 배출량의 43.78%로, 전기에너지와 비슷한 수준인 것으로 나타나 이산화탄소 배출량을 절감하기 위해서는 전기에너지와 난방ener지를 줄이는 것이 중요함을 알 수 있다.

모형을 통한 추정 시 발생하는 오류의 원인인 건축적 특성과 에너지 소비량의 관계를 설명하기 위하여 전기에너지 소비량을 종속변수로, 건축적 특성을 설명변수로 한 회귀분석을 실시하였다. 분석 결과를 종합하면 연면적과 세대 당 면적, 밀도를 의미하는 대지면적 당 세대 수가 증가할수록 에너지 소비량은 감소하며, 건물 수, 용적률, 건물 당 세대 수는 증가할수록 에너지 소비량은 증가하는 것으로 나타났다.

제4장 재건축 생애주기별 탄소 배출 저감 방안 제시 및 효과 검증

4장에서는 2장에서 선별된 탄소배출 저감요소를 대상으로 전문가 FGI를 실시하여 미래 노후계획도시 재건축 과정에서 현실적으로 적용 가능한 탄소배출 저감요소들을 도출하고, 적용 시 고려해야 하는 사항 및 추가적으로 필요한 저감요소 등을 보완하였다.

2장에서 선정된 탄소배출 저감요소는 크게 내재탄소가 배출되는 ‘해체’와 ‘건설’, 운영 탄소가 배출되는 ‘운영’의 세 가지 생애주기 관점으로 분류하였으며, 총 6개 부문 28개 저감요소로 구성되었다. ‘자원순환 특화’ 부문은 해체 단계, ‘지속가능 건설’ 부문은 시공 단계, ‘에너지 효율 건축물’, ‘기후변화 적응 및 흡수원 확대’, ‘친환경 교통’, ‘신재생 에너지’의 4개 부문은 운영 단계에 해당된다. 이 중 전문가 FGI를 통해 최종적으로 도출된 저감요소는 도시 단위에서 적용해야 하는 ‘친환경 교통’ 부문을 제외한 5개 부문의 23개 요소이다.

최종적으로 도출된 탄소배출 저감요소의 재건축 단계에서의 적용가능성 및 적용의 용이성 등을 고려하여 공동주택 재건축 시 적용할 수 있는 탄소 배출 감축 패키지를 개발하였다. 감축 패키지는 ①핵심, ②확장, ③종합의 3단계로 나누어 제시하였으며, 핵심 패키지와 확장 패키지는 운영 단계의 저감요소를, 종합 패키지는 운영 단계와 함께 해체 단계와 건설 단계의 저감요소를 모두 포함한다. ‘핵심’ 패키지는 가장 적용 가능성이 높은 저감요소만을 포함하여 꼭 적용할 것을 권장하는 패키지로, 운영 단계 저감요소 중 ‘에너지 효율 건축물’ 부문에서 액티브 기술 3가지를 제외한 나머지를 모두 포함하고 있다. 고성능 창호, 고기밀 시공, 외단열 시공, 외부차양, 자연채광, 자연환기 등 패시브 기술과 액티브 기술 중 고효율 LED 조명, 그 외 일조, 풍향 고려 건축물 배치, 에너지 효율 향상 시스템이 포함되어 있으며, 신재생에너지는 태양광발전만 포함된다. ‘확장’ 패키지는 적용 가능성이 높지만 공공차원의 지원 및 규제 등 정책화가 필요하거나 비용이 높은 요소를 핵심 패키지에 추가한 패키지로, 에너지 효율 건축물 부문의 액티브 기술, 기후변화 적응 및 흡수원 부문의 녹색공간 및 녹색기반시설이 추가되어 운영 단계의 저감요소만을 포함하고 있다. ‘종합’ 패키지는 에너지 소비량 절감의 최대 효과를 달성할 수 있는 요소들을 모두 포함한 패키지로, 지원·규제 등 정책화, 적극적인 공공 차원 개입, 입주민의 에너지 소비 절감에 대한 공감대 형성 등이 필요하며 아파트 단지에 국한되는 것이 아니라 지역 차원에서 적용할 시 더 큰 효과를 달성할 수 있는 요소들로 구성되어 있다. 운영 단계의 모든 저감요소와 함께 해체 단계의 폐기물 저감, 건설 단계의 자재 재활용

를 확대, 탄소 배출 저감형 건설자재 사용까지 생애주기 전체에 걸친 저감요소를 종합적으로 포함하며, 신재생 에너지 부문에서도 태양광 발전 뿐만 아니라 지열에너지, 바이오 에너지까지 모두 포함한다. 모든 패키지는 ZEB 5단계를 기본적으로 달성하는 것을 전제로 하므로, 에너지 소비량의 20%를 재생에너지로 생산하는 것으로 추정하여 생산된 에너지량을 전기에너지 소비량에서 제외하였다.

탄소배출 저감 패키지를 적용했을 때의 이산화탄소 배출량을 추정한 결과, 용적률 150% 재건축 후 이산화탄소 배출량이 558 kton으로 크게 증가하는 것으로 나타났으나 가장 낮은 단계인 '핵심' 패키지 적용 시 배출량이 216.9 kton, '확장' 패키지 적용 시 177.7 kton, '종합' 패키지 적용 시 1.167 kton으로 나타나 탄소배출 저감 패키지가 이산화탄소 배출량을 줄이는 데에 크게 효과가 있는 것으로 나타났다.

추가적인 탄소 배출 감축 패키지의 효과 검증을 위하여 에너지원별 탄소 배출 감축 효과, 패키지 적용 시 단지별 ZEB 등급, 에너지원별 비용 절감 효과를 추정하였다. 에너지원별로 탄소 배출량을 살펴보면 전기에너지는 '핵심' 패키지와 '확장' 패키지를 적용했을 때 탄소 배출량이 크게 감소하는 것으로 나타났는데, 전기에너지의 탄소 배출 감축 결과는 재생에너지 생산량을 전기에너지 소요량에서 제외한 것이 주요인이다. 가스에너지는 에너지의 절대량 자체가 적어 '핵심' 패키지에서만 소규모로 감축되고 그 이후 단계에서는 추가 감축 없이 유지된다. 난방에너지는 패키지 기술 중심의 '핵심' 패키지 적용 시 60% 이상 감축되며, 액티브 기술이 추가된 '확장' 패키지 적용 시 여기에서 다시 70% 이상 감축되는 것으로 나타났다. 패키지 적용 시 1차 에너지 소요량으로 획득할 수 있는 ZEB 등급을 단지별로 추정한 결과, '핵심' 패키지 적용만으로도 모든 단지가 ZEB 5등급 기준을 충족시키고 4등급, 3등급까지 달성하는 단지도 나타나 핵심패키지의 효과성이 검증되었다. 에너지원별 비용 절감 효과를 추정한 결과, 월간 전기요금은 재건축 전보다 재건축 후 평균 77,076.83원 증가하며, '핵심' 패키지 적용 시 재건축 후 요금보다 평균 30,463원, 확장패키지 적용 시 평균 61,502.27원, 종합패키지 적용 시에는 평균 66,141.06원이 저렴해진다. 가스에너지 요금은 단지별 편차가 크지만 재건축 후 평균 7,513.03원 증가한다. 핵심 패키지 적용 시 재건축 후 요금보다 평균 1,057.77원 감소하며, 가스에너지는 핵심패키지 적용 시에만 감소하므로 가스요금은 핵심, 확장, 종합 패키지 모두 동일하다. 난방에너지의 열요금은 재건축 후 평균 91,552.64원 증가하며, 핵심 패키지 적용 시 77,530.88원, 확장 패키지 적용 시 115,706.62원 감소한다. 패키지별 절감 금액을 살펴보면, 재건축 이후 에너지 요금보다 핵심 패키지는 평균 33.18%, 확장 패키지는 평균 54.25%, 종합 패키지는 평균 55.65% 절감되었다.

제5장 노후계획도시 재건축 공동주택 단지의 탄소배출 저감을 위한 정책방안

5장에서는 본 연구의 정책 목표를 환경적, 사회적, 경제적 지속가능성 달성의 세 가지 측면으로 설정하고, 정책 추진 방향 설정을 위한 2차 전문가 FGI를 실시하였다. 노후계획도시 재건축 시 탄소 배출 저감을 유도할 수 있는 정책적 방안을 크게 ①인센티브 제공, ②인증제도, ③공간확보의 3개 부문으로 구분하고 '인센티브 제공' 부문에서는 재건축 단지의 용적률 완화나 보조금 지원, 세금공제 등을 통해 탄소배출 저감 노력을 유도 및 강화할 수 있는 방안을 모색하고자 하였으며, '인증제도'에서는 제로에너지건축물 인증, 건축물에너지효율등급 인증 등 기존의 관련 인증제 활용에 대한 의견을 검토하고자 하였다. '공간 확보' 부문에서는 탄소흡수원, 도시농장 등 탄소 저감을 위한 관련 인프라의 설치를 고려하여 단지 내 공간 확보를 장려할 수 있는 정책적 방안에 대해 검토하고자 하였다. 또한 4장에서 최종 도출한 탄소배출 저감요소를 재건축 과정에 적극적으로 도입하기 위해 연계·활용할 수 있는 정책 방안에 대한 의견도 수렴하였다.

이러한 과정을 거쳐 재건축 공동주택단지의 탄소배출 저감을 위한 정책 방향을 규제자 측면과 공급자 측면, 사용자 측면의 세 방향에서 제안하였다. 규제자 측면은 규제 제한 사항 최소화 및 인센티브 융합, 공급자 측면은 브랜딩 가치 상승 유도 및 가이드라인 제시, 사용자 측면에서는 중장기적 가치 인식 유도 및 생활공간의 질적 향상을 강조하는 것이다. 연구의 목표 및 방향에 대한 세부 정책 방안은 전문가 FGI를 통해 목록화, 구체화하였는데, '인센티브 제공방안', '인증제도 활성화방안', '탄소배출저감 및 흡수원 관련 시설 설치를 위한 단지 내 공간 확보방안'의 세 가지 항목으로 제시하고 구체적인 방안은 「노후계획도시정비법」을 중심으로 관련 법안과 연계하는 것을 제안하였다.

인센티브 제공 방안의 측면에서는 용적률 완화를 인센티브로 사용하되, 보조금 및 세금 공제 등 금전적인 지원책과 연계하여 활용하는 등의 방법들이 제시될 필요가 있다. 이를 위해서는 과도한 용적률 인센티브가 되지 않도록 특별법상 기준 용적률을 낮추어 인센티브 용적률과 격차가 커지도록 계획하는 것이 선행되어야 하며, 기준 용적률을 높지 않게 설정한 후 탄소배출저감 및 제로에너지 건물로 재건축 시 부여하는 인센티브 조항을 신설할 필요가 있다. 또한 추가 용적률 부여를 조건으로 탄소배출 저감을 위한 추가적인 개발 부담금을 부여하는 방안, 감축요인 도입 시 보조금 지원 범위를 확대하는 방안이 있다. 여기에는 공급자에게 저리 용자 제공 및 이자 비용 지원 등에 대한 구체적인 방안이 포함된다. 또한 재건축 단지의 준공 후 본 연구에서 제시한 운영단계 배출량 저감과

연계한 세금공제 혜택을 주는 방안이 있다. 탄소배출 거래제와 유사한 형태로 운영 단계에서 효과적으로 탄소배출량을 감축한다면 그 감축량에 대한 크레디트를 인증해주는 방안도 고려해 볼 수 있다. 부여된 크레디트의 활용을 위해서는 제도를 마련하여 거래 지원 및 허용하는 방안이 필요하다. 해체 및 건설단계에서는 자재의 재활용이나 친환경 건축 자재 사용에 대한 세금 감면 적용을 통해 공급자에 대한 경제적 이익을 실현 시켜주는 정책도 필요하다.

인증제도 측면에서는 지금의 의무적으로 달성해야 하는 ZEB 5등급보다 더 높은 4등급을 인증할 경우 취득세 및 재산세 등을 감면해주고 공급자에게는 소득세 및 법인세 공제해주는 방안이 필요하다. 또한 건설 당시 인증 취득에 필요한 비용을 공공에서 지원해 줄 필요가 있다.

탄소배출저감 및 흡수원 관련 시설 설치를 위한 단지 내 공간 확보 방안의 측면에서는 설치 의무에 대한 새로운 기준 및 규정을 마련하기 위해 환경부에서 주관하는 탄소중립도시 지정 및 지원, 탄소중립시설 유형의 별도 신설도 고려해 볼만 하다. 또한 공동주택 단지 내 옥상, 체육시설, 주차장 등에 태양광 발전시설을 설치하고, 공용전기로 적극 활용하게 하는 방안이 필요하다. 이를 위해서 지구단위계획 수립 시 공간 확보를 위해 세부 용도지역 및 세부 구역에 대해 설치 비율을 의무화하는 방안도 고려해 볼 수 있다. 또한 재생에너지나 재난방지 등을 위해 지하 공간 등이 소요되는 경우 그에 대한 일정 비율을 용적률 인센티브로 추가하는 방안도 필요하다.

제6장 결론

본 연구의 의의는 다음과 같다.

첫째, 건축물의 생애주기 관점에서 90년대 지어진 아파트 중심의 신도시에서의 현재 탄소배출량을 산정하고, 이를 근거로 하여 미래 탄소배출량을 예측할 수 있는 모형을 개발하였다.

둘째, 노후계획도시정비법에 의한 재건축 진행시 허용되는 최대 용적률을 달성한다고 가정하고, 증가하는 탄소배출량을 본 연구에서 개발한 모형을 이용하여 정량적으로 산정하고 그 결과를 제시하였다.

셋째, 현재 단계에서 적용가능한 패시브, 액티브 기술과 정책을 선별하고 이를 통하여 도시·건축 분야에서 수용하여 감축할 수 있는 탄소배출량에 대한 원단위를 제시하였다. 그리고 이를 통하여 향후 발생할 것으로 예상되는 탄소배출량을 구체적으로 얼마만큼 저감할 수 있는지를 예시로 제시하였다.

마지막으로 재건축 공동주택이 높은 단계의 탄소배출 저감요소를 적용한 친환경 건축물로 유도하기 위한 다양한 정책 방안에 대한 아이디어를 여러 법령과 정책과 연결된 특별법을 중심으로 제시하였다.

본 연구의 한계는 다음과 같다.

첫째, 분석 모형 및 데이터 구득의 한계이다. 본 연구에서 설정한 모형은 기존 문헌 및 논문 등에서 검증된 모형을 변형하여 적용한 것이다. 분석 결과 설명력은 높게 도출되었지만 모형 설정 시 본 연구에서 고려하지 못한 변수의 영향력이 있을 수 있다. 또한 분석에 이용된 데이터는 1기 신도시인 분당 아파트 단지로만 한정하여 진행함으로써 전체 노후 계획도시로 확대할 수 있는 일반적인 해석이 부족할 가능성이 있다.

둘째, 탄소배출량 산정 및 추정과 관련하여 분석의 용이성 차원에서 설정한 가정과 생략으로 인한 한계이다. 본 연구에서는 재건축 이후의 모습이 결정되어 있지 않은 상태에서 기존의 건물에서 용적률 상승만을 가정하였으므로, 향후 실제 단지에서 나타나는 배출량과는 다소 차이가 있을 것으로 예상된다.

셋째, 도출된 저감 요소 선정 및 저감률과 관련하여 제기될 수 있는 한계이다. 본 연구에서는 현재 적용되고 있는 정책이나 기술들을 조사하여 숫자로 산정되고 검증된 것만을 선별하여 적용하고 FGI 결과를 바탕으로 저감 요소와 관련된 패키지를 최종 도출·제안함으로써 객관성을 확보하고자 하였으나, 그 과정도 많은 가정과 일반화가 있다는 것을 감안한다면 설명력에 대한 한계는 있을 수밖에 없을 것이다.

넷째, 정책대안으로 제시된 추가 가능 용적률로 대표되는 인센티브 조항에 대한 설득력에 대한 한계이다. 현재 노후계획도시정비법 내 특례조항인 150% 상향의 조항을 본 연구의 결과에 활용하기 위해서는 기존 용적률을 보다 낮은 수준으로 설정하고 본 연구에서 제시하는 감축방안을 적용할 때 비로소 달성할 수 있는 메커니즘을 제안하는 것이 최선이라 판단되었다. 그러나 이와 같은 방안은 또 다른 규제사항으로 시장에서 인식하여 강한 저항이 예상될 수 있다.

본 연구의 한계를 보완하고, 변화하는 재건축·재건축 여건 등을 반영한 다음과 같은 후속 연구들이 신속히 수행될 필요가 있다.

현재의 아파트 단지가 아닌 지구단위 차원에서 교통수단이나 대규모 흡수원까지 반영된 탄소중립도시라는 개념을 가진 단지 스케일 이상 규모에서의 면밀한 배출량 및 감축량을 추정하는 연구가 필요하다. 또한 이와 같은 정량적인 수치를 기반으로 한 탄소배출과 노후계획도시 재건축의 경제성 또는 사업성에 대한 고도화된 연구가 필요하다. 본 연구에서 제시했던 배출량과 감축량을 근거로 한 양적 연구의 결과를 추가적으로 보완하는 개념으로 배출량에 대한 경제적 손실과 생애주기별로 감축방안을 적용할 때의 지불해야 하는 비용, 운영 단계에서 탄소배출량을 감축함으로써 얻는 경제적 이익 등을 재건축의 사업성과 결합하여 보여줄 필요가 있다. 향후 이와 같은 연구는 중앙정부 또는 노후계획도시를 추진하는 주체인 지자체가 주도하고, 건축과 환경, 경제 분야의 연구기관들이 함께 협동연구의 형식으로 3년 정도의 장기 연구 프로젝트로 추진하는 것을 제안한다.

주제어

노후계획도시, 탄소배출 저감정책, 생애주기 평가, 에너지 소비

차례

CONTENTS

제1장 서론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
1) 연구배경 및 필요성	1
2) 연구목적	7
2. 연구의 범위 및 방법	8
1) 연구범위	8
2) 연구방법	9
3) 연구의 주요내용	10
4) 선행연구와 본 연구의 차별성	13
제2장 탄소배출 저감 관련 문헌 검토 및 국내외 사례	17
1. 관련 문헌 및 정책 검토	17
1) 관련 문헌 검토	17
2) 탄소중립 관련 정책 및 법령, 추진경과	30
3) 제로에너지건축물 관련 정책 및 법령, 추진경과	35
4) 「노후계획도시정비 및 지원에 관한 특별법」 내 탄소배출 저감 관련 내용	43
2. 탄소배출저감 관련 기술 및 정책 적용 사례	46
1) 건축물 생애주기별 탄소배출저감 기술 및 적용 효과	46
2) 계획기법에 따른 탄소배출저감 효과	51
3) 탄소배출 저감 정책의 효과	57
4) 주요 국외 탄소배출 저감 단지 사례 요약	59
3. 시사점	61
제3장 분당신도시 재건축 생애주기별 탄소 배출량 추정	65
1. 분석의 개요	65
1) 분석의 전제	66
2) 분석의 흐름	67
3) 분석의 대상	68
2. 해체, 건설단계의 내재탄소 배출량 추정	71
1) 해체 단계의 이산화탄소 배출량 추정	71
2) 건설 단계의 이산화탄소 배출량 추정	73

차례 CONTENTS

3. 운영 단계의 운영탄소 배출량 추정	76
1) 추정 대상 에너지원	76
2) 에너지 소비량 추정 모형	76
3) 재건축 후 에너지 수요량 추정	79
4) 운영 단계의 이산화탄소 배출량 추정	82
4. 아파트 단지 건축 특성과 에너지 소비량 관계 분석	85
1) 분석의 개요	85
2) 에너지원별 모형 분석 결과	87
3) 소결	92
제4장 재건축 생애주기별 탄소 배출 저감 방안 제시 및 효과 검증	93
1. 전문가 FGI를 통한 적용 가능 탄소배출 저감요소 도출	93
1) 개요	93
2) 생애주기별 적용 가능한 탄소배출 저감요소 도출	96
3) 최종 도출 결과	102
2. 탄소 배출 감축 패키지 제시 및 감축 비율 산출	103
1) 탄소 배출 감축 패키지 제시	103
2) 탄소 배출 감축 패키지별 감축 비율 산출	104
3. 탄소 배출 감축 패키지 적용 효과 검증	106
1) 생애주기별 이산화탄소 배출 감축량 추정	106
2) 에너지원별 탄소 배출 감축 효과	114
3) 패키지 적용 시 단지별 ZEB 등급	119
4) 패키지 적용의 비용 절감 효과	124
4. 소결	135
제5장 노후계획도시 재건축 공동주택 단지의 탄소배출 저감을 위한 정책방안	137
1. 정책 목표 및 추진 방향 설정	137
1) 정책 목표 설정	137
2) 정책 추진 방향 설정을 위한 전문가 FGI	138
3) 재건축 공동주택단지의 탄소배출 저감을 위한 정책 방향	146

차례 CONTENTS

2. 관련 정책 연계 및 제도 개선 방안	149
1) 인센티브 제공 방안	149
2) 인증제도 활용 방안	153
3) 탄소배출저감 및 흡수원 관련 시설 설치를 위한 단지 내 공간 확보 방안	155
제6장 결론	157
1. 연구요약 및 연구의 의의	157
1) 연구요약	157
2) 연구의 의의	162
2. 연구의 한계 및 후속 연구 제안	165
1) 연구의 한계	165
2) 후속 연구 제안	166
참고문헌	169
SUMMARY	181
부록 1. 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 탄소중립도시 관련 내용	187
부록 2. 「탄소중립·녹색성장 국가 기본계획」 건물 부문 핵심 및 세부과제	189
부록 3. 분석 대상 분당 아파트별 대지 면적, 건축면적, 연면적, 세대수 및 건물 수	193
부록 4. 분당 아파트 단지별 해체 단계 이산화탄소 배출량 산출	199
부록 5. 분당 아파트 단지별 용적률 150% 상향 재건축 건설 단계 이산화탄소 배출량 산출	205
부록 6. 분당 아파트 단지별 재건축 전/후 연면적 변화 및 에너지 소비량 변화 추정	211
부록 7. 분당 아파트 단지별 재건축 이후 이산화탄소 배출량과 변화율	217

표차례 LIST OF TABLES

[표 1-1] 한국형 녹색분류체계 중 도시·건물 부문 녹색경제활동	3
[표 1-2] 「노후 계획도시 재정비를 위한 특별법」 발의안(의안번호 2120356) 내 기본계획 수립에 관한 사항	6
[표 1-3] 선행연구와 본 연구의 차별성	13
[표 2-1] 선행연구의 생애주기 단계 구분	18
[표 2-2] 산업연관표를 활용한 건축물 생애주기 단계별 탄소배출 비중 분석	19
[표 2-3] 에너지 수지 계산 기준에 따른 제로에너지건축물 개념	21
[표 2-4] 신재생 에너지 공급방식 구분	21
[표 2-5] 제로에너지 성능 수준에 따른 제로에너지건축물 개념	22
[표 2-6] 건축물의 에너지 효율을 높이는 요소기술	23
[표 2-7] 신재생 에너지 생산기술	25
[표 2-8] 건물 에너지 관리기술	26
[표 2-9] 건축물 전생애주기 탄소배출량 관련 선행연구 시사점	28
[표 2-10] 탄소중립 관련 선행연구 시사점	28
[표 2-11] 제로에너지도시 관련 선행연구 시사점	30
[표 2-12] 탄소중립 관련 정책 및 법령 추진경과	30
[표 2-13] 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 내 녹색건축물 관련 내용	31
[표 2-14] 온실가스 부문별·연도별 감축목표(건물)	32
[표 2-15] 「탄소중립·녹색성장 국가 기본계획」 건물 부문 핵심 및 세부과제 중 재건축 관련 내용	33
[표 2-16] 건축·도시 관련 폐기물 부문 핵심 및 세부과제 중 재건축 관련 내용	34
[표 2-17] 2050 가정부문 수단별/용도별 에너지 감축 목표(건물 부문)	34
[표 2-18] 신축 공동주택 에너지성능기준 강화 내용(건축물 에너지 효율향상 실천과제)	35
[표 2-19] 제로에너지건축물 관련 정책 및 법령 추진경과	35
[표 2-20] 「녹색건축물 조성 지원법」 및 동법 시행령 내 제로에너지건축물 관련 내용	36
[표 2-21] 「녹색건축물 조성 지원법」 및 동법 시행령 내 제로에너지건축물 건축기준 완화 인센티브 관련 내용	38
[표 2-22] 「녹색건축물 조성 지원법」 및 동법 시행령 내 녹색건축물 조성 촉진을 위한 금융 지원 및 활성화 관련 내용	39
[표 2-23] 「녹색건축물 조성 지원법」 및 동법 시행령 내 녹색건축물 조성 시범사업 관련 내용	40
[표 2-24] 제로에너지건축물 인센티브	41
[표 2-25] 제로에너지건축물 인증에 따른 건축기준 완화 비율	42
[표 2-26] 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」 및 동법 시행령 내 「노후계획도시」의 정의	43
[표 2-27] 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」 내 탄소중립, 제로에너지건축물 관련 내용	44

표차례 LIST OF TABLES

[표 2-28] 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」 내 녹색건축물 금융 지원 및 활성화 관련 내용	45
[표 2-29] 계획기법에 따른 탄소배출 저감 효과 정리	56
[표 2-30] 친환경 건축물 인증 프로그램의 탄소배출 저감 효과	57
[표 2-31] 탄소배출 거래 정책 효과 및 예측결과	58
[표 2-32] 주요 국외 탄소배출 저감 단지 사례 요약표	59
[표 2-33] 노후계획도시 재건축 단지에 적용 가능성이 높은 요소	63
[표 3-1] 탄소 배출량 추정 대상 아파트 단지(n=115)	69
[표 3-2] 분당신도시 아파트 단지 분포	70
[표 3-3] 공동주택 해체 시 단위면적 당 이산화탄소 배출량	71
[표 3-4] 동/마을 별 분당 아파트 해체 단계 이산화탄소 배출량 산출	72
[표 3-5] 공동주택 건설 시 단위면적 당 이산화탄소 배출량	74
[표 3-6] 동/마을 별 분당 아파트 용적률 150% 상향 재건축 건설 단계 이산화탄소 배출량 산출	75
[표 3-7] 추정 대상 에너지원의 특징과 변환계수	76
[표 3-8] 분당 신도시 현황 데이터	77
[표 3-9] 에너지 소비량 추정 모형의 설명력 검증	78
[표 3-10] 재건축 용적률 150% 상향 시 설명변수 계산 결과	80
[표 3-11] 동/마을별 분당 아파트 재건축 전/후 연면적 및 에너지 소비량 변화	80
[표 3-12] 분당 아파트 재건축 이후 이산화탄소 배출량과 증감률	83
[표 3-13] 아파트 단지 건축 특성과 에너지 소비량 관계 분석을 위해 추가된 아파트 단지(n=7)	85
[표 3-14] 아파트 단지 건축 특성과 에너지 소비량 관계 분석에 사용된 변수	85
[표 3-15] 아파트 단지별 종속변수 기술통계 결과	86
[표 3-16] 아파트 단지별 설명변수 기술통계 결과	86
[표 3-17] 전기 에너지 소비량 모형 추정 결과	87
[표 3-18] 전기에너지 소비량 모형 추정 결과 해석	88
[표 3-19] 가스 에너지 소비량 모형 추정 결과	89
[표 3-20] 가스에너지 소비량 모형 추정 결과 해석	89
[표 3-21] 난방 에너지 소비량 모형 추정 결과	90
[표 3-22] 난방에너지 소비량 모형 추정 결과 해석	91
[표 3-23] 에너지 소비량 모형 추정 결과 종합 (월별 랜덤효과 제외)	92
[표 4-1] 탄소배출 저감요소 풀(6개 부문, 28개 요소)	94
[표 4-2] 탄소배출 저감요소별 적용 가능성 및 주요 의견	96
[표 4-3] '자원순환 특화' 관련 저감요소에 대한 주요 의견	98
[표 4-4] '지속가능 건설' 관련 저감요소에 대한 주요 의견	98

표차례 LIST OF TABLES

[표 4-5] '신재생에너지' 관련 저감요소에 대한 주요 의견	99
[표 4-6] '에너지 효율 건축물' 관련 저감요소에 대한 주요 의견	100
[표 4-7] '기후변화 적응 및 흡수원 확대' 관련 저감요소에 대한 주요 의견	100
[표 4-8] '친환경 교통' 관련 저감요소에 대한 주요 의견	101
[표 4-9] 적용 가능 저감요소 최종 도출 결과(5개 부문, 23개 요소)	102
[표 4-10] 탄소 배출량 감축 패키지 별 적용 에너지 소비량 및 이산화탄소 배출량 감축 비율	104
[표 4-11] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 핵심 패키지 적용 결과(운영 단계)	106
[표 4-12] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 확장 패키지 적용 결과(운영 단계)	107
[표 4-13] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 종합 패키지 적용 결과(운영 단계)	108
[표 4-14] 해체 단계 이산화탄소 배출 감축량 추정	110
[표 4-15] 건설 단계 이산화탄소 배출 감축량 추정	110
[표 4-16] 건축물 생애주기별 탄소 감축 패키지 적용 시 이산화탄소 배출량 종합비교	111
[표 4-17] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 패키지 적용 시 전기에너지 이산화탄소 배출량	114
[표 4-18] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 패키지 적용 시 가스에너지 이산화탄소 배출량	115
[표 4-19] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 패키지 적용 시 난방에너지 이산화탄소 배출량	117
[표 4-20] 통합 ZEB 인증제도 평가 기준(안)	119
[표 4-21] 분당 아파트 단지별 핵심패키지 적용 시 단위면적당 에너지 소비량 및 추정 ZEB 등급	120
[표 4-22] 추정 대상 에너지원의 적용 요금제	124
[표 4-23] 주택용전력(저압, 기타계절) 기본요금 및 전력량요금	125
[표 4-24] 전기요금 계산식에 포함되는 비용	125
[표 4-25] 분당 마을별 재건축 및 패키지 적용 시 세대 당 월간 전기요금 추정	126
[표 4-26] 분당 마을별 패키지 적용 시 월간 전기요금 감소 금액	127
[표 4-27] 경기도 주택용 취사 가스 기본요금 및 사용량요금	128
[표 4-28] 분당 마을별 재건축 및 패키지 적용 시 세대 당 월간 가스요금	129
[표 4-29] 열요금 동절기 기본요금 및 전력량요금	131
[표 4-30] 분당 마을별 재건축 및 패키지 적용 시 세대 당 월간 열요금	131
[표 4-31] 분당 마을별 재건축 전/후 및 패키지 적용 시 월간 열요금 증감액	132
[표 4-32] 분당 마을별 탄소 저감 패키지별 에너지 요금 및 재건축 이후 요금 대비 감소율	134
[표 5-1] 탄소배출 저감을 위한 정책적 방안 및 관련 법령	139
[표 5-2] 인센티브 제공(융적률 완화) 관련 주요 의견 및 관련 법령	141
[표 5-3] 인센티브 제공(금융 지원) 관련 주요 의견 및 관련 법령	142
[표 5-4] 인증제도 관련 주요 의견 및 관련 법령	143
[표 5-5] 공간 확보 관련 주요 의견 및 관련 법령	144

표차례

LIST OF TABLES

[표 5-6] 탄소배출 저감요소 도입을 위한 정책 연계 가능성	145
[표 5-7] 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」 개선(안) 예시	150
[표 5-8] 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」 시행령 개선 예시	154
[표 5-9] 노후계획도시 탄소배출저감을 위한 가이드라인(안)	156
[별표 1] 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 탄소중립도시 관련 내용	187
[별표 2] 「탄소중립·녹색성장 국가 기본계획」 건물 부문 핵심 및 세부과제	189
[별표 3] 분석 대상 151개 아파트 단지의 대지면적, 건축면적, 연면적, 세대수 및 건물 수	193
[별표 4] 분당 아파트 단지별 해체 단계 이산화탄소 배출량 산출(현재 연면적 기준)	299
[별표 5] 분당 아파트 단지별 용적률 150% 상향 재건축 건설 단계 이산화탄소 배출량 산출	205
[별표 6] 분당 아파트 단지별 재건축 전/후 연면적 변화 및 에너지 소비량 변화 추정	211
[별표 7] 분당 아파트 단지별 재건축 이후 이산화탄소 배출량과 변화율	217

그림차례 LIST OF FIGURES

[그림 1-1] SDG 11 목표 및 세부실천계획, 탄소중립기본법 내 탄소중립 그린도시 모식도	2
[그림 1-2] '국가 탄소중립 녹색성장 기본계획' 중 '1-3 건물부문' 관련 내용	3
[그림 1-3] 아파트 신축 시 배출되는 탄소배출량 비교 예시	5
[그림 1-4] 탄소중립·에너지특화도시 관련 해외 공동주택 사례	10
[그림 1-5] 연구의 흐름	12
[그림 2-1] 건설상품의 생애주기 단계별 탄소배출의 주요 원인	19
[그림 2-2] 제로에너지건축물 적용기술	26
[그림 2-3] 통합 제로에너지 건축물 인증제도 평가 기준 변경 내용	38
[그림 2-4] 부지 외(Off-site) 신재생에너지 생산 시 단위면적당 1차에너지 생산량, 순생산량, 소비량 계산식	41
[그림 2-5] 제로에너지건축물 건축 시 시기별 신청 가능한 인센티브	41
[그림 2-6] 건물의 생애주기별 탄소 배출 비율	47
[그림 3-1] 분당 아파트 재건축 전, 건물 해체 및 건설, 재건축 후 운영 중 에너지 소비량 추산 메커니즘	65
[그림 3-2] 동/마을 별 분당 아파트 해체 단계 이산화탄소 배출량	73
[그림 3-3] 마을 별 분당 아파트 용적률 150% 상향 재건축 건설 단계 이산화탄소 배출량	75
[그림 3-4] 재건축 운영단계 에너지원별 이산화탄소 배출량 비율	82
[그림 3-5] 분당 마을별 에너지원별 재건축 전/후 이산화탄소 배출량	83
[그림 4-1] 분당 마을별 해체, 건설 단계 탄소 감축 종합 패키지 적용 시 이산화탄소 배출량	112
[그림 4-2] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 운영 단계 이산화탄소 배출 감축량	112
[그림 4-3] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 전기에너지 이산화탄소 배출량	115
[그림 4-4] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 가스에너지 이산화탄소 배출량	117
[그림 4-5] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 난방에너지 이산화탄소 배출량	118
[그림 4-6] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 월간 전기요금	126
[그림 4-7] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 월간 가스요금	129
[그림 4-8] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 월간 열요금	131
[그림 5-1] 지속가능성 증진을 위한 정책 목표	138
[그림 5-2] 이해관계자별 쟁점사항	147
[그림 5-3] 정책 추진 방향 제안	148
[그림 5-4] 탄소배출 주요 저감요소 및 기술	148

제1장 서론

- 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 연구의 범위 및 방법
-

1. 연구의 배경 및 목적

1) 연구배경 및 필요성

□ ‘탄소중립2050’, ‘탄소중립기본법’에 대응하기 위한 추진전략과 시나리오를 통해 국가차원에서 노후계획도시에 대한 탄소중립, 제로에너지 정주환경 달성 필요

UN은 전 세계의 도시들에 지속가능한 도시로의 변화를 위해서 도시설계 측면에서 구체적인 전략과 메커니즘을 요구하고 있다. 그 중에서도 탄소배출 저감을 위한 건축·도시차원에서의 주요 전략으로 에너지효율이 높은 건축물의 활성화가 강조되고 있다.

우리도 최근 「탄소중립기본법」에 의거한 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획이 수립되었지만, 그 세부 내용 측면에서 대부분 탄소배출 저감과 관련한 첨단기술 육성에 방점이 찍혀있다. 또한 건축·도시 차원에서는 선언적으로 신축건물의 제로에너지와 기존건물 그 린리모델링 관련 내용만 언급되어 있을 뿐, 아직까지 구체적인 대응방안은 부재한 현실이다.

2050년까지 탄소중립과 제로에너지를 달성하기 위해서는 특히 80, 90년대 한국의 도시 발전과정에서 만들어진 대규모 신도시들의 탄소중립도시로의 변화를 생각해야 할 시점이다. 이는 전통적인 공간구조의 도시들과 다른 신도시들이 동시다발적으로 노후화됨으로써 대규모의 재정비, 재건축이 전국적으로 예상되는 상황이기 때문이다. 따라서 이

와 같은 노후계획도시들의 재건축이 본격적으로 추진되기 시작한 지금, 탄소중립도시를 달성하기 위해서는 전략, 원칙, 규제를 포함하는 단계적 로드맵 제시가 필요하다. 이는 1기 신도시를 시작으로 앞으로 노후화가 예정된 2기, 최근의 3기 신도시까지 지속가능성을 확보하기 위한 차원에서 활용하기 위한 대안이며 지금이 그 시작점으로 가장 중요한 시기라 할 수 있다.



SDG 11 목표 및 세부실천계획



탄소중립기본법 내 탄소중립 그린도시 모식도

[그림 1-1] SDG 11 목표 및 세부실천계획, 탄소중립기본법 내 탄소중립 그린도시 모식도

출처: 좌-UN. (2018). p.10. 표 1, 우-환경부. (2022a). (<https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148897649>) (검색일: 2024.2.3.)

□ 국가건축정책기본계획의 정책목표, ‘2023 신성장 4.0’ 정책목표 중 탄소중립도시, K-택소노미 내 ‘도시·건물 분야’에서 기존도시의 제로에너지 특화도시로의 전환을 목표로 설정, 그러나 목표 달성을 위한 도시 물리적 환경 측면의 실질적 노력은 부재

현재까지 수립된 제3차 국가건축정책기본계획에서는 '25년까지 건축부문 탄소배출을 25%로 저감하는 것을 목표로 하고 있다. 그러나 이 역시 대부분의 내용은 제로에너지건축물조성, 에너지설비개선과 같은 건축설비기술로 한정되어 있고 실제 탄소배출 저감을 위한 건축·도시설계부분에서의 구체적인 세부계획은 수립되어 있지 않다. 또한 2023년 발표한 '신성장 4.0'에서 우리나라는 향후 2050년까지 30년 중장기계획에서 국가 로드맵에 따라 도시단위의 탄소배출 저감을 위해 도시계획시설에 탄소중립개념을 반영하는 방안을 추진하고 있다.

1-3-4 계획수립-공간조성 탄소중립화

- ② 도시단위 탄소중립을 위해 도시계획 등에 탄소중립요소 도입 (국토부)
- 계획구역의 탄소 흡수량·배출량을 조사하도록 하고 계획별 감축목표 설정, 도시 규모·유형별 차별화된 계획요소* 반영 유도
 - * 공간구조 개편, 녹색교통, 녹색건축물, 탄소흡수원 확충, 신재생에너지 확대 등
 - 탄소포집·활용·저장 시설(CCUS), 친환경연료(전기·수소 등) 충전소 등 탄소중립 기여 기반시설을 향후 도시계획 시설로 편입 검토(∼'25)

[그림 1-2] '국가 탄소중립 녹색성장 기본계획' 중 '1-3 건물부문' 관련 내용

출처 : 관계부처합동, (2023), p.46.

이 밖에 환경부가 주관하는 한국형 녹색분류체계(K-Taxonomy)에서는 64개 녹색경제 활동 중 '녹색건축'에 대한 항목이 포함되어 있다. 도시·건물 부문에는 4개의 경제활동을 제시하였으며, “제로에너지 건축물 또는 녹색건축물 신규 건설·리모델링 및 취득”이 포함되어 있다. 따라서 노후계획도시들도 제로에너지특화 도시개발·운영 항목 중 (2)항 ‘기존도시를 제로에너지 특화도시로 전환’하기 위한 활동에 대응하기 위한 구체적인 실천방안 수립을 고려해야 할 필요성이 제기된다.

[표 1-1] 한국형 녹색분류체계 중 도시·건물 부문 녹색경제활동

부문	활동	내용
라. 도시·건물	(1) 제로에너지 특화 도시개발·운영	(1) 신규 제로에너지 특화 도시를 개발하거나, (2) 기존 도시를 제로에너지 특화도시로 전환하기 위해 도시를 개발·운영하는 활동
	(2) 제로에너지 건축물 또는 녹색 건축물 신규 건설·리모델링 및 취득	(1) 건물 신축, (2) 기존 건물 그린리모델링, (3) 건물 취득하는 활동
	(3) 건축물 관련 온실가스 감축 설비·인프라 구축·운영	주거용, 상업용 등 (1) 건축물 자체의 온실가스를 감축하거나, (2) 건축물을 활용하여 직간접적으로 온실가스를 감축하는데 필요한 설비, 시스템 등 인프라를 구축·운영하는 활동
	(4) 저탄소 인터넷 데이터 센터 구축·운영	인터넷 데이터 센터를 신규로 구축·운영하거나 기존 설비의 개조를 위해 필요한 온실가스 감축 설비, 시스템 등 인프라를 구축·운영하는 활동

출처 : 환경부, (2021a), 한국형 녹색분류체계(K-Taxonomy) 가이드라인, p.25 표를 편집하여 작성

□ 「노후계획도시정비법」 및 마스터플랜에 근거, 30년 이상 노후화된 신도시들의 대대적인 정비가 예정되며 이로 인한 탄소배출 양과 에너지사용량 증가 예상

이와 같은 여건에서 건축·도시 분야에서 획기적으로 탄소배출저감 방안을 추진해야 하는 정부는 현재 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」을 통한 노후 계획도시들의

대대적인 재정비를 추진하고 있다. 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법 시행령」에서 정의하는 노후계획도시 조성사업의 정의¹⁾에 따르면 「택지개발촉진법」으로 조성된 신도시들뿐만 아니라 「공공주택 특별법」에 따른 공공주택사업, 「도시개발법」에 따른 도시개발사업, 「산업입지 및 개발에 관한 법률」에 따른 산업단지개발사업, 「신행정수도 후속대책을 위한 연기·공주지역 행정중심복합도시 건설을 위한 특별법」에 따른 행정중심복합도시건설사업, 「혁신도시 조성 및 발전에 관한 특별법」에 따른 혁신도시개발사업, 「주택법」에 따른 국민주택건설사업 또는 대지조성사업 등으로 조성된 도시들도 모두 그 대상으로, 전국적으로 수많은 도시들이 조성 후 20년을 기점으로 대규모의 재정비가 가능해진다. 특히 「택지개발촉진법」으로 개발된 대표적인 노후계획도시인 1기 신도시의 경우 10만호 이상의 주택을 추가 공급(기존 29만에서 40만 세대 이상의 고밀)할 계획이어서, 그 과정에서 필연적으로 더 많은 탄소를 배출할 뿐 아니라 개발 이후 에너지 사용량 또한 기존 대비 크게 증가 될 것으로 예상된다. 그 근거로 국토교통부가 2022년 전국 모든 건물의 에너지사용량을 집계한 결과²⁾, 에너지 총사용량과 단위면적당 에너지사용량이 전년대비 각각 5.9%, 2.7% 증가했다고 밝혔다. 에너지 총사용량이 늘어난 데에는 신축에 따른 연면적 증가(3.1%)와 기후변화에 따른 냉난방 증가(5.4%) 등이 영향을 준 것으로 보인다.

이와 함께 국토부는 ‘에너지절약형 친환경주택 건설기준(이하 친환경주택 건설기준)’ 개정안을 통해 2023년부터 공공주택 제로에너지 5등급 인증을 의무화 하였다. 이는 ‘사업자가 에너지평가방식(성능기준 또는 시방기준)을 선택할 수 있도록 하는 체계는 유지하되, 평가 방식별 에너지기준은 현행보다 강화’하는 것이 주요 내용이다. 이와 같은 기준은 재건축을 앞두고 있는 노후계획도시의 주거단지들 모두에게 해당되는 사항으로 이후 에너지사용량과 탄소배출량에 대한 검증을 통해 건축물 분야에서 목표로 하고 있는 2050 탄소중립을 달성에 대한 검증과 보완 대책이 필요하다.

따라서 현재 여건을 감안할 때 노후계획도시의 공동주택들을 재건축하기 위해서는 필연적으로 더 강화된 건물의 에너지 효율화와 탄소배출 저감을 동시에 고려해야 하는 상황이다.³⁾ 더욱이 노후계획도시를 정비해야 하는 주체인 지자체들도 대부분 탄소중립도시를 선언, 제로에너지 달성에 대한 구체적인 이행 방안을 2050년까지 제시해야 하므

1) 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법 시행령」 (2024.4.23. 대통령령 제34443호) 제2조제1항

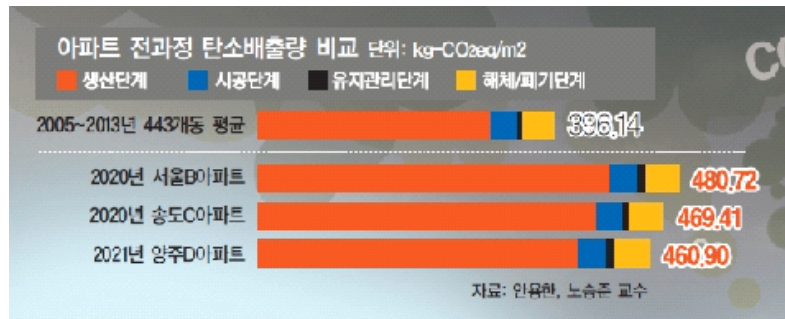
2) 문보경. (2023). 2022년 건물 에너지 사용량, 최고점인 2018년보다 늘어. 5월 31일 기사. (<https://www.etnews.com/20230531000076>) (검색일:2024.1.31.)

3) 권선형.(2023). (<https://www.hansbiz.co.kr/news/articleView.html?idxno=652768>) (검색일: 2024.1.31.)

로,⁴⁾ 이를 가능하게 할 구체적이고 지속적인 감축 방안 마련이 시급하다.

□ ‘2050 탄소중립 시나리오’에서 탄소발생량 명기를 의무화하는 생애주기 관점의 탄소중립건물 관리제도를 중장기적으로 마련할 것을 제언

재건축은 현재 운영되고 있는 건축물을 해체, 새로운 건축물을 새로 건축하고 다시 운영하는 일련의 과정으로, 건축물 생애주기의 전 과정에서 에너지를 사용하고 이산화탄소를 배출하게 된다. 세계 건축 및 건설 연맹(Global Alliance for Buildings and Construction)의 보고서에 따르면, 2020년 건축물 운영과 건설에 사용된 에너지는 149 EJ로 전 세계 에너지 소비량의 36%를 차지한다. 이 중 약 85%인 127 EJ은 건물 운영단계에서 소비되며, 나머지 22 EJ은 건축 자재를 만드는 데 소비된다.⁵⁾ 또한 유엔(UN)의 보고서에 따르면 건축물의 건설 및 운영으로 인한 이산화탄소 배출량은 탄소배출량의 37%를 차지하며, 일반적으로 건축물의 건설단계에서 약 30%, 운영단계에서 약 70%, 해체단계에서 약 2~3%의 탄소가 배출된다고 하였다.⁶⁾ 건물 부문 에너지 소비와 탄소 배출의 대부분이 운영단계에 집중되어 있어 간과하기 쉽지만, 해체와 건설 단계도 무시할 수 없을 정도의 비중을 차지하고 있는 것이다.



[그림 1-3] 아파트 신축 시 배출되는 탄소배출량 비교 예시

출처: 김태형. (2021). (https://m.dnews.co.kr/m_home/view.jsp?idxno=202110250808417590357) (검색일: 2024.2.3.)

‘2050 탄소중립 시나리오’에서는 건축 부문의 감축 수단의 하나로서 중장기적으로 탈탄소 건축자재·소재 사용, 저에너지 시공, 건설폐기물 최소화 등 생애주기 관점에서 탄소발생량 명기 의무화 등을 그 내용으로 하는 탄소중립건물 관리 제도를 마련할 것을 제언

4) '21년 5월 24일 '2021 P4G 서울정상회의'에서 한국의 243개 지방정부는 2050년까지 탄소중립을 공식 선언

5) UNEP, Global ABC. (2022). p.39.

6) 김태형. (2023). (https://m.dnews.co.kr/m_home/view.jsp?idxno=202306081732397750241) (검색일: 2024.1.31.)

하였다.⁷⁾ 건축물 에너지 효율화 등 운영 단계의 기준을 강화하는 동시에 건축물의 탄소 중립 기준이 생애주기 관점으로 확대되는 것이다. 도시 구조상 동시 다발적인 개발과 정비가 필요한 노후계획도시의 경우 운영단계뿐 아니라 해체, 건설 단계에서 발생할 탄소 배출과 에너지양 또한 예측하고 이에 대한 감축 방안을 수립할 필요가 있다.

□ '24년부터 노후계획도시들의 대규모 재정비·재건축이 예정됨에 따라 탄소중립도시(NET ZERO CITY) 및 제로에너지 특화도시(ZERO ENERGY CITY)로의 전환을 위한 「노후계획도시정비법」을 중심으로 한 정책 방안 제시 필요

이와 같은 대내외적 여건을 고려할 때 노후계획도시들의 탄소배출 저감을 위해서는 기술적인 측면만이 아니라 실현을 위한 국가 정책 측면에서의 대안 마련이 절실하다. 특히 노후계획도시들과 같이 특별법을 적용하여 예외적으로 대규모 재정비, 재건축을 진행하는 경우 건축물 또는 단지별로 생애주기인 해체·건설·운영 단계별 탄소배출저감, 제로 에너지를 달성을 유도하기 위한 정책수단이 필요하다.⁸⁾ 이는 강제적인 사항 또는 인센티브를 통한 유도 사항 모두를 고려해야 한다. 예를 들면, 관련 법령 조항 신설 및 시행령, 시행규칙에 반영되거나 기본계획 추진 과정에 반영할 수 있는 구체적인 가이드라인의 형태가 포함될 수 있다. 특히 기본계획 수립 시 해체·건설·운영 단계로 구분하고, 각 단계별 탄소배출량 감축을 위한 항목들을 실제 사업추진 단계에서 사업에 반영하게 하는 등과 같이 구체적인 개선방안 제시가 필요하다.

[표 1-2] 「노후 계획도시 재정비를 위한 특별법」 발의안(의안번호 2120356) 내 기본계획 수립에 관한 사항

항목	내용
제8조 (기본 계획의 수립 등)	① 국토교통부장관은 제7조에 따른 재정비분과위원회의 심의를 거쳐 노후 계획도시 재정비사업 기본계획을 수립하여야 한다.
	② 제1항에 따른 기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.
	1. 노후 계획도시 재정비사업의 개요 및 목표
	2. 주거지 노후도 평가와 주거환경 정비계획
	3. 교통시설별 이용현황과 문제점
	4. 보행환경과 녹지 환경 정비계획
	5. 도시재정비의 기본방향과 추진계획
	6. 재원조달계획과 국가와 지방자치단체의 역할분담계획
	7. 그 밖에 대통령령으로 정하는 사항
	③ 제1항에 따른 기본계획이 사회적·경제적 여건 변화로 변경되어야 할 필요가 있는 경우 국토

7) 2050 탄소중립위원회. (2021). p.57.

8) 노승준(2021)은 최신 아파트의 신축부터 폐기 단계까지의 탄소배출량이 이전 보다 18.7% 증가한다고 실증하였다. (출처: 김태형. (2023). (https://m.dnews.co.kr/m_home/view.jsp?idxno=202306081732397750241) (검색일: 2024.1.31.)

항목	내용
	교통부장관은 이를 변경할 수 있다.
	④ 제1항 및 제3항에 따라 각각 기본계획을 수립하거나 변경하려는 경우 국토교통부장관은 노후 계획도시를 관할하는 시·도지사의 의견을 수렴할 수 있다.
	⑤ 국토교통부장관은 제1항 및 제3항에 따라 수립·변경된 기본계획을 관보에 고시하여야 한다.
출처 : 국회 의안정보시스템, https://ikms.assembly.go.kr/bill/billDetail.do?billId=PRC_G2F3E0D2M2K0H1Q3P5F9E1L0K9J1R4 (접속일: 2024.2.3.)	

2) 연구목적

따라서 이를 위한 본 연구의 목적은 다음과 같다.

- ① 노후계획도시 재건축 공동주택단지를 중심으로 건축물의 생애주기(LC)별 탄소배출량 및 에너지수요량, 항목별 절감효과를 추정모형을 통해 정량적으로 산정·검증한다.
- ② 이를 근거로 노후계획도시들의 재건축 전후 과정에서 적용이 가능한 탄소배출량 및 에너지사용량 절감을 유도할 수 있는 실효성 있는 정책 방안을 ‘노후계획도시 정비법’과 연계하여 제시한다.

2. 연구의 범위 및 방법

1) 연구범위

□ 연구의 공간적 범위

본 연구의 공간적 범위는 노후계획도시들 중 분당신도시의 아파트 단지로 한정한다. 이는 비슷한 시기에 지어진 노후계획도시들이 탄소배출량 산정 및 추정, 검증 단계에서 유사성을 보이므로 다수의 사례를 분석하는 것은 의미가 없다고 판단되었기 때문이다. 또한 다수의 노후계획도시들을 사전 검토한 결과 대표성과 데이터 구축의 용이성, 사업 추진의 시급성 등을 고려할 때 본 연구의 분석 대상으로 분당신도시 내 아파트 단지가 가장 적합하였으며 샘플 분석결과 5개 신도시 중 오차가 적은 결과 값을 보여 주었다.

□ 연구의 내용적 범위

첫째, 본 연구에서의 분석 대상은 재건축, 재정비의 주요 대상인 아파트단지 및 단지 내 아파트(공동주택) 건축물을 대상으로 한다. 이는 재건축, 재정비 사업의 기본 단위로서 주거단지 또는 근린주구 단위를 의미하며, 기존 주거지의 ①해체, ②건설, ③운영 단계를 가정하여 분석한다.

둘째, 단지 및 건축물과 관련한 탄소중립, 제로에너지 관련 기술은 현 시점에서 적용이 가능한 것들만을 대상으로 하며, 이에 대한 학문적 근거는 기존 문헌 및 선행연구를 기준으로 도출한다.

셋째, 연구 결과의 실행 수단으로서 주요 정책 근거 법령의 범위 및 대상은 다음과 같다.

- ① 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」
- ② 「녹색건축물 조성 지원법」
- ③ 건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증에 관한 규칙
- ④ 에너지절약형 친환경주택의 건설기준
 - 건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준
- ⑤ 공동주택의 제로에너지 설계가이드라인

2) 연구방법

본 연구의 주요 연구방법은 다음과 같다.

□ 국내외 사례조사·분석

- 정책 사례: 국내외 탄소배출저감 정책 및 효과
- 기술 및 계획기법 사례 : 해외 문헌 검토를 통한 건축물 생애주기별 기술 및 계획기법의 효과 분석
- 저탄소 단지 사례: 독일 프라이부르크, 스웨덴 말뫼 Bo01, 핀란드 헬싱키 비키, 영국 런던 BEDZED 내 단지

□ 탄소중립도시와 관련된 국내외 문헌 및 법령, 제도 분석

- 국내 「탄소중립기본법」 및 관련 계획, 「녹색건축물 조성 지원법」 및 관련 계획, 국외 탄소중립도시 관련 근거 법령에 대한 자료 수집 및 분석
- 국내외 관련 문헌 및 선행연구자료 검토를 통한 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」법령 개정안 및 시행령 등 도출

□ 탄소배출량, 에너지수요량 산정 및 예측 모형을 활용한 통계분석

- 노후계획도시 특성 및 생애주기(LC) 정비과정(해체, 건설, 운영)별 탄소배출, 에너지사용 특성 도출을 위한 데이터 수집 및 모형설정, 통계분석
- 탄소배출 감축 기술 및 정책 실행을 가정한 전후 비교를 위해 건축물 연면적에 따른 온실가스 배출량, 에너지 사용량, 감축량 추산 모형 적용 및 효과 검증

□ 전문가 원고 의뢰, 자문 및 인터뷰, 세미나 개최

- 주요 민간 전문가, 정부 부처 및 지자체 담당 공무원, 학계 관련자가 참여하는 자문 및 의견수렴
- 탄소배출량 산정, 관련 기술, 기준, 규제 등에 대한 의견수렴을 위해 녹색건축, 탄소중립 관련 전문가를 대상으로 한 원고 의뢰, 심층 인터뷰, 세미나 개최

3) 연구의 주요내용

□ 탄소중립도시, 제로에너지특화도시 관련 문헌 및 정책 검토

- 탄소중립도시 및 제로에너지특화도시 이전의 도시개념 및 기후변화 대응
- 탄소중립도시 및 제로에너지 관련 도시개념 및 건축물의 정의, 기술 동향
- 탄소중립 및 제로에너지 건축물 관련 정책 및 법령, 추진경과

□ 노후 계획도시의 탄소배출 저감 관련 국내외 사례

- 노후계획도시 정비 및 탄소배출 저감을 위한 관련 정책 사례
- 탄소배출저감 관련 기술 및 계획기법 사례



1. 덴마크 코펜하겐 탄소중립도시 에코빌리지



2. 핀란드 에코비키 태양광 패널 입면 아파트



3. 하이델베르크 패시브하우스 복합단지

[그림 1-4] 탄소중립·에너지특화도시 관련 해외 공동주택 사례

출처: 1-강성찬. (2012) (<https://m.mk.co.kr/news/business/5307613>), 2-한국에너지정보문화재단 블로그. (<https://blog.naver.com/energyinfoplaza/222708142722>). 3-Enbausa.de. (2021) (<https://www.enbausa.de/darstellung/aktuelles/artikel/passivhaustagung-2021-erfahrungen-aus-der-bahnstadt-7586.html>) (검색일: 2024.2.3.)

□ 노후계획도시 재건축 생애주기별 탄소배출량 및 에너지 수요량 산정

- 에너지 소비량 추정 모형 구축
- 분당 신도시 아파트 단지 재건축 이후 에너지 수요량 및 탄소배출량 추정
- 탄소배출 저감을 위한 기술, 정책 적용 후 효과 추정
- 탄소배출 저감을 위한 기술, 정책을 가정한 각 케이스별 탄소배출 저감량, 에너지 저감량 산정 및 효과 검증

□ 노후계획도시 재건축 공동주택단지의 탄소배출 저감을 위한 정책방안 제시

- 현행 제도 하에서 적용 가능한 정책 대안에 대한 아이디어 제시
- 「노후계획도시정비법」 내 관련 내용을 반영한 개정안 제시(조항 신설 또는 시행령 및 시행규칙, 기준 관련 내용 제안)
- 지자체(노후계획도시)조례, 특별법 하위 시행령 및 지침으로 활용방안 제안
- 「노후계획도시정비법」 기본계획 수립 시 반영가능한 제도 및 규제, 인센티브 방안, 단계별 적용 아이디어, 가이드라인 등 제시



[그림 1-5] 연구의 흐름

4) 선행연구와 본 연구의 차별성

[표 1-3] 선행연구와 본 연구의 차별성

구 분	선행연구와의 차별성		
	연구목적	연구방법	주요연구내용
주요 선행 연구	1 - 과제명 : 친환경 근린개발을 위한 도시설계 기법연구 - 연구진(년도) : 유광홍 외(2009) - 연구목적 : 온실가스 감축을 위한 친환경 도시설계 요소를 도출하고 이를 적용하는데 소요되는 비용과 감축효과 검증	- 문헌분석 - 사례분석	- UAE 마스다르시티, 영국 베드제드, 박람회도시 림, 스웨덴 함마르비, 한국 동탄2, 검단, 탕정, 행복도시의 사례 분석 - 복합용도, 직주근접, 대중교통중심, 카셰어링, 패시브하우스 등의 특징을 도출 - 도시설계요소로서 친환경 토지이용, 녹색교통체계, 에너지절약형 건축, 신재생에너지, 수자원 순환체계 부문 요소도출 - 온실가스의 정량적인 도출 중심
	2 - 과제명 : 해외 신도시계획 사례에 나타난 저탄소 계획요소에 관한 연구 - 연구진(년도) : 전우선 외(2010) - 연구목적 : 해외사례분석을 통해 저탄소계획기법의 경향과 특성 파악	- 문헌분석 - 사례분석	- 마스다르, 함마르비, 말뫼, 림, 동탄, 칼룬드버그 사례 분석 - 에너지저장 건축, 에너지 절약형 교통, 지속가능 생태 및 수순환, 신재생에너지, 생태 및 녹지공원 항목에서 계획 요소의 도출
	3 - 과제명 : 탄소중립도시 해외사례 : 코펜하겐, 파리, 도쿄 - 연구진(년도) : 박창석(2021) - 연구목적 : 3개 도시사례를 중심으로 주요 특징과 우리나라 탄소중립도시를 위한 시사점 도출	- 사례분석	- 코펜하겐, 파리, 도쿄 등 탄소중립도시를 우리나라보다 먼저 선언한 해외도시들에 대한 이행단계에서의 특징을 정리 - 주로 계획단계에서의 내용을 온실가스 배출량, 에너지소비량, 재생에너지, 교통수단 등으로 구분하여 정리
	4 - 과제명 : CO2 and Carbon Emissions from Cities: Linkages to Air Quality, Socioeconomic Activity, and Stakeholders in the Salt Lake City Urban Area - 연구진(년도) : John C. Lin et al(2018) - 연구목적 : 솔트레이크시티를 대상으로 하여 탄소 중립도시로 전환하기 위한 실천계획 제시		- 각 주체별로 탄소배출량과 사회·경제적 활동의 상관관계를 정량적으로 분석 - 모델링을 통해 2040년까지의 배출량과 도시 구조의 변화를 예측하여 제시
	5 - 과제명 : 저탄소 도시계획 요소별 탄소감축량 산정 방법 연구 - 연구진(년도) : 이상문(2013) - 연구목적 : 계획수립 과정에 적용할 수 있는 CO2 감축량 산식모형 개발, 공간계획 분야 저탄소 계획기법 도출	- 문헌분석 - 모형산출	- 이산화탄소 감축을 위한 도시개발 차원에서의 계획요소를 제시하고, 이에 따른 탄소감축량 변화를 정량적으로 추정 - 계획요소를 실제 대상지에 적용해봄으로써 계획요소별 CO2 감축량을 산출하기 위한 알고리즘 개발
	6 - 과제명 : 건축물 생애과정에서의 이산화탄소 배출량 계산 프로세스에 관한 연구 - 연구진(년도) : 정영선·허정호(2011) - 연구목적 : 건축물이 생애주기 동안에 발생시키는 이산화탄소 배출량을 평가하기 위한 계산 프로세스를 제안	- 문헌분석	- 건축물 생애주기별 발생하는 CO2 배출량을 평가하기 위한 계산 프로세스 제시
	7 - 과제명 : 도시공간 계획요소를 이용한 이산화탄소 배출량 산정 모델 개발(서울시를 사례로)	- 문헌분석 - 배출량	- 연구 대상지의 CO2 배출량 산정 및 통계분석을 통해 도시개발로 인한 CO2 배출 강도를 예측할 수 있는 산정

구 분	선행연구와의 차별성		
	연구목적	연구방법	주요연구내용
본 연구	- 연구진(년도) : 김인현 외(2011) - 연구목적 : 도시공간 계획 및 설계안들의 탄소저감 효과를 예측할 수 있는 모델을 개발	- 산정 - 회귀분석	- 모델 개발
	- 과제명 : 탄소저감 도시계획 수립을 위한 모델구상 및 적용방안 연구 - 연구진(년도) : 노경식 외(2013) - 연구목적 : 국내 도시계획 실정을 반영한 탄소저감 도시계획 수립·적용을 위한 모델 구상	- 문헌분석 - 모델구축	- 해외 탄소저감 도시계획 사례 검토(일본 저탄소도시 가이드라인, 영국 저탄도 도시 조성 프로그램 등) - 도시 유형 및 부문별 탄소저감 도시계획 수립 모델 구축
	- 과제명 : 기성시가지 내 신도시 개발지역의 탄소 중립도시 조성방향 연구 - 연구진(년도) : 임희지 외(2009) - 연구목적 :	- 문헌분석	- 도시 내 신도시개발 규모 추정 및 유형 분류 - 개발단위별 적용 가능한 탄소저감요소 검토 - 탄소저감요소의 적용 및 요소별 경제성 파악 - 기성시가지 내 신도시 개발지역의 탄소저감 방향 설정
	- 과제명 : 1기 신도시 재건축 단지의 공공성 제고를 위한 정책방향 연구 - 연구진(년도) : 김성준 외(2023) - 연구목적 : 특별법에 따른 최고용적률(500%)의 가 능성과 공공성을 높이기 위한 방안 제시	- 문헌분석 - 사례분석 - 현장조사 - 전문가 자문 및 인터뷰 - GIS, 토지 피복 지수 분석 - 매스 대안 설계	- 재건축 시 고려해야 할 공공성에 대한 개념 정립 - 국내외 사례분석(서울, 과천 개별 재건축사례, 해외 공동 주택 재건축 사례)을 통한 문제점 및 시사점 도출 - 분당신도시의 재건축 추진 단지를 대상으로 한 재건축 용량산정 - 재건축 단지 유형별 매스대안 설계 - 재건축 시 공공성제고를 위한 가이드라인 원칙, 정책방향, 노후계획도시정비법에 대한 보완 제안
	- 과제명 : Prediction of Life Cycle Carbon Emissions of Sponge City Projects: A Case Study in Shanghai, China - 연구진(년도) : Lin, Xiaohu et al(2018) - 연구목적 : 도시공간의 생애주기적 탄소 배출량 산 정 및 탄소 흡수원 효과 추정	- 문헌분석 - 생애주기 분석(LCA)	- 도시(스펀지시티) 전 생애주기 관점에서 탄소배출 인벤 토리(직·간접 탄소배출량, 탄소흡수원) 구축
본 연구	- 연구목적: 노후계획도시의 재정비, 재건축 과정에서 탄소중립도시, 제로에너지 특화도시로의 전환을 위 한 필수적용 기술과 설계방안에 대한 구체적인 실천 계획 및 정책적·제도적 개선방안 제안	- 문헌분석 - 사례분석 - 현장조사 - 전문가 자문 및 인터뷰	- 탄소중립도시, 제로에너지특화도시 개념과 특징, 최신 문헌 및 동향 검토 - 노후 계획도시, 탄소중립·제로에너지특화도시 관련 해외 사례조사 및 분석 - 노후 계획도시의 도시공간구조 및 건축물, 도시설계 특성 도출 - 탄소중립·에너지특화도시의 기본 구성단위 유형별 프로토타입 제안 - 노후 계획도시를 탄소중립도시, 제로에너지특화도시로 전환하기 위한 구체적인 건축물, 도시 및 지구단위에서의 제도개선 및 정책 방안 제시

출처 : 연구진 작성

기존 연구들은 '탄소배출'과 관련하여 특정 개별 이슈만을 다루며 개념적·선언적인 연구 결과만을 제시하고 있다. 기존 지침들을 단순 요약하거나, 특정 이슈(친환경, 탄소배출 저감)에 대해서 탄소배출저감 신기술 활용 관련 개념적·원론적인 내용만을 다루고 있기 때문에 건축 및 도시설계 분야에서 활용되기 어렵다. 특히 탄소중립도시를 달성하기 위해서 신도시 뿐 아니라 기존 도시를 재정비, 재건축해야 함에도 각 단계에서 탄소중립도시, 제로에너지도시 관련 이슈들에 대한 공간적·물리적 방안들이 구체적으로 제시되지 못하고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 한계점을 극복하기 위해 노후계획도시들의 건축물 및 단지들이 해체-건설-운영 단계를 거치는 과정에서 발생하는 탄소배출량, 에너지수요량들을 추정해보고 현재 운용되는 기술 및 정책, 제도를 통해 이를 저감, 개선할 수 있는 방안을 모색한다.

또한 현 정부의 중요한 당면 과제인 '노후계획도시의 재정비'와 '탄소배출저감'이라는 두 가지 국가적 이슈를 결합한 구체적인 정책적 대안 요구에 대한 대응 차원이다. 즉 노후계획도시들을 동시다발적으로 재정비할 수 있는 근거인 국토부 주관의 「노후계획도시정비법」, 「녹색건축물조성지원법」과의 내용적·정책적 연계성을 고려한 연구이다. 그리고 그 결과인 정책적 실현수단으로서 「노후계획도시정비법」의 일부 개정안 및 법정 계획인 지자체 재정비계획 수립 및 실행과정에서 활용될 수 있는 정책방안을 제시한다.

제2장 탄소배출 저감 관련 문헌 검토 및 국내외 사례

- 1. 관련 문헌 및 정책 검토
 - 2. 탄소배출저감 관련 기술 및 정책 적용 사례
 - 3. 시사점
-

1. 관련 문헌 및 정책 검토

1) 관련 문헌 검토

① 건축물 생애주기 탄소배출 관련 문헌 검토

□ 운영탄소와 내재탄소

건축물의 생애주기에서 발생하는 탄소배출량은 운영 단계에서 발생하는 운영탄소, 그 외의 단계에서 발생하는 내재탄소로 구분할 수 있다. 운영탄소는 건축물 생애주기 상 운영단계에서 직접적, 간접적으로 배출된 탄소를 말하며⁹⁾, 내재탄소는 건설자재 생산과 정부터 건설, 건축물의 해체까지 운영단계를 제외한 단계에서 배출된 모든 탄소를 포함한다. 내재탄소는 특히 건설상품이 준공되기 직전까지 건설자재 생산과 시공과정에서 배출된 탄소만을 지칭하기도 하는데, 이는 건설상품의 건설과정에서 이미 내재된 탄소 배출이라는 의미가 있다.¹⁰⁾

9) 직접 배출량은 배출원에서의 활동으로 배출원 경계 내에서 배출되는 온실가스 양, 간접 배출량은 배출원에서의 활동이 온실가스 배출의 원인이 되나, 실제 온실가스 발생은 배출원 경계 밖에서 일어나는 경우의 배출량이다. 예를 들어 주택의 난방을 위해 가스보일러를 사용할 때 발생하는 온실가스는 주택의 직접 배출, 전기제품 사용을 위한 전력 생산단계에서 발생하는 온실가스는 간접배출이다. 2050 탄소중립위원회. (2021). p.12.

□ 건축물 생애주기 단계 구분과 단계별 탄소배출 비중

건축물의 생애주기 단계는 연구자에 따라 구분 단위, 사용하는 용어, 단계에 포함되는 목록에 조금씩 차이가 있다. 노승준·태성호(2017)는 건축물의 생애주기를 건축자재의 생산단계, 시공단계, 운영단계, 유지관리과정, 폐기단계로 구분하였고, 이세연 외(2023)는 건축자재 생산단계, 시공단계, 운영단계, 폐기단계, 재생단계로 구분하였다. 배은석·오규식(2015)은 건설단계, 운영단계, 철거/폐기단계로, 이홍일(2022)은 건설단계, 운영단계, 해체단계로 구분하였다.

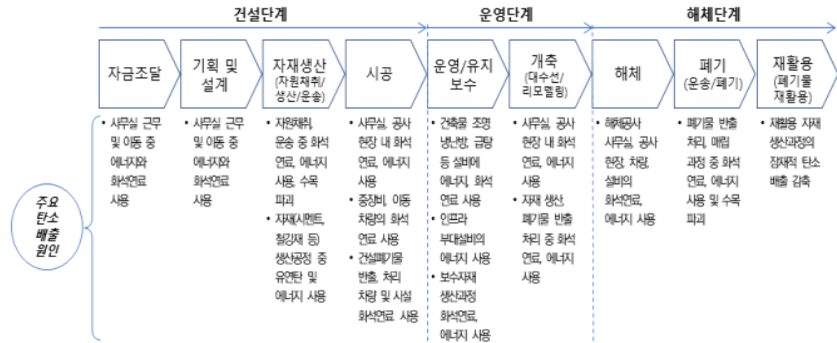
[표 2-1] 선행연구의 생애주기 단계 구분

연구자	생애주기 단계					
	생산	시공	운영	유지관리	철거/폐기	재생
노승준·태성호(2017)	건축자재 생산	건축자재 운송, 건축물 시공	건축물 운영	건축물의 개보수를 위해 신규 투입되는 건축자재 생산	건축물 해체, 폐건축자재 운송, 폐건축자재 매립	-
이세연 외(2023)	원재료 채취, 운송, 제조 공정	자재 운송, 현장시공	건물 운영에너지, 교체과정 (리모델링, 마감재료 교체)	-	건물 해체, 폐기물 운송, 매립·소각	유닛과 자재의 재사용
	건설		운영		철거/폐기/해체	
배은석·오규식(2015)	자재생산, 운송, 시공		전력, 가스, 지역난방, 상수도		해체, 운송, 중간처리	
이홍일(2022)	자금조달, 기획 및 설계, 자재생산(자원채취, 생산, 운송), 시공		운영/유지보수, 개축(대수선, 리모델링)		해체, 폐기(운송, 폐기), 재활용(폐기물 재활용)	

출처 : 연구진 작성

생애주기 단계별 이산화탄소 배출량은 운영단계에서 약 62-81%, 건설단계에서 약 15-32%, 해체 단계에서 약 2-3%가 배출되는 것으로 추정되었는데, 연구자별로 수치의 차이는 있으나 운영단계에서 대부분의 탄소가 배출되고 그 다음으로는 건설단계, 해체 단계 순으로 배출 비중이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

10) 이홍일. (2022). p.37.



[그림 2-1] 건설상품의 생애주기 단계별 탄소배출의 주요 원인

출처: 이홍일. (2022). p.34. 그림 3-3.

[표 2-2] 산업연관표를 활용한 건축물 생애주기 단계별 탄소배출 비중 분석

구분	건설단계			운영단계		해체단계		합계	
이강희 (1996)	세부 단계	시공		운영	개보수	해체		소계	
	탄소배출	27.0		62.0	8.0	3.0		100	
	비중(%)	27.0		70.0	3.0				
김성완· 이종성 (1988)	세부 단계	시공		운영	개보수	해체		소계	
	탄소배출	15.0		81.0	2.0	2.0		100	
	비중(%)	15.0		83.0	2.0				
태성호 (2022)	세부 단계	자재생산	자재운송	시공	운영	유지관리	해체	폐기	소계
	탄소배출	29.0	1.0	2.0	62.0	3.0	2.5	0.5	100
	비중(%)	32.0			65.0	3.0			

출처 : 이홍일. (2022). p.39. 표 3-4.

□ 건축물 생애주기 탄소배출 관련 선행연구

이세연 외(2023)는 건축물에서 배출되는 탄소를 전생애주기 관점에서 건축물의 원자재 생산, 운송, 건축 시공, 수선 및 폐기 과정에서 배출되는 내재탄소와 건축물의 운영단계에서 사용 시 배출되는 운영탄소로 분류하고, 공장에서 유닛을 생산하여 현장에서 조립하는 방식의 모듈러 공동주택과 철근콘크리트 공동주택의 배출량을 비교분석하였다.

평가 결과, 모듈러 공동주택의 내재탄소량이 RC 공동주택에 비하여 감소하는 것을 볼 수 있다. 전생애주기의 경우 30년 시나리오는 17.5%, 60년 시나리오는 20.7%, 운영단계를 제외한 내재탄소량은 30년 시나리오는 49.5%, 60년 시나리오는 60.2% 감소하였으며, 자재생산단계만을 보면 시멘트 사용 감소와 연계되어 35.1% 저감되었다. RC 공법에 비해 모듈러 공법이 탄소배출량 감축에 기여하는 것으로 나타났으나, 운영 단계에서 단열 기법 차이에 따른 열교현상에 의한 에너지손실을 반영하지 못한 한계가 있다.

노승준·태성호(2017)는 공동주택의 구조 및 평면 형태에 따른 전과정 내재 탄소배출량을 분석하고자 하였다. 일반적으로 주요 건축자재의 생산 단계에 대한 탄소배출량이 전체 내재 탄소배출량의 85% 이상을 차지하므로,¹¹⁾ 실제 철근콘크리트 구조로 건설된 공동주택 중 벽식구조 3곳, 라멘구조 3곳, 무량판구조 3곳의 실적자료를 이용하여 생산단계에서 탄소배출을 공통적으로 야기하는 주요 건축자재를 도출하였다. 분석 결과, 모든 구조의 공동주택에서 레미콘, 철근, 콘크리트벽돌, 유리, 단열재, 석고보드의 6가지가 탄소배출량의 95%를 차지하는 주요 건축자재로 나타났다.

배은석·오규식(2015)은 전과정평가를 이용하여 서울시 아파트의 이산화탄소 배출량을 분석하였다. 서울시 아파트를 주동형상 및 현관구조, 난방방식, 난방연료에 따라 유형을 분류하고 유형별 건설, 운영, 해체/폐기 단계에서 사용되는 에너지와 이산화탄소 배출량을 추정함으로써 환경 친화적인 아파트 유형을 파악하고자 하였다.

서울시의 총 3,833개의 아파트를 대상으로 전과정평가로 생애주기 단계별 이산화탄소 배출량을 분석한 결과¹²⁾, 건설단계에서는 콘크리트 제품 생산 과정에서의 배출량 저감, 운영단계에서는 전력 및 난방에너지 사용량 감축, 해체/폐기단계에서는 해체공법의 선택이 이산화탄소 배출량 감축의 핵심적 요소로 나타났다. 아파트 유형별로 면적당 배출량과 세대당 배출량을 비교한 결과 가장 많은 이산화탄소를 배출하는 유형은 탑상형의 초고층아파트와 복도형의 중앙난방을 사용하는 아파트로 나타났으며, 가장 적은 이산화탄소를 배출하는 유형은 계단실형의 판상형 아파트로 나타났다.

이홍일(2022)은 국가적인 탄소중립 추진이 건설사업에 미칠 파급효과를 파악한 후 성공적으로 탄소배출을 감축하기 위한 전략방향과 탄소배출 감축방안을 도출하고 건설기업, 자재생산기업, 정부 등 주요 관련 주체들의 역할과 협업 구조에 대해 살펴보려고 하였다.

건설산업의 생애주기 단계 내 세부 활동 중 탄소배출 비중이 높은 활동의 감축에 집중하는 것을 전략방향으로 설정하여 건설산업 차원에서 특화된 방안을 선정한 결과, 자재생산 관련 내재탄소 감축방안, 탄소배출 저감형 건설방식 도입/활용방안, 건축물 운영탄소 감축방안이 핵심 감축방안으로 도출되었으며, 수행 주체별로는 종합건설기업, 정부 외에도 시멘트, 철강재 등 자재생산기업의 탄소저감형 자재 생산, 발전기업의 에너지 전환을 통한 건설단계 및 운영단계의 간접적 탄소배출 감축 등도 중요하다고 하였다.

11) 노승준·태성호. (2017). p.67.

12) 배은석·오규식. (2015). pp.344-350.

② 제로에너지 관련 문헌 검토

□ 제로에너지건축물의 개념

- 에너지 수치 계산 기준에 따른 정의

Torcellini와 3인(2006)은 에너지 수치를 계산할 때 어떤 기준을 적용하느냐에 따라 최종에너지 소비 제로(Site ZEB), 1차에너지 소비 제로(Source ZEB), 에너지 비용 제로(Cost ZEB), 온실가스 배출 제로(Emission ZEB)의 네 가지로 분류하였다.¹³⁾ 이 분류는 에너지의 소비와 관련되어 가장 흔하게 사용되는 개념 중 하나이다.¹⁴⁾

[표 2-3] 에너지 수치 계산 기준에 따른 제로에너지건축물 개념

개념	설명
최종에너지 소비 제로 (Zero site(delivered) Energy)	건축물 대지 내에서 소비되고 건축물의 모든 에너지 계량기에 의해 측정되는 에너지를 강조하는 개념으로 에너지 생산, 전송 및 분배로 인한 에너지 손실을 고려하지 않음
1차 에너지 소비 제로 (Zero Primary (Source) Energy)	에너지 생산, 전송 및 분배에 필요한 에너지를 일컫는 개념으로 대지 내에서 생산된 전기를 수출하여 구매한 전기에 대한 손실이나 대지 내 소비되는 화석연료를 상쇄할 수 있음
에너지 비용 제로 (Zero Energy Costs)	대지 내에서 생산된 에너지를 전력망에 되팔아 모든 에너지 구매 비용을 상쇄하는 개념
온실가스 배출 제로 (Zero Emission)	에너지 소비량의 개념 대신 탄소 배출량을 측정하여 0이 되게 하는 개념

출처 : 김신성·진태승. (2018). p.14 표 2-1

- 신재생에너지 생산 방식에 따른 정의¹⁵⁾

패시브건축물 설계로 단열 및 기밀 성능을 고도화하여 에너지소요량을 최소화하는 방식과 대지 내에서 공급, 대지 외에서 공급의 두 가지 공급 유형으로 구분된다. 대지 내 공급은 건축물에 부착된 신재생에너지 설비 또는 대지 내 외부 공간에서 생산하는 경우를 말하며, 대지 외 공급은 인근의 대지 또는 원거리에서 생산한 신재생 에너지를 구매하는 경우를 말한다.

13) 조상규·이진민. (2010). p.20.

14) IPEEC Building Energy Efficiency Taskgroup. (2018). p.10.

15) 김신성·진태승. (2018). p.15.

[표 2-4] 신재생 에너지 공급방식 구분

신재생에너지 공급 방법	예시
패시브 설계로 건축물 에너지소요량 최소화	자연채광, 고효율 공조설비, 자연환기, 증발냉각 등
on-site	건축물에서 생산 가능한 신재생 에너지원 사용 태양광, 태양열, 건물에서의 풍력 발전 대지 내에서 생산 가능한 신재생 에너지원 사용 태양광, 태양열, 수력발전(low-impact hydro), 풍력발전
off-site	대지 외부의 신재생에너지원으로 대지 내에서 생산 바이오매스, 우드펠릿, 에탄올, 바이오디젤 등 대지외부에서 공급되는 에너지원 대지 외부에서 신재생에너지 생산 대지 외부의 신재생에너지 생산설비에 투자 대지 외부에서 신재생에너지 공급 신재생에너지 생산 전력 구매

출처 : 김신성·진태승, (2018). p.15 표 2-2

- 제로에너지 성능 수준에 따른 정의¹⁶⁾

국가나 기관별로 다양하게 사용되고 있는 제로에너지건축물의 정의를 제로에너지 성능 수준에 따라 크게 4가지로 분류할 수 있다.

[표 2-5] 제로에너지 성능 수준에 따른 제로에너지건축물 개념

개념	설명
Zero Energy Building Ready	패시브 하우스에서 Nearly Zero Energy Building 단계로 가기 전 시장의 여건이나 기술력 보안을 고려하여 신재생 에너지 생산을 제외한 저에너지 수준의 건축물
Nearly Zero Energy Building	제로에너지건축물 구축이 현실적 타당성이 낮으므로 건축물에서 사용되는 에너지 용도를 구분하고, 한정된 에너지에 대하여 제로에너지를 구현하는 건축물
Net Zero Energy Building	화석에너지를 사용할 수도 있으나 건물 효율화를 통해 에너지 사용량을 큰 폭으로 저감한 후, 신재생 에너지를 생산을 통해 연간 에너지 수지를 '0'으로 유지하는 건축물
Plus Energy Building	건물이 필요로 하는 에너지보다 더 많은 양의 에너지를 신·재생에너지원으로부터 생산하여 자동차(전기)용 에너지 등 기타 용도로 제공하는 건축물. 보통 이 단계에서는 한정된 에너지 요소(난방, 냉방, 급탕, 조명, 환기) 이외에 건축물에서 사용되는 모든 요소에 대한 사용량을 만족시키는 건축물

출처 : 이승연 외. (2017). pp.43-44의 내용과 p.44 그림 3-1의 내용을 종합하여 표로 작성

- 국내의 정책적 정의

「녹색건축물 조성 지원법」에서는 제로에너지건축물을 ‘건축물에 필요한 에너지부하를 최소화하고 신에너지 및 재생에너지를 활용하여 에너지 소요량을 최소화하는 녹색건축물’¹⁷⁾로 정의하고 있다. 김신성·진태승(2018)은 국내의 제로에너지건축물 정의가 Nearly

16) 이승연 외. (2017). pp.43-44.

Zero Energy Building에 근접하고 있으며, 신재생에너지 설치 없이 에너지 소요량을 제로로 한 경우 및 개별건축물 단위를 벗어나 대지 외부까지 고려하는 에너지 수지계산 기준에 따른 개념, 신재생에너지 생산 방식에 따른 개념은 반영하지 못하고 있다고 하였다.¹⁷⁾

□ 제로에너지건축물 요소기술

제로에너지건축물의 요소기술은 크게 냉·난방 에너지사용량을 최소화하는 패시브 기술, 에너지소비량을 최소화하는 액티브 기술이 있으며, 에너지의 소비 및 생산량을 측정·제어하는 관리기술과 신재생에너지를 생산하는 기술은 기관 및 연구진에 따라 액티브 기술에 포함되기도 하고 별도로 구분되기도 한다. 제로에너지건축물 인증시스템이나 국토교통부의 자료에서는 관리기술은 액티브 기술에 포함하고 재생에너지는 별도로 구분하고 있으나, 본 연구에서는 개별 건축물이 아닌 단지 단위의 계획을 고려하므로 개별 건축물의 에너지 효율을 높이는 요소기술, 신재생에너지 생산기술, 에너지 소비 및 생산량을 측정·제어하는 관리 기술의 세 가지로 구분하였다.

• 건축물의 에너지 효율을 높이는 요소기술

건축물의 에너지 효율을 높이는 요소기술은 단열, 기밀성능 강화 등 냉·난방 에너지요구량을 최소화하는 패시브 기술과 고효율 보일러, 폐열회수환기장치 등 에너지소비량을 최소화하는 액티브 기술로 나누어볼 수 있다.

[표 2-6] 건축물의 에너지 효율을 높이는 요소기술

요소기술	설명
자연환기	- 자연에너지인 바람의 통로를 설계하고 공기의 압력 차이를 활용하여 실내 공기가 실외 공기와 교환되도록 유도하는 기술 - 시설 내외부의 압력 차이로 인하여 발생하는 풍력환기와 온도 차이에 의한 부력으로 발생하는 중력환기로 구분 - 공간 특성에 맞는 환기방식과 개폐 방법, 개폐 면적 등의 고려가 필요함 - 예시: 개구부 개방, 창호일체형 자연환기 설비, 굴뚝 환기 구조
패시브 기술	- 창문은 유리로 되어 있어 단열재가 사용된 벽보다 일사의 유입이 많고 공기의 유입이 쉽기 때문에, 창문을 통한 일사차단과 공기유입을 막는 성능을 높인 창문을 고성능 창문(창호)라고 함 - 고성능 창문의 사용 시 냉난방에너지를 10% 이상 절감하는 효과를 얻을 수 있음 - 일반적으로 주거용 건물은 높은 일사 열 획득을 위해 로이유리를 안쪽에 사용하고, 비주거용 건물은 일사 열 획득을 위해 로이유리를 바깥쪽에 사용함 - 예시: 3중 유리 적용 창호, 로이유리(low-E glass) 적용 창호

17) 「녹색건축물 조성 지원법」(2022.3.25. 법률 제18469호) 제2조제4호.

18) 김신성·진태승. (2018). p.17.

요소기술	설명
	- 겨울철 난방에너지 상승의 주요인이 되는 창호를 에너지절감형으로 대체할 시, 난방에너지 요구량은 37.92%, 연간 에너지요구량은 18.31% 절감 가능
고기밀	- 창문이나 문을 닫았을 때 발생하는 틈이나 창문과 벽체에서 열이 빠져나가는 틈을 최소화하여 바깥 공기가 침투하거나 실내공기가 빠져나가는 것을 차단하는 기술 예시: 고기밀 이중창 창호, 기밀테이프를 부착한 창호
	- 건축물의 기밀성을 '패시브하우스기준'으로 설정할 경우, 기준주택 대비 난방에너지요구량은 5.49%, 연간에너지요구량은 3.15% 절감 가능
외단열	- 단열재를 건물 외부에 설치하여 단열재가 건물을 감싸도록 설치하는 방법을 의미하며, 다른 단열 방법에 비하여 단열 효과가 뛰어나고 열교 현상이 적음
	- 건축물의 단열방식을 외단열 시스템으로 변경할 경우, 난방에너지 요구량은 4.42%, 연간에너지요구량은 2.33% 절감 가능
외부차양	- 건물에 설치하는 처마나 블라인드 등을 이용하여 실내로 들어오는 태양광을 차단하는 기술을 의미함
	- 외부차양을 이용하여 냉방에너지의 5~15%를 절감 가능함 예시: 돌출된 상부차양 구조체, 가변형 외부차양, 패브릭 전동 외부차양
	- 패시브하우스기준'으로 차양 설치 시 기준주택 대비 냉방에너지요구량은 56.16%, 연간에너지요구량은 7.08% 절감 가능
자연채광	- 햇빛을 활용하여 주명의 역할을 대신해 불필요한 조명이 사용을 줄여주는 기술
	- 자연채광을 활용하여 조명 에너지의 35% 이상을 절약 가능 예시: 천창, 아트리움 구조, 광덕트(집광기를 통해 채광한 태양광을 광덕트를 이용해 실내로 전송)
옥상녹화	- 건물이 햇빛으로부터 받는 열을 차단(하절기)하거나 방출하는 열을 흡수(동절기)하기 위하여 건물 옥상에 식물을 심는 기술
	- 옥상녹화를 적용 시 기존건물의 옥상에 비하여 최고 3℃ 낮은 온도를 유지 가능하며 건물의 냉난방에너지를 최대 15%까지 저감이 가능함 예시: 중앙형 옥상 녹화 시설, 저관리 경량형 옥상 녹화 시설
고효율 보일러	- 가정에서 사용하는 전체 에너지 중 1/3 이상을 차지하는 난방 에너지의 절약을 위하여 실내난방과 온수공급 두 가지 역할을 동시에 하면서 높은 효율을 가진 보일러를 사용하는 기술
	- 총발열량기준 87%이상의 효율의 보일러 사용 또는 지역난방방식 적용할 경우, 건물 난방에너지의 약 8% 이상 절감 가능
액티브 기술	- 에너지 효율이 높은 가전제품으로 더 적은 에너지를 사용하는 뛰어난 성능의 제품들을 의미함
고효율 가전기	- 가전제품 중 에너지 사용량이 큰 에어컨의 경우 5등급 제품보다 1등급 제품을 사용할 시 약 30~40% 가량 에너지 절약이 가능함
	- 효율 최고등급 가전제품 사용 시 차상위등급 대비 약 21%의 에너지 절감 효과 → 가구당 연간 약 700kwh 절감, CO2 배출량 연간 약 298kg 감축 가능
폐열회수 환기장치	- 외부에서 유입되는 차가운 공기와 실내에서 외부로 버려지는 더운 공기의 열교환을 통해 실내에 공급되는 공기의 온도를 올려주는 장치
	- 80% 효율의 폐열회수기 설치 시, 기준주택 대비 난방에너지요구량은 27.87%, 연간에너지요구량은 16.07% 절감 가능
고효율 LED 조명	- LED 조명의 사용 전력은 일반 조명 대비 1/5 수준이며, 수명도 15배에 달하기 때문에 에너지 및 자원절약 측면에서 우수함

출처 : 한국에너지공단. (2018). pp.3-22; 이명주 외(2012), pp.279-281; 건축물에너지효율등급인증시스템 홈페이지(https://beec.energy.or.kr/BC/BC04/BC04_02_011.do 검색일(2024.08.21.); 이지은. (2020) 내용을 바탕으로 연구진 정리 및 작성

- 신재생에너지 생산기술

신재생에너지 생산기술은 태양광 발전, 풍력발전, 연료전지, 지열을 이용한 냉방/난방 장치, 태양열을 이용한 냉방/난방장치 등이다.

[표 2-7] 신재생 에너지 생산기술

요소기술	설명
태양광 발전	태양의 빛에너지를 변환시켜 전기를 생산하는 발전기술로 햇빛을 받으면 광전효과에 의해 전기를 발생하는 태양전지를 이용한 시스템 태양광 발전 패널(태양전지)의 설치 각도에 따라 발전 효율에 따라 차이가 발생하므로 태양광을 가장 효과적으로 흡수할 수 있는 태양광 발전 설치 계획이 필요함 지면에 설치하는 기존의 설치 방식과 함께 건물의 벽면 외피 재료에 태양광 발전 시스템을 결합한 건물일체형 태양광 발전시스템(BIPV)이 활용되고 있음 예시: 지면에 태양광 모듈 설치, 지붕에 태양전지 부착, 건물일체형 발전시스템(BIPV)
풍력발전	바람이 가진 에너지를 활용하여 전기를 생산하는 발전기술 바람이 부는 곳에서만 발전할 수 있다는 단점이 있으며, 바람의 양이 일정하게 많이 부는 지역에서 발전 효율이 높음 예시: 수직형 풍력 발전기, 수평형 풍력 발전기
연료전지	수소와 산소의 화학반응을 통해 직접 전기에너지를 생산하는 기술 현재는 수소의 가공이 어려워 천연가스를 연료로 사용하며, 항상 일정한 열이 필요한 곳에서 사용해야 높은 효율을 얻을 수 있음 오염물질을 배출하지 않는 친환경 기술로 날씨와 환경에 상관없이 항상 전기를 생산 가능하며, 설치 장소에 제한이 없음 전기를 생산하면서 발생한 열을 온수 및 난방으로 이용 가능함
지열을 이용한 냉방/난방장치	지열에너지는 토양, 지하수, 지표수 등이 태양복사열 또는 지구 내부의 마그마 열에 의해 보유하고 있는 에너지를 의미함 지열에너지의 열을 이용하여 난방/냉방을 하는 경우를 직접 이용 기술, 지열에너지의 열을 이용하여 전기를 생산하는 경우를 간접 이용 기술로 분류함 날씨, 계절 등 외부 환경의 영향을 크게 받지 않는 장점이 있음
태양열을 이용한 냉방/난방장치	태양 에너지를 열로 흡수하여 에너지로 이용하는 기술 태양열을 이용하여 물을 가열하면 가스나 전기를 사용하지 않아도 난방 및 급탕이 가능하며, 소음과 공해가 없다는 장점이 있음 태양열 에너지는 에너지밀도가 낮고 계절별, 시간별 변화가 심하므로 집열과 축열 기술이 가장 기본이 되는 기술임 예시: 진공관형 태양열 시스템, 평판형 태양열 시스템

출처 : 한국에너지공단. (2018). pp.23-32의 내용을 표로 작성

- 관리기술

건물에너지관리시스템(BEMS, Building Energy Management System)은 “건축물의 쾌적한 실내 환경 유지와 효율적인 에너지 관리를 위하여 에너지 사용내역을 모니터링 하여 최적화된 건축물에너지 관리방안을 제공하는 계측, 제어, 관리, 운영 등이 통합된 시스템”이다.¹⁹⁾ 제로에너지건축물 인증을 위해 건축물에너지관리시스템(BEMS) 또는 원격검침전자식 계량기를 설치해야 한다. 한국에너지기술연구원에 의하면 국내에서

BEMS를 설치한 건축물은 에너지 소비량을 평균 10% 이상 감축할 수 있는 것으로 나타났다.²⁰⁾

[표 2-8] 건물 에너지 관리기술

요소기술	설명
건물에너지관리 시스템(BEMS)	- ICT 기반 실시간 건물에너지 관리 톨 - 수집된 정보를 분석하여 건물 특성에 따라 개선방안 제시 및 자동제어를 통해 운영 상태를 최적화하는 첨단 시스템 - 건물에서 사용하고 있는 에너지 사용량을 실시간으로 계측하고 사용자에게 알려주는 기능, 각 건물에서 사용하고 있는 에너지 사용량을 분석하는 기능, 에너지 사용설비와 연동하여 계측-분석된 내용을 바탕으로 설비를 제어하여 건물에너지를 최적으로 관리하는 기능이 있음

출처 : 이승언 외. (2017). pp.43~44의 내용과 p.44 그림 3-1의 내용을 종합하여 표로 작성



[그림 2-2] 제로에너지건축물 적용기술

출처: 제로에너지건축물 인증시스템 홈페이지(https://zeb.energy.or.kr/BC/BC02/BC02_03_001.do) (검색일: 2024.1.21.)

□ 제로에너지건축물 관련 선행연구

- 공동주택의 제로에너지건축물인증 등급 달성 방안 관련 연구

김법전 외(2020)는 공동주택에서 제로에너지건축물인증을 획득하기 위해 적용 가능한 신재생에너지시스템을 경제성, 내구성, 설치 및 유지관리의 용이성 등을 고려하여 태양 광발전시스템으로 한정하고, 지붕 및 옥탑층 형태에 따른 태양광발전시스템의 설치용

19) 한국에너지공단. (2018). p.33

20) KT Enterprise 홈페이지, <https://enterprise.kt.com/bt/dxstory/1554.do> (검색일: 2024.08.21.)

량과 연간발전량을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

원종연·태영란(2021)은 실제 공동주택 2개 단지를 대상으로 옥상 및 입면에 설치 가능한 태양광 발전시스템 용량을 검토하여 실현가능한 제로에너지건축물 등급 수준을 분석하였다. 옥상면의 경우 일조분석을 통해 총 일주 5시간 이상 만족 구간을 검토하여 태양광 발전시스템을 적용할 수 있는 면적을 산출하였는데 태양광 설치 가능면적 비율은 주동 배치에 따라 54~73% 범위로 나타났으며, 평균 65%로 분석되었다.

제로에너지건축물 인증 등급별 태양광 발전시스템 적용 분석 결과, 제로에너지건축물 5등급과 4등급은 모두 발전시스템을 옥상에만 설치해도 달성이 가능한 것으로 나타났다. 3등급은 옥상의 가용 가능한 전체 면적에 더하여 입면 일부에 태양광 모듈의 적용이 필요하며, 2등급은 대상지의 일부만 달성이 가능하고, 1등급은 대상지 전체 모두가 달성 불가능한 것으로 나타났다.

- 공동주택 제로에너지건축물인증 시 경제성 관련 연구

윤요선 외(2020)는 공동주택에 적용할 신재생에너지시스템으로 태양광 PV를 설정하고, 공동주택 건축물이 제로에너지건축물 달성 가능한 에너지 자립률을 산정하여 PV 시스템을 적용할 경우의 경제성 분석을 수행하였다.

에너지 자립률 별로 적용된 태양광 패널의 물량을 산출하여 지붕 BRPV와 입면 LIPV의 공사비를 각각 산출하였는데, 입면 LIPV 설치 시 공사비는 층수에 따라 세대 당 공사비가 크게 차이나지 않았으나, 지붕 BRPV는 층수가 낮아짐에 따라 공사비가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 에너지자립률이 높아지면 공사비도 증가하였고, 입면 공사 시 공사비의 상승폭이 커서 지붕설치에 비해 경제성이 떨어지는 것으로 나타났다.

③ 시사점 종합

건축물에서 발생하는 탄소는 건축물의 운영단계에서 사용 시 배출되는 운영탄소와 원자재 생산, 운송, 건축, 시공, 수선 및 폐기 과정에서 발생하는 탄소로서 운영탄소를 제외한 모든 탄소를 포함하는 내재탄소로 구분할 수 있다. 건축물의 생애주기 단계별로 탄소배출량 비중을 살펴보면 대체적으로 운영단계에서 가장 많은 탄소가 배출되어 운영탄소의 감축이 가장 중요한 것으로 나타났으며, 건설단계의 경우 자재생산단계에서 대부분의 탄소가 발생하여 생산 시 탄소배출이 적은 친환경·탄소배출 저감형 자재를 사용하는 것이 내재탄소의 저감에 가장 효과적인 방식인 것을 알 수 있다.

[표 2-9] 건축물 전생애주기 탄소배출량 관련 선행연구 시사점

연구진 (년도)	연구 내용·결과	시사점
이세연 외 (2023)	- 모듈러 공동주택의 내재탄소량이 RC 공동주택에 비해 감소 - 장기 사용 시나리오가 단기 시나리오보다 감소	- 모듈러 공법이 내재탄소 감소에 유리 - 건축물의 장기사용이 필요
노승준· 태성호 (2017)	- 레미콘, 철근, 콘크리트벽돌, 유리, 단열재, 석고보드가 탄소배출량의 95%를 차지 - 투입되는 자재량-주거동의 건축면적, 레미콘·철근-구조 형식 및 주거동의 평면 형태, 콘크리트 벽돌·석고보드-주거동의 평면 형태와 상관관계 - 구조별 배출량 벽식구조>라멘구조>무량판구조 - 평면별 배출량 판상형>혼합형>타워형	- 주요 건설자재를 탄소배출 저감형으로 사용 필요 - 레미콘 사용량의 감축이 중요 - 탄소배출량이 적은 건물 구조와 평면 형태 사용 필요
배은석· 오규식 (2015)	- 생애주기 단계별로 이산화탄소 배출량 비중은 건설단계 18.59%, 운영단계 80.34%, 해체 및 폐기단계 1.06% - 건설단계는 짧은 기간에 많은 양의 이산화탄소 배출 - 건설단계 배출량의 95.91%를 자재 생산단계가 차지 - 레미콘, 파일, 철근, 시멘트, 석고보드, 유리 등 상위 10위까지의 자재가 전체의 약 96%를 차지하며, 레미콘이 전체 배출량의 67%를 차지 - 난방방식은 중앙난방>개별난방>지역난방 순으로 이산화탄소 배출량이 적어짐 - 탑상형의 초고층아파트와 복도형의 중앙난방을 사용하는 아파트가 배출량이 많음 - 계단실형의 판상형 아파트가 배출량이 적음	- 생애주기 단계 중 운영탄소 감축이 가장 중요 - 내재탄소는 건설단계의 자재생산 단계에서 감축하는 것이 효과적 - 주요 건설자재를 탄소배출 저감형으로 사용 필요 - 탄소배출량이 적은 건물 구조와 난방 방식 사용 필요
이흥일 (2022)	- 건설단계에서 30% 내외, 운영단계에서 70% 내외, 해체/폐기단계에서 2% 내외의 탄소배출 - 건설단계에서 탄소배출 중 자재생산 단계에서 배출되는 탄소의 비중이 80% 이상 - 건설자재별로 레미콘이 약 70%, 철골이 약 5% 탄소배출 - 해체된 폐기물의 재활용을 통해 약 0-2%의 탄소배출 감축 가능 - 건설단계 자재생산 관련 내재탄소 감축방안, 탄소배출 저감형 건설방식 도입/활용방안, 운영단계 건축물 운영탄소 감축방안, 해체단계 폐기물 재활용 방안이 건설 산업에 특화된 핵심 감축방안	- 생애주기 단계 중 운영탄소 감축, 건설단계의 자재생산 단계 탄소 감축, 해체단계 폐기물 재활용 방안이 중요 - 주요 건설자재를 탄소배출 저감형으로 사용하는 것이 필요

출처 : 연구진 작성

탄소중립형 제로에너지 단지, 제로에너지 타운의 계획요소 중 재건축 단위에서 적용 가능한 것은 패시브하우스 설계와 신·재생에너지 생산이며, 신·재생에너지의 생산이 에너지 자립률 상승에 중요하다.

[표 2-10] 탄소중립 관련 선행연구 시사점

연구진 (년도)	연구 내용·결과	시사점
이명식· 이강복 (2011)	- 탄소중립형 제로에너지 단지 시범도시에 적용가능한 기본 계획요소로 토지이용, 녹색교통, 신재생에너지, 에너지 절감 건축, 자연순환의 5가지 계획요소 도출	- 재건축 단위에서 적용 가능한 계 획요소는 패시브하우스, 지열 발 전, 태양열, 태양광
김민휘 외 (2022)	- 기존의 제로에너지타운을 플러스에너지커뮤니티로 리 모델링 - 단열성능은 기존과 동일한 상태에서 건물일체형 태양 광 발전시스템, 건물일체형 태양광·열 시스템 적용을 통해 에너지 자립률을 상승시킴	- 신·재생에너지의 생산이 에너지 자립률 상승에 중요 - 생산된 전력량의 측정·저장·판매 등 플러스에너지커뮤니티로 발전 하기 위한 기술은 아직 미비함

출처 : 연구진 작성

제로에너지건축물에서는 냉·난방 에너지요구량을 최소화하는 패시브 기술, 에너지소비
량을 최소화하는 액티브 기술, 신·재생에너지 생산기술, 건물에너지 관리시스템 등 다양
한 요소기술의 활용이 중요하다.

[표 2-11] 제로에너지도시 관련 선행연구 시사점

연구진(년도)	연구 내용·결과	시사점
김법전 외 (2020)	- 공동주택의 지붕 및 옥탑층 형태에 따른 태양광발전시스템의 설치용량과 연간발전량을 시뮬레이션 분석 - 박공지붕에 돌출형 코어를 갖는 20층 이하 규모의 공동주택에서 ZEB 5등급 획득 가능 - 그 이상의 규모는 추가적인 신재생에너지 설치나 에너지 효율 높이는 시스템 필요	- 태양광발전시스템이 경제성, 내구성, 설치 및 유지관리의 용이성에서 적절 - 고층의 공동주택에는 지붕에 설치하는 태양광발전시스템 외 추가적인 발전시스템이 필요함
원종연· 태영란 (2021)	- 실제 공동주택 2개 단지를 대상으로 옥상 및 입면에 설치 가능한 태양광 발전시스템 용량 검토, 실현가능한 제로에너지건축물 등급 수준 분석	- 입면의 경우 태양광 발전시스템 적용 가능면적은 주동 배치에 따라 변화함 - 고층은 설비 시스템의 배관길이, 펌프동력 등 효율성 문제로 더 많은 태양광시스템 면적 필요
윤요선 외 (2020)	- 공동주택 건축물이 태양광 PV 시스템을 사용하여 제로에너지건축물 달성 가능한 에너지 자립률 획득 시 경제성 분석 - 세대당 공사비는 입면 LIPV 설치 시 층수에 따라 크게 차이나지 않았으나, 지붕 BRPV는 층수가 낮아질수록 공사비 증가 - 입면 공사 시 공사비의 상승폭이 커서 지붕설치에 비해 경제성 떨어짐 - 에너지자립률이 높아지면 공사비 증가 - 지붕 BRPV만 설치할 경우 15~20층 규모에서 4등급 수준의 자립률 달성 가능, 14년 이내 투자비 회수 가능	- 경제성을 고려할 때 입면보다는 지붕에 태양광 시스템을 설치하는 것이 유리 - 에너지자립률이 높아질수록 공사비용이 증가하므로, 공동주택 단지의 여건을 고려한 목표 에너지자립률 설정이 필요 - 지붕과 입면의 태양광 시스템 설치를 고려한 건축물 규모 계획 필요

연구진(년도)	연구 내용·결과	시사점
김민경· 김민영 (2011)	- 세계 주요도시의 제로에너지타운 정책을 조사·분석 - 에너지정책과 주택정책이 유기적으로 연계되어 있으며 정부와 지자체의 정책이 일관적으로 이루어지는 것, 꾸준한 모니터링 및 사후관리체계 구축, 구체적인 목표와 실현 계획을 제시, 미래에 대한 투자로 인식하고 강력하게 지원, 민간과 공공의 협력, 시범단지 조성의 중요성을 시사점으로 제시	- 주택정책과 에너지정책의 유기적 연계, 일관적 정책 필요 - 실현 가능한 목표 제시, 적극적인 투자 및 실천 필요 - 민간이 참여할 수 있는 유인 필요 - 지속적인 관리체계 필요 - 시범단지 조성 필요

출처 : 연구진 작성

종합적으로, 건축물의 내재탄소를 감축하기 위해서는 주요 건설자재를 탄소저감형 자재로 사용하고 탄소배출량이 적은 구조 및 평면 형태를 중심으로 계획할 필요가 있다. 또한 건축물을 장기적으로 사용할 수 있도록 계획하는 것이 내재탄소 감축에 중요하다. 운영탄소 감축은 제로에너지건축물 건축과 밀접한 관계가 있는데, 특히 신·재생에너지를 생산하는 것이 에너지자립률을 높이는 데 필수적이다. 따라서 건축물에 단열 등 패시브 시스템과 고효율보일러 등 액티브시스템 요소기술을 설치하는 것에서 시작하여 신·재생에너지 생산까지 고려하는 것이 필요하다. 신·재생에너지 생산 시스템으로는 태양광 발전시스템이 가장 활용도 및 경제성이 높은 것으로 선행연구에 공통적으로 언급되고 있으며, 지붕에 우선적으로 설치하고 필요 시 입면에 건축물일체형 시스템을 설치하는 것이 경제적인 것으로 나타났다. 태양열 발전 시스템의 효율성은 주동의 높이, 지붕의 형태, 입면의 형태 및 주도 배치 등에 따라 달라지므로, 태양열 발전 시스템의 설치를 고려하여 단지를 계획할 필요가 있다. 또한 개별 단지 단위에서 법적으로 요구되는 최소 에너지자립률을 달성하지 못하는 경우가 발생할 수 있으므로, 이런 경우에 대처할 수 있도록 단지들을 그룹핑하여 재건축하도록 하거나 기부채납 공공시설물에 신·재생에너지 생산사이트를 포함하는 등 도시 차원의 Off-site적 대안을 고려할 필요가 있다.

2) 탄소중립 관련 정책 및 법령, 추진경과

① 탄소중립 관련 정책 및 법령 추진경과

[표 2-12] 탄소중립 관련 정책 및 법령 추진경과

년도	내용
2020.12.	2050 탄소중립 비전 국내·외 선언
2021.5.	‘2050 탄소중립 위원회’ 출범
2021.9.	「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(탄소중립기본법)」제정 (2023.3. 시행)

년도	내용
2021.10.	'2050 탄소중립 시나리오' 수립
2021.10.	2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향
2022.10.	「탄소중립기본법」에 따른 제2기 '2050 탄소중립·녹색성장 위원회' 출범
2022.10.	'탄소중립·녹색성장 추진전략' 수립
2023.4.	'탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 기본계획' 수립

출처: 연구진 작성

② 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(탄소중립기본법)」

「탄소중립기본법」 제31조에서는 에너지이용 효율과 신·재생에너지의 사용비율이 높고 온실가스 배출을 최소화하는 '녹색건축물'을 확대하기 위한 정책을 수립·시행하도록 하고 있으며, 이를 위해 대통령령으로 정하는 기준 이상의 건물에 대하여 중장기 및 기간별 목표를 설정·관리하고 신축되거나 개축되는 건축물에 에너지 소비량을 조절·절약할 수 있는 지능형 계량기를 부착하게 할 수 있다. 또한 제31조제3항에서는 건축물의 설계·건설·유지관리·해체 등의 전 과정에서 에너지·자원 소비를 최소화하고 온실가스 배출을 줄이기 위한 단계별 대책 및 기준을 마련하여 시행하도록 하고 있다.

[표 2-13] 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 내 녹색건축물 관련 내용

제31조	녹색건축물의 확대
①	정부는 에너지이용 효율과 신·재생에너지의 사용비율이 높고 온실가스 배출을 최소화하는 건축물(이하 "녹색건축물"이라 한다)을 확대하기 위한 정책을 수립·시행하여야 한다.
②	정부는 건축물에 사용되는 에너지 소비량과 온실가스 배출량을 줄이기 위하여 대통령령으로 정하는 기준 이상의 건물에 대하여 중장기 및 기간별 목표를 설정·관리하여야 한다.
③	정부는 건축물의 설계·건설·유지관리·해체 등의 전 과정에서 에너지·자원 소비를 최소화하고 온실가스 배출을 줄이기 위하여 설계기준 및 허가·심의를 강화하는 등 건설·유지관리·해체 등의 단계별 대책 및 기준을 마련하여 시행하여야 한다.
④	정부는 기존 건축물이 녹색건축물로 전환되도록 에너지 진단 및 「에너지이용 합리화법」 제25조에 따른 에너지절약사업과 「녹색건축물 조성 지원법」 제27조에 따른 그린리모델링 사업을 통하여 온실가스 배출을 줄이는 사업을 지속적으로 추진하여야 한다.
⑤	정부는 신축되거나 개축되는 건축물에 대해서는 전력소비량 등 에너지의 소비량을 조절·절약할 수 있는 지능형 계량기를 부착·관리하도록 할 수 있다.
⑥	정부는 중앙행정기관, 지방자치단체, 대통령령으로 정하는 공공기관 및 교육기관 등의 건축물을 녹색건축물로 전환하기 위한 이행계획을 수립하고, 제1항에서부터 제5항까지의 규정에 따른 정책을 적용하여 그 이행사항을 점검·관리하여야 한다.
⑦	정부는 대통령령으로 정하는 바에 따라 일정 규모 이상의 신도시 개발 또는 도시 재건축을 하는 경우에는 녹색건축물을 적극 보급하여야 한다.
⑧	정부는 녹색건축물의 확대를 위하여 필요한 경우에는 대통령령으로 정하는 바에 따라 재정적 지원을 할 수 있다.

출처: 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(2024.6.9. 법률 제19430호) 발령하여 연구진 작성

③ 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 기본계획

□ 탄소중립·녹색성장 국가전략

탄소중립·녹색성장 국가전략은 '2050년까지 탄소중립을 목표로 하여 탄소중립 사회로 이행하고, 환경과 경제의 조화로운 발전을 도모'하는 것을 비전으로, '탄소중립·녹색성장, 글로벌 중추국가로의 도약'을 전략 목표로 설정하고 있다. 국토의 저탄소화는 건물 에너지 자립 강화, 무공해 모빌리티 확산, 환경 친화적 농축수산 전환, 산림·습지의 탄소 흡수원 확충을 의미한다.

□ 중장기 건물 부문 감축 목표

2030 국가 온실가스 감축 목표(NDC)는 2015년 6월 최초 수립되었으며, 2019년 12월 표기 방식을 절대치 방식으로 변경하여 2018년 온실가스 배출량 대비 26.3%로 감축 목표를 수립하고 UN에 제출하였다. 이후 2021년 10월 '2050 탄소중립 선언'의 후속조치로 2018년 온실가스 배출량 대비 40%로 감축목표를 상향하였다.

「탄소중립기본법」에 따라 부문별·연도별 감축목표를 수립하였으며, 건물 부문의 경우 감축목표 상향 전후의 감축률이 32.8%로 동일하다. 건물 부문 감축의 방향은 신축건물의 제로에너지화 및 기존건물의 그린리모델링 등 에너지효율 강화, 건물 성능 정보 공개를 통한 효율 개선이다.

[표 2-14] 온실가스 부문별·연도별 감축목표(건물)

		(단위:백만톤CO ² e)								
구분	부문	2018 기준년도	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
배출	건물	52.1	47.6	47.0	46.0	44.5	42.5	40.2	37.5	35.0 (32.8%)

출처 : 관계부처 합동, (2023). p.21~22 표를 편집하여 연구진 작성

□ 탄소중립·녹색성장 국가 기본계획

• 1-3 건물 부문

건물 부문은 '국민의 생활 터전이 되는 모든 공간의 탄소중립화'를 추진방향으로 하여, 신규건축물의 제로에너지 건축 확산 등 에너지 성능 강화, 기존 민간·공공 건축물의 그

[표 2-15] 「탄소중립·녹색성장 국가 기본계획」 건물 부문 핵심 및 세부과제 중 재건축 관련 내용

출처 : 관계부처 합동. (2023). p.48 표에 p.42~47 내용을 추가하여 연구진 수정

• 1-6 폐기물 부문

폐기물 부문은 ‘생산·유통·소비 등 전 과정에서 자원을 효율적으로 이용하고 순환이용을 활성화하는 친환경 경제 체계 완성’을 추진방향으로 하여, 생산·유통·소비 등 폐기물 전 주기 원천 감량, 배출·수거체계 확립 등을 통한 재활용 원료인 폐자원의 안정적 공급, 플라스틱, 순환골재, 유기성 폐자원 바이오가스화 등 고부가가치 재활용 확대를 핵심 과제로 설정하였다. 이 중 고부가가치 재활용에 건설폐기물 재활용 확대가 포함되어 있다.

[표 2-16] 건축·도시 관련 폐기물 부문 핵심 및 세부과제 중 재건축 관련 내용

관리번호	과제명	주관부처(협조부처)
1-6-3	고부가가치 재활용 확대	
	② 건설폐기물 재활용 확대	
	- 건설폐기물 품목별 ‘분별해체’ 의무를 민간발주 공사까지 확대 검토하여 혼합배출 원천 차단(~’30년)을 통해 재활용 지원	환경부
	- 순환골재 사용 의무 대상·용도·사용량을 단계적으로 확대하고, 순환골재 생산자 품질관리 의무화 등 방안 마련(~’30년)	

출처 : 관계부처 합동, (2023). p.71 표에 p.69 내용을 추가하여 연구진 수정

④ 국토교통 2050 탄소중립 추진전략(국토교통 2050 탄소중립 로드맵)

국토교통 2050 탄소중립의 비전은 ‘국민의 생활토전이 되는 모든 공간과 이동수단의 탄소중립’으로 설정하였으며, 국토교통 분야가 핵심적인 역할을 수행하는 건물과 수송 부문 시나리오를 기반으로 하여 국토교통 분야의 목표를 2018년 대비 국토교통 온실가스 140.2백만 톤 감축으로 설정하였다.

□ 2050 건물 부문 감축 목표

2050 부문별 온실가스 감축 목표를 에너지로 환산하여 각 수단별 감축량을 에너지 용도로 할당하여 설정하였으며, 가정부문, 상업부문, 공공부문으로 나누어 수립하였다.

[표 2-17] 2050 가정부문 수단별/용도별 에너지 감축 목표(건물 부문)

					(단위:천 TOE)
수단	난방	냉방	기타	신재생	합계
건물에너지 효율향상	3,115	221	-	-	3,336
고효율기기보급	-	-	3,760	-	3,760
스마트에너지관리	-	-	228	-	228
행태개선	-	-	386	-	386
신재생	-	-	-	496	496
감축 합계	3,115	221	4,374	496	8,206

출처 : 국토교통과학기술진흥원, (2022). 표 5-19

□ 건물 부문 추진전략과 실천과제

건물 부문 추진전략은 건축물 에너지 효율 향상, 에너지고효율/저비용 건축자재·설비·기기 개발 및 확산, 스마트 에너지 관리 시스템 구축 및 행태 개선, 건축물 신재생에너지 설비 확산 및 전력화의 5가지이다.

건축물 에너지 효율 향상의 실천과제는 기존건축물 그린리모델링 사업 확대, 신축건축물 ZEB 사업 확대, 녹색건축 기반 및 관리 강화, 지역 중심의 녹색건축 추진역량 강화 및 지원체계 구축의 4가지로 구성되어 있으며, 이 중 신축건축물 ZEB 사업 확대와 관련하여 신축 공동주택을 대상으로 에너지성능기준을 강화하고, 신재생에너지 의무 적용을 확대하는 내용이 포함되어 있다.

[표 2-18] 신축 공동주택 에너지성능기준 강화 내용(건축물 에너지 효율향상 실천과제)

추진전략	실천과제
건축물 에너지 효율 향상	④ 신축 공동주택 에너지성능기준 강화
	- 신축 공동주택의 에너지성능 향상 • 30세대 이상 신축 공동주택 사업계획 승인 대상)의 에너지성능기준(에너지효율등급)을 현행 1등급 이상에서 1+ 등급 이상으로 상향 • 25년까지 공동주택 에너지성능을 ZEB 인증 기준인 에너지효율등급 1++ 등급 수준으로 강화 - 신재생에너지 의무 적용 확대 • '25년 신축 공동주택의 ZEB 인증 대비를 위하여 에너지자립률을 단계적으로 향상 • 신재생에너지 설비 항목의 점수 하한을 현행 10점에서 25점으로 상향

출처 : 국토교통과학기술진흥원. (2022). p.220 내용을 표로 작성

3) 제로에너지건축물 관련 정책 및 법령, 추진경과

① 제로에너지건축물 관련 정책 및 법령 추진경과

[표 2-19] 제로에너지건축물 관련 정책 및 법령 추진경과

단계	년도	내용
법령제정	2012	「녹색건축물 조성 지원법」 제정 및 공포
	2014	제로에너지 건축물 활성화 방안 발표, 저층형 시범사업 선정(4개소)
기반구축	2015	고층형 시범사업 선정(2개소)
	2016	단지형, 교육 연구시설 시범사업 선정(4개소)
상용화	2017	제로에너지건축물 인증제 시행(2017.01.20.), 보급 확산 사업 추진

단계	년도	내용
촉진	2019	제로에너지건축물 의무화 로드맵 발표 및 관련 법령 개정 제로에너지건축물 의무화 입법예고
	2020~	단계별 의무화 추진
의무화	2020	공공 1000㎡ 이상(5등급)
	2023	공공 500㎡ 이상(5등급), 공공 공동주택 30세대 이상(5등급)
	2024	민간 공동주택 30세대 이상(5등급 수준)
(이하 예정)	2025	공공 500㎡ 이상(일부용도 규모 대상, 4등급 수준 예상), 민간 1000㎡(5등급 수준)
	2030	공공 500㎡ 이상(일부용도 규모 대상, 4등급 수준 예상), 민간 500㎡ 이상(5등급 수준)
	2050	전 건물(1등급 수준)

출처 : 제로에너지건축물 인증시스템 홈페이지 정책동향에 내용을 추가하여 표로 작성 (https://zeb.energy.or.kr/BC/BC02/BC02_02_001.do) (검색일: 2024.1.21.)

② 「녹색건축물 조성 지원법」²¹⁾, 「녹색건축물 조성 지원법 시행령」

□ 에너지효율등급 인증제 및 제로에너지건축물 인증제

건축물의 에너지 소요량을 나타내는 에너지효율등급과 그에 따른 인센티브 등은 에너지효율등급 인증제 및 제로에너지건축물 인증제를 통하여 관리된다. 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증과 관련된 내용은 법 제17조~제20조에서 다루고 있으며, 인증제의 시행 및 건축물 에너지성능정보 공개, 인증기관의 지정 취소, 인증의 취소에 대한 내용을 포함한다. 에너지효율등급 및 제로에너지건축물 인증 대상 건축물의 용도와 규모, 건축물 에너지성능정보의 공개 대상 건축물은 녹색건축물 조성 지원법 시행령 제12조 및 제13조에 명시되어 있다.

[표 2-20] 「녹색건축물 조성 지원법」 및 동법 시행령 내 제로에너지건축물 관련 내용

법	내용
녹색건축물 조성 지원법	제17조 건축물의 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 대상 건축물 등
	① 국토교통부장관은 에너지성능이 높은 건축물을 확대하고, 건축물의 효과적인 에너지관리를 위하여 건축물 에너지효율등급 인증제 및 제로에너지 건축물 인증제를 시행한다.
	② 건축물 에너지효율등급 인증제 및 제로에너지건축물 인증제를 시행하기 위하여 운영기관 및 인증기관을 지정하고, 건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 업무를 위임할 수 있다.

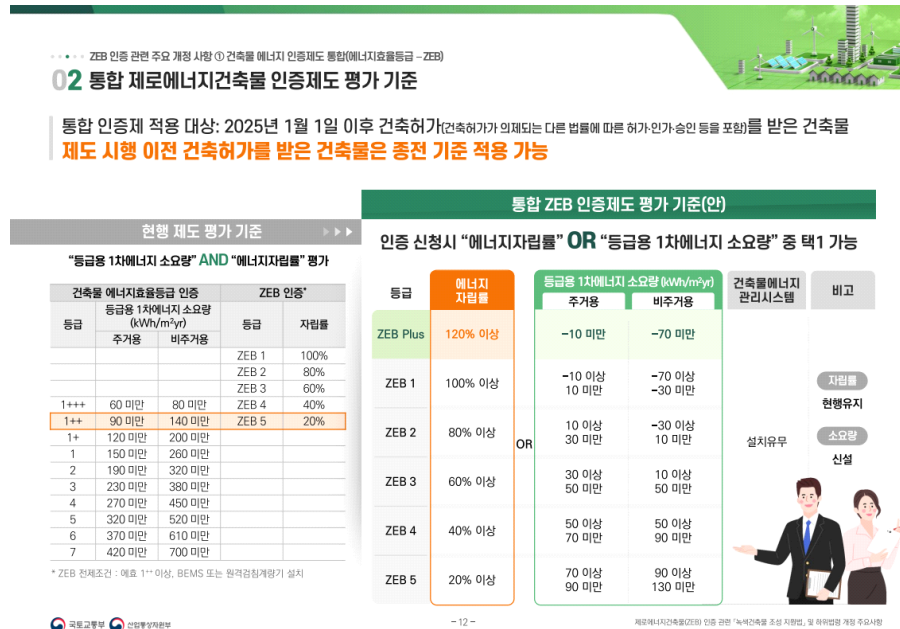
21) 「저탄소 녹색성장 기본법」이 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」으로 개정되어 2024년 7월 시행된 법령의 내용을 정리하였다. 제로에너지건축물에 대한 내용은 개정 전후가 동일하다.

법	내용
	③ 건축물 에너지효율등급 인증을 받으려는 자는 대통령령으로 정하는 건축물의 용도 및 규모에 따라 제2항에 따른 인증기관에게 신청하여야 하며, 인증평가 업무는 인증기관에 소속되거나 등록된 건축물에너지평가사가 수행하여야 한다. ④ 제3항의 인증평가 결과가 국토교통부와 산업통상자원부의 공동부령으로 정하는 기준 이상인 건축물에 대하여 제로에너지건축물 인증을 받으려는 자는 제2항에 따른 인증기관에 신청하여야 한다. ⑤ 제1항에 따른 건축물 에너지효율등급 인증제 및 제로에너지건축물 인증제의 운영과 관련하여 다음 각 호의 사항에 대하여는 국토교통부와 산업통상자원부의 공동부령으로 정한다. 1. 인증 대상 건축물의 종류 ⑥ 대통령령으로 정하는 건축물을 건축 또는 리모델링하려는 건축주는 해당 건축물에 대하여 에너지효율등급 인증 또는 제로에너지건축물 인증을 받아 그 결과를 표시하고, 「건축법」 제38조에 따른 건축물대장에 해당 사항을 지체 없이 적어야 한다.
제18조	건축물 에너지성능정보의 공개 및 활용 등 ① 국토교통부장관은 대통령령으로 정하는 건축물의 연간 에너지 사용량, 온실가스 배출량 또는 제17조에 따라 인증받은 해당 건축물의 에너지효율등급 등이 표시된 건축물 에너지 평가서를 제10조제5항에 따른 방법으로 공개하여야 한다. ② 「공인중개사법」에 따른 중개업자가 제1항에 해당하는 건축물을 중개할 때에는 매입자 또는 임차인이 중개 대상 건축물의 에너지 평가서를 확인할 수 있도록 안내할 수 있다. ③ 건축물 에너지 평가서의 내용, 공개 기준 및 절차, 활용방안, 운영기관 등 건축물 에너지성능정보의 공개 및 활용에 관한 구체적인 사항은 국토교통부령으로 정한다.
제12조	건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 대상 건축물 등 ① 법 제17조제3항에서 “대통령령으로 정하는 건축물의 용도 및 규모”란 다음 각 호의 용도 등을 말한다. 1. 「건축법 시행령」 별표1 제2호가목부터 다목까지의 공동주택 2. 업무시설 3. 그 밖에 법 제17조제5항제1호에 따라 국토교통부와 산업통상자원부의 공동부령으로 정하는 건축물 ② 법 제17조제6항 전단에 따라 에너지효율등급 인증 또는 제로에너지건축물 인증을 받아 그 결과를 표시해야 하는 건축물은 각각 별표1 각 호의 요건을 모두 갖춘 건축물로 한다.
녹색건축물 조성 지원법 시행령	제13조 건축물 에너지성능정보의 공개 및 활용 등 ① 법 제18조제1항에서 “대통령령으로 정하는 건축물”이란 법 제10조제1항에 따른 건축물 에너지·온실가스 정보체계가 구축된 지역에 있는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 건축물을 말한다. 1. 전체 세대수가 100세대 이상인 주택단지 내의 공동주택 2. 연면적 2천제곱미터 이상의 업무시설(「건축법 시행령」 별표 1 제14호나목2)에 따른 오피스텔은 제외한다) ② 삭제 (2015. 5. 28.)

출처 : 「녹색건축물 조성 지원법」(2022.3.25. 법률 제18469호), 「녹색건축물 조성 지원법 시행령」(2023.12.19. 대통령령 제34006호) 발췌하여 연구진 작성

제로에너지건축물 인증제의 내용이 건축물 에너지효율등급 인증제의 인증기준을 포함하고 있으므로, 2024년 2월 20일 ‘녹색건축물 조성 지원법’이 개정되어 2025년 1월 1일

부터 제로에너지효율등급 인증제가 폐지되고 제로에너지건축물 인증제로 통합될 예정이다. 기존에는 에너지효율등급을 획득한 후 제로에너지건축물 인증을 신청할 수 있었으나, 변경된 통합 인증제에서는 1차 에너지 소요량과 에너지 자립률 중 한 가지를 선택하여 평가받을 수 있다.



[그림 2-3] 통합 제로에너지 건축물 인증제도 평가 기준 변경 내용
출처: 국토교통부, 산업통상자원부. (2024). p.12.

□ 녹색건축물에 대한 건축기준 완화 및 지원

제로에너지건축물은 녹색건축물에 포함되므로, 녹색건축물 조성의 활성화 대상 건축물의 완화기준 대상에 포함된다. 「녹색건축물 조성 지원법」 제15조에서는 녹색건축물에 대한 건축기준 완화 내용을 다루고 있는데, 용적률, 건축물의 높이 등 건축기준을 최대 15% 완화할 수 있으며 인증등급에 따른 완화비율을 적용한다.

[표 2-21] 「녹색건축물 조성 지원법」 및 동법 시행령 내 제로에너지건축물 건축기준 완화 인센티브 관련 내용

법	내용
	제15조 건축물에 대한 효율적인 에너지 관리와 녹색건축물 조성의 활성화
녹색건축물 조성 지원법	① 국토교통부장관은 건축물에 대한 효율적인 에너지 관리와 녹색건축물 건축의 활성화를 위하여 필요한 설계·시공·감리 및 유지·관리에 관한 기준을 정하여 고시할 수 있다. ② 「건축법」 제5조제1항에 따른 허가권자는 녹색건축물의 조성을 활성화하기 위하여

법	내용
	여 대통령령으로 정하는 기준에 적합한 건축물에 대하여 제14조의제1항 또는 제14조의2를 적용하지 아니하거나 다음 각 호의 구분에 따른 범위에서 그 요건을 완화하여 적용할 수 있다. 1. 「건축법」 제56조에 따른 건축물의 용적률: 100분의 115 이하 2. 「건축법」 제60조 및 제61조에 따른 건축물의 높이: 100분의 115 이하 ③ 지방자치단체는 제1항에 따른 고시의 범위에서 건축기준 완화 기준 및 재정지원에 관한 사항을 조례로 정할 수 있다.
녹색건축물 조성 지원법 시행령	제11조 녹색건축물 조성의 활성화 대상 건축물 및 완화기준 ① 법 제15조2항에서 “대통령령으로 정하는 기준에 적합한 건축물”이란 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 건축물을 말한다. 3. 법 제17조에 따라 제로에너지건축물 인증을 받은 건축물 ② 국토교통부장관은 제1항 각 호의 어느 하나에 해당하는 건축물에 대하여 허가권자가 법 제15조제2항에 따라 법 제14조제1항 또는 제14조의2를 적용하지 아니하거나 건축물의 용적률 및 높이 등을 완화하여 적용하기 위한 세부기준을 정하여 고시할 수 있다.
출처 : 「녹색건축물 조성 지원법」(2022.3.25. 법률 제18469호), 「녹색건축물 조성 지원법 시행령」(2023.12.19. 대통령령 제34006호) 발췌하여 연구진 작성	

또한 법 제25조에서는 녹색건축물 조성사업에 대해 보조금의 지급, 세금 감면 등의 지원 및 특례를 제공할 수 있도록 하고 있으며, 제26조에서는 정부가 녹색건축물 조성을 촉진하기 위한 자원 조성 및 자금 지원, 새로운 금융상품의 개발, 기반시설 구축사업에 대한 민간투자 활성화 등의 금융 시책을 수립·시행하도록 하고 있다.

[표 2-22] 「녹색건축물 조성 지원법」 및 동법 시행령 내 녹색건축물 조성 촉진을 위한 금융 지원 및 활성화 관련 내용

법	내용
녹색건축물 조성 지원법	제25조 녹색건축물 조성사업에 대한 지원·특례 등 ① 국가 및 지방자치단체는 녹색건축물 조성을 위한 사업 등에 대하여 보조금의 지급 등 필요한 지원을 할 수 있다. ② 「신용보증기금법」에 따라 설립된 신용보증기금 및 「기술보증기금법」에 따라 설립된 기술보증기금은 녹색건축물 조성사업에 우선적으로 신용보증을 하거나 보증조건 등을 우대할 수 있다. <개정 2016. 3. 29.> ③ 국가 및 지방자치단체는 녹색건축물 조성사업과 관련된 기업을 지원하기 위하여 「조세특례제한법」과 「지방세특례제한법」에서 정하는 바에 따라 소득세 · 법인세 · 취득세 · 재산세 · 등록세 등을 감면할 수 있다. <개정 2016. 1. 19.> ④ 국가 및 지방자치단체는 녹색건축물 조성사업과 관련된 기업이 「외국인투자 촉진법」 제2조제1항제4호에 따른 외국인투자를 유치하는 경우에 이를 최대한 지원하기 위하여 노력하여야 한다.
	제26조 금융의 지원 및 활성화 정부는 녹색건축물 조성을 촉진하기 위하여 다음 각 호의 사항을 포함하는 금융 시책을 수립·시행하여야 한다. 1. 녹색건축물 조성의 지원 등을 위한 자원의 조성 및 자금 지원 2. 녹색건축물 조성을 지원하는 새로운 금융상품의 개발 3. 녹색건축물 조성을 위한 기반시설 구축사업에 대한 민간투자 활성화

출처 : 「녹색건축물 조성 지원법」(2022.3.25. 법률 제18469호) 발췌하여 연구진 작성

□ 녹색건축물 조성 시범사업

중앙행정기관의 장 및 지방자치단체의 장은 녹색건축물에 대한 국민의 인식을 높이고 녹색건축물 조성의 촉진을 위하여 녹색건축물 조성 시범사업을 지정할 수 있으며, 시범사업에 대해 재정지원 등을 통하여 지원할 수 있다.

[표 2-23] 「녹색건축물 조성 지원법」 및 동법 시행령 내 녹색건축물 조성 시범사업 관련 내용

법	내용
녹색건축물 조성 지원법	제24조 녹색건축물 조성 시범사업 실시 ① 중앙행정기관의 장 및 지방자치단체의 장은 녹색건축물에 대한 국민의 인식을 높이고 녹색건축물 조성의 촉진을 위하여 다음 각 호의 사업을 시범사업으로 지정할 수 있다. 1. 공공기관이 시행하는 사업 2. 기존 주택을 녹색건축물로 전환하는 사업 3. 녹색건축물을 신규로 조성하는 사업 4. 기존 주택 외의 건축물을 녹색건축물로 전환하는 사업으로서 대통령령으로 정하는 사업 ② 중앙행정기관의 장 및 지방자치단체의 장은 제1항에 따른 시범사업에 대하여 재정지원 등을 통하여 지원할 수 있다. ③ 제1항 및 제2항에 따른 녹색건축물 조성 시범사업의 지정절차, 녹색건축물 조성 기준의 적용, 재정지원 등에 대하여 필요한 사항은 국토교통부령으로 정한다.
	제17조 녹색건축물 조성 시범사업 법 제24조제1항제4호에서 “대통령령으로 정하는 사업”이란 국토교통부장관이 법 제13조제1항에 따라 고시하는 기준에 적합하게 기존 주택 외의 건축물을 녹색건축물로 전환하기 위하여 건축물의 리모델링·증축·개축·대수선 및 수선을 하는 사업을 말한다. 다만, 수선은 창·문, 설비·기기, 단열재 등을 통하여 에너지성능을 개선하는 사업으로 한정한다.

출처: 「녹색건축물 조성 지원법」(2022.3.25. 법률 제18469호), 「녹색건축물 조성 지원법 시행령」(2023.12.19. 대통령령 제34006호) 발췌하여 연구진 작성

③ 「건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준」

제로에너지건축물 인증을 받을 때 부지 외에서 생산한 신재생에너지도 생산량으로 인정·평가받을 수 있도록 ‘건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준’이 개정(2019. 3월 시행)되었다.²²⁾

22) 이인규. (2018), (<http://www.kharn.kr/news/article.html?no=8294>) (검색일: 2024.1.28.)

주1) 단위면적당 1차에너지 생산량(kWh/m²·년)

$$= \text{대지 내 단위면적당 1차에너지 순 생산량}^* + \text{대지 외 단위면적당 1차에너지 순 생산량}^* \times \text{보정계수}^{**}$$

* 단위면적당 1차에너지 순 생산량 = $\sum[(\text{신재생에너지 생산량} - \text{신·재생에너지 생산에 필요한 에너지소비량}) \times \text{해당 1차에너지 환산계수}] / \text{평가면적}$

주2) 단위면적당 1차에너지 소비량(kWh/m²·년)

$$= \sum(\text{에너지소비량} \times \text{해당 1차에너지 환산계수}) / \text{평가면적}$$

※ 냉방설비가 없는 주거용 건축물(단독주택 및 기숙사를 제외한 공동주택)의 경우 냉방평가 항목을 제외

▲ 단위면적당 1차에너지 생산량, 순생산량, 소비량 계산식

[그림 2-4] 부지 외(Off-site) 신재생에너지 생산 시 단위면적당 1차에너지 생산량, 순생산량, 소비량 계산식
출처: 이인규. (2018). (<http://www.kharn.kr/news/article.html?no=8294>) (검색일: 2024.1.28.)

④ 제로에너지건축물 인센티브

제로에너지건축물 조성을 촉진하기 위하여 기반시설 기부채납 경감, 건축기준 완화 등의 건축 관련 인센티브, 신재생에너지 설치보조금, 에너지이용 합리화 자금지원 등 설비 투자 관련 지원, 건축물에너지효율등급 인증 수수료 감면 등 인증 관련 지원, 건축물 또는 주택 취득세 20% 감면 등 세제혜택, 주택도시시기금 대출한도 상향 등의 재정적 인센티브가 제공되고 있다.



[그림 2-5] 제로에너지건축물 건축 시 시기별 신청 가능한 인센티브

출처: 제로에너지건축물 인증시스템 홈페이지 (https://zeb.energy.or.kr/BC/BC03/BC03_05_003.do) (검색일: 2024.2.4.)

[표 2-24] 제로에너지건축물 인센티브

인센티브	내용	근거법·규정	비고
건축기준 완화	용적률, 건축물의 높이 등 건축기준을 제로에너지건축물 등급에 따라 최대 15% 완화	「녹색건축물조성지원법」 제15조 「에너지절약설계기준」 제17조	
주택건설사업 기반시설 기부채납률 경감	제로에너지건축물 인증을 받은 주택건설사업의 경우에는 기부채납 부담수준에 대하여 최대 15%의 경감률을 적용	「주택건설사업 기반시설 기부채납 운영기준」 2-2-2	
신·재생에너지 설비보조금	시범사업: 모든 주택, 건물 및 부속시설물에 기술개발 결과물 등을 적용하거나, 신기술의 실증 후 신기술 등을 적용하기 위해 해당 신·재생에너지 설비를 일정기간 동안 시범적으로 설치하려는 경우	산업통상자원부 신·재생에너지 보급사업 공고	건물 지원 사업과 시범사업이 있음
에너지이용 합리화 자금지원	제로에너지건축물 예비인증을 취득한 건축물의 에너지효율관련 설비 투자 시 투자비의 일부를 장기 저리로 지원	2022년도 에너지이용합리화사업을 위한 자금지원 지침[별표 1]	기업 대상
건축물에너지 효율등급 인증 수수료 감면	제로에너지건축물인증 표시 의무대상이 아닌 민간건축물에 대해 건축물에너지 효율등급 인증 수수료 최대 100% 감면	「건축물에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준」	
세제혜택	건축물 또는 주택 취득세 20% 감면	「지방세특례제한법」 제 47조의2	2023.12.31. 종료
주택도시기금 대출한도 상향	제로에너지건축물 인증을 받은 공공임대주택 및 민간임대주택에 대해 대출한도 상향	「2023년도 주택도시기금 운용계획」	

출처 : 제로에너지건축물 인증시스템 홈페이지(https://zeb.energy.or.kr/BC/BC03/BC03_05_003.do)의 내용을 바탕으로 연구진 작성 (검색일: 2024.2.4.)

[표 2-25] 제로에너지건축물 인증에 따른 건축기준 완화 비율

최대완화비율	완화조건	비고
15%	제로에너지건축물 1등급	에너지자립률 ²³⁾ 이 100% 이상
14%	제로에너지건축물 2등급	에너지자립률이 80% 이상~100% 미만
13%	제로에너지건축물 3등급	에너지자립률이 60% 이상~80% 미만
12%	제로에너지건축물 4등급	에너지자립률이 40% 이상~60% 미만
11%	제로에너지건축물 5등급	에너지자립률이 20% 이상~40% 미만

출처 : 건축물의 에너지절약설계기준[국토교통부고시 제2023-104호] 별표9의2에 내용을 추가하고 편집하여 연구진 작성

23) 「건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준」 별표1의2
에너지자립률(%)=단위면적당 1차에너지 생산량(kWh/㎡년)/단위면적당 1차에너지 소비량(kWh/㎡년)×100
단위면적당 1차에너지 생산량=대지 내 단위면적당 1차에너지 순생산량+대지 외 단위면적당 1차에너지 순생산량×보정계수
단위면적당 1차에너지 순생산량=Σ((신재생에너지 생산량-신재생에너지 생산에 필요한 에너지량)×해당 1차에너지 환산계수)/평가면적

4) 「노후계획도시정비 및 지원에 관한 특별법」 내 탄소배출 저감 관련 내용

「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」에서 말하는 ‘노후계획도시’란 ‘대규모 주택 공급 등을 목적으로 「택지개발촉진법」에 따른 택지개발사업 등 대통령령²⁴⁾으로 정하는 사업에 따라 조성 후 20년 이상 경과하고 면적이 대통령령²⁵⁾으로 정하는 바에 따라 100만 제곱미터 이상인 지역으로 제6조에 따라 노후계획도시정비기본계획이 수립된 지역’이다.²⁶⁾

[표 2-26] 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」 및 동법 시행령 내 ‘노후계획도시’의 정의

법	내용
노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법	제2조 정의 ① “노후계획도시”란 대규모 주택공급 등을 목적으로 「택지개발촉진법」에 따른 택지개발사업 등 대통령령으로 정하는 사업에 따라 조성 후 20년 이상 경과하고 면적이 대통령령으로 정하는 바에 따라 100만 제곱미터 이상인 지역으로 제6조에 따라 노후계획도시정비기본계획이 수립된 지역을 말한다.
	제2조 노후계획도시 조성사업 등 ① 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」(이하 “법”이라 한다) 제2조제1호에서 “「택지개발촉진법」에 따른 택지개발사업 등 대통령령으로 정하는 사업”이란 다음 각 호의 사업을 말한다. 1. 「공공주택 특별법」에 따른 공공주택사업 2. 「도시개발법」에 따른 도시개발사업(같은 법 제11조제1항제1호부터 제4호까지의 어느 하나에 해당하는 사업시행자가 시행하는 사업으로 한정한다) 3. 「산업입지 및 개발에 관한 법률」에 따른 산업단지개발사업(같은 법 제16조제1항제1호 또는 제2호의 사업시행자가 시행하는 사업으로 한정한다) 4. 「신행정수도 후속대책을 위한 연기·공주지역 행정중심복합도시 건설을 위한 특별법」에 따른 행정중심복합도시건설사업 5. 「주택법」 제24조제2항에 따른 국민주택건설사업 또는 대지조성사업 6. 「택지개발촉진법」에 따른 택지개발사업 7. 「혁신도시 조성 및 발전에 관한 특별법」에 따른 혁신도시개발사업 ② 법 제2조제1호에서 “면적이 대통령령으로 정하는 바에 따라 100만 제곱미터 이상인 지역”이란 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 지역으로서 면적이 100만 제곱미터 이상인 지역을 말한다. 1. 제1항 각 호의 어느 하나에 해당하는 사업으로 조성된 지역. 다만, 제1항제3호에 따른 사업으로 조성된 산업단지의 경우에는 면적이 50만 제곱미터 이상인 주거시설용지를 포함하는 경우로 한정한다. 2. 둘 이상의 제1호에 따른 지역이 서로 연결 또는 인접[각 지역의 전부 또는 일부가 같은 행정동(「지방자치법」 제7조제4항에 따른 행정동을 말한다. 이하 같다)]

24) 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법 시행령」(2024.4.23. 대통령령 제34443호) 제2조제1항

25) 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법 시행령」(2024.4.23. 대통령령 제34443호) 제2조제2항

26) 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」(2023.12.26. 법률 제19847호) 제2조제1항

법	내용
	또는 연접한 행정동에 위치하는 경우를 말한다. 이하 이 항에서 같다]한 경우로서 해당 지역의 면적을 합한 지역
	3. 제1호에 따른 지역과 다음 각 목의 요건을 모두 갖춘 지역을 합한 지역
	가. 제1호에 따른 지역에 연접 또는 인접한 지역일 것
	나. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제36조제1항제1호에 따른 도시지역일 것
	다. 면적이 50만 제곱미터 이하이고, 제1호에 따른 지역 면적의 25퍼센트 이하일 것
	4. 제2호에 따른 지역과 다음 각 목의 요건을 모두 갖춘 지역을 합한 지역
	가. 제2호에 따른 지역에 연접 또는 인접한 지역일 것
	나. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제36조제1항제1호에 따른 도시지역일 것
	다. 면적이 50만 제곱미터 이하이고, 제2호에 따른 지역 면적의 25퍼센트 이하일 것

출처 : 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」(2023.12.26. 법률 제19847호), 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법 시행령」(2024.4.23. 대통령령 제34443호) 발췌하여 연구진 작성

노후계획도시정비기본계획 수립 시 ‘저탄소 녹색도시로의 전환을 위한 추진계획’과 ‘건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등 재활용 촉진계획’을 포함하여야 하며²⁷⁾, 노후계획도시특별정비구역을 지정하고 특별정비계획을 수립할 때에는 ‘녹색건축 등 건축물 에너지효율화 계획’과 ‘건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등에 관한 계획’을 포함하여야 한다.²⁸⁾

[표 2-27] 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」 내 탄소중립, 제로에너지건축물 관련 내용

법	내용
노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법	제7조 기본계획의 내용
	① 기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.
	12. 저탄소 녹색도시로의 전환을 위한 추진계획
	13. 건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등 재활용 촉진계획
	제12조 특별정비계획의 수립
	① 특별정비계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.
	17. 녹색건축 등 건축물 에너지효율화 계획
	18. 건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등에 관한 계획

출처 : 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」(2023.12.26. 법률 제19847호) 발췌하여 연구진 작성

27) 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」(2023.12.26. 법률 제19847호) 제7조제1항제12호, 제13호

28) 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」(2023.12.26. 법률 제19847호) 제12조제1항제17호, 제18호

노후계획도시특별정비구역에서는 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」, 「건축법」, 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」 등에 따른 건축규제의 완화 등에 대한 특례, 특별정비계획 수립 시 「도시 및 주거환경정비법」에 따른 안전진단 관련 특례 등을 적용받을 수 있다.

[표 2-28] 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」 내 녹색건축물 금융 지원 및 활성화 관련 내용

법	내용
노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법	제25조 건축규제의 완화 등에 관한 특례 ① 지정권자는 특별정비구역에서 다음 각 호의 사항에 대하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 완화된 기준을 적용할 수 있다. 다만, 제3호의 경우 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제78조 및 관계 법령에 따른 용적률 최대한도의 100분의 150을 초과할 수 없다. 1. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제76조에 따른 용도지역·용도지구에서의 건축물의 건축 제한 2. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제77조 및 관계 법령에 따른 건폐율의 제한 3. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제78조 및 관계 법령에 따른 용적률의 제한 4. 「건축법」 제60조 및 제61조에 따른 건축물의 높이 제한 5. 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」 제14조에 따른 도시공원 또는 녹지의 확보기준 ② 특별시장·광역시장·특별자치시장·특별자치도지사·시장 또는 군수는 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제40조의2제1항에도 불구하고 특별정비구역 일부를 같은 법 제40조의2에 따른 입지규제최소구역으로 지정 또는 변경할 수 있다. ③ 제2항에 따른 입지규제최소구역의 지정 등에 관한 사항은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제40조의2제2항부터 제5항까지를 준용한다.
	제26조 「도시 및 주거환경정비법」에 대한 특례 ① 지정권자는 「도시 및 주거환경정비법」 제8조제1항에도 불구하고 특별정비계획을 수립할 수 있다. ② 지정권자는 특별정비에정구역에 포함되는 주택단지의 재건축 사업에 대하여 제30조제1항 각 호에 따른 공공기여에 관한 사항을 고려하여 공공성이 인정되는 경우 「도시 및 주거환경정비법」 제12조에 따른 안전진단을 실시하지 아니하거나 완화된 기준을 적용하여 특별정비계획을 수립할 수 있다. ③ 제2항에 따른 안전진단 완화 또는 면제의 대상 및 기준 등에 필요한 사항은 대통령령으로 정한다.

출처 : 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」(2023.12.26. 법률 제19847호) 발췌하여 연구진 작성

2. 탄소배출저감 관련 기술 및 정책 적용 사례

1) 건축물 생애주기별 탄소배출저감 기술 및 적용 효과

① 건축물 생애주기 단계에 따른 탄소배출저감 및 에너지 사용량

건축물의 생애주기에서 에너지 사용량과 탄소 배출 모두 운영 단계에서 가장 높게 나타난다. 운영 단계에서의 탄소배출 및 에너지 사용량 저감은 제로에너지 건축물, 재생에너지 활용 등 다양한 계획기법을 통해 추진될 수 있다.

□ 생애주기별 온실가스배출량

Wu et al.(2012)는 중국의 한 사무실 건물의 에너지 소비와 이산화탄소 배출에 대한 생애주기평가를 진행하였다. 건축 자재 생산, 건설, 운영 및 해체 과정으로 나누어 에너지 소비와 탄소 배출량을 확인하였으며, 운영 단계의 에너지 소비 비율은 85.99%로 가장 높게 나타났다. 건축자재 생산 단계는 총 에너지 소비의 12.32%이고 건설 및 해체 단계는 각각 1.41%, 0.28%를 차지한다. 탄소 배출량은 건물 운영 단계가 총 탄소 배출의 81.29%로 가장 높다. 건축 자재 생산 단계는 4.49%의 비율을 보이고 건설 및 해체 단계는 각각 0.55%, 13.67%를 차지한다.²⁹⁾

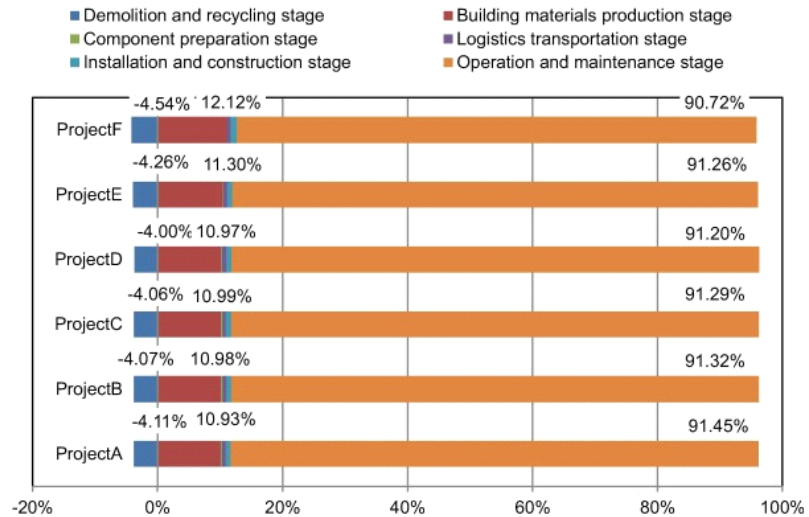
Peng(2016)은 중국 난징의 건축물을 대상으로 건물의 생애주기 동안 발생하는 탄소 배출을 조사하였다. 이를 위해 Ecotect와 건물 정보 모델링(Building Information Modeling, BIM) 기술을 활용하였다. 건축물 성능에 영향을 미치는 요인을 식별하기 위해 민감도 분석을 수행했고, 결과적으로 운영 단계가 전체 배출의 약 85.4%를 차지하여 탄소 배출의 주요 원인임을 확인했다. 시공 단계는 전체 배출의 약 12.6%를 차지하며, 해체 단계는 전체 배출의 약 2%를 차지하였다.³⁰⁾

Li et al.(2022)의 연구에서는 사전 제작 콘크리트 건물이 자원을 절약하고 건설 기간을 단축하며 품질을 향상시키고 오염을 줄일 수 있다는 사실을 확인했다. 운영 및 유지 관리 단계에서 탄소 배출은 전체의 약 91%를 차지했으며, 자재 생산 단계는 약 11%를 차지했다. 해체 및 재활용 단계는 -4%로 나타났다.³¹⁾

29) Wu et al. (2012). pp.105-118.

30) Peng, C. (2016). p.464.

31) Li et al. (2022). p.17.



[그림 2-6] 건물의 생애주기별 탄소 배출 비율

출처: Li et al. (2022), p.16.

□ 에너지 효율 건축물의 생애주기별 온실가스배출량

Röck et al.(2020)은 건물 생애주기 동안 발생하는 온실가스 배출을 조사하기 위해 650 개 이상의 생애주기평가 사례 연구를 수집하고 분석하였다. 그중 238개 사례를 기반으로 보았을 때 에너지 성능 등급이 높을수록 온실가스 배출이 감소하는 추세를 보였지만, 건축 자재의 제조 및 가공에서 발생하는 ‘시공된(Embodied)’ 온실가스 배출량이 증가하였다. 시공 에너지는 전체 생애주기 온실가스 배출의 약 20-25%를 차지하며 에너지 효율이 높은 건물의 경우 비율이 45-50%로 증가하고 극단적인 경우 90%를 초과하였다.³²⁾

Chastas et al.(2018) 연구는 95개의 주택 건물을 대상으로 생애주기 중 시공 단계의 에너지와 탄소 배출에 대해 조사하였다. 연구 결과 열적 특성이나 에너지 효율을 고려하지 않은 전통적 건물의 시공 에너지는 9~22%의 비율을 차지하고 주요한 냉난방 시스템 없이 내부 환경을 유지할 수 있는 패시브 건물은 32~38%, 전통적인 건축물보다 훨씬 더 낮은 에너지 소비를 목표로 설계되고 건축된 저 에너지 건물은 21~57%의 비율을 차지하는 것으로 나타났다.³³⁾

32) Röck et al. (2020). p.1.

33) Chastas et al.(2018). p.223.

□ 건축자재, 건축구조에 따른 시공에너지와 온실가스배출량

Abouhamad & Abu-Hamd(2021) 연구는 건축 시스템의 시공 에너지와 시공 온실가스 배출에 대한 생애주기평가 프레임워크를 개발하여 영향력이 높은 요인을 식별하였다. 자재 생산 단계가 전체 시공 환경 영향의 약 90%를 차지하여 자재 생산 단계에서의 효율성을 높이거나 더 친환경적인 자재 사용이 중요함을 도출하였다.³⁴⁾

Minunno et al.(2021) 연구는 8개의 건축자재(콘크리트, 철근, 구조용 강철, 목재, 타일, 단열재, 석고)와 세 가지 건물 유형(콘크리트, 목재, 강철)과 관련한 시공 에너지와 탄소배출에 대해 연구하였다. 연구 결과 콘크리트를 목재로 대체하면 에너지를 최대 43%, 이산화탄소를 최대 68% 절감할 수 있으며 부산물 통합(by-product integration)을 통해 콘크리트에서 에너지를 최대 33%, 이산화탄소 최대 63% 절감 가능성을 밝혔다.³⁵⁾

□ 건물 해체 단계의 온실가스배출량, 폐기물 관리

Wang et al.(2018) 연구는 건물 해체 생애주기 동안 건물 해체 폐기물의 탄소 배출을 평가하기 위한 프레임워크를 개발하고 고층 주거건물을 대상으로 탄소 배출이 적은 폐기물 처리 방법을 식별하였다. 연구 결과, 금속 폐기물의 재활용은 벽돌 폐기물에 비해 높은 환경적 이익을 제공함을 밝혔다. 알루미늄은 건물 해체 폐기물 전체 무게의 0.66%를 차지하지만 알루미늄을 재활용하였을 때 최대 45%의 탄소 배출 감소가 가능하였다.³⁶⁾

Ram et al.(2020) 연구는 건설 및 철거 폐기물 관리에 대해 네 가지 시나리오별 생애주기평가를 진행하였다. 시나리오는 현재(S1) 및 미래(S2) 매립 옵션과 이동 없는 재활용 옵션(S3) 및 이동 있는 재활용 옵션(S4)으로 구성되었다. 연구 결과, 건설 및 철거 폐기물을 매립하는 대신 재활용하면 대기중으로 6.41kgCO_{2eq} 배출(S3) 및 4.92kgCO_{2eq} 배출(S4)을 줄일 수 있으며, 89.93MJ(S3) 및 66.7MJ(S4)의 기본 에너지를 절약할 수 있다.³⁷⁾

Liu et al.(2020) 연구는 생애주기평가와 생애주기비용을 결합하여 중국 광저우에서 세 가지 폐기물 처리 시나리오의 환경 및 경제적 요인을 분석하였다. 세 가지 시나리오는 철거 폐기물을 매립하는 방식(S1), 철거 폐기물을 재활용하여 골재로 사용하는 방식(S2), 철거 폐기물을 재활용하여 분말 형태로 사용하는 방식(S3)으로 구성되어 있다. 생

34) Abouhamad & Abu-Hamd. (2021). p.19.

35) Minunno et al. (2021). p.1.

36) Wang et al. (2018). p.3164.

37) Ram et al. (2020). p.13.

애주기평가결과, S1과 비교했을 때 S2는 $6.790 \times 10^8 \text{kgCO}_{2\text{eq}}$ 만큼 감소했으며 S2와 비교했을 때 S3는 $4.172 \times 10^8 \text{kgCO}_{2\text{eq}}$ 만큼 추가 감소했다.³⁸⁾

Carpenter et al.(2013) 연구는 건설 및 철거 폐기물 관련 시나리오와 관련된 배출량을 조사하였다. 연구 결과, 건설 및 철거 폐기물을 매립하는 것보다 재활용하는 것이 더 유의함을 밝혔다. 구체적으로 비목재 건설 및 철거 폐기물을 재활용하고 목재 잔해를 전기 생산을 위해 연소할 때 연간 7조 BTU 이상의 에너지를 생산하며 연간 70,000~130,000 톤의 온실가스 배출 감소 효과가 나타났다.³⁹⁾

Hossain et al.(2016) 연구는 건설 및 철거 폐기물과 폐유리로부터 재활용 골재를 생산하는 것과 천연 골재 생산이 환경에 미치는 영향을 생애주기평가를 통해 평가하고 비교하였다. 연구결과, 재활용 골재는 천연 골재와 비교했을 때 온실가스 배출이 65% 감소하며, 비재생 에너지 소비를 58% 절감하였다. 폐유리를 재활용했을 때 천연 골재 생산보다 에너지 소비를 54%, 온실가스 배출을 61%, $\text{SO}_{2\text{eq}}$ 배출을 46% 절감하였다.⁴⁰⁾

② 프리패브리케이션(Prefabrication)의 효과

운영단계에서 발생하는 탄소 외의 단계에서 발생하는 내재탄소 중 시공 단계에서 발생하는 탄소는 조립식·사전 제작식 건물의 활용으로 감소를 기대할 수 있다. 그러나 미리 제작한 유닛을 운송하는 조립식·사전 제작식의 특성상 제조 및 운송 단계에서 탄소 배출량이 증가한다. 조립식 철골 시공의 경우에는 기존 콘크리트 방식에 비해 재료 소비량을 줄일 수 있지만 시공에너지가 증가한다. 따라서 특정한 방식이 무조건 좋다고 여기기보다는 여건에 따라 결정할 필요가 있다.

Chou & Yeh(2015)의 연구에서는 조립과 현장주조 방식 차이에 따른 탄소 배출량에 미치는 영향을 확인하였다. 조립식 방법은 제조 및 운송 단계에서 8.44%를 차지하는 반면, 현장주조식은 해당 단계에서 3.58%의 비중을 보였다. 가장 큰 차이는 주로 제조, 운송, 시공 단계에서 나타났으며, 특히 조립식 부품의 장거리 운송이 탄소 배출의 주요 원인임을 밝혔다.⁴¹⁾

38) Liu et al. (2020). p.1.

39) Carpenter et al. (2013). pp.396-406.

40) Hossain et al. (2016). p.67.

41) Chou & Yeh. (2015). p.145.

Teng, Li, Pan & Ng(2018)의 연구에서는 조립식 건물 27채를 대상으로 건물 생애주기 동안의 탄소 배출량을 조사하였다. 기존 사례와 비교하여, 평균적으로 조립식 건물은 시공 단계에서 탄소 배출이 15.6%가 감소하고, 운영 단계에서는 3.2%의 탄소 배출 감소가 이루어진 것을 확인했다.⁴²⁾

Aye et al.(2012)은 조립식 다세대 주택 건물에 소비된 에너지를 계량화하여 조립식이 일반적인 건축 방법보다 향상된 환경 성능을 제공하는지 파악하였다. 8층의 주택을 대상으로 조립식 철골 시공은 기존 콘크리트 시공에 비해 재료 소비량을 최대 78%까지 감소시키는 것으로 나타났다. 하지만 조립식 철골 건물은 콘크리트 건물에 비해 시공에너지가 약 50%까지 증가하는 결과를 보였다.⁴³⁾

Wen et al.(2015) 연구는 Iskandar Malaysia Johor Bahru의 저층 아파트 건물에서 1m²의 바닥 면적에 대해 조립식 건축 방식과 현장 주조 건축 방식을 비교한 결과, 조립식 건축 방식이 현장 주조 방식보다 시공 에너지와 온실가스 배출 감소 측면에서 더 유리하며 저탄소 개발에 기여할 수 있음을 확인했다.⁴⁴⁾

42) Teng, Li, Pan & Ng. (2018). p.133.

43) Aye et al. (2012). p.159.

44) Wen et al. (2015). p.302.

2) 계획기법에 따른 탄소배출저감 효과⁴⁵⁾

① 에너지 전환

□ 신재생에너지 설비

Ghaleb & Asif(2022)는 상업용 건물 옥상에서 태양광 발전의 적용 가능성을 조사했다. 태양광 모델링 결과, 연간 평균 285 kWh/m²의 출력이 가능하며, 이는 총 91,122 MWh/년의 전력 생산을 의미한다. 또한 105개 건물에 설치된 태양광 시스템이 연간 약 72,533 톤의 이산화탄소, 2,159.6 톤의 메탄, 그리고 372.7 톤의 질산화질소 배출을 절감할 수 있다는 것이 확인되었다.⁴⁶⁾

Qerimi et al.(2020)의 연구는 코소보 프리슈티나에 위치한 38,289 가구를 대상으로 온수기를 가정용 태양열 온수기(Domestic solar water heaters)로 교체하였을 때 에너지 소비량을 조사하였다. 이 온수기는 연간 7,274,910 유로를 절감하고 이산화탄소 배출량을 22,973,400 kg 줄이는 것을 확인하였다.⁴⁷⁾

박민용·정연태(2023)의 연구에서는 건축물 배수를 이용하여 생산되는 전기에너지를 실측하였다. 초소수력 발전시스템에 콘덴서를 부착하여 관측한 전력은 유량이 10.0 m³/h 일 때 33 W로, 콘덴서를 부착하지 않았을 때보다 약 2.5배의 발전효율을 보이는 것으로 나타났다.⁴⁸⁾

45) 주요 단지계획 기법의 목록은 이은석 외. (2023). pp.143-150의 분류를 참고하였음

46) Ghaleb & Asif. (2022). p.629.

47) Qerimi et al. (2020). p.1366.

48) 박민용·정연태. (2023). p.36.

□ 지역 냉·난방

Akgüc & Yilmaz(2022)의 연구에서는 고층 주거용 건물의 난방, 환기, 공조 시스템의 에너지 성능 향상을 위해 첨단 환류(Retrofit) 방안을 제시하였다. 그 결과 수요에 따라 제어되는 환기 전략과 분산형 열 회수 환풍 시스템을 사용하면 연간 39%의 에너지 소비 저감이 가능하다고 밝혔다.⁴⁹⁾

Blum et al.(2010)은 지열 히트펌프 시스템 사용으로 인한 이산화탄소 배출 절감량을 기존 난방 시스템과 비교하였다. 지열 히트펌프 시스템을 사용할 때 독일 전력 혼합을 기준으로 탄소 배출을 35% 줄일 수 있으며, 지역 전력 혼합을 기준으로 72%까지 줄일 수 있음을 발견했다. 추가로, 하나의 지열 히트펌프 시스템이 절감시키는 연간 탄소량은 1,800 kg에서 4,000 kg 사이로 추정했다.⁵⁰⁾

□ 폐기물 에너지화 시설

Kim et al.(2020)의 연구에서는 1973년 1월부터 2016년 12월까지 미국의 총 바이오매스 에너지 소비량, 총 이산화탄소 배출량 및 GDP 간의 인과 관계를 조사했다. Autoregressive Distributed Lag 모형으로 분석한 결과 1인당 총 바이오매스 에너지 소비량이 1% 증가하면 장기적으로 1인당 총 이산화탄소 배출량이 0.65% 감소하는 것으로 나타났다.⁵¹⁾

Münster & Lund(2010)의 연구는 8가지 Waste-to-Energy 기술을 연비, 이산화탄소 절감, 비용으로 비교하였다. 바이오가스 Transport+ 솔루션으로 3.1 Mt/year의 이산화탄소 감소와 0.9 Mt/year의 합성가스 감소가 가능함을 밝혔다.⁵²⁾

49) Akgüc & Yilmaz. (2022). p.20.

50) Blum et al. (2010). p.127.

51) Kim et al. (2020). p.953.

52) Münster & Lund. (2010). p.1261.

② 기후변화 적응 및 흡수원 확대

□ 녹색지붕 및 수직정원

Cai et al.(2019)은 중국 우시에서 녹색 지붕의 에너지 절약과 생태적 이점에 대한 시뮬레이션 연구를 진행하였다. Buddha 풀은 연간 단위 제곱미터 당 1.79 kg의 이산화탄소를 흡수하고 1.3 kg의 산소를 방출한다. 우시의 녹색 지붕의 연간 탄소 배출 감소량은 9.35 kg/m^2 이고 배출 절감으로 인한 이익은 제곱미터 당 1.02 달러로 나타났다. 에너지 소비 시뮬레이션 결과 단위 제곱미터 당 녹색 지붕은 연간 11.53 kWh를 절약할 수 있으며 연간 생태적 이점은 단위제곱 미터 당 3.37 달러로 나타났다.⁵³⁾

Pan & Chu(2016)의 연구에서는 홍콩의 공공주택단지에서 수직 녹지 시스템의 에너지 절약 가능성을 분석하였다. 수직 녹지 시스템이 설치된 아파트와 설치되지 않은 아파트의 냉방용 전력 소비량을 비교했다. 그 결과 수직 녹지 시스템은 덥고 습한 8월과 9월에 에어컨에 소비되는 전력의 16%를 절약했다.⁵⁴⁾

Li et al.(2019)의 연구는 Yuhou Street라는 보행자 거리를 대상으로 녹색 벽 설계에 대한 실내 냉각 및 에너지 절약 성능을 분석하였다. Living wall systems(LWS)의 디자인에 따라 실내 냉각 및 에너지 절약 성능이 다르게 나타났다.

□ 도시농장 및 녹지공간

Zhang et al.(2014)의 연구에서는 중국 베이징의 16,577 ha의 녹지를 통해 여름 내내 $3.33 \times 10^{12} \text{ kJ}$ 의 열을 흡수하는 것이 가능하다고 밝혔다. 녹지의 냉방 효과로 냉방 수요가 $3.09 \times 10^8 \text{ kWh}$ 감소하여 베이징의 순 냉방 에너지 사용량이 60% 감소했고 밝혔다. 이에 따른 전력 절약과 관련된 발전소의 CO_2 배출량의 연간 감소량은 243,000톤에 달하며 평균 61 kg/ha 이다.⁵⁵⁾

Kong et al.(2016)은 Gulou 캠퍼스의 녹지 공간이 더운 여름날 미기후에 미치는 영향을 조사했다. 녹지 공간을 제거하면 일평균 기온이 0.5°C 상승하고 캠퍼스의 식생의 냉방 성능은 356대의 에어컨과 $1.3 \times 10^4 \text{ kWh}$ 에너지에 해당하는 것으로 추정되었다.⁵⁶⁾

53) Cai et al. (2019). pp.2441-2442.

54) Pan & Chu. (2016). p.299.

55) Zhang et al. (2014). p.37.

56) Kong et al. (2016). p.1438.

□ 건물 일체형 도시농업

Lee et al.(2015)의 연구는 도시 농업이 활성화될 경우 기대할 수 있는 온실가스 감축효과를 추정하였다. 서울을 대상으로 도시 농업을 얻을 수 있는 농작물 생산량과 그에 따른 푸드 마일리지 감소, 이산화탄소 배출량 감소 등을 추정했다. 그 결과 서울의 도시 농업은 51.17 km²의 면적에서 가능하며 이 면적에서 연간 1,167만 kg의 이산화탄소 배출량을 줄이는 것이 가능하다고 밝혔다.⁵⁷⁾

Hu et al.(2019)의 연구에서는 중국 베이징 도시농업의 탄소발자국과 경제성을 생애주기평가법을 이용하여 평가하였다. 농장 내 재배와 농장 외 공급망의 차이를 고려하여 소규모 직거래 판매 방식과 대규모 배달 판매 방식의 두 가지 사례를 분석하고 비교했다. 두 경우 모두 탄소발자국이 재배 단계와 운송 단계에서 주로 발견되었다. 전기를 수력 발전으로 대체하는 것과 가솔린과 디젤 대신 바이오 디젤로 전환하는 시뮬레이션 결과 탄소발자국이 20.0~21.8% 감소하는 것으로 나타났다.⁵⁸⁾

□ 빗물관리를 위한 도시 인프라

Chiu et al.(2015)의 연구에서는 빗물 수집 시스템이 가정용 물 사용을 21.6% 절약하고 연간 138.6 kWh의 에너지 절약을 촉진하는 것으로 분석하였다. 빗물 수집 시스템의 단위당 에너지 절약 비용은 빗물 수집 시스템 설정의 85%로 태양광 PV 시스템보다 낮다고 밝혔다.⁵⁹⁾

Adugna et al.(2018)의 연구는 대형 공공기관의 옥상 빗물 수집 시스템의 잠재적 기여도를 조사하였다. 그 결과 옥상 빗물 수확은 연간 음용수 공급량의 최대 2.3%를 충족할 수 있다고 규명했다.⁶⁰⁾

57) Lee et al. (2015). p.5.

58) Hu et al. (2019). p.615.

59) Chiu et al. (2015). p.6285.

60) Adugna et al. (2018). p.8.

③ 자원순환

□ 폐기물 저감

Dong et al.(2018)은 중국 상하이로 사례로 폐기물 재활용의 에너지 절감 및 탄소 저감 가능성을 평가하였다. 현재 상하이의 재활용 시스템으로 8.7 백만 톤 표준 석탄(tce)과 16.81 백만 톤 이산화탄소가 감소 가능하며 폐철강과 비철금속의 재활용은 에너지 절약의 주요 원인으로 약 44%와 42%에 해당하고 탄소 감소량의 60%와 33%를 각각 차지했다고 밝혔다. 또한, RPF (Refuse Plastic & paper Fuel)의 도입은 1.24 백만 톤의 에너지 절약과 2.67 백만 톤의 이산화탄소 감소에 더 기여할 수 있다고 밝혔다.⁶¹⁾

□ 자원순환 밸류체인 구축

Camilleri(2021)의 연구에서는 순환 경제 접근 방식이 에너지 사용에 미치는 영향을 분석하였다. 식품 폐기물, 철강 생산, 기타 자재 생산, 제품 개조, 차량 공급, 건설 및 기타 장비 제조와 관련된 접근 방식으로 인한 에너지 사용의 잠재적 절약은 전 세계 및 EU에서 6~11%, 영국에서는 5~8%를 절약할 수 있다고 분석하였다.⁶²⁾

□ 효율적 자원 회수 시스템

서울시는 2023년 한 해 동안 광역자원회수시설 4곳에서 총 36GWh의 전력을 생산해 1만 가구에 공급하였으며, 소각열(154만 3천Gcal)을 25만 가구에 난방열원으로 제공하였다고 밝혔다.⁶³⁾

Vergara et al.(2011)의 연구에서는 폐기물 처리 방식이 온실가스에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 폐기물을 40% 감소시키면 연간 6만 톤의 이산화탄소 절감을 이끌어낼 수 있다고 밝혔다.⁶⁴⁾

61) Dong et al. (2018). p.27.

62) Camilleri. (2021). pp.141-161.

63) 서울특별시 자원회수시설 소개 홈페이지 (<https://rrf.seoul.go.kr/content1/kproj1102.do>) (검색일 : 2024.5.8.)

64) Vergara et al. (2011). p.87.

□ 탄소배출 저감형 건설자재 사용

김영환·박상준(2014)은 도시재생사업에서 적용 가능한 저탄소 녹색 계획요소의 활용방안을 모색하고자 자원관리, 교통, 에너지 효율화 등의 측면에서 계획요소별 탄소저감 효과를 검토하였다. 분석 결과, 자원관리 측면에서는 건설 단계에서 친환경 콘크리트를 사용했을 때 기존 콘크리트 대비 1m³ 당 79kg의 탄소 저감 효과가 있음을 확인하였다.

④ 계획기법에 따른 탄소배출 저감 효과 종합

[표 2-29] 계획기법에 따른 탄소배출 저감 효과 정리

계획기법	탄소배출 저감 효과
에너지 전환	신재생에너지 설비 - 건물에 설치된 태양광 시스템이 연간 약 72,533 톤의 이산화탄소 저감 - 태양열 온수기를 이용하여 연간 이산화탄소 배출량 22,973,400 kg 감소
	스마트그리드 및 에너지 저장 네덜란드 PowerMatching City 주거용 스마트 그리드 시범 프로젝트의 경우 평균 가구의 전력 소비량의 14.4%에 해당하는 에너지 비용 절감
	에너지 효율 건축물 - LEED 인증 건물이 6개국에서 연간 이산화탄소 배출 33 메가톤 감소 - LEED Gold 인증 건물의 에너지 소비량과 온실가스 배출량이 약 20% 낮음 - BREEAM 인증한 건물이 평균 22%의 이산화탄소 배출량 감소
	지역 냉·난방 - 수요에 따라 제어되는 환기 전략과 분산형 열 회수 환풍 시스템을 사용하여 연간 39% 에너지 소비 저감 - 지열 히트펌프 시스템을 사용하여 탄소 배출 최소 35% 절감
	전기차 충전 인프라 전기차 충전 인프라 설치를 통해 이산화탄소 147kt~210 kt 감소
	폐기물 에너지화 시설 - 바이오매스 에너지 소비량 1% 증가 시 1인당 총 이산화탄소 배출량 0.65% 감소 - 바이오가스 Transport+ 솔루션으로 3.1 Mt/year의 이산화탄소 감소
	탄소포집 기술 탄소포집 회랑 설치를 통해 전력 및 산업 부문에서 탄소 배출량 38% 완화
	녹색지붕 및 수직정원 - 녹색 지붕의 연간 탄소 배출 감소량은 9.35 kg/m²이며 전력 사용 감소량은 11.53 kWh - 수직 녹지 시스템을 통해 여름철 에어컨 소비 전력의 16% 절약 - Living Wall System 도입을 통해 최대 19.92%의 에너지 절약
	도시농장 및 녹색공간 녹지의 냉각효과로 인해 순 냉방 에너지 사용량 60% 감소
기후변화 적응 및 흡수원 확대	건물 일체형 대학 캠퍼스의 식생을 통해 1.3 × 10⁴ kWh 에너지 부하 감소
	도시농업 - 서울의 전역에서 연간 1,167만 kg의 이산화탄소 배출량 감소 - 탄소발자국 20.0~21.8% 감소
	빗물관리를 위한 도시 인프라 빗물 수집 시스템을 통해 연간 138.6 kWh의 에너지 절약
	복원력 강화 인프라 녹색기반시설을 설치하여 연간 온실가스 배출량 평균 45.9% 감소
자원순환 특화	폐기물 저감 재활용 시스템으로 상하이에서 이산화탄소 16.81 백만 톤 감소
	자원순환 밸류체인 구축 순환 경제 접근 방식을 통해 에너지 사용 최대 11% 절약

계획기법	탄소배출 저감 효과
효율적 자원 회수 시스템	- 폐기물 처리 방식 개선을 통해 연간 6만 톤의 이산화탄소 절감 - 폐기물 처리 전략을 변경을 통해 1인당 이산화탄소 배출량이 1970년 200 kg에서 2005년 170 kg으로 절감
재활용률 확대 기반 마련	재활용 비율을 15%에서 80%로 개선하면 전반적인 에너지 절약이 3.5배에서 5.5배까지 향상
탄소배출권 연계	- 도쿄 탄소 배출권 거래제도가 전체 감소의 6.9% 기여 2009년 수준과 비교하여 규제된 대학이 탄소 배출과 에너지 소비를 평균적으로 약 3-5% 감소 - 에너지 소비에 평균적으로 약 5-7%의 감소 영향
탄소배출 저감형 건설자재 사용	친환경 콘크리트 사용 시 기존 콘크리트 대비 1m³ 당 79kg의 탄소 저감

출처 : 연구진 작성

3) 탄소배출 저감 정책의 효과

□ 친환경 건축물 인증 프로그램의 효과

친환경 건축물 인증 프로그램은 미국, 영국, 오스트레일리아, 영국 등 여러 국가에서 운영되고 있으며, 실제로 건물의 에너지소비량과 온실가스배출량을 줄이는 데에 효과가 있는 것으로 나타났다. 평가하는 분야는 탄소 배출과 에너지가 중심이 되며, 그 외 물 사용, 폐기물, 교통, 토지이용, 실내 환경 등이 활용된다. 평가 분야가 유사하더라도 세부적인 항목 등에는 차이가 있기 때문에 국가 간에 단순비교하기에는 어려움이 있다. 그러나 평균적으로 인증 등급이 높을수록 효과 또한 높아지는 것을 볼 수 있으며, 낮은 수준의 인증은 효과가 거의 없는 경우도 있다.

[표 2-30] 친환경 건축물 인증 프로그램의 탄소배출 저감 효과

국가	명칭	운영 주체	시작 년도	평가 분야	등급 구간	탄소배출 저감 효과
미국	LEED	미 국 그 린 빌 딩 위 원 회	1998	탄소, 에너지, 물, 폐기물, 교통, 재료, 건강 및 실내 환경 품질	4	- LEED GOLD(상위 2구간) 등급을 받은 건물이 에너지소비량과 온실가스 배출량이 약 20% 낮음¹⁾ - LEED 인증을 받은 건물의 에너지 사용 강도가 해당 지역의 표준 건물 보다 낮은 수준으로 나타남²⁾
영국	BREEAM	BRE	1990	관리, 물, 에너지, 교통, 건강과 웰빙, 자원, 회복력, 토지이용 및 환경 보전, 오염, 재료, 폐기물, 혁신	6	- BREEAM이 인증한 건물은 평균 22%의 CO₂ 배출량 감소를 달성³⁾ - 교육용 18.98%, 헬스케어용 19.22%, 업무용 23.73%, 교도소 28.17%, 소매점 20.76%, 기타 22.68% CO₂ 배출 감소³⁾

국가	명칭	운영 주체	시작 년도	평가 분야	등급 구간	탄소배출 저감 효과
오스트레일리아	GREEN STAR	GBCA	2003	건축 시 저탄소 배출 재료 사용, 화석연료 사용 지양, 재생에너지 사용, 운영에너지 저감, 온실가스 배출량 감소	6	- Green Star Certified 인증(상위 4 구간 이상)을 받은 건물은 평균적으로 호주 평균 건물보다 온실가스 배출량이 62% 적음⁴⁾ - Green Star Certified 건물은 평균적 건물보다 66% 적은 전기 사용⁴⁾
홍콩	BEAM PLUS	BSL	2010	물 사용, 커뮤니티, 지속 가능한 장소, 건강과 실내 환경 품질, 실외 환경 품질, 에너지 사용, 녹색 건축, 관리, 혁신과 부가, 종합적 디자인과 건설 관리, 재료와 폐기물	4	- 에너지 효율이 높은 냉각장치와 담수 냉각 타워 시스템의 사용이 증가함에 따라 에너지 사용 효율도 증가하는 경향⁵⁾ - EUI(단위면적당 에너지사용지수)는 각각 14.692, 3.823 및 11.842 kWh/m² 감소⁵⁾

출처 : 1) Scofield(2013), 2) Mallory-Hill & Gorgolewski(2017), 3) Taylor(2015), 4) Taylor(2015), 5) Jia & Lee(2018)

□ 탄소배출 거래 정책의 효과

탄소배출 거래 정책은 탄소를 감축한 만큼 탄소배출권을 판매할 수 있는 정책이다. 미국 캘리포니아의 탄소배출권 거래제도와 일본 도쿄의 탄소 배출권 거래제도 모두 온실가스 배출 감소에 효과가 있는 것으로 나타났으며, 이는 탄소배출권의 판매를 통한 경제적 이득이 민간부문에서 탄소배출 저감시키는 유인이 될 수 있음을 보여주는 것이다. 탄소 저감량의 수익화가 가능해졌으므로, 공동주택이 탄소거래 시장에 적극적으로 참여할 수 있는 방안을 고민할 필요가 있다.

[표 2-31] 탄소배출 거래 정책 효과 및 예측결과

국가	정책 효과
미국 (캘리포니아)	- 2013년부터 2019년까지 이산화탄소 배출이 연평균 0.9%씩 감소하여 총 6.4%의 감소¹⁾ - 저감 효과는 주로 건물 및 전력 부문에서 관찰됨(전력 부문 6.2%, 건물 부문 1.4%의 연간 감소율)¹⁾
일본(도쿄)	- 도쿄 탄소 배출권 거래제도가 연구 대상 오피스 전체 감소의 6.9%에 영향²⁾ - 탄소 배출 거래 시스템에 의해 규제된 대학은 탄소 배출과 에너지 소비를 평균적으로 약 3~5% 감소시킴³⁾
대한민국	- 공동주택 단지의 이산화탄소 배출 벤치마크 개발 - 이산화탄소 배출량 감축 목표치의 18.1% 달성⁴⁾

출처 : 1) Kramer & Lessmann(2023), 2) Arimura & Abe(2021), 3) Abe & Arimura(2021), 4) Jeong, Hong & Kim(2018)

4) 주요 국외 탄소배출 저감 단지 사례 요약

탄소배출저감 요소들을 효과적으로 적용했다고 평가 받는 네 개의 해외도시 사례를 다음과 같이 정리·요약하였다. 본 연구와 상관성이 높은 항목인 녹지 및 오픈스페이스, 건축물, 에너지효율건축물, 에너지 생산 및 거래, 환경영향, 폐기물, 관리 항목으로 구분하였다.

[표 2-32] 주요 국외 탄소배출 저감 단지 사례 요약표

구분	독일 프라이부르크 Vauban	스웨덴 말뫼 Bo01	핀란드 헬싱키 Vikki	영국 런던 BedZED
	410,000㎡ 5,500명(계획)	220,000㎡ 2,343명	11,320㎡ 15,000명	16,500㎡ 100가구
녹지 및 오픈 스페 이스	수변공간 보존	강변 비오톱 지정	-	-
	인공 수공간 조성	-	운하 조성	인공수로
	비오톱 조성	도로변에 조성	수생 비오톱 조성	소규모로 조성
	녹지 조성	휴식, 놀이용 녹지 조성	공원 조성하여 생태축 설정	Green Finger 체계로 자연녹지를 주거지역에 유입
	녹지 보전·관리	오래된 나무 보존	녹지대 보전	가로수 심기 프로젝트
건축물 디자인 및 배치	녹색지붕 조성	○(평지붕)	○	-
	녹색벽 조성	-	○	-
	판유리	-	-	○
	발코니/정원/유리 온실	-	-	○
	향 고려 배치 (일조량 확보)	남향 배치	-	주거용 남향, 남서향 배치
에너지 효율 건축물	미기후 조절	-	지구 외부에 4-5층, 내부에 1-2층 건물 배치	-
	저에너지 주택 건설 의무화	65k Wh/m ² a	-	-
	저에너지 건축기법 이용	NEH(Niedrig-Energiehäuser: 저에너지 건설) 건축기법	-	-
	패시브하우스 설계	단열, 태양열 및 기술적인 열 회수 시스템	○	모든 건축물이 다양한 기법을 이용한 실험적 친환경 건축물
	플러스 에너지 하우스 (보조발전소를 갖춘 패시브 하우스)	최초의 에너지 플러스 주택 헬리오트로프	-	-

구분		독일 프라이부르크 Vauban	스웨덴 말뫼 Bo01	핀란드 헬싱키 Vikki	영국 런던 BedZED
		410,000㎡	220,000㎡	11,320㎡	16,500㎡
		5,500명(계획)	2,343명	15,000명	100가구
에너지 생산 및 거래	재생 가능한 에너지원에서 에너지 생산	우드칩* 열병합 발전	신재생 에너지 100%	태양열 사용 난방 시스템	초기 우드칩 열병합 발전소 운영, 목재 펄릿* 보일러로 전환
	태양열, 태양광 발전 시스템	○	○	○	○
	풍력 발전	-	해안	-	-
	지열 시스템	-	히트펌프 이용 지역난방	-	-
	조력 발전	-	해안	-	-
에너지 거래		에너지플러스 주택의 잉여 에너지를 도시 전력망에 판매	-	-	그리드 전기 구매에 녹색 관세 적용, 재생 에너지 전력 소비
환경 영향	빗물 관리	개거형 침투시스템	홍통 활용 바다와 중앙 운하로 자연적으로 향하도록 설계	지하 빗물 저장탱크, 인공수로	옥상 정원에서 수집하여 지하 물탱크에 저장
	물 재활용	빗물을 초등학교 화장실 변기 물 사용	빗물을 정화하여 폭포, 연못, 농지에 이용	빗물을 수집하여 정원에 이용	빗물 정원수, 화장실용 사용 사무실 오페수 정화, 재활용 식물을 이용한
	물 정화	중수도는 미생물막(biofilm) 시설에서 정화	-	-	하수도 자연 정화 처리 시스템 리빙머신
폐기물	바이오가스 생성	가정용 폐기물 혐기성 소화조	음식물 쓰레기의 40% 바이오가스로 전환하여 지역난방	-	-
관리	모니터링	GEMIS** 소프트웨어 사용	물과 에너지 소비 데이터에 인터넷으로 접근	-	-
	종합 에너지 관리 시스템	-	신재생에너지 전문기업인 Sydkraft 참여	-	-

출처 :연구진 작성

* 우드칩은 재생 가능하고 탄소 중립적인 에너지원으로 간주됨, 목재 펄릿은 탄소가 거의 없는 연료

** Global Emission Model for Intergrated Systems

3. 시사점

지금까지의 탄소배출 저감 관련 국내외 선행연구 및 사례분석의 시사점을 정리하면 다음과 같다.

먼저 탄소배출 저감 정책에서 친환경 건축물 인증 프로그램은 주요한 정책수단이다. 이러한 프로그램은 공통적으로 탄소 배출과 에너지 소비량을 중심으로 평가하는데, 여러 연구 결과에서 높은 등급일수록 효과가 높다는 공통적인 결과를 보여주고 있다. 반면 낮은 수준의 인증은 효과가 거의 없는 경우도 있으며, 우리나라 공동주택의 경우 전용면적을 고려하면 G-SEED 인증과 LEED 인증이 유의미한 차이를 보여주지 못한다는 연구도 있다.⁶⁵⁾ 따라서 낮은 수준의 인증은 최소한의 기준으로서의 의미를 가진다고 볼 수 있으며, 건축물 인증 프로그램에서 정책적인 효과를 보기 위해서는 건축물의 성격을 고려한 인증 프로그램과 함께 높은 수준의 인증 단계가 요구된다.

둘째, 기존의 에너지 사용량 및 탄소배출량을 모니터링하여 정확한 감축량을 측정할 수 있는 것이 중요하다. 이는 비용 및 민간 부문에 적용될 정책들의 실효성과 관계가 있는 내용으로 탄소배출량 감축을 무리하게 요구하는 것은 곧 비용 증가를 의미하며 민간의 반발을 불러와 정책의 실효성이 떨어지기 때문이다. 탄소배출 저감을 위한 기술 및 계획 기법으로는 에너지 소모량을 줄임으로써 탄소 소비량을 줄이는 패시브 기법과 신재생 에너지를 생산하여 에너지 소비량을 충당하고 더 나아가 거래까지 가능하도록 하는 액티브 기법, 에너지 소비량 및 생산량을 측정·제어하는 관리기술 등이 있으며, 계획 대상의 여건과 특징, 추진하는 정책의 목표에 따라 적용 가능 여부와 효과성을 고려하여 활용하는 것이 필요하다.

이은석 외(2023)는 탄소중립도시 종합계획 수립 방안 연구에서 IPCC가 제공한 공통사회경제경로(SSP: Shared Socio-economic pathways) 시나리오에 기반하여 지역의 현황 및 특성에 따라 적용할 수 있도록 에너지 전환, 기후변화 적응, 흡수원 확대, 자원순환, 사회행태 전환의 탄소중립도시특화 계획 도구를 개발하였다. 본 연구에서는 계획 도구 구분의 큰 틀을 활용하여 사례 분석에서 도출된 기술 및 계획기법을 구분하고, 재건축 단지의 특성을 고려하여 재건축시 적용 가능한 기술을 분류하였다. 아파트 단지 재건축의 특성상 단지 스케일을 넘어서는 도시 단위에서의 계획기법, 물리적인 환경 조성 외의 계획기법은 제외하였고, 향후 기술 발전에 따라 적용할 필요성이 있다고 판단되는 계

65) Jeong et al. (2016).

획기법은 현재 적용이 어렵더라도 포함시켰다.

선행연구 및 사례를 살펴볼 때 신재생에너지 설비의 경우 모든 저탄소 단지 사례에서 태양열, 태양광 발전을 채택하고 있으며, 선행연구에서도 그 효과성이 가장 많이 검증된 기술이기도 하다. 풍력발전이나 지력발전, 조력발전에 비해 주거단지에 적용하기 쉽기 때문인 것으로 보인다. 지력발전의 경우 풍력이나 조력보다는 설치 여건 등에서 적용 가능성이 높아 태양열·태양광 다음으로 많이 이용되었다. 에너지 효율과 관련해서는 저에너지 주택, 저에너지 건축기법, 패시브하우스 등 시공에너지와 운영에너지를 감축하는 기법이 주로 이용되었다. 특히 제로에너지 건축물 기술을 활용한 패시브하우스의 경우 모든 사례에서 활용되었으며, 건물의 주동을 배치할 때 향을 고려하여 배치하는 방안 또한 많은 사례에서 채택된 계획기법이다. 흡수원과 관련하여서는 녹색지붕, 그린인프라가 모든 사례에서 중요하게 이용되었다. 그 외 텃밭, 폐기물 재활용 등 해외사례에서 적게 사용되었으나 국내의 여건에 맞추어 활용 가능하다고 판단되는 계획기법도 있으며, 폐기물 에너지 전환, 에너지거래와 같이 민간 단지 차원에서 추진하기 어렵거나 기술의 발전을 기다려야 하는 계획기법들도 있다. 이후 4장에서 본 장에서 재건축 단지에 적용 가능한 것으로 1차 선별한 기술 및 계획기법을 대상으로 전문가 자문 및 FGI를 진행하고, 이를 통해 최종적으로 선정된 요소들의 효과를 정량적으로 추정·검증한다.

셋째, 탄소배출권 거래 시장 참여 및 향후 스마트그리드 연계 생산 에너지 판매를 노후 계획도시 전체 차원에서 도입을 고려해볼만 하다. 재건축 단지에 적용 가능한 것으로 분류된 계획기법은 에너지 전환과 기후 변화 적응 및 흡수원 확대 부문에 집중되어 있는 것을 볼 수 있는데, 자원순환의 경우 도시 스케일에서의 접근이 필요하며 사회 행태 전환은 소프트웨어적 내용이 추가 되기 때문이다. 단순히 건축물과 단지 차원의 소극적 감축 방안을 넘어서 전체 도시단위에서의 스마트그리드를 연계하고 재생에너지원을 도입하여 에너지를 생산함으로써 탄소배출권 거래 시장에 노후계획도시의 지자체별 참여를 추진할 필요가 있다. 특히 공동주택이 탄소배출권 거래 시장에 참여할 수 있게 되면서 탄소 저감량의 수익화가 가능해졌으므로, 단기적으로는 LH의 사례와 같이 건설사 차원에서 탄소배출권을 확보하고 건축 시 부담금을 줄이는 방식, 장기적으로는 대전 공동주택과 같이 탄소 감축량을 판매하는 방식 등 ZEB의 건설과 신재생에너지 발전이 경제적 혜택으로 이어질 수 있는 방안을 고민할 필요가 있다. 또한 탄소배출권의 거래를 위해서는 정확한 에너지 소비·생산 모니터링이 필요하므로, 모니터링 설비의 설치의 필수적이며 장기적으로는 더 넓은 범위의 에너지를 관리하는 종합 관리 시스템과 연계할 수 있는 인프라의 확보도 고려해야 할 것이다.

[표 2-33] 노후계획도시 재건축 단지에 적용 가능성이 높은 요소

계획기법		독일 프라이 부르크 Vauban	스웨덴 말뫼 Bo01	핀란드 헬싱키 Vikki	영국 런던 BedZED	적용 가능 여부
에너지 전환	신재생에너지 설비	태양열, 태양광 발전	○	○	○	○
		풍력 발전	○			
		지열 발전	○			○
		조력 발전	○			
	스마트그리드 및 에너지 저장	스마트그리드				
		에너지 저장				
	에너지 효율 건축물	저에너지 주택건설 의무화	○			○
		저에너지 건축기법	○		○	○
		패시브하우스	○	○	○	○
		플러스 에너지 하우스	○			
		향 고려 배치	○	○	○	○
		열병합발전소	○		○	
	지역 냉·난방	바이오가스		○		
		지열 시스템		○		
		태양열 난방		○		
	전기차 충전 인프라					○
	폐기물 에너지화 시설	폐기물 바이오 가스 전환	○	○		○
	탄소포집 기술					
기후 변화 적응 및 흡수원 확대	녹색지붕 및 수직정원	녹색지붕	○	○	-	○
		녹색벽 (수직정원)		○		○
	도시농장 및 녹색공간	텃밭				○
		녹지 보전				
		공원, 그린 오픈스페이스				○
	건물 일체형 도시농업	유리온실		○	○	
	빗물관리를 위한	LID	○			○

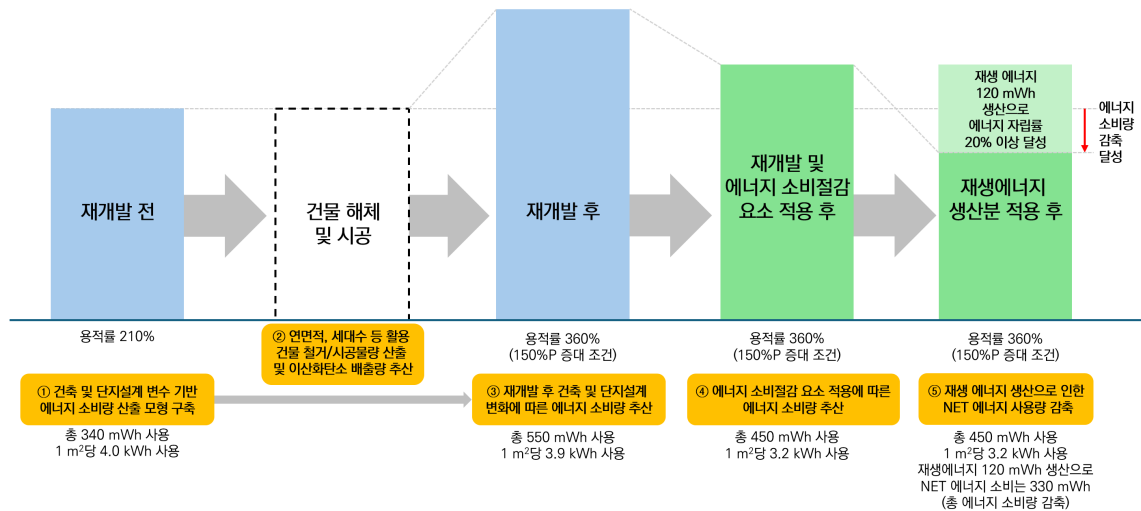
계획기법		독일 프라이 부르크 Vauban	스웨덴 말뫼 Bo01	핀란드 헬싱키 Vikki	영국 런던 BedZE D	적용 가능 여부
도시 인프라	지하 빗물 저장 탱크			○	○	○
	개거형 침투시스템	○				○
	복원력 강화	○	○	○		
	인프라	○	○	○	○	○
자원 순환	폐기물 저감					○
	폐기물 재활용					○
	자원순환 별류체인 구축					
	효율적 자원 회수 시스템					
	재활용률 확대 기반 마련					
	탄소배출권 연계	○			○	○
	에너지 거래					
	에너지 거대					
관리	모니터링					○
	에너지 관리 시스템					○

출처 : 연구진 작성

제3장 분당신도시 재건축 생애주기별 탄소 배출량 추정

1. 분석의 개요
2. 해체, 건설 단계의 내재 탄소 배출량 추정
3. 운영 단계의 운영탄소 배출량 추정
4. 아파트 단지 건축 특성과 에너지 소비량 관계 분석

1. 분석의 개요



[그림 3-1] 분당 아파트 재건축 전, 건물 해체 및 건설, 재건축 후 운영 중 에너지 소비량 추산 메커니즘

출처: 연구진 작성

본 연구는 기존 공동주택의 재건축에 관한 연구이므로 분당신도시 재건축의 생애주기를 해체단계, 운영단계, 건설단계의 세 단계로 구분하고 운영단계에서 발생하는 운영탄소와 해체, 건설 단계에서 발생하는 내재탄소를 추정한다.

내재탄소는 해체단계에 해체, 운송, 처리, 건설단계에 자재생산, 운송, 시공과정을 포함하여 추정하며, 운영탄소는 전기, 가스, 난방에너지를 대상으로 추정한다. 운영탄소의 경우 아파트 건축구조 및 단지설계에 따른 에너지 소비량 예측 모델을 구축하고, 이 모델을 통해 향후 재건축 시 용적률 150% 증대에 따라 발생할 것으로 예상되는 운영 시의 에너지 소비 총량 및 탄소 배출량 증가를 추정한다. 여기에서 추정되는 에너지 소비 총량 및 탄소 배출량은 밀도를 제외하고 현재와 동일한 조건으로 재건축이 이루어졌음을 가정하여 산정한 값이다.

1) 분석의 전제

□ 전제 1. 재건축 단지 탄소 배출량 저감을 위해 건축물의 전체 생애주기를 고려할 필요가 있다.

노후계획도시는 기존 아파트단지의 해체, 새로운 아파트 단지의 설계 및 시공, 완공된 아파트 단지 운영 등 재건축의 모든 단계가 탄소가 배출되는 과정이므로, 건축물 전체 생애주기를 고려하여 단계별로 탄소 배출량을 산출하고 저감 방안을 도출한다.

□ 전제 2. 아파트 단지별 에너지 소비량과 탄소 배출량은 아파트 구조 및 단지계획에 따라 변화한다.

용적률 150% 증대는 건축 연면적, 세대 수, 층수 등 건축 규모 및 단지설계의 변화를 의미하므로, 아파트 단지의 건축 형태 및 단지설계 형태를 정량적으로 산출할 수 있는 다양한 지표를 선정하여 추정 모형에 적용한다.

□ 전제 3. 탄소 저감 방안은 재건축 시 용적률 150% 증대의 조건과 ZEB 5등급 인증 취득을 위해 필요한 조건을 동시에 고려해야 한다.

2장의 사례분석을 통해 도출한 탄소배출 저감 효과를 정량화해서 효율(rate)로 산출 가능한 기술, 계획 기법 등의 항목을 선정한다. 그 다음 가능한 탄소 배출 저감 패키지를 개발하고, 각 패키지를 적용했을 때 ZEB 5등급을 달성하기 위해 필요한 재생에너지 생산량을 추정하여 제시한다.

2) 분석의 흐름

□ 1단계: 내재탄소 배출량 추정

- 해체 단계 이산화탄소 배출량 추정
- 건설(자재 생산 및 시공) 단계 이산화탄소 배출량 추정

□ 2단계: 운영탄소 배출량 추정

- 아파트 단지 특성 정보를 활용한 에너지 소비모형 구축
 - 소비모형은 다항, 다층, 랜덤효과 모형을 활용
 - 구성 가능한 다양한 아파트 단지 특성 정보를 활용한 에너지 소비모형을 구축하고, 평가와 개선의 환류 작업을 통해 월별/아파트 단지별 에너지 소비량에 대한 설명력이 가장 높은 모형 확정
- 재건축을 통한 용적률 150% 증대 후 운영 단계의 에너지 소비 예측량 추정
 - 재건축을 통한 용적률 150% 상향 시 연면적, 층수, 세대수는 증가하지만 대지면적, 건축면적(건폐율)은 유지되는 것으로 가정
 - 산출된 특성변화 값을 에너지 소비모형에 적용하여 재건축 후 에너지 소비 예측량 산출
 - 재건축(용적률150% 증대) 후 예측 에너지 소비량은 아파트 단지별/월별로 산출

□ 3단계: 아파트 단지 건축 특성과 에너지 소비량의 관계 분석

- 전기, 가스, 난방의 각 에너지원을 종속변수로, 건축 특성을 설명변수로 하여 에너지 소비량과 건축 특성과의 관계를 분석

□ 4단계: 탄소 배출 저감 패키지 개발

- 전문가 자문과 선행연구 검토를 통해 효과, 적용 가능성, 비용 등을 고려한 에너지 저감 요소를 도출하고 이를 활용한 저감 패키지를 개발
- 저감 패키지는 효과, 적용 가능성, 비용의 관점에서 ①핵심 저감요소 패키지, ②확장 저감요소 패키지, ③종합 저감요소 패키지의 3단계로 구성

□ 5단계: 탄소 배출 저감 패키지 효과 검증 및 정책적 함의 도출

- 탄소 배출 저감 패키지에 포함된 요소별 효과는 2장의 사례분석 및 추가적인 문헌 분석 결과를 토대로 요약화

- 각 패키지를 적용했을 경우 저감할 수 있는 에너지 소비량 및 탄소 배출량을 산출하여 2단계에서 추정된 재건축 후 운영탄소 예측량과 비교 및 효과 검증
- 핵심 패키지를 적용했을 경우 ZEB 5등급을 달성하기 위한 1차에너지 소요량 기준을 충족하는지 여부를 분석 후 효과 검증
- 용적률 증대 재건축 및 각 패키지 적용 시 세대 당 월별 에너지 요금 증감량을 산출하여 패키지 적용의 경제적 효과 검증

3) 분석의 대상

□ 분석 단위: 아파트 단지

아파트 단지 단위의 특성 차이가 아파트 단지 내 건물 단위의 특성 차이보다 더 큰 변화를 보일 것으로 예상됨에 따라 기본 분석 단위를 단지 단위로 설정하였다. 예를 들면, 대형 평수 위주로 구성된 단지과 소형 평수 위주로 구성된 단지, 저층 위주로 구성된 대형 평수 단지 등 단지 레벨에서 동수, 층수, 건폐율, 용적률, 연면적, 세대당 연면적 등 건물 특성과 세대 구성원의 소득 및 세대 구조 등의 차이가 에너지 소비에 영향을 미칠 것이기 때문이다.

마을이나 동 단위는 건물 특성을 반영하기에 규모가 지나치게 방대하므로 분석 단위로 적절하지 않다고 판단되었다. 단, 분석은 단지 단위로 진행하였으나 단지 단위 분석 결과를 모두 내용에 포함하기에는 어려움이 있어 결과는 마을 단위 위주로 기재하고 단지 단위 분석 결과는 부록으로 첨부하였다.

□ 분석 대상 선정

총 155개의 단지 중 데이터가 시기별로 큰 변화량을 보이거나 여타 유사 아파트에 비해 큰 오차 값을 보이는 단지를 제외하는 등 선별 과정을 거쳐 1차로 122개의 단지를 아파트 단지 건축 특성과 에너지 소비량의 관계를 분석의 대상으로 선정하였다.

1차로 선별된 122개 아파트단지 중 데이터가 지나치게 크거나 작은 오류가 있는 경우, 12개월 중 급격한 변화가 발생된 경우, 두 가지 데이터(전기·가스와 난방)간 집계 단위(아파트 단지)가 불일치하는 경우의 단지들을 제외한 115개 단지를 2차 선별하여 탄소 배출량 및 비용 효과 추정 대상으로 선정하였다.

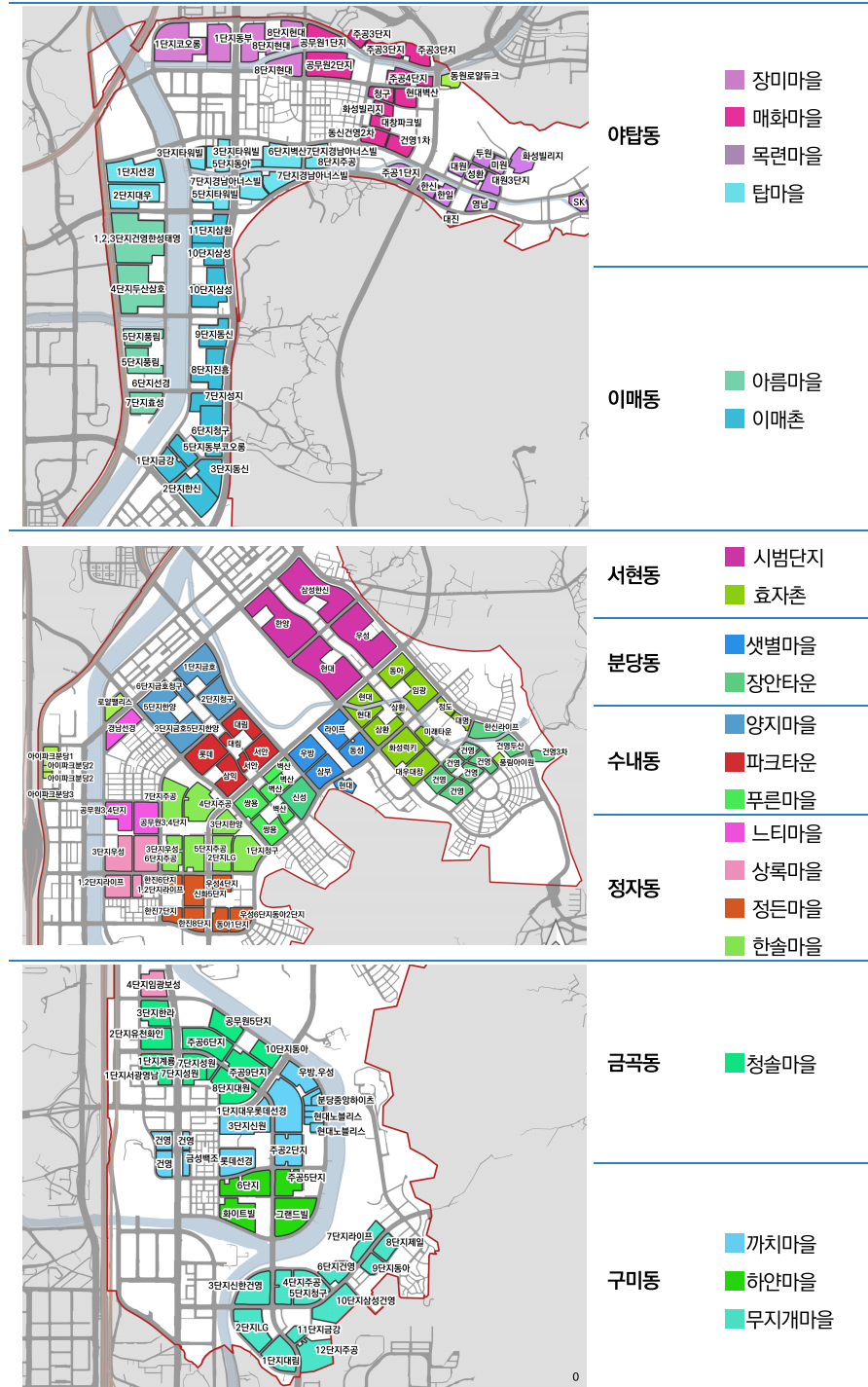
[표 3-1] 탄소 배출량 추정 대상 아파트 단지(n=115)

동이름	마을이름	분석 대상 아파트 단지	단지수
구미동	까치	1단지대우롯데선경, 2단지주공, 3단지신원, 건영, 금성백조, 롯데선경, 우방·우성 (제외: 분당중앙하이츠, 성원, 현대노블리스)	7
	무지개	1단지대림, 2단지LG, 3단지신한건영, 5단지청구, 6단지건영, 7단지라이프, 8단지제일, 9단지동아, 10단지삼성건영, 11단지금강, 12단지주공 (제외: 4단지주공)	11
	하얀	5단지주공, 6단지, 그랜드빌, 화이트빌	4
금곡동	청솔	1단지계룡, 1단지서광영남, 2단지유천화인, 3단지한라, 5단지공무원, 6단지주공, 7단지성원, 8단지대원, 9단지주공, 10단지동아	10
분당동	샛별	동성, 라이프, 삼부, 우방 (제외: 현대)	4
	장안타운	건영, 건영3차, 건영두산, 한신라이프	4
	분당(마을 없음)	(제외: 품림아이원)	-
서현동	시범	삼성한신, 우성, 한양, 현대	4
	효자촌	대명, 동아, 삼환, 임광, 정도, 현대 (제외: 대우대창, 미래타운, 화성력키)	6
수내동	양지	2단지청구 (제외: 1단지금호, 3,5단지금호한양, 5단지한양, 6단지금호청구)	1
	파크타운	대림 (제외: 롯데, 삼익, 서안)	1
	푸른	벽산쌍용신성	1
아탑동	매화	1단지공무원, 2단지공무원, 3단지주공, 4단지주공, 건영1차, 동신건영2차, 청구, 현대벽산, 화성빌리지(제외: 대창파크빌)	9
	목련	1단지주공, SK, 대원, 대원3단지, 두원, 미원, 성환, 영남, 한신, 한일, 화성빌리지 (제외: 대진)	11
	장미	1단지동부, 8단지현대 (제외: 1단지코오롱)	2
	탑	1단지선경, 2단지대우, 3단지타워빌, 5단지동아, 남아너스빌, 8단지주공(제외: 5단지타워빌)	6
	미분류	동원로알듀크	1
	아름	1,2,3단지건영한성태영, 4단지두산삼호, 5단지풍림, 7단지효성 (제외: 6단지선경)	4
이매동	이매촌	1단지금강, 2단지한신, 3단지동신, 5단지동부코오롱, 6단지청구, 7단지성지, 8단지진흥, 9단지동신, 10단지삼성, 11단지삼환	10
	느티	경남선경 (제외: 3,4단지공무원)	1
정자동	분당	로얄팰리스, 아이파크분당1	2
	상록	1,2단지라이프, 3단지우성, 4단지임광보성	3
	정든	2,6단지우성동아, 4단지우성, 5단지신화, 6단지한진, 7단지한진, 8단지한진 (제외: 1단지동아)	6
	한솔	1단지청구, 2단지LG, 3단지한양, 4단지주공, 5단지주공, 6단지주공, 7단지주공	7
	분당(마을 없음)	(제외: 아이파크분당2, 아이파크분당3)	-

출처 : 건축물대장 및 2023년 건축공간연구원 기본연구 “1기 신도시 재건축의 공공성 제고를 위한 단지 분석 및 설계 연구 기본 현황 및 분당 재건축 시뮬레이션 분석” 자료 활용

* 마을이 없는 단지는 '분당'으로 표기함

[표 3-2] 분당신도시 아파트 단지 분포



출처: 김성준 외. (2023). 표 4-3을 편집하여 연구진 작성

2. 해체, 건설단계의 내재탄소 배출량 추정

1) 해체 단계의 이산화탄소 배출량 추정

□ 해체 단계 이산화탄소 배출량 산출

해체 단계는 아파트 단지 별 연면적을 기준으로 하여 이산화탄소 배출량을 산출하였다. 기본 산정식은 배은석·오규식(2015)이 제시한 해체 및 폐기단계의 이산화탄소 배출량을 기초로 하여 산정하였다. 해체 시 이산화탄소 발생량은 건설연구원(2013)의 건설공사 표준품셈에 따른 자재 소요량을 기반으로 총 해체 물량을 추산하였다. 여기에 우지환(2011)에서 제시된 건축물 해체 장비의 연료 소비 효율 및 시간당 연료소비량을 고려한 이산화탄소 배출 효율을 활용하였다. 또한 폐기물 운송단계의 이산화탄소 배출량의 경우 98%의 폐기물이 재활용 처리업체로 이송된다는 조사 결과(환경부(2011))에 따라 아파트부터 재활용 처리업체 간 폐기물 평균 이송거리를 산출해 적용하였고, 폐기물 중간 처리단계는 이흥석(2001)의 조사 자료를 활용하였다.

- 해체 시 건물 단위면적 당 이산화탄소 배출량 = 연면적 × 배출단위(단위면적당 배출량)

[표 3-3] 공동주택 해체 시 단위면적 당 이산화탄소 배출량

(단위: kton-CO ₂ /㎡)	
구분	배출량
해체	17.43
운송	1.92
처리	4.71
소계	24.06

출처: 연구진 작성

□ 해체 단계 이산화탄소 배출량 추정 결과

현재 분당 아파트를 모두 해체할 경우, 206.5 kton에 상당하는 이산화탄소가 배출 될 것으로 추산된다. 각 동별, 마을별, 단지별 이산화탄소 배출량은 연면적과 정비례하는 것으로 나타났다.

해체 시 발생하는 이산화탄소 분량이 전체의 72.4%에 해당하며, 화물자동차의 운송 분량은 8.0%, 처리 부분은 19.6%에 해당한다.

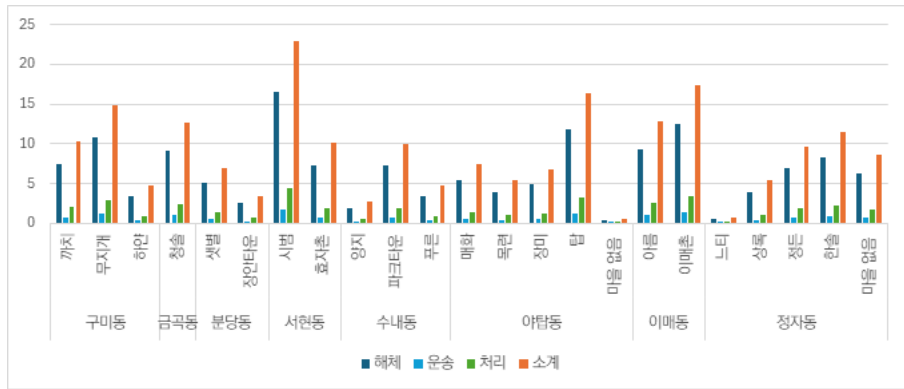
[표 3-4] 동/마을 별 분당 아파트 해체 단계 이산화탄소 배출량 산출

(단위: kton-CO₂/㎡)

동/마을	현재 연면적 (1,000 ㎡)	해체	운송	처리	소계
구미동	1,245.8	21.71	2.39	5.87	29.97
까치	429.5	7.49	0.82	2.02	10.33
무지개	618.2	10.78	1.19	2.91	14.88
하얀	198.1	3.45	0.38	0.93	4.77
금곡동	526.2	9.17	1.01	2.48	12.66
청솔	526.2	9.17	1.01	2.48	12.66
분당동	433.7	7.56	0.83	2.04	10.43
샛별	288.8	5.03	0.55	1.36	6.95
장안타운	144.9	2.53	0.28	0.68	3.49
서현동	1,374.8	23.96	2.64	6.48	33.08
시범	952.3	16.60	1.83	4.49	22.91
효자촌	422.5	7.36	0.81	1.99	10.17
수내동	730.0	12.72	1.40	3.44	17.56
양지	113.5	1.98	0.22	0.53	2.73
파크타운	416.8	7.26	0.80	1.96	10.03
푸른	199.6	3.48	0.38	0.94	4.80
야탑동	1,519.0	26.48	2.92	7.15	36.55
매화	307.8	5.37	0.59	1.45	7.41
목련	228.7	3.99	0.44	1.08	5.50
장미	282.6	4.93	0.54	1.33	6.80
탑	678.1	11.82	1.30	3.19	16.32
마을 없음	21.8	0.38	0.04	0.10	0.52
이매동	1,257.4	21.92	2.41	5.92	30.25
아름	536.5	9.35	1.03	2.53	12.91
이매촌	720.9	12.57	1.38	3.40	17.35
정자동	1,497.6	26.10	2.88	7.05	36.03
느티	33.2	0.58	0.06	0.16	0.80
상록	226.9	3.96	0.44	1.07	5.46
정든	398.0	6.94	0.76	1.87	9.57
한솔	477.2	8.32	0.92	2.25	11.48
마을 없음	362.3	6.31	0.70	1.71	8.72
전체 계	8,584.4	149.63	16.48	40.43	206.54

출처 : 연구진 작성

* 아파트 단지 전체 추정 결과는 [부록 4]에 수록



[그림 3-2] 동/마을 별 분당 아파트 해체 단계 이산화탄소 배출량

출처: 연구진 작성

2) 건설 단계의 이산화탄소 배출량 추정

□ 건설 단계 이산화탄소 배출량 산출

아파트 단지별 용적률 150% 상향 시 아파트의 건축면적 및 건폐율은 고정하고, 연면적, 용적률, 층수, 세대수 등의 수치는 증가하는 방향으로 특성변화를 전제한 후 총 건축 물량을 산정하였다.

산정식은 배은석·오규식(2015)이 제시한 자재생산 및 건설 단계의 이산화탄소 배출량을 바탕으로 하여 구성하였다. 아파트 건설을 위한 대표자재 목록은 “공동주택 공사비 분석자료(대한주택공사, 2006)”에 따랐으며, 대표자재 별 이산화탄소 배출량 원단위는 정영선(2010)의 산업연관분석법과 한국건설기술연구원(2008)의 개별적산법을 활용해 산출하였다. 특히 개별적산법은 한국건설기술연구원(2008)의 「건축자재 환경성정보 국가 DB 구축사업」 최종보고서와 환경부/지식경제부가 개발하고 한국환경산업기술원이 편찬한 국가LCI DB⁶⁶⁾을 활용하였다. 운송 중 배출되는 이산화탄소 배출량은 아파트 건설에 사용되는 운송장비 목록에 따라 김종엽(2005)의 연구를 참고하였고, 시공단계의 배출량은 우지환(2010)의 연구에 따라 건설장비, 자재운반장비, 현장사무소 에너지 소비량을 바탕으로 산정하여 적용하였다.

- 자재 생산 및 시공 단계 단위면적 당 이산화탄소 배출량 = 연면적 × 배출단위(단위면적당 배출량)

66) 국가LCI DB, <https://ecosq.or.kr/websquare.do#w2xPath=/ui/cer/ic/oh/ICOH110M01.xml&valVl=tabs1&menuSn=20018000> (검색일 2024.09.21.)

[표 3-5] 공동주택 건설 시 단위면적 당 이산화탄소 배출량

(단위: kton-CO ₂ /㎡)	
구분	배출량
자재생산	403.52
운송	5.83
시공	11.08
소계	420.43

출처: 연구진 작성

□ 건설 단계 이산화탄소 배출량 추정 결과

건설 단계의 이산화탄소 배출량은 분당 아파트 단지 재건축 시 용적률 150% 상향 조건을 반영한 연면적을 기준으로 추정하였다.

분당 아파트 전체를 용적률 150% 상향 조건으로 재건축 할 경우, 6,570 kton에 상당하는 이산화탄소가 배출 될 것으로 추산된다. 이는 해체 단계에서 발생하는 이산화탄소 배출량의 32배에 달하는 양으로, 해체 단계 보다는 자재 생산 및 시공 단계 배출되는 이산화탄소 절감 방안에 더 집중하는 것이 정책 효과를 높일 것으로 예상된다. 또한, 자재생산이 차지하는 이산화탄소 배출량은 전체 시공 단계에서 발생하는 양의 96%를 차지하고, 화물자동차가 배출하는 운송 분량은 1.4%, 시공 시 공사 장비가 배출하는 분량은 2.6%에 불과하므로 생산할 때 탄소배출량이 적은 자재를 사용하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

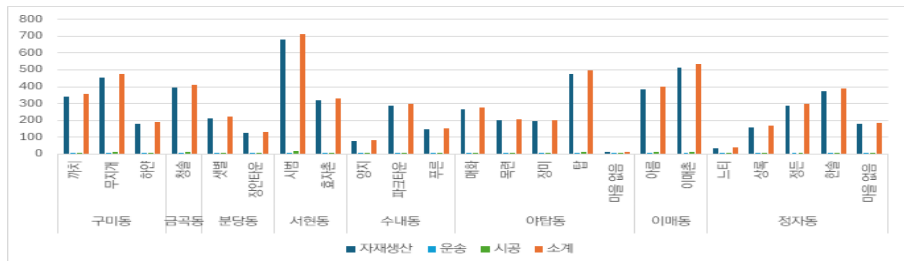
[표 3-6] 동/마을 별 분당 아파트 용적률 150% 상향 재건축 건설 단계 이산화탄소 배출량 산출

(단위: kton-CO₂/㎡)

동/마을	재건축 후 연면적 (1,000 ㎡)	자재생산	운송	시공	소계
구미동	2421.4	977.08	14.12	26.83	1,018.03
까치	845.5	341.17	4.93	9.37	355.47
무지개	1125.6	454.19	6.56	12.47	473.22
하얀	450.3	181.72	2.63	4.99	189.34
금곡동	977.6	394.50	5.70	10.83	411.03
청솔	977.6	394.50	5.70	10.83	411.03
분당동	846.3	341.50	4.93	9.38	355.81
샛별	531.9	214.64	3.10	5.89	223.63
장안타운	314.4	126.86	1.83	3.48	132.18
서현동	2479.4	1,000.49	14.45	27.47	1,042.41
시범	1689.8	681.87	9.85	18.72	710.45
효자촌	789.6	318.62	4.60	8.75	331.97
수내동	1271.3	512.98	7.41	14.09	534.47
양지	193.3	77.99	1.13	2.14	81.26
파크타운	712.0	287.29	4.15	7.89	299.33
푸른	366.0	147.70	2.13	4.06	153.89
아탑동	2853.5	1,151.43	16.64	31.62	1,199.68
매화	659.2	265.99	3.84	7.30	277.14
목련	494.2	199.42	2.88	5.48	207.77
장미	483.7	195.20	2.82	5.36	203.38
탑	1180.3	476.26	6.88	13.08	496.22
마을 없음	36.1	14.57	0.21	0.40	15.18
이매동	2217.7	894.88	12.93	24.57	932.39
아름	945.6	381.55	5.51	10.48	397.54
이매촌	1272.1	513.34	7.42	14.10	534.85
정자동	2560.5	1,033.20	14.93	28.37	1,076.50
느티	89.2	35.97	0.52	0.99	37.48
상록	397.3	160.31	2.32	4.40	167.03
정든	709.8	286.40	4.14	7.86	298.41
한솔	923.2	372.52	5.38	10.23	388.13
마을 없음	441.1	177.99	2.57	4.89	185.45
전체 계	15627.6	6,306.07	91.11	173.15	6,570.33

출처 : 연구진 작성

* 아파트 단지 전체 추정 결과는 [부록 5]에 수록



[그림 3-3] 마을 별 분당 아파트 용적률 150% 상향 재건축 건설 단계 이산화탄소 배출량

출처: 연구진 작성

3. 운영 단계의 운영탄소 배출량 추정

1) 추정 대상 에너지원

운영 단계의 추정 대상 에너지원은 ‘전기’, ‘가스’, ‘난방’의 세 가지로 구성하였다. 전기, 가스, 난방에너지의 소비량은 각각 개별 모형을 구성하고 월별 소비량을 추정한 후 최종 에너지 추정 소요량을 합산하여 탄소 배출량을 산정하였다.

또한 에너지 소비량을 이산화탄소 배출량으로 변환하기 위해서 환경부가 2022년 7월 「배출권거래법령 관련고시」의 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」에서 고시한 변환계수를 활용하였다.

[표 3-기] 추정 대상 에너지원의 특징과 변환계수

에너지원	단위	현재 공급방식	사용처	계절 특성	변환계수
전기 에너지	kWh	한국전력공사(KEPCO) 생산 국가 전력망	조명, 전기 기기 등	여름과 겨울에 첨두 소비량에 도달	0.4567 tCO ₂ /MWh (2018년 국가 온실가스 배출계수, 한국전력거래소 전력배출계수)
가스 에너지	kWh (변환)	삼천도시가스(주) 산하 삼천리와 코원에너지서비스 도시가스사	부엌 취사 등	계절 특성은 약함	56,100 kgCO ₂ /TJ (2017년 연료별 국가고유 배출계수, 도시가스(LNG))
난방 에너지	kJ	열병합 방식의 지역난방 설비 한국지역난방공사에서 생산된 열을 각 아파트 단지로 공급(천연가스 연료)	난방 및 온수 등	겨울에 첨두 소비량에 도달	60,760 kgCO ₂ /TJ (2013년 국가 온실가스 배출계수, 열병합시설)

출처 : 연구진 작성

2) 에너지 소비량 추정 모형

□ 주거용 건물 에너지 소비 추정 모형 설계

주거용 건물 에너지 소비 추정 모형은 이선주·유종현(2023)의 연구에서 사용한 기본구조를 기초로 설계하였다. 본 연구에서는 건물 특성, 단지의 사회경제적 특성, 단지의 열섬현상 방지 효과 벡터 등을 변수로 사용하였다.

에너지 소비량 추정 모형은 전기 에너지, 가스 에너지, 난방 에너지 별로 각각 개별 모형을 설정하여 추정하였고, 에너지원 별로 아파트 단지의 건축설계 및 단지계획 특성에 따라, 또한 시계열 별로 월별/계절별 특수성을 반영한 추정 모형을 구성하였다.

$$\ln(E_{im}) = \beta_1 B_i + \beta_2 S_i + \beta_3 G_i + \theta_r + \gamma_m + \epsilon_{im}$$

- E_{im} = 단지(i)에서 (m)월에 소비한 단위 면적당 에너지 총량에 자연로그를 취한 값
= ln(에너지소비총량/연면적)
- B_i = 단지(i)의 건물 특성을 나타내는 벡터로 단지 내 동 수, 연면적, 용적률, 건물 당 세대수를 사용
→ 건축연도와 건폐율은 통계적으로 유의미하지 않아 모형에서 제외; 건물당 연면적, 층수, 층당 연면적은 높은 공선성으로 모형에서 제외(모형에 포함된 변수들은 모두 VIF 10 이하로 구성)
- S_i = 단지(i)의 사회경제적 특성을 나타내는 벡터로 단지 당 세대수(밀도)와 세대 당 연면적(평형)을 사용
- G_i = 단지(i)의 열섬현상 방지 효과를 나타내는 벡터로 단지별 녹지면적비율을 사용
- θ_r = 다수의 아파트 단지를 포괄하는 상위레벨 랜덤 효과(Random Effect, RE) 변수로 마을 단위로 발생하는 RE를 추출하기 위해 사용
→ 동 단위 RE 보다는 마을 단위 RE가 통계적인 변량 제어 효과가 높은 것을 확인
- γ_m = 월별 시계열 랜덤 효과를 반영하기 위해 사용
→ 전기 에너지 소비 모형은 월별 랜덤 효과를, 가스 및 합산 에너지 소비 모형은 두 달 치 소비량을 합산한 랜덤 효과를 사용
- ϵ_{im} = 오차항
- 파라미터 추정은 multi-level mixed effect linear regression 모형으로 STATA에서 추정함

□ 분석 대상 및 데이터

- 분석 대상
 - 분당 1기 신도시 내 아파트 단지 115개
- 현황 데이터 구축
 - 현황 데이터는 전기에너지 사용량, 가스에너지 사용량, 난방에너지 사용량, 건물 특성, 사회경제적 특성, 단지별 녹지면적비율을 사용하였다.

[표 3-8] 분당 신도시 현황 데이터

변수	출처	비고
종속	전기에너지 사용량	건축데이터민간개방시스템(open.eais.go.kr)
	가에너지 사용량	의 지번별 에너지 사용량
	난방에너지 사용량	국토교통부 녹색건축과 가구에너지패널조사 (12차~14차) 상 건축물 에너지 사용량
설명	건물 특성	건축물대장 및 네이버부동산에 기재된 자료를 교차 검증하여 구축
	사회경제적 특성 벡터	2023년 건축공간연구원 기본과제 '1기 신도시 재건축의 공공성 제고를 위한 단지 분석 및 설계 연구 기본현황 및 분당 재건축 시뮬레이션 분석' 연구 중 수집한 아파트 단지별 상세 자료를 활용
		단지 내 동 수, 연면적, 용적률, 건물 당 세대수
		대지면적 당 세대수(밀도), 세대 당 연면적(평형)

변수	출처	비고
단지별 녹지면적비율 벡터	국토부 환경공간정보서비스 토지피복지도를 바탕으로 녹지면적비율을 산출	단지의 열섬현상 방지 효과를 나타내는 벡터

출처 : 연구진 작성
 * 아파트 단지별 건물 특성은 [부록 3]에 수록

□ 에너지 소비량 추정 모형의 설명력 검증

모형의 설명력을 검증하기 위하여 2023년도 실측 에너지 소비량과 추정된 에너지 소비량을 비교하였다. 검증 결과, 전기, 가스, 난방, 전체 에너지 모두 평균 1~2% 내외의 오차를 보이는 것으로 나타나 모형의 설명력은 충분한 것으로 판단하였다.

[표 3-9] 에너지 소비량 추정 모형의 설명력 검증

(단위: mWh)				
구분	전기에너지	가스에너지	난방에너지	전체에너지
실제 집계 에너지 소비량 평균 (2023년 실측 자료) (A)	3,251.5	317.3	6,219.9	9,788.7
모델 추정 에너지 소비량 평균 (B)	3,293.5	312.5	6,276.8	9,882.8
추정 오차 (C=(B-A)/A)	1.3%	-1.5%	0.9%	1.0%

출처 : 연구진 작성
 * 모든 에너지원의 단위를 mWh로 통일하여 비교함

3) 재건축 후 에너지 수요량 추정

□ 재건축 용적률 150% 상향 시 설명변수 계산

- Step 1. 용적률 150% 상향 시 연면적 변화 산출
 - 용적률 150% 상향을 가정하여 기존 용적률에 1.5를 추가할 시(예: 기존 용적률 2.1→재건축 후 용적률 3.6) 대지 면적과 건축 면적(건폐율)을 고정한 채로 연면적의 변화를 산출한다. (예, 기존 용적률 2.1=연면적210/대지면적100 → 재건축 후 용적률 3.6=연면적360/대지면적100)
- Step 2. 재건축 전후의 연면적 변화 비율(Rate) 산출
 - 재건축 전과 후의 연면적 변화 비율(Rate)을 산출한다. (연면적 변화 비율 $\text{Rate} = \text{재건축 연면적} / \text{기존 연면적}$) (예, 재건축 후 연면적360/기존 연면적210 = 1.714)
- Step 3. 재건축 후 층수, 세대수 산출
 - Step 2의 Rate를 이용하여, 대지면적과 건축면적, 건물 수를 고정하고 증가하게 될 층수와 세대수를 산출한다. (예, 재건축 후 층수=기존 층수×Rate)
 - 이 때 기존 용적률이 1.5보다 큰 고층 아파트 단지는 연면적이 2배 보다 적게 증가하는 반면, 기존 용적률이 1.5보다 작은 저층아파트와 같은 단지는 연면적이 2배 이상으로 크게 증가하는 결과로 이어진다. (예1, 재건축 후 층수34층 = 기존 층수20층×1.714), (예2, 재건축 후 세대수 170세대 = 기존 세대수 100세대×1.714)
- Step 4. 재건축 후 건물 당 세대수, 대지면적 당 세대수 산출
 - 재건축 후 증가한 세대수와 연면적을 바탕으로 재건축 후 건물 당 세대수, 대지면적 당 세대수를 추정한다.
- 변화 없는 설명변수
 - 연면적에 따라 증가하는 세대 수를 산출하므로, 세대 당 면적은 변화가 없다.
 - 녹지면적 비율은 변화가 없는 것으로 가정한다.

□ 변수 계산 결과

계산 결과, 다음과 같이 모형에서 설정한 모든 변수가 최소 82% 이상 증대되는 것으로 나타났다.

[표 3-10] 재건축 용적률 150% 상향 시 설명변수 계산 결과

구분	단위	기존(평균)	재건축 후	증감률
용적률	%	173.8	323.8	86.3%
연면적	10,000 m ²	7.057	12.868	82.3%
층수	층	10.0	18.6	86.3%
세대수	세대	690.5	1,290.5	86.9%
건물 당 세대 수	세대/건물	58.6	110.7	88.9%
대지면적 당 세대 수	세대/m ²	0.0177	0.0341	92.4%

출처 :연구진 작성

□ 재건축 후 에너지 소비량 추정

에너지 소비량 모형에 사용된 설명변수의 변화를 모두 반영하여 재건축 후의 아파트 단지별 총 에너지 소비량을 추정하였다. 그 결과, 대부분 큰 폭의 에너지 소비량 증가를 보였으나 아파트 단지 간 편차도 큰 것을 볼 수 있다. 이는 추정 모형은 분당 아파트 단지 전체를 대상으로 하는 반면 결과 값은 개별 단지를 대상으로 적용했을 때 발생 가능한 오류로 해석된다. 특히 아파트 단지의 건축적 특성 변수 중 에너지 소비량이 증가할 때 반대로 감소하는 방향성을 띄는 변수의 영향을 크게 받는 단지의 경우 이러한 결과가 도출된 것으로 보인다. 연면적의 증가율보다 에너지 소비량의 증가율이 낮은 것 또한 대지면적과 건축면적이 고정된 상태에서 밀도가 높아지는 것의 영향으로 볼 수 있다.

아파트 단지의 건축적 특성과 에너지 소비량과의 관계는 본 장의 4절에서 자세히 검토하였다.

[표 3-11] 동/마을별 분당 아파트 재건축 전/후 연면적 및 에너지 소비량 변화

동/마을	(단위:10,000 m ² , 에너지소비량 gWh)					
	연면적			에너지 소비량(전기+가스+난방)		
	재건축 전	재건축 후	증감률(%)	재건축 전	재건축 후	증감률(%)
구미동	124.58	242.14	94.4	167.54	320.84	91.5
까치	42.95	84.55	96.9	59.56	110.47	85.5
무지개	61.82	112.56	82.1	79.52	149.50	88.0
하얀	19.81	45.03	127.3	28.46	60.87	113.9
금곡동	52.62	97.76	85.8	72.35	136.27	88.4
청솔	52.62	97.76	85.8	72.35	136.27	88.4

분당동	43.37	84.63	95.1	76.63	123.33	60.9
셋별	28.88	53.19	84.2	41.48	73.36	76.9
장안타운	14.49	31.44	117.0	35.15	49.97	42.2
서현동	130.81	234.99	79.6	163.26	228.50	40.0
시범	95.23	168.98	77.5	116.67	148.07	26.9
효자촌	35.58	66.01	85.5	46.58	80.42	72.6
수내동	41.36	73.08	76.7	70.41	74.86	6.3
양지	11.35	19.33	70.2	14.63	21.89	49.6
파크타운	10.04	17.15	70.8	13.99	20.58	47.1
푸른	19.96	36.60	83.4	41.79	32.38	-22.5
야탑동	150.84	282.69	87.4	202.63	346.60	71.0
매화	29.73	63.26	112.8	44.84	95.28	112.5
목련	22.87	49.42	116.1	35.94	77.50	115.
분당	2.18	3.61	65.8	2.38	5.38	126.0
장미	28.26	48.37	71.2	46.89	54.65	16.5
탑	67.81	118.03	74.0	72.58	113.79	56.8
이매동	122.60	216.08	76.2	155.94	268.26	72.0
아름	50.51	88.87	75.9	60.85	98.38	61.7
이매촌	72.09	127.21	76.5	95.08	169.87	78.7
정자동	145.40	248.45	70.9	216.96	343.86	58.
느티	3.32	8.92	168.2	4.16	10.75	158.6
분당	36.23	44.11	21.8	44.85	53.54	19.4
상록	22.69	39.73	75.1	45.50	56.89	25.
정든	35.43	63.37	78.9	45.65	84.27	84.6
한솔	47.72	92.32	93.4	76.81	138.41	80.2
전체 계	811.58	1,479.83	82.3	1125.70	1842.51	63.7

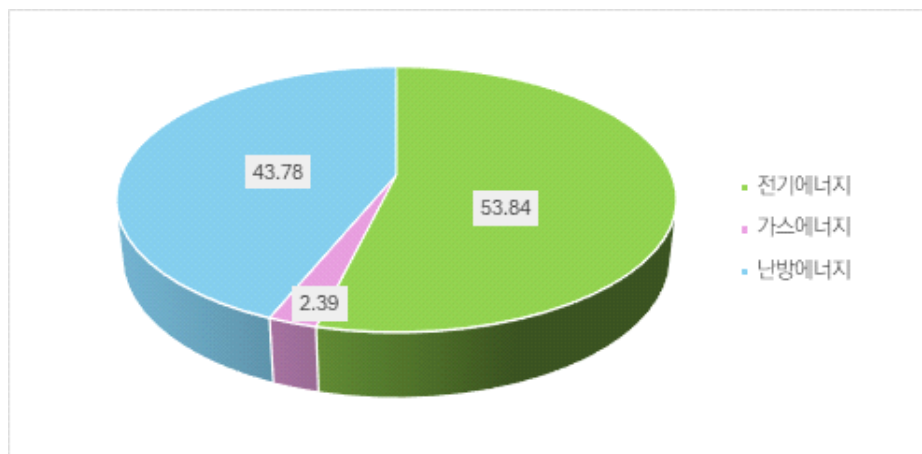
출처 : 연구진 작성

* 아파트 단지 전체 추정 결과는 [부록 6]에 수록

4) 운영 단계의 이산화탄소 배출량 추정

앞에서 도출된 에너지 소비량을 바탕으로, 에너지원별 변환계수⁶⁷⁾를 사용하여 재건축 이후 운영 단계의 이산화탄소 배출량을 추정하였다. 그 결과, 연간 이산화탄소 배출량 총합계는 558.61 kton-CO₂/㎡로 추정되었으며, 재건축 이전보다 66.9% 증가한 값으로 에너지 소비량 증가보다 이산화탄소 배출량의 증가가 큰 것으로 나타났다.

전기에너지는 배출량의 증가율이 76.1%로 총 배출량 증가율인 66.9%를 상회하는 동시에, 총 배출량의 53.84%로 가장 큰 비중을 차지하여 배출량 증가를 견인하는 가장 큰 요인인 것으로 나타났다. 난방에너지는 56.3%로 전기에너지에 비해서는 상대적으로 낮은 증가율을 보이지만, 총 배출량에서 차지하는 비중이 43.78%로 양적 측면에서 전기에너지와 큰 차이가 없다. 전체 에너지 중 가장 큰 증가율을 보인 것은 81.1%의 가스 에너지 배출량으로, 취사 에너지를 사용할 세대 수가 늘어난 영향으로 보인다. 그러나 가스 에너지는 총 배출량의 2.4%만을 차지하므로, 가스 에너지 배출량의 증가는 전체 배출량에 큰 영향을 미치지 못한다고 볼 수 있다. 이상의 결과를 종합할 때 이산화탄소 배출량을 저감하기 위해서는 전기에너지와 난방에너지 소비량을 줄이는 데에 집중하는 것이 효과적일 것이라 판단된다.



[그림 3-4] 재건축 운영단계 에너지원별 이산화탄소 배출량 비율 (단위: %)

출처: 연구진 작성

67) 본 보고서 p.76 [표 3-7] 참고

[표 3-12] 분당 아파트 재건축 이후 이산화탄소 배출량과 증감률

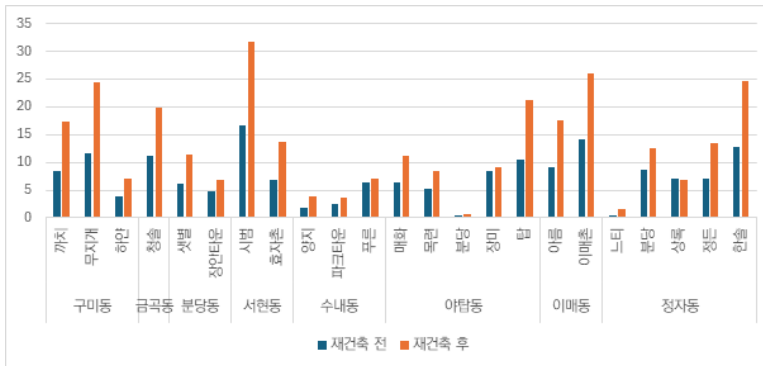
(단위: 이산화탄소 배출량: kton-CO₂/㎡, 증감률: %)

동/마을	전기 에너지		가스 에너지		난방 에너지		전체 에너지원 합계	
	배출량	증감률	배출량	증감률	배출량	증감률	배출량	증감률
구미동	49.06	103.9	2.25	131.8	44.25	83.8	95.55	94.6
까치	17.40	106.4	0.78	150.8	14.99	73.2	33.17	90.7
무지개	24.52	110.1	0.96	109.5	19.92	76.1	45.40	93.7
하얀	7.14	80.0	0.51	153.2	9.34	127.5	16.99	105.3
금곡동	19.96	76.9	1.09	108.6	19.07	93.5	40.12	85.2
청솔	19.96	76.9	1.09	108.6	19.07	93.5	40.12	85.2
분당동	18.32	66.5	0.89	36.0	17.24	59.9	36.45	62.4
샛별	11.49	84.7	0.49	106.4	10.02	71.6	21.99	78.9
장안타운	6.83	42.9	0.40	-3.6	7.22	46.0	14.46	42.5
서현동	45.59	94.5	1.55	71.6	26.46	12.6	73.61	53.8
시범	31.84	92.2	1.09	68.3	15.96	-5.5	48.89	43.4
효자촌	13.76	100.2	0.46	79.8	10.50	58.7	24.72	79.8
수내동	14.51	33.7	0.42	3.4	8.97	-8.2	23.90	13.7
양지	3.75	99.7	0.12	91.3	2.86	28.1	6.73	61.3
파크타운	3.71	48.6	0.12	47.8	2.60	46.1	6.42	47.6
푸른	7.06	8.9	0.17	-32.2	3.51	-39.0	10.75	-14.0
야탑동	50.61	63.3	2.76	74.7	48.58	74.9	101.95	69.0
매화	11.16	75.2	0.82	129.6	14.60	129.4	26.59	103.0
목련	8.42	60.4	0.70	76.3	12.15	147.3	21.28	101.4
분당	0.77	91.9	0.03	45.9	0.78	152.5	1.58	116.4
장미	9.11	8.9	0.44	1.8	7.11	23.0	16.67	14.3
탑	21.14	99.5	0.77	105.9	13.93	34.0	35.84	67.7
이매동	43.55	88.4	1.70	88.4	35.98	63.1	81.23	76.3
아름	17.52	93.4	0.59	74.4	12.49	45.2	30.60	70.0
이매촌	26.04	85.2	1.10	96.9	23.49	74.6	50.63	80.3
정자동	59.14	64.1	2.69	87.5	43.98	53.5	105.80	60.0
느티	1.57	205.9	0.05	210.6	1.54	139.1	3.17	169.3
분당	12.63	46.0	0.15	-28.2	5.49	1.1	18.28	27.8
상록	6.83	-2.0	0.48	88.8	8.65	36.5%	15.96	17.7
정든	13.35	90.3	0.55	73.3	11.44	82.2%	25.34	86.2
한솔	24.75	92.2	1.45	129.9	16.85	69.3%	43.05	83.5
전체 계	300.74	76.1%	13.34	81.1%	244.54	56.3%	558.61	66.9

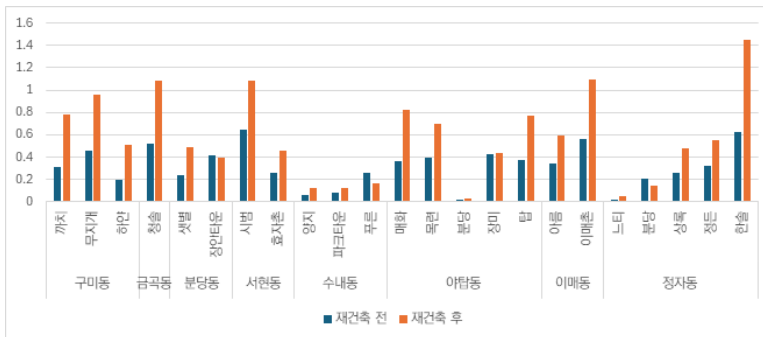
출처 : 연구진 작성

* 아파트 단지 전체 추정 결과는 [부록 7]에 수록

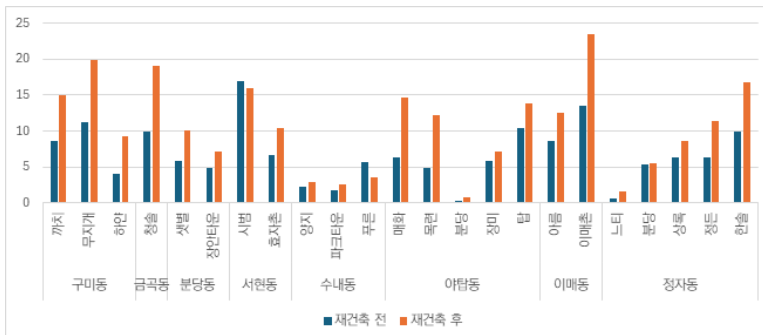
전기 에너지



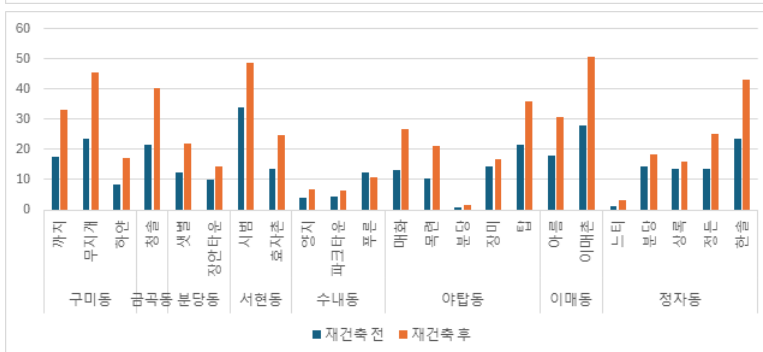
가스 에너지



난방 에너지



전체 에너지 합계



[그림 3-5] 분당 마을별 에너지원별 재건축 전/후 이산화탄소 배출량 (단위: kton-CO₂/m²)

출처: 연구진 작성

4. 아파트 단지 건축 특성과 에너지 소비량 관계 분석

1) 분석의 개요

앞서 설정한 모형을 통해 아파트 단지의 에너지 소비량을 추정한 결과, 에너지 소비량이 일괄적으로 상승하는 것이 아니라 단지별, 에너지원별로 상이한 패턴을 나타냈다. 이는 도시 전체를 대상으로 한 모형을 아파트 단지별로 적용했을 때의 한계이기도 하지만, 아파트 단지의 건축적 특성이 각 에너지 소비량에 서로 다른 영향을 미쳤기 때문이기도 하다. 이러한 상관관계를 설명하기 위하여 본 연구에서는 1차 선별된 단지 122개를 대상으로 각 전기에너지 소비량을 종속변수로, 건축적 특성을 설명변수로 한 회귀분석을 실시하였다.

[표 3-13] 아파트 단지 건축 특성과 에너지 소비량 관계 분석을 위해 추가된 아파트 단지(n=7)

동이름	마을이름	분석 대상 아파트 단지	단지수
서현동	효자촌	대우대창	1
수내동	파크타운	롯데, 삼익, 서안	3
아탑동	매화	대창파크빌	1
이매동	아름	6단지선경	1
정자동	정든	1단지동아	1

출처 : 연구진 작성

* 본 보고서 p.69 [표 3-1]의 탄소 배출량 추정 대상 아파트 단지(n=115)에 7곳의 아파트 단지를 추가하여 n=122

[표 3-14] 아파트 단지 건축 특성과 에너지 소비량 관계 분석에 사용된 변수

구분	변수	
종속변수	에너지 사용량	전기에너지, 가스에너지, 난방에너지 각각의 단지별, 월별 소비량, 단위면적당 소비량
설명변수	아파트 단지 건축 특성	건물 수, 용적률, 연면적, 건물 당 세대 수, 대지면적 당 세대 수, 세대 당 면적, 녹지 면적 비율

출처 : 연구진 작성

* 각 데이터의 출처는 본 보고서 p.77 [표3-8]과 동일

□ 종속변수 기술통계

- 전기 에너지 소비량

분당 아파트 단지의 평균 월별 전기 에너지 소비량은 271 mWh로 최소 28.8부터 최대 1,708.1 mWh의 넓은 분포를 보인다. 월별 전기에너지 소비량을 아파트 단지 연면적으로

로 나눈 단위 면적당 전기 소비량(kWh/m²)은 평균 3.9로, 최소 1.03부터 최대 14.31 kWh/m²의 분포를 보인다.

- 가스 에너지 소비량

가스 소비량 데이터는 격월로 구성되어 단지별 연간 총 6개의 관찰 값을 바탕으로 분석하였다. 아파트 단지별 격월별 가스 에너지 소비량은 52.9 mWh. 단위면적 당 가스 에너지 소비량은 0.834를 나타냈고, 월 기준으로 비교했을 시 전기 에너지 소비량의 1/10 수준으로 나타났다.

- 난방 에너지 소비량

난방 에너지 소비량은 평균 월별 단지별 512.6 mWh로 전기 에너지 소비량의 두 배를 약간 못 미치는 수준으로 나타나 가장 많은 소비가 발생하는 에너지원으로 보인다. 단위 면적당 난방 에너지 소비량은 월별 단지별 7.89 mWh로 단위 면적 당 전기 에너지 소비량의 두 배 가까이 되는 것으로 나타났다.

[표 3-15] 아파트 단지별 종속변수 기술통계 결과

변수	단위	N	Mean	SD	Min	Max
전기소비량(단지별, 월별)	mWh	1464	271.0	227.3	28.8	1,708.1
단위 면적당 전기소비량	kWh/m ²	1464	3.911	1.289	1.029	14.309
가스소비량(단지별, 격월별)	mWh	732	52.9	49.5	6.3	414.4
단위 면적당 가스소비량	kWh/m ²	732	0.834	0.466	0.121	2.950
난방소비량(단지별, 월별)	mWh	1404	512.6	665.1	13.4	5,327.5
단위 면적당 난방소비량	kWh/m ²	1404	7.889	6.821	0.519	41.068

출처 : 연구진 작성

* 가스소비량은 전기소비량 단위로 환산 후 산정

**전기 소비량 데이터 N=1,464 = 122개 단지 * 12개월

가스 소비량 데이터 N = 732 = 122개 단지 * 연간 6개 기록(2개월에 한번 검침)

난방 소비량 데이터 N = 1,404 = 117개 단지 * 12개월

□ 설명변수 기술통계

분석에 포함된 122개 아파트 단지는 평균 12.5개의 건물로 구성되었고, 평균 용적률 174%의 수준으로 개발되었다. 평균적으로 연면적 70,360 m²에 59 세대가 거주하며, 세대 당 105.6 m²의 면적과 33%의 녹지 면적을 보인다.

[표 3-16] 아파트 단지별 설명변수 기술통계 결과

변수	단위	N	Mean	SD	Min	Max
건물 수	개	122	12.5	7.5	3.0	38.0
용적률	%	122	174.3	80.8	88.0	738.6
연면적	10,000 m ²	122	7.036	5.644	0.738	26.746
건물 당 세대 수	세대/건물	120	58.9	53.5	8.5	550.3
대지면적 당 세대 수	세대/m ²	122	0.018	0.007	0.004	0.050
세대 당 면적	m ² /세대	122	105.6	37.0	34.6	221.6
녹지 면적 비율	%	122	33.2	12.3	1.2	55.8

출처 : 연구진 작성

2) 에너지원별 모형 분석 결과

모든 해석은 다른 설명변수와 마을별/월별 랜덤 효과를 고정한 상황을 가정하였다.

□ 전기에너지 소비량 모형 분석 결과

모형 추정 결과, 용적률, 건물 당 세대 수, 녹지 면적 비율이 증가할수록 단위면적당 전기 에너지 소비량이 증가하는 것으로 나타났다. 즉 아파트의 층수가 증가하거나 세대 수가 증가할수록 전기 에너지 소비량이 증가한다는 것이다. 반면 아파트 단지 당 연면적과 대지면적 당 세대 수, 세대 당 면적은 증가할수록 단위면적당 전기에너지 소비량은 감소하는 것으로 나타났다. 대형단지일수록, 평형이 커질수록, 거주밀도가 높아질수록 단위 면적당 전기에너지 소비량이 감소한다고 볼 수 있다.

1월 소비량을 비교대상(base)으로 하는 월별 랜덤효과는 여름(7~9월)과 겨울(12~1월)에 큰 전기 에너지 소비, 봄과 가을에 적은 에너지 소비 패턴을 보여준다.

마을별 랜덤효과(마을별 사회, 경제, 지역, 도시구조적 특수성)는 전기 에너지 소비량과 통계적으로 유의한 상관관계를 보인다.

[표 3-17] 전기 에너지 소비량 모형 추정 결과

설명변수	Coef.	z	Sig.
건물 수	0.0025	1.62	.
용적률	0.2658	14.64	**
연면적	-0.0066	-2.51	*

건물 당 세대 수	0.0018	13.57	**
단지 당 세대 수	-33.4484	-18.27	**
세대 당 면적	-0.0075	-21.11	**
녹지 면적 비율	0.2835	4.68	**
월별 랜덤 효과			
1월(base)			
2월	-0.0388	-1.66	+
3월	-0.1699	-7.28	**
4월	-0.1388	-5.94	**
5월	-0.1911	-8.19	**
6월	-0.1663	-7.13	**
7월	-0.0035	-0.15	
8월	0.2202	9.43	**
9월	0.0231	0.99	
10월	-0.1758	-7.53	**
11월	-0.1316	-5.64	**
12월	-0.0805	-3.45	**
Constant	2.1688	31.86	**
마을별 랜덤효과	Estimate	S.E.	
var(_cons)	0.0263	0.01	**
var(residual)	0.0327	0.00	**

출처 : 연구진 작성
(** P<0.01, * P<0.05, + P<0.10)

[표 3-18] 전기에너지 소비량 모형 추정 결과 해석

설명변수			단위면적(㎡)당 전기 에너지 소비량
건물 수	증가	-	증가(통계적 유의성 없음)
용적률	증가	건축면적 대비 연면적 증가 건물 층수 증가	증가
연면적	증가	아파트 단지 당 연면적 증가	감소
건물 당 세대 수	증가	한 건물이 포함하는 세대 수 증가 건물이 높아지거나 옆으로 넓어짐	증가
대지면적 당 세대 수	증가	거주밀도 증가	감소
세대 당 면적	증가	세대 당 평수 넓어짐 소득수준 높아짐	감소
녹지 면적 비율*	증가	건폐율 감소로 층수 증가	증가

출처 : 연구진 작성
* 녹지면적 혹은 오픈스페이스 증가로 인한 이산화탄소 흡수 메커니즘은 본 에너지 추산 모형과 무관함

□ 가스 에너지 소비량 모형 분석 결과

가스 에너지 소비량 모형 결과는 연면적, 건물 당 세대 수, 세대 당 면적의 변수에서 전기 에너지 소비량 모형과 유사한 결과를 보인다. 건물 수, 건물 당 세대 수가 증가할수록 가스에너지 소비량은 증가한다. 반면 연면적과 세대 당 면적, 녹지면적비율은 증가할수록 단위면적당 가스에너지 소비량이 감소하는 것으로 나타났다. 가스 에너지는 취사에 쓰이므로, 세대 수가 소비량의 증가에 가장 중요하게 관련이 있는 것으로 해석된다.

격월별 랜덤 효과는 base인 1~2월이 가장 사용량이 많고 여름-가을(7~10월) 중 가스 에너지 소비량이 가장 적은 것으로 추정된다.

마을별 랜덤효과(마을별 사회, 경제, 지역, 도시 구조적 특수성)는 가스 에너지 소비량과 통계적으로 유의한 상관관계를 보인다.

[표 3-19] 가스 에너지 소비량 모형 추정 결과

설명변수	Coef.	z	Sig.
건물 수	0.0067	1.74	+
용적률	-0.0458	-1.02	
연면적	-0.0125	-1.96	+
건물 당 세대 수	0.0008	2.51	*
단지 당 세대 수	5.5935	1.21	
세대 당 면적	-0.0065	-7.25	**
녹지 면적 비율	-0.3902	-2.57	*
월별 랜덤 효과			
1-2월(base)			
3-4월	-0.1203	-2.85	**
5-6월	-0.2201	-5.22	**
7-8월	-0.2724	-6.46	**
9-10월	-0.2656	-6.30	**
11-12월	-0.1513	-3.59	**
Constant	0.6584	4.32	**
마을별 랜덤효과			
	Estimate	S.E.	
var(_cons)	0.0566	0.02	*
var(residual)	0.1066	0.01	**

출처 : 연구진 작성

(** P<0.01, * P<0.05, + P<0.10)

[표 3-20] 가스에너지 소비량 모형 추정 결과 해석

설명변수			단위면적(㎡)당 전기 에너지 소비량
건물 수	증가	-	증가
용적률	증가	건축면적 대비 연면적 증가 건물 층수 증가	감소(통계적 유의성 없음)
연면적	증가	아파트 단지 당 연면적 증가	감소
건물 당 세대 수	증가	한 건물이 포함하는 세대 수 증가 건물이 높아지거나 옆으로 넓어짐	증가
대지면적 당 세대 수	증가	거주밀도 증가	증가(통계적 유의성 없음)
세대 당 면적	증가	세대 당 평수 넓어짐 소득수준 높아짐	감소
녹지 면적 비율*	증가	건폐율 감소로 층수 증가	감소

출처 : 연구진 작성

* 녹지면적 혹은 오픈스페이스 증가로 인한 이산화탄소 흡수 메커니즘은 본 에너지 추산 모형과 무관함

□ 난방에너지 모형 분석 결과

난방 에너지 소비량 모형 결과는 용적률, 연면적, 대지면적 당 세대 수, 세대 당 면적에서 전기에너지 모형과 유사한 결과를 보인다. 건물 수, 용적률이 증가할수록 소비량도 증가 하며, 연면적, 대지 면적 당 세대 수, 세대 당 면적, 녹지 면적 비율이 증가할수록 소비량은 감소하는 것으로 나타났다. 분당아파트 재건축 후 에너지 소비량을 추정할 때 난방에너지 소비량의 증가율이 가장 적었던 것은 건축적 특성 중에 감소의 관계를 갖는 요인이 많기 때문인 것으로 보인다.

월별 랜덤효과는 base인 1월이 가장 높고, 기온이 높은 여름(6~9월)이 가장 낮은 것으로 나타난다.

마을별 랜덤효과(마을별 사회, 경제, 지역, 도시 구조적 특수성)는 난방 에너지 소비량과 통계적으로 유의한 상관관계를 보인다.

[표 3-21] 난방 에너지 소비량 모형 추정 결과

설명변수	Coef.	z	Sig.
건물 수	0.0134	10.62	**
용적률	0.0775	5.16	**
연면적	-0.0314	-14.76	**
건물 당 세대 수	0.0000	0.26	
단지 당 세대 수	-3.4115	-2.27	*

세대 당 면적	-0.0040	-13.68	**
녹지 면적 비율	-0.3050	-5.96	**
월별 랜덤 효과			
1월(base)			
2월	-0.3202	-16.37	**
3월	-0.7139	-36.51	**
4월	-1.1875	-60.73	**
5월	-1.7008	-86.98	**
6월	-2.3053	-117.89	**
7월	-2.4462	-125.10	**
8월	-2.6584	-135.95	**
9월	-2.4753	-126.58	**
10월	-1.4470	-74.00	**
11월	-0.5939	-30.37	**
12월	-0.1250	-6.39	**
Constant	3.5219	55.01	**
마을별 랜덤효과	Estimate	S.E.	
var(_cons)	0.0383	0.01	**
var(residual)	0.0220	0.00	**

출처 : 연구진 작성

(** P<0.01, * P<0.05, + P<0.10)

[표 3-22] 난방에너지 소비량 모형 추정 결과 해석

설명변수	단위면적(㎡)당 전기 에너지 소비량		
건물 수	증가	-	증가
용적률	증가	건축면적 대비 연면적 증가 건물 층수 증가	증가
연면적	증가	아파트 단지 당 연면적 증가	감소
건물 당 세대 수	증가	한 건물이 포함하는 세대 수 증가 건물이 높아지거나 옆으로 넓어짐	증가(통계적 유의성 없음)
대지면적 당 세대 수	증가	거주밀도 증가	감소
세대 당 면적	증가	세대 당 평수 넓어짐 소득수준 높아짐	감소
녹지 면적 비율*	증가	건폐율 감소로 층수 증가	감소

출처 : 연구진 작성

* 녹지면적 혹은 오픈스페이스 증가로 인한 이산화탄소 흡수 메커니즘은 본 에너지 추산 모형과 무관함

3) 소결

전기, 가스, 난방 세 가지 에너지 모두와 일관된 방향성을 보이는 것은 연면적과 세대 당 면적으로, 이들 변수가 증가할수록 에너지 소비량은 감소하는 모습을 보인다. 밀도를 의미하는 대지면적 당 세대 수 또한 증가할수록 에너지 소비량은 감소한다. 에너지 소비량의 증가에 영향을 미치는 변수는 건물 수, 용적률, 건물 당 세대 수로, 층수와 세대 수 등이 많아질수록 에너지 소비량은 증가한다고 볼 수 있다. 서로 다른 방향성을 가지는 경우 대부분 통계적 유의성이 없는 것으로 도출되었으나, 녹지 면적 비율의 경우 전기에너지 소비량은 증가하는 것으로, 가스에너지와 난방에너지 소비량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 녹지 면적 비율이 증가하면 건폐율이 감소하여 건물의 층수가 많아지는 결과를 초래하게 되어 엘리베이터 운행 및 급수, 하수 처리 등 건축물의 높이와 관련된 전기에너지 소비가 증가하기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

[표 3-23] 에너지 소비량 모형 추정 결과 종합 (월별 랜덤효과 제외)

구분	전기에너지			가스에너지			난방에너지		
	Coef.	Sig.	증감	Coef.	Sig.	증감	Coef.	Sig.	증감
건물 수	0.0025			0.0067	+	증	0.0134	**	증
용적률	0.2658	**	증	-0.0458			0.0775	**	증
연면적	-0.0066	*	감	-0.0125	+	감	-0.0314	**	감
건물 당 세대 수	0.0018	**	증	0.0008	*	증	0.0000		
단지 당 세대 수	-33.4484	**	감	5.5935			-3.4115	*	감
세대 당 면적	-0.0075	**	감	-0.0065	**	감	-0.0040	**	감
녹지 면적 비율	0.2835	**	증	-0.3902	*	감	-0.3050	**	감
마을별 랜덤효과	Estimate			Estimate			Estimate		
var(_cons)	0.0263	**		0.0566	*		0.0383	**	
var(residual)	0.0327	**		0.1066	**		0.0220	**	

출처: 연구진 작성

(** P<0.01, * P<0.05, + P<0.10)

이상의 결과를 종합하면 아파트 단지의 에너지 소비량은 대형 단지일수록, 평형이 넓을수록, 밀도가 높을수록 감소하며, 층수가 높을수록, 세대 수가 많을수록 증가한다고 요약할 수 있다.

제4장 재건축 생애주기별 탄소 배출 저감 방안 제시 및 효과 검증

1. 전문가 FGI를 통한 적용 가능 탄소배출 저감요소 도출
 2. 탄소 배출 감축 패키지 제시 및 감축 비율 산출
 3. 탄소 배출 감축 패키지 적용 효과 검증
 4. 소결
-

1. 전문가 FGI를 통한 적용 가능 탄소배출 저감요소 도출

1) 개요

4장에서는 전문가 FGI, 자문 등을 통해 탄소배출 저감을 위한 패키지를 개발하고, 이 패키지들을 적용한 결과를 3장의 결과 값과 비교하였다. 그리고 에너지원별 탄소 배출 효과와 각 단지별 ZEB 등급 검토, 에너지원 별 비용 절감 효과를 검토함으로써 패키지의 효용성을 검증하였다.

□ 조사목적

앞선 2장에서의 결과를 바탕으로 노후계획도시 재건축 과정에서 고려해볼 수 있는 탄소 배출 저감요소를 선정하였다. 선정된 저감요소들에 대한 전문가들의 의견을 수렴하여 실제 노후계획도시 재건축 과정에서 현실적으로 적용 가능한 탄소배출 저감 요인들을 도출하고, 적용 시 고려해야 하는 사항, 추가적으로 필요한 저감요소 등을 보완하였다.

□ 조사기간 및 방법

- (조사기간) 2024년 6월 26일 ~ 7월 2일
- (조사대상) 관련 분야(건축, 도시, 환경 등) 학계·민간·공공 전문가 총 21인
- (조사방법) 온라인 설문조사

□ 조사 대상 탄소배출 저감요소

선행연구 검토를 통해 선정한 탄소배출 저감요소는 크게 내재탄소 배출의 '해체', '건설', 운영탄소 배출의 '운영'의 세 가지 생애주기 관점으로 분류하였다. 해체 단계는 '자원순환 특화', 건설 단계는 '지속가능 건설', 운영 단계는 '에너지 효율 건축물', '기후변화 적응 및 흡수원 확대', '친환경 교통', '신재생에너지'의 4가지 부문으로 구성하였으며, [표 4-1]과 같이 총 6개 부문, 28개 저감요소가 포함되어 있다.

'자원순환 특화' 부문은 기존 건축물의 해체 과정에서 폐기물 저감을 위해 도입할 수 있는 요소들이며, 폐기물 퇴비화 및 재활용 등을 포함한다. '지속가능 건설' 부문은 시공 단계의 저감 요소로, 건축 자재의 재활용률 확대, 탄소배출 저감형 건설자재 사용, 프리패브리케이션(prefabrication)의 3가지를 포함한다.

운영단계의 '에너지 효율 건축물' 부문은 건축물의 에너지 사용을 최소화하기 위한 패시브(Passive) 기술과 에너지 사용 효율을 높이기 위한 액티브(Active) 기술을 포함하였으며, 일조나 풍향을 고려한 건축물 배치, 에너지 효율 향상 시스템도 함께 구성하였다. '기후변화 적응 및 흡수원 확대' 부문은 단지 및 건축물 내부의 온도를 낮춰 간접적으로 에너지 사용을 저감시키는 동시에 탄소를 흡수하기 위한 요소들로, 옥상녹화 및 벽면녹화, 녹색기반시설 등이 해당되며 기후위기 적응 측면에서 단지 내 도시농장, 도시 빗물관리 인프라 구성에 대한 항목 또한 포함한다. '친환경 교통' 부문은 재건축 단지 내 친환경 교통수단 관련 시설 도입에 대한 내용이다. '신재생에너지' 부문은 단지 내에서 필요한 에너지를 태양열, 풍력, 바이오에너지 등의 재생에너지로 생산하여 충당하는 것으로, 관련 발전시설의 조성, 재건축 시 신재생에너지 생산을 위한 공간 확보 및 인프라 설치에 대한 전반적인 의견을 수렴하였다.

[표 4-1] 탄소배출 저감요소 풀(6개 부문, 28개 요소)

생애주기			구분	주요 저감요소	세부 내용
해체	건설	운영			
●	●		자원순환 특화	1 폐기물 저감	폐기물 퇴비화, 재활용 가능성 평가 등
				2 자재 재활용률 확대	건축 자재 재활용률 개선 등
			지속가능 건설	3 탄소배출 저감형 건설자재 사용	탄소배출 저감형 공법 활용 등
				4 프리패브리케이션	조립식 건축 시공 등
●	●	●	신재생 에너지	5 태양광 발전	태양광 발전시설 조성
				6 태양열 발전	가정용 태양열 온수기 등
				7 풍력 발전	풍력 발전시설 조성
				8 수력 발전	초소수력 발전시스템
				9 지열에너지 활용	냉난방공조(HVAC), 지열 히트펌프 (GSHP) 등
				10 바이오에너지 활용	폐기물 에너지화 시설 조성
				11 친환경 수소 발전	연료전지 등
			에너지 효율 건축물	12 고성능 창호	고성능 창호를 통한 냉난방 에너지 절감
				13 고기밀 시공	창호, 콘센트, 배관 등 기밀 시공
				14 패시브 외단열 시공	단열을 통한 열손실 최소화 및 에너지 절감
				15 외부차양	건물 외부 블라인드, 처마 등
				16 자연채광	자연채광 고려 건물 배치 등
				17 자연환기	자연환기 고려 건물 배치 등
				18 고효율 보일러	-
				19 액티브 고효율 가전제품	-
				20 브 고효율 LED 조명	-
				21 열회수형 환기장치	폐열회수 환기장치 등
				22 일조, 풍향 고려 건축물 배치	-
				23 에너지 효율 향상 시스템	스마트그리드, 배터리 에너지 저장 시 스템, 건물에너지관리시스템(BEMS)
●	●	●	기후변화 적응 및 흡수원 확대	24 옥상녹화 및 벽면녹화	녹색지붕, 옥상녹화, 수직 녹지 시스템 등
				25 녹색공간 및 녹색기반시설	공원녹지 조성 및 녹색기반시설(GI) 설치
				26 도시농장(농업)	건물 일체형 옥상온실 등
				27 빗물관리 인프라	빗물수집시스템
●	●	●	친환경 교통	28 친환경 교통수단 도입	전기차 이용 편의시설 조성 등

출처 : 본 보고서 2장의 내용을 바탕으로 연구진 정리 및 작성

2) 생애주기별 적용 가능한 탄소배출 저감요소 도출

전문가들의 의견 수렴 결과, 해체 및 건설 단계에서의 탄소배출 저감요소는 운영 단계에 비해 상대적으로 적용 가능성이 낮게 나타났다. 운영 단계의 경우, 신재생 에너지 부문에서 '태양광 발전'의 적용 가능성이 90%로 매우 높게 나타났으며, 에너지 효율 건축물 부문에서는 자연환기를 제외한 모든 패시브·액티브 기술의 적용 가능성이 85% 이상으로 높게 나타났다. 기후변화 적응 및 흡수원 확대 부문에서는 빗물관리 인프라(86%), 녹색공간 및 녹색기반시설(81%) 순으로 적용 가능성이 높았다. 친환경 교통수단 도입 항목의 적용 가능성 또한 90%로 높게 나타났다.

[표 4-2] 탄소배출 저감요소별 적용 가능성 및 주요 의견

구분	주요 저감요소	적용 가능성(%)			주요 의견
		높음	보통	낮음	
자원순환 특화	1 폐기물 저감	62	29	10	해체 시 폐기물 골재 재활용 검토
지속가능 건설	2 자재 재활용률 확대	48	48	5	목표치 설정 필요; 자원순환 중간기점 설치; 식재 조정 재활용 고려; 자원 순환적 관점에서 폐기물을 건설 자재화 필요
	3 탄소배출 저감형 건설자재 사용	67	29	5	입주민 수용 어려움; 감리 필요성; 비용 절감 입증 필요; 순환 골재 품질관리 필요
	4 프리패브리케이션	48	43	10	비용 증가 우려; 친환경 시멘트 등 자재 개선 가능
	5 태양광 발전	90	10	0	중저밀도 주거단지 대상; 가장 현실적인 대안; 맑은 날이 적은 국내 기상 특성 반영 필요
신재생 에너지	6 태양열 발전	38	52	10	중저밀도 주거단지 대상; 여타 에너지원과 경쟁성/경쟁성 떨어짐; 에너지 밀도가 낮고 우리나라 기후의 계절성 존재; 규모화가 어려움
	7 풍력 발전	14	33	52	진동, 소음 문제; 풍력 자원량 검증 선행 필요; 수직축 풍차 가능; 지리적 기상학적 한정성(구릉성 산지)
	8 수력 발전	14	33	52	대상지의 지리적 한정성; 하천을 이용한 소수력 발전은 가능하지만 경제성 어려움; 수열 발전의 대안; 지리적 한정성; 배수를 활용한 초소수력발전 방식도 있음
	9 지열에너지 활용	43	43	14	히트펌프 방식+중저밀도 주거단지 대상; 도시 적용 가능성 여부 확인 필요; 투자비용 대비 에너지 생산량 한계; 냉난방공조/지열히트펌프 함께 할 시 효율 좋음
	10 바이오에너지 활용	43	33	24	입주민 수용 어려움; 실용성은 높으나 설치 어려움; 투자비용 대비 에너지 생산량 한계;
	11 친환경 수소 발전	29	29	43	안전 우려; 그린 수소/블루 수소 생산기지로 부터 공급받을 수 있는지 여부 검토 필요; 비용 문제

구분	주요 저감요소	적용 가능성(%)			주요 의견
		높음	보통	낮음	
에너지 효율 건축물	12 고성능 창호	100	0	0	모든 유형의 주택에 적용; 반드시 필요
	13 고기밀 시공	95	5	0	고층 공동주택; 반드시 필요하나 설계/시공방법 기준/표준이 분명하지 않음
	14 패시브 외단열 시공	95	5	0	중저층 공동주택; 반드시 필요
	15 외부차양	86	14	0	저층 주거지역; 비용 적음
	16 자연채광	86	14	0	고층 주거의 한계
	17 자연환기	76	24	0	고층 주거의 한계(20층 이상은 기계적 환기 필요)
	18 고효율 보일러	90	10	0	강제/규제방안 필요; 초기 설치비용
	19 액티브 고효율 가전제품	90	10	0	강제/규제방안 필요; 정부 정책 지원 필요
	20 고효율 LED 조명	100	0	0	모든 유형의 주택에 적용; 정부 정책 지원 필요
	21 열회수형 환기장치	90	10	0	모든 유형의 주택에 적용; 높은 초기 설치비용
	22 일조, 풍향 고려 건축물 배치	81	19	0	고층 주거는 한계가 있고 현행 단지설계 시 반영되는 내용으로 정책화 필요성 낮음
	23 에너지 효율 향상 시스템	81	19	0	단지 및 근린생활권 별로 적용하도록 유도 필요; BEMS; 도시 전체에 적용 필요
기후변화 적응 및 흡수원 확대	24 옥상녹화 및 벽면녹화	67	24	10	운영관리 주체 논의 어려움; 큰 비용 문제; 고층 주거에 적용 한계; 유지관리 어려움; 탄소 배출 저감요소로는 미미한 효과; 도심의 온도 상승 저하 효과 기대 가능; 기술 개발 많이 되어있고, 정원문화 확산; 지원 사업 활성화
	25 녹색공간 및 녹색기반시설	81	14	5	비용 문제; 지역차원에서 단지 간 녹지 연속성 보완 필요; 적정 토지 확보 필요
	26 도시농장(농업)	52	29	19	운영관리 주체 논의 어려움; 비용 문제; 탄소 배출저감 효과 적음; 입지 어려움
	27 빗물관리 인프라	86	14	0	비용 문제; 전 도시 차원의 빗물 관리 시스템으로 개선 필요
친환경 교통	28 친환경 교통수단 도입	90	10	0	아파트 단지 재건축과 교통수단 도입은 별개의 문제이므로 깊이 논의하지 않음

출처 : 연구진 작성

□ 해체 단계

재건축을 위한 해체 단계에서의 폐기물 저감요소는 대부분의 전문가가 적용 가능성이 높다고 평가하였다. 또한, 현 통계상 건설폐기물의 재활용률이 99%로 높긴 하나 여전히 남아 있는 약 1%와 통계에 잡히지 않는 불법투기 건설폐기물에 대해서도 검토가 필요하다는 의견이 있었다.

[표 4-3] '자원순환 특화' 관련 저감요소에 대한 주요 의견

구분	적용 가능성	주요 의견
1. 폐기물 저감	높음	- 목표치 설정 필요 - 자원순환 중간 기점 설치를 통해 운영 상 자원순환 가능
	낮음	- 법령은 마련되어 있으나, 건설폐기물 처리 운영 단계에서 불법행위 다수 발견. 행정상 관리가 이뤄지지 않으면 이행되기 어려움

출처 : 연구진 작성

□ 건설 단계

건설 단계의 경우 전문가들은 탄소배출 저감형 건설자재 사용의 적용 가능성을 가장 높게 평가했으며, 자재 재활용률 확대나 프리패브리케이션의 적용 가능성도 높게 나타났다. 자재 재활용률을 획기적으로 높이기 위해서는 자재 재활용 시의 건설비용과 일반 건설비용의 비교와 함께 법적 근거 검토가 선행되어야 할 필요가 있다는 의견이 있었다.

그 외 건설 단계에서의 저감요소로 장수명 주택에 대한 의견도 많았다. 장수명 주택은 초기 단계에서 소폭의 공사비용 증가가 있으나 생애주기적 측면에서는 비용 절약이 가능하고, 해체와 재건축 횟수를 줄임으로써 온실가스과 건설폐기물 양도 절감할 수 있어 다수의 전문가들이 긍정적인 평가를 하였다.

[표 4-4] '지속가능 건설' 관련 저감요소에 대한 주요 의견

구분	적용 가능성	주요 의견
2. 자재 재활용률 확대	높음	- 자원순환적 관점에서 폐기물 건설자재화 필요
	낮음	- 재건축 단계에서 입주민들의 반발 고려 필요
3. 탄소배출 저감형 건설자재 사용	높음	- 순환 골재 품질관리 필요
	낮음	- 비용 절감 입증 필요; 입주민 수용 어려움; 감리 필요성;
4. 프리패브리케이션	높음	- 친환경 시멘트 등 자재 개선 가능
	낮음	- 비용적 측면에서의 해결 필요

출처 : 연구진 작성

□ 운영 단계

• 신재생에너지

재건축 과정에서 신재생에너지 저감요소의 적용 가능성을 높이는 요인으로서는 기술의 현실성과 높은 효율성, 장기적인 비용 절감효과 등이, 적용 가능성을 낮추는 요인으로서는 초기의 높은 투자비용과 입지 부족 문제, 지리적 한정성, 입주민 수용의 어려움 등이 논의되었다.

여러 요인들을 종합해보았을 때 재건축 과정에서 가장 적용 가능성이 높게 나타난 신재생 에너지 저감요소는 ‘태양광 발전’이다. 대부분의 전문가들은 태양광 발전의 필요성에 공감하며 확대가 필요하다는 의견을 제시하였다. 태양광을 포함한 신재생에너지의 적용 및 확대에 있어 가장 큰 어려움은 비용적, 기술적 측면이었으며 적극적인 도입을 위해서는 이러한 문제들에 대한 해결이 선행될 필요가 있을 것으로 보인다.

기타 풍력, 수력, 친환경 수소 발전 등은 입지 문제가 일차적으로 고려되어야하기 때문에 노후계획도시 재건축 단지에는 적합하지 않을 수 있다는 의견도 다수 제기되었다.

[표 4-5] ‘신재생에너지’ 관련 저감요소에 대한 주요 의견

구분	적용 가능성	주요 의견
5. 태양광 발전	높음	- 가장 현실적인 대안이나 건설 이후 운영 주체의 관리 고민 필요 - 초기 설치비용 높으나 장기적으로 비용 절감 효과 높음
	낮음	- 중저밀도 주거단지 위주로 배치 가능
6. 태양열 발전	높음	- 적용 가능하나 건설 이후 운영 주체의 관리 고민 필요 - 난방 에너지 절감에 효과적이며 설치와 유지보수가 비교적 간편
	낮음	- 여타 에너지원과 경제성/경쟁성 떨어짐 - 규모화가 어려움; 중저밀도 주거단지 위주로 배치 가능
7. 풍력 발전	낮음	- 건설사의 판매 및 주민 수용성 입장에서 적용 어려움 - 진동, 소음 문제; 입지 부족 가능성; 지리적 기상학적 한정성
8. 수력 발전	낮음	- 실제 사업성이 가능한 입지 부족 가능성; 대상지의 지리적 한정성
9. 지열에너지 활용	높음	- 냉난방공조/지열히트펌프 함께 할 시 효율 좋음
	낮음	- 투자비용 대비 에너지 생산량 한계
10. 바이오에너지 활용	높음	- 실용성은 높으나 설치 어려움
	낮음	- 입주민 수용 어려움; 투자비용 대비 에너지 생산량 한계
11. 친환경 수소 발전	높음	- 높은 효율성과 낮은 환경 영향으로 미래 에너지로서 큰 잠재력
	낮음	- 큰 투자비용, 중장기적 대안 - 안전성 및 경제성 측면에서 우려

출처 : 연구진 작성

- 에너지 효율 건축물

에너지 효율 건축물과 관련해서는 12개 저감요소의 적용 가능성이 모두 높다고 평가되었다. 특히, 패시브·액티브 기술 요소는 현재의 에너지 효율 기술 수준을 고려했을 때 상당한 수준으로 적용이 용이하다는 의견이 많았다. 해당 저감요소의 도입은 재건축 과정에서 반드시 필요하다는 의견이 대부분이었다.

[표 4-6] '에너지 효율 건축물' 관련 저감요소에 대한 주요 의견

구분	적용 가능성	주요 의견
패시브 기술 (12~17)	높음	- 반드시 필요한 요소로서 모든 유형의 주택에 적용 필요하며, 강제/규제방안 필요
액티브 기술 (18~21)	높음	- 초기 설치비용이 높아 정부 정책 지원 필요
22. 일조, 풍향 고려 건축물 배치	높음	- 계획 및 설계 단계 적용 가능
	낮음	- 고층 주거에는 한계가 있음 - 현행 단지설계 시 반영되는 내용으로 정책화 필요성 낮음
23. 에너지 효율 향상 시스템	높음	- 단지 및 근린생활권 별로 적용하도록 유도 필요 - 탄소중립 에너지기술 로드맵 연계

출처 : 연구진 작성

- 기후변화 적응 및 흡수원 확대

다수의 전문가들이 건축물 녹화, 단지 내 녹색공간 등의 확보와 같은 요소들이 비교적 수용성이 높다는 의견을 제시하였다. 다만, 흡수원과 신재생에너지 공급 시설과 같이 단지 내 최적 입지가 겹치는 경우도 많기 때문에 탄소감축의 측면에서 신재생에너지 공급 시설에 우선순위가 밀릴 가능성이 있음을 우려하였다. 녹색공간과 관련해서는 수공간 확대에 대한 의견도 많았으며 관련 기준을 마련해 의무화할 필요가 있다는 의견이 제시되었다. 기존의 자연 녹지(원형지) 보전, 도시 숲이나 정원 조성의 필요성 등도 함께 언급되었다.

[표 4-7] '기후변화 적응 및 흡수원 확대' 관련 저감요소에 대한 주요 의견

구분	적용 가능성	주요 의견
24. 옥상녹화 및 벽면녹화	높음	- 도심의 온도상승 저하 효과 기대 가능 - 지원 사업 활성화 필요
	낮음	- 운영관리 주체 논의 어려움; 유지관리 어려움 - 큰 비용 문제; 탄소배출 저감효과가 미미한 수준
25. 녹색공간 및 녹색기반시설	높음	- 수공간 확대, 단지와 도시 차원 녹지체계 반영 필요
	낮음	- 비용 문제; 적정 토지 확보 필요

구분	적용 가능성	주요 의견
26. 도시농장(농업)	높음	- 옥상농장, 수경재배, 공간대여 등을 통한 수익창출 가능
	낮음	- 운영관리 주체 논의 어려움; 입지 선정 어려움 - 비용 문제; 탄소배출 저감효과 낮음
27. 빗물관리 인프라	높음	- 기 운영되고 있는 시설인 만큼 적용 가능성 높음 - 물 순환 시스템 통합 필요
	낮음	- 비용 문제

출처 : 연구진 작성

• 친환경 교통

친환경 교통수단의 경우, 대상지 범위로 노후계획도시 구역을 벗어난 행정구역 및 광역 단위가 고려되어야하기 때문에 단지 단위에서의 사업 추진이 어려울 수 있다는 의견이 다수 제기되었다.

[표 4-8] '친환경 교통' 관련 저감요소에 대한 주요 의견

구분	적용 가능성	주요 의견
28. 친환경 교통수단 도입	높음	- 향후 전기차 충전 수요를 고려한 관련 인프라 설치 필요
	낮음	- 아파트 단지 재건축과 교통수단 도입은 별개의 문제이므로 깊이 논의 하지 않음

출처 : 연구진 작성

3) 최종 도출 결과

해체 및 건설 단계에서의 저감요소는 운영 단계에 비해 상대적으로 적용 가능성이 낮게 나타났으며, 운영 단계에서도 저감요소에 따라 비용적, 기술적, 지리학적 측면 등의 관점에서 적용 가능성이 다르게 나타났다. 전문가의 의견과 실제 재건축 과정에서의 적용 현실성 등을 종합적으로 검토하여 [표 4-9]와 같이 저감요소를 최종적으로 도출하였다. 해체 단계에서는 1개 부문 1개 요소, 건설 단계에서는 1개 부문 3개 요소, 운영 단계에서 3개 부문 19개 요소로, 총 5개 부문 23개 요소로 구성되었다.

[표 4-9] 적용 가능 저감요소 최종 도출 결과(5개 부문, 23개 요소)

생애주기	부문	저감요소
해체 단계	자원순환 특화	1 폐기물 저감
		2 자재 재활용률 확대
건설 단계	지속가능 건설	3 탄소배출 저감형 건설자재 사용
		4 프리패브리케이션(prefabrication)
		5 태양광 발전
	신재생에너지	6 지열에너지 활용
		7 바이오에너지 활용
		8 고성능 창호
		9 고기밀 시공
운영 단계	패시브	10 외단열 시공
		11 외부차양
		12 자연채광
		13 자연환기
	에너지 효율 건축물	14 고효율 보일러
		15 고효율 가전제품
		16 고효율 LED 조명
		17 열회수형 환기장치
	기후변화 적응 및 흡수원 확대	18 일조, 풍향 고려 건축물 배치
		19 에너지 효율 향상 시스템
		20 옥상녹화 및 벽면녹화
		21 녹색공간 및 녹색기반시설
		22 도시농장(농업)
		23 빗물관리 인프라

출처 : 연구진 작성

2. 탄소 배출 감축 패키지 제시 및 감축 비율 산출

1) 탄소 배출 감축 패키지 제시

탄소 배출 감축 패키지는 재건축 단계에서의 적용가능성 및 적용의 용이성 등을 고려하고 생애주기를 반영하여 ①핵심, ②확장, ③종합의 3단계로 나누어 제시하였다. 제로에너지 건축물은 생애 주기 중 운영 단계에 해당되며 전문가 FGI 결과 또한 운영 단계 저감 요소들의 적용 가능성이 가장 높게 나타났으므로, 핵심 패키지와 확장 패키지는 운영 단계만으로 구성하고 해체 단계와 건설 단계는 종합 패키지에 포함하였다.

□ 핵심 패키지

‘핵심 패키지’는 최종적으로 도출된 저감요소 중 가장 적용 가능성이 높은 것만을 포함하여 꼭 적용할 것을 권장하는 패키지로, 운영 단계 저감요소의 일부만으로 구성되어 있다. 에너지 효율 건축물 부문은 패시브 하우스 기술 전부와 함께 액티브 기술 중 고효율 LED 조명, 그 외 일조, 풍향 고려 건축물 배치, 에너지 효율 향상 시스템까지 포함하며, 신재생에너지 부문은 태양광 발전이 포함되어 있다. 핵심 패키지의 중심이 되는 패시브 기술은 주로 난방 에너지와 관련되어 있으므로, 난방 에너지 소요량을 줄이는 데에 가장 효과적인 패키지라고 볼 수 있다.

□ 확장 패키지

‘확장 패키지’는 적용 가능성이 높지만 공공차원의 지원 및 규제 등 정책화가 필요하거나 비용이 높은 요소를 핵심 패키지에 추가한 패키지로, 에너지 효율 건축물 부문의 액티브 기술, 기후변화 적응 및 흡수원 부문의 녹색공간 및 녹색기반시설이 추가되어 운영 단계의 저감요소만을 포함하고 있다. 액티브 기술은 난방 에너지와 전기 에너지 모두를 저감하는 기술들로, 난방에너지 소요량을 더 많이 저감하는 동시에 전기에너지 소요량도 줄이는 패키지라고 볼 수 있다.

□ 종합 패키지

‘종합 패키지’는 에너지 소비량 절감의 최대 효과를 달성할 수 있는 요소들을 모두 포함한 패키지로, 지원·규제 등 정책화, 적극적인 공공 차원 개입, 입주민의 에너지 소비 절감에 대한 공감대 형성 등이 필요하며 아파트 단지에 국한되는 것이 아니라 지역 차원에서 적용할 시 더 큰 효과를 달성할 수 있는 요소들로 구성되어 있다. 운영 단계의 모든 저감

요소와 함께 해체 단계의 폐기물 저감, 건설 단계의 자재 재활용률 확대, 탄소 배출 저감형 건설자재 사용까지 생애주기 전체에 걸친 저감 요소를 종합적으로 포함하며, 신재생 에너지 부문에서도 태양광 발전 뿐만 아니라 지열에너지, 바이오에너지까지를 모두 포함한다.

2) 탄소 배출 감축 패키지별 감축 비율 산출

운영 단계의 감축 비율은 각 패키지를 구성하는 요소들에 대한 전기, 가스, 난방 에너지 원 별 감축률을 계산하고 합산하여 산출하였다. 해체와 건설 단계의 감축률은 별도 산정 후 이산화탄소 배출량으로 합산하였다. 요소별 감축 비율은 선행연구와 통계 자료를 이용하여 설정하였다.

신재생 에너지 부문의 경우 기존에는 에너지효율등급과 별도로 운영되었으나 2025년 1월부터 에너지효율등급과 제로에너지건축물 등급이 통합되어 운영되게 되었다. 공동주택 재건축 시 ZEB 5단계는 필수적으로 달성해야 하는 조건이므로, 본 연구에서는 ZEB 5단계 조건인 에너지 자립률 20%를 달성하는 것을 가정하여 에너지 생산량 20%를 전기 에너지 소요량에서 제외하여 산출하였다.

[표 4-10] 탄소 배출량 감축 패키지 별 적용 에너지 소비량 및 이산화탄소 배출량 감축 비율

구분	저감요소	탄소 배출량 감축 패키지			적용 에너지 소비량 및 이산화탄소 배출량 감축 비율
		핵심	확장	종합	
자원순환 특화	1 폐기물 저감			○	건설 폐기물 재활용 비율 100% 적용 (환경부, 실제 98.9% 재활용, 0.8% 매립)
	2 자재 재활용률 확대			○	자재 재활용 비율 25% 적용(최대 인센티브) 재활용 건축자재 활용기준 제4조(건축기준의 완화) 및 서울시 녹색건축물 설계기준 개정 예고안 의견서 참조
지속가능 건설	3 탄소배출 저감형 건설자재 사용			○	아파트 1채 당 콘크리트 200m ³ 소요되는 것으로 가정 후 친환경 콘크리트 1 m ³ 당 CO ₂ 79 kg 저감 비율 적용 산출
	4 프리패브리케이션 (prefabrication)				노후 도시 재건축에 적용 어려움
신재생 에너지	5 태양광 발전	○	○	○	에너지 자립률 20% 달성 가정 (전기 에너지 요구량에서 감축하는 것으로 반영)
	6 지열에너지 활용			○	
	7 바이오에너지 활용			○	

구분	저감요소	탄소 배출량 감축 패키지			적용 에너지 소비량 및 이산화탄소 배출량 감축 비율
		핵심	확장	종합	
에너지 효율 건축물	8	고성능 창호	○	○	○ 난방 에너지 요구량 37.92% 절감
	9	고기밀 시공	○	○	○ 난방 에너지 요구량 5.49% 절감
	10	패 시 브	외단열 시공	○	○ 난방 에너지 요구량 4.42% 절감
	11		외부차양	○	○ 연간 에너지 요구량 7.08% 절감
	12	자연채광	○	○	○ -
	13	자연환기	○	○	○ -
	14	고효율 보일러		○	○ 지역난방 시 난방 에너지 8% 절감
	15	액 티 브	고효율 가전제품		○ 2→1등급 상향 시 전기 에너지 21% 절감
	16		고효율 LED 조명	○	○ -
	17	열회수형 환기장치		○	○ 80% 폐열 회수기 설치 시 난방 에너지 요구량 27.87% 절감
	18	일조, 풍향 고려 건축물 배치	○	○	○ 북향 배치 대비 난방 에너지 요구량 4.42% 절감
	19	에너지 효율 향상 시스템	○	○	○ 연간 에너지 배출량 10% 절감
기후변화 적응 및 흡수원 확대	20	옥상녹화 및 벽면녹화		○	○ 녹색지붕, 옥상녹화: 건축면적(옥상면적)의 50%를 옥상녹화로 사용 가정 연간 탄소배출 감소량 9.35kg/㎡
	21	녹색공간 및 녹색기반시설		○	○ 지역단위 시설개발 필요
	22	도시농장(농업)		○	○ 지역단위 시설개발 필요
	23	빗물관리 인프라		○	○ 가구당 연간 75.8㎡ 물 절약, 138.6 kWh 에너지 절감 산출

출처 : 본 보고서 2장 선행연구를 바탕으로 연구진 정리

* 건설 폐기물 재활용 관련: 환경부 전국 폐기물 발생 및 처리 현황 2019년 통계

(https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_99_3300316&conn_path=I2) (검색일: 2024.9.4.)

3. 탄소 배출 감축 패키지 적용 효과 검증

1) 생애주기별 이산화탄소 배출 감축량 추정

□ 운영 단계

- ‘핵심’ 패키지 적용 결과
 - 핵심 패키지 적용 후 분석 대상 분당 아파트 단지의 이산화탄소 배출량은 261.95 kton으로 추산된다.
 - 패키지 적용 전 재건축 운영단계 배출량 558.61 kton의 절반이 넘는 296.66 kton이 감축되는 것으로, 재생에너지 생산량 20%를 제외한 패시브 기술만으로 상당량의 탄소 배출량이 저감되는 것을 알 수 있다.

[표 4-11] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 핵심 패키지 적용 결과(운영 단계)

동/마을	재생에너지 생산량 (gWh)	에너지원 별 이산화탄소 배출량 (kton-CO ₂ /㎡)			
		전기 에너지	가스 에너지	난방 에너지	합계
구미동	35.68	24.38	1.87	17.52	43.77
까치	12.38	8.78	0.64	5.93	15.35
무지개	16.90	12.61	0.80	7.89	21.29
하얀	6.39	3.00	0.43	3.70	7.12
금곡동	15.04	9.68	0.90	7.55	18.13
청솔	15.04	9.68	0.90	7.55	18.13
분당동	13.62	8.97	0.74	6.83	16.53
샛별	8.20	5.78	0.40	3.97	10.15
장안타운	5.43	3.19	0.34	2.86	6.38
서현동	27.41	25.29	1.29	10.48	37.05
시범	18.23	18.07	0.90	6.32	25.29
효자촌	9.18	7.22	0.38	4.16	11.76
수내동	8.86	7.99	0.34	3.55	11.89
양지	2.50	1.97	0.10	1.13	3.20
파크타운	2.38	1.98	0.10	1.03	3.11
푸른	3.98	4.04	0.14	1.39	5.57
야탑동	38.23	24.50	2.29	19.24	46.03
매화	10.02	4.68	0.68	5.78	11.15
목련	8.04	3.31	0.58	4.81	8.71
분당	0.58	0.37	0.02	0.31	0.70

장미	6.24	4.70	0.36	2.82	7.88
탑	13.35	11.43	0.64	5.52	17.59
이매동	30.24	22.31	1.41	14.25	37.96
아름	11.37	9.33	0.49	4.94	14.77
이매촌	18.87	12.98	0.92	9.30	23.19
정자동	39.60	30.95	2.23	17.41	50.59
느티	1.17	0.77	0.04	0.61	1.42
분당	6.70	7.41	0.13	2.18	9.72
상록	6.01	2.92	0.40	3.42	6.75
정든	9.44	6.75	0.46	4.53	11.74
한솔	16.28	13.09	1.20	6.67	20.96
전체 계	208.69	154.06	11.06	96.82	261.95

출처 : 연구진 작성

- ‘확장’ 패키지 적용 결과

- 확장 패키지 적용 후 총 이산화탄소 배출량은 177.69 kton으로 추산되어 핵심패키지 보다 84 kton 이상 감축되는 효과를 나타내는 것으로 나타났다.
- 패시브 기술뿐만 아니라 액티브 기술까지 적용되어 에너지 요구량이 감소하므로 에너지 자립률 20%를 달성하기 위해 필요한 재생에너지 생산량 또한 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 핵심 패키지와 같은 수준의 재생에너지 생산 시설을 확보할 경우에는 더 높은 ZEB 등급에 도달할 수 있다.

[표 4-12] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 확장 패키지 적용 결과(운영 단계)

동/마을	재생에너지 생산량 (gWh)	에너지원 별 이산화탄소 배출량 (kton-CO2/m²)			
		전기 에너지	가스 에너지	난방 에너지	합계
구미동	19.91	23.04	1.87	4.36	29.27
까치	6.98	8.21	0.64	1.48	10.33
무지개	9.62	11.67	0.80	1.96	14.43
하얀	3.31	3.16	0.43	0.92	4.51
금곡동	8.34	9.27	0.90	1.88	12.05
청솔	8.34	9.27	0.90	1.88	12.05
분당동	7.54	8.56	0.74	1.70	10.99
샛별	4.60	5.42	0.40	0.99	6.82
장안타운	2.94	3.13	0.34	0.71	4.18
서현동	16.74	22.22	1.29	2.61	26.12
시범	11.46	15.62	0.90	1.57	18.09

효자촌	5.27	6.60	0.38	1.03	8.02
수내동	5.31	7.08	0.34	0.88	8.31
양지	1.43	1.80	0.10	0.28	2.18
파크타운	1.39	1.79	0.10	0.26	2.15
푸른	2.48	3.49	0.14	0.35	3.98
야탑동	21.16	23.49	2.29	4.79	30.56
매화	5.19	4.94	0.68	1.44	7.06
목련	4.09	3.65	0.58	1.20	5.43
분당	0.31	0.36	0.02	0.08	0.46
장미	3.62	4.32	0.36	0.70	5.38
탑	7.95	10.22	0.64	1.37	12.23
이매동	17.13	20.71	1.41	3.54	25.66
아름	6.64	8.44	0.49	1.23	10.17
이매촌	10.49	12.27	0.92	2.31	15.49
정자동	23.13	28.17	2.23	4.33	34.74
느티	0.63	0.74	0.04	0.15	0.94
분당	4.24	6.34	0.13	0.54	7.00
상록	3.14	3.04	0.40	0.85	4.30
정든	5.31	6.32	0.46	1.13	7.90
한솔	9.81	11.74	1.20	1.66	14.60
전체 계	119.25	142.54	11.06	24.09	177.69

출처 : 연구진 작성

- ‘종합’ 패키지 적용 결과
 - 종합 패키지 적용 후 총 이산화탄소 배출량은 167.68 kton 으로 추산되어 확장 패키지에서 10 kton 가량 추가로 감축 가능할 것으로 산출된다. 패키지 적용 전 재건축 운영단계 배출량의 70% 정도 감축된 양이다.
 - 종합 패키지는 확장 패키지에 흡수원 확대 부문이 추가적으로 포함된 것으로, 에너지 소요량 자체의 감축량은 확장 패키지에서 상대적으로 적게 증가한다.
 - 에너지자립률 20%를 달성하기 위한 재생에너지 생산량이 더욱 감소하고, 재생에너지 생산시설은 태양광발전 외에도 지열에너지, 바이오에너지 까지 활용하여 생산량은 늘어날 것이므로 높은 ZEB 등급 달성이 가능하다.

[표 4-13] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 종합 패키지 적용 결과(운영 단계)

동/마을	재생에너지 생산량 (gWh)	에너지원 별 이산화탄소 배출량 (kton-CO ₂ /㎡)			
		전기 에너지	가스 에너지	난방 에너지	합계
구미동	19.32	21.28	1.87	4.36	27.50
까치	6.78	7.60	0.64	1.48	9.72
무지개	9.37	10.98	0.80	1.96	13.73
하얀	3.17	2.71	0.43	0.92	4.05
금곡동	8.05	8.55	0.90	1.88	11.33
청솔	8.05	8.55	0.90	1.88	11.33
분당동	7.35	7.97	0.74	1.70	10.41
샛별	4.48	5.09	0.40	0.99	6.48
장안타운	2.87	2.88	0.34	0.71	3.93
서현동	16.29	20.79	1.29	2.61	24.68
시범	11.15	14.59	0.90	1.57	17.07
효자촌	5.14	6.20	0.38	1.03	7.62
수내동	5.18	6.68	0.34	0.88	7.91
양지	1.40	1.71	0.10	0.28	2.09
파크타운	1.37	1.70	0.10	0.26	2.06
푸른	2.41	3.27	0.14	0.35	3.76
야탑동	20.45	21.40	2.29	4.79	28.48
매화	4.98	4.34	0.68	1.44	6.46
목련	3.91	3.13	0.58	1.20	4.91
분당	0.31	0.34	0.02	0.08	0.44
장미	3.50	4.01	0.36	0.70	5.07
탑	7.74	9.58	0.64	1.37	11.59
이매동	16.71	19.47	1.41	3.54	24.42
아름	6.48	7.96	0.49	1.23	9.68
이매촌	10.23	11.51	0.92	2.31	14.74
정자동	22.48	26.39	2.23	4.33	32.95
느티	0.62	0.66	0.04	0.15	0.85
분당	4.20	6.12	0.13	0.54	6.79
상록	3.02	2.74	0.40	0.85	3.99
정든	5.17	5.92	0.46	1.13	7.51
한솔	9.47	10.94	1.20	1.66	13.80
전체 계	115.84	132.53	11.06	24.09	167.68

출처 : 연구진 작성

□ 해체 단계

환경부 전국 폐기물 발생 및 처리 현황의 최신 통계(2019년 기준)에 따르면 건설폐기물 재활용 비율은 98.9%에 육박하고, 0.8%만 매립되는 것으로 나타난다.

[표 4-14] 해체 단계 이산화탄소 배출 감축량 추정

생애주기	저감요소	감축 비율	적용 전 배출량	적용 후 배출량
해체 단계	폐기물 저감	건설 폐기물 재활용 비율 100% 적용*	206.54 kton	0 kton

출처 : 연구진 작성

* 환경부 전국 폐기물 발생 및 처리 현황의 최신 통계(2019년 기준) 참고

따라서 본 연구에서는 해체 시 발생하는 이산화탄소는 건설 폐기물 100% 재활용을 통해 감축 효과가 있는 것으로 간주하고, 이에 따라 앞서 산출한 206.54 kton의 이산화탄소 배출량이 모두 감축되는 것으로 추산하였다.

□ 건설 단계

현재 대상지의 구체적인 건설계획이 없는 상황에서 감축량을 산정하기에는 고려해야 할 변수가 너무 많다. 따라서 본 연구에서는 재활용 건축자재 활용기준 제4조(건축기준의 완화) 및 서울시 녹색건축물 설계기준 개정 예고안 의견서를 기준으로 하여, 재활용 건설자재 사용 시 최대치의 인센티브를 적용할 수 있는 재활용 비율 25% 달성을 가정하여 저감량을 개략적으로 산출하였다. 그 결과, 앞서 산출한 6,570.33 kton의 건설 단계 이산화탄소 배출량의 25%인 1,642.58 kton의 감축효과가 있는 것으로 추산될 수 있다. 건설 단계의 감축량은 종합 패키지에 포함하였다.

[표 4-15] 건설 단계 이산화탄소 배출 감축량 추정

생애주기	저감요소	감축 비율	적용 전 배출량	적용 후 배출량
건설단계	자재 재활용률 확대	재활용 비율 25% 달성*	6570.33 kton	4927.75 kton

출처 : 연구진 작성

* 재활용 건축자재 활용기준 제4조(건축기준의 완화)의 최대 인센티브 확보를 위한 자재 재활용 비율

□ 탄소 배출 저감 패키지의 효과 종합

용적률 150% 상향을 가정한 재건축 후에는 건축물 규모(용적률, 층수, 세대 수, 연면적 등) 증가로 인해 이산화탄소 배출량이 558.6 kton까지 크게 증가하는 것으로 나타났다. 반면 본 연구의 탄소 배출 저감 패키지를 적용했을 때에는 가장 낮은 단계인 '핵심' 패키지만 적용하더라도 이산화탄소 배출량을 줄이는 데에 큰 효과가 있는 것을 알 수 있다. 또한 '핵심' 패키지 적용 시 이산화탄소 배출량이 261.9 kton 정도로 재건축 전 배출량보다 크게 감소 될 수 있으며, '확장' 패키지는 177.7 kton, '종합' 패키지는 167.7 kton까지 감축할 수 있을 것으로 추산된다.

'종합' 패키지에는 해체 및 건설 단계도 포함되는데, 재활용 등 이산화탄소 배출량 감축 비용을 적용할 경우 해체 단계에서는 206.54 kton, 건설 단계에서는 1,642.58 kton이 저감되어 최종적으로 4,927.75 kton이 발생될 것으로 추산된다.

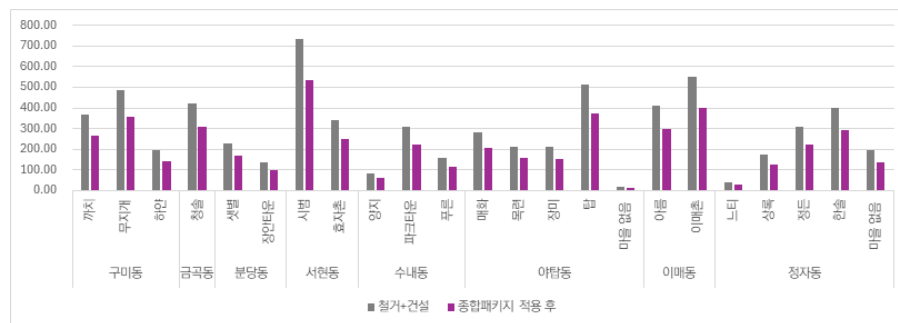
[표 4-16] 건축물 생애주기별 탄소 감축 패키지 적용 시 이산화탄소 배출량 종합비교

(단위: kton-CO₂/㎡)

동/마을	해체, 건설 단계		운영 단계				
	해체+건설 배출량	종합 패키지	재건축 전 (2023년)	재건축 후 (FAR +150)	핵심 패키지	확장 패키지	종합 패키지
구미동	1,048.00	763.52	49.10	95.55	43.77	29.27	27.50
까치	365.80	266.60	17.39	33.17	15.35	10.33	9.72
무지개	488.10	354.92	23.44	45.40	21.29	14.43	13.73
하얀	194.11	142.01	8.27	16.99	7.12	4.51	4.05
금곡동	423.69	308.27	21.66	40.12	18.13	12.05	11.33
청솔	423.69	308.27	21.66	40.12	18.13	12.05	11.33
분당동	366.24	266.86	22.44	36.45	16.53	10.99	10.41
샛별	230.58	167.72	12.29	21.99	10.15	6.82	6.48
장안타운	135.67	99.14	10.14	14.46	6.38	4.18	3.93
서현동	1,075.49	781.81	47.85	73.61	37.05	26.12	24.68
시범	733.36	532.84	34.10	48.89	25.29	18.09	17.07
효자촌	342.14	248.98	13.75	24.72	11.76	8.02	7.62
수내동	552.03	400.85	21.02	23.90	11.89	8.31	7.91
양지	83.99	60.95	4.17	6.73	3.20	2.18	2.09
파크타운	309.36	224.50	4.35	6.42	3.11	2.15	2.06
푸른	158.69	115.42	12.50	10.75	5.57	3.98	3.76
야탑동	1,236.23	899.76	60.34	101.95	46.03	30.56	28.48
매화	284.55	207.86	13.10	26.59	11.15	7.06	6.46

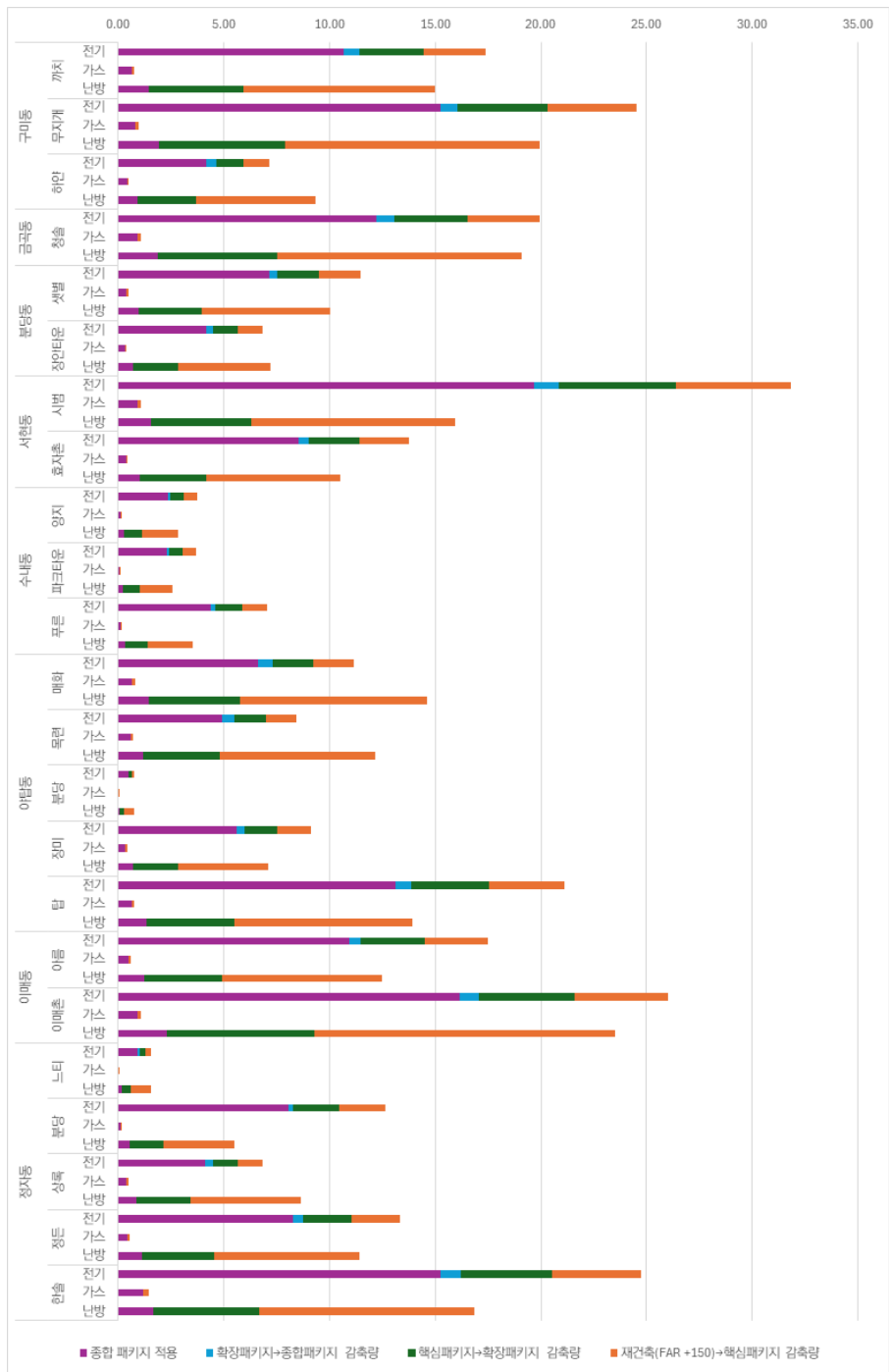
목련	213.27	155.83	10.56	21.28	8.71	5.43	4.91
분당	210.18	152.54	0.73	1.58	0.70	0.46	0.44
장미	512.54	372.17	14.58	16.67	7.88	5.38	5.07
탑	15.70	11.39	21.37	35.84	17.59	12.23	11.59
이매동	962.64	699.29	46.08	81.23	37.96	25.66	24.42
아름	410.45	298.16	18.00	30.60	14.77	10.17	9.68
이매촌	552.20	401.14	28.08	50.63	23.19	15.49	14.74
정자동	1,112.53	807.38	66.11	105.80	50.59	34.74	32.95
느티	38.28	28.11	1.18	3.17	1.42	0.94	0.85
분당	172.49	125.27	14.30	18.28	9.72	7.00	6.79
상록	307.98	223.81	13.56	15.96	6.75	4.30	3.99
정든	399.61	291.10	13.61	25.34	11.74	7.90	7.51
한솔	194.17	139.09	23.46	43.05	20.96	14.60	13.80
전체 계	6,776.87	4927.75	334.60	558.61	261.95	177.69	167.68

출처 : 연구진 작성



[그림 4-1] 분당 마을별 해체, 건설 단계 탄소 감축 종합 패키지 적용 시 이산화탄소 배출량 (단위: kton-CO2/m²)

출처: 연구진 작성



[그림 4-2] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 운영 단계 이산화탄소 배출 감축량 (단위: kton-CO₂/m²)
출처: 연구진 작성

2) 에너지원별 탄소 배출 감축 효과

□ 전기에너지

전기에너지의 경우 ‘핵심’패키지를 적용했을 때와 ‘확장’패키지를 적용했을 때 이산화탄소 배출량이 크게 감축되었다. 전기에너지의 주요 탄소 배출 저감요소는 패시브 기술의 ‘외부차양’, 액티브 기술의 ‘고효율 가전제품’, ‘에너지 효율 향상 시스템’의 3가지로, 이 중 ‘외부차양’과 ‘에너지 효율 향상 시스템’은 전기 에너지 단일 저감이 아니라 연간 에너지 요구량 저감으로 추산되었다. 전기에너지에서의 탄소 배출 감축 결과는 재생에너지 생산량을 전기에너지 소요량에서 제외한 것이 주요한 요인이다.

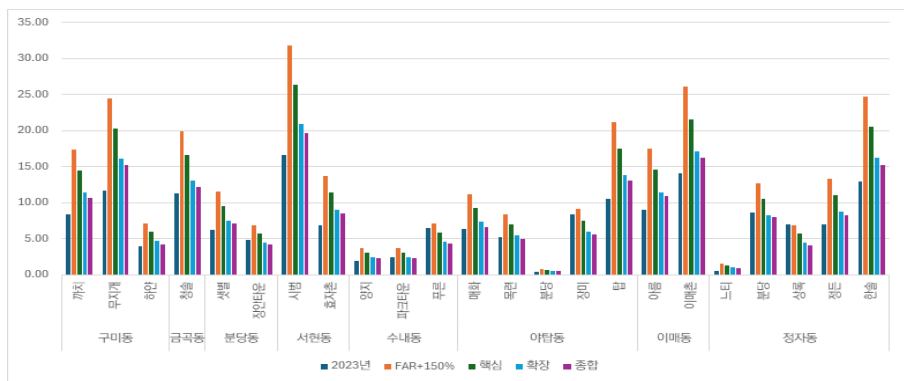
[표 4-17] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 패키지 적용 시 전기에너지 이산화탄소 배출량

(단위: kton-CO₂/㎡)

동/마을	재건축 전 (2023년)	재건축 후 (FAR +150)	탄소 감축 패키지 적용		
			핵심	확장	종합
구미동	24.06	49.06	40.68	32.14	30.10
까치	8.43	17.40	14.43	11.40	10.69
무지개	11.67	24.52	20.33	16.06	15.25
하얀	3.97	7.14	5.92	4.67	4.16
금곡동	11.28	19.96	16.55	13.07	12.22
청솔	11.28	19.96	16.55	13.07	12.22
분당동	11.00	18.32	15.19	12.00	11.32
샛별	6.22	11.49	9.52	7.52	7.13
장안타운	4.78	6.83	5.66	4.47	4.19
서현동	23.44	45.59	37.81	29.87	28.23
시범	16.56	31.84	26.40	20.86	19.68
효자촌	6.87	13.76	11.41	9.01	8.55
수내동	10.85	14.51	12.04	9.51	9.05
양지	1.88	3.75	3.11	2.46	2.35
파크타운	2.49	3.71	3.07	2.43	2.33
푸른	6.48	7.06	5.85	4.62	4.37
야탑동	30.98	50.61	41.96	33.15	30.74
매화	6.37	11.16	9.25	7.31	6.61
목련	5.25	8.42	6.98	5.52	4.92
분당	0.40	0.77	0.64	0.50	0.48
장미	8.36	9.11	7.56	5.97	5.61

탑	10.60	21.14	17.53	13.85	13.12
이매동	23.12	43.55	36.12	28.53	27.10
아름	9.06	17.52	14.52	11.47	10.92
이매촌	14.06	26.04	21.59	17.06	16.18
정자동	36.03	59.14	49.04	38.74	36.66
느티	0.51	1.57	1.30	1.03	0.94
분당	8.65	12.63	10.47	8.28	8.04
상록	6.97	6.83	5.67	4.48	4.12
정든	7.01	13.35	11.07	8.74	8.28
한솔	12.88	24.75	20.53	16.22	15.27
전체 계	170.77	300.74	249.37	197.00	185.43

출처 : 연구진 작성



[그림 4-3] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 전기에너지 이산화탄소 배출량 (단위: kton-CO2/m²)

출처: 연구진 작성

□ 가스에너지

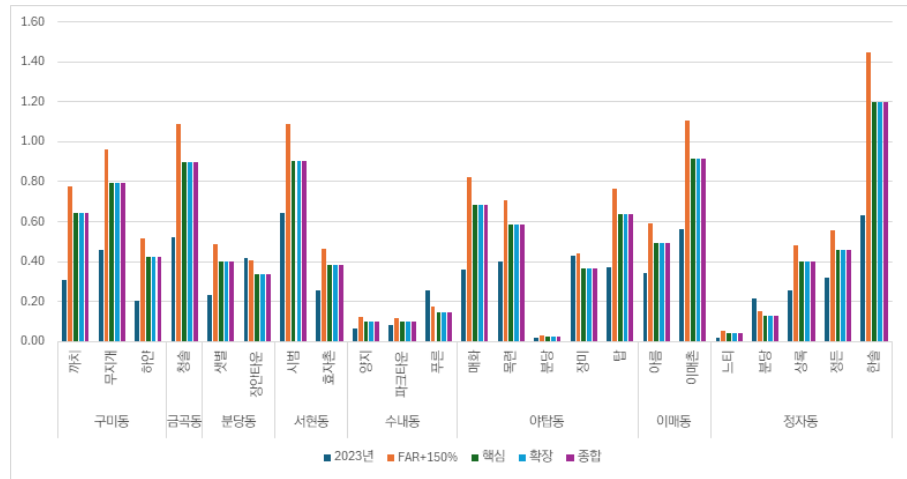
가스에너지는 취사에 사용되는 에너지로, 에너지의 절대량 자체가 적어 이산화탄소 배출량도 적다. 가스에너지 저감 요소는 연간 에너지 요구량을 절감하는 패시브 기술의 ‘외부차양’과 ‘에너지 효율 향상 시스템’이며, ‘핵심’ 패키지에서 이 요소들이 적용된 후 추가되는 저감 요소가 없어 모든 패키지의 감축량이 동일하게 유지된다.

[표 4-18] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 패키지 적용 시 가스에너지 이산화탄소 배출량

(단위: kton-CO₂/㎡)

동/마을	재건축 전 (2023년)	재건축 후 (FAR +150)	탄소 감축 패키지 적용		
			핵심	확장	종합
구미동	0.97	2.25	1.87	1.87	1.87
까치	0.31	0.78	0.64	0.64	0.64
무지개	0.46	0.96	0.80	0.80	0.80
하얀	0.20	0.51	0.43	0.43	0.43
금곡동	0.52	1.09	0.90	0.90	0.90
청솔	0.52	1.09	0.90	0.90	0.90
분당동	0.66	0.89	0.74	0.74	0.74
샛별	0.24	0.49	0.40	0.40	0.40
장안타운	0.42	0.40	0.34	0.34	0.34
서현동	0.90	1.55	1.29	1.29	1.29
시범	0.65	1.09	0.90	0.90	0.90
효자촌	0.26	0.46	0.38	0.38	0.38
수내동	0.40	0.42	0.34	0.34	0.34
양지	0.06	0.12	0.10	0.10	0.10
파크타운	0.08	0.12	0.10	0.10	0.10
푸른	0.26	0.17	0.14	0.14	0.14
야탑동	1.58	2.76	2.29	2.29	2.29
매화	0.36	0.82	0.68	0.68	0.68
목련	0.40	0.70	0.58	0.58	0.58
분당	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
장미	0.43	0.44	0.36	0.36	0.36
탑	0.37	0.77	0.64	0.64	0.64
이매동	0.90	1.70	1.41	1.41	1.41
아름	0.34	0.59	0.49	0.49	0.49
이매촌	0.56	1.10	0.92	0.92	0.92
정자동	1.43	2.69	2.23	2.23	2.23
느티	0.02	0.05	0.04	0.04	0.04
분당	0.21	0.15	0.13	0.13	0.13
상록	0.26	0.48	0.40	0.40	0.40
정든	0.32	0.55	0.46	0.46	0.46
한솔	0.63	1.45	1.20	1.20	1.20
전체 계	7.37	13.34	11.06	11.06	11.06

출처 : 연구진 작성



[그림 4-4] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 가스에너지 이산화탄소 배출량 (단위: kton-CO₂/m²)
출처: 연구진 작성

□ 난방에너지

난방에너지는 에너지 효율 건축물 부문의 탄소배출 저감요소 거의 대부분에서 감축률을 추산할 수 있는 에너지원이다. 패시브 기술 중심의 ‘핵심’ 패키지 적용 시 60% 이상의 탄소 배출량이 감축되며, 액티브 기술이 추가된 ‘확장’ 패키지 적용 시 핵심 패키지의 감축된 값에서 다시 70% 이상 감축되는 것으로 나타났다.

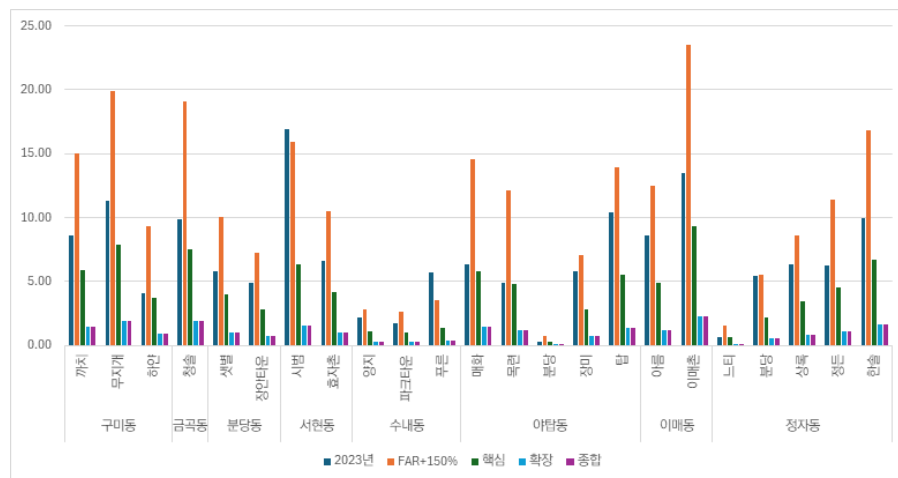
[표 4-19] 분당 마을별 재건축 후 탄소 감축 패키지 적용 시 난방에너지 이산화탄소 배출량

(단위: kton-CO₂/m²)

동/마을	재건축 전 (2023년)	재건축 후 (FAR +150)	탄소 감축 패키지 적용		
			핵심	확장	종합
구미동	24.07	44.25	17.52	4.36	4.36
까치	8.65	14.99	5.93	1.48	1.48
무지개	11.31	19.92	7.89	1.96	1.96
하얀	4.11	9.34	3.70	0.92	0.92
금곡동	9.86	19.07	7.55	1.88	1.88
청솔	9.86	19.07	7.55	1.88	1.88
분당동	10.78	17.24	6.83	1.70	1.70
샛별	5.84	10.02	3.97	0.99	0.99
장안타운	4.94	7.22	2.86	0.71	0.71
서현동	23.51	26.46	10.48	2.61	2.61
시범	16.89	15.96	6.32	1.57	1.57

효자촌	6.62	10.50	4.16	1.03	1.03
수내동	9.77	8.97	3.55	0.88	0.88
양지	2.23	2.86	1.13	0.28	0.28
파크타운	1.78	2.60	1.03	0.26	0.26
푸른	5.76	3.51	1.39	0.35	0.35
야탑동	27.77	48.58	19.24	4.79	4.79
매화	6.37	14.60	5.78	1.44	1.44
목련	4.91	12.15	4.81	1.20	1.20
분당	0.31	0.78	0.31	0.08	0.08
장미	5.78	7.11	2.82	0.70	0.70
탑	10.40	13.93	5.52	1.37	1.37
이매동	22.06	35.98	14.25	3.54	3.54
아름	8.60	12.49	4.94	1.23	1.23
이매촌	13.46	23.49	9.30	2.31	2.31
정자동	28.65	43.98	17.41	4.33	4.33
느티	0.65	1.54	0.61	0.15	0.15
분당	5.44	5.49	2.18	0.54	0.54
상록	6.33	8.65	3.42	0.85	0.85
정든	6.28	11.44	4.53	1.13	1.13
한솔	9.95	16.85	6.67	1.66	1.66
전체 계	156.46	244.54	96.82	24.09	24.09

출처 : 연구진 작성



[그림 4-5] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 난방에너지 이산화탄소 배출량 (단위: kton-CO2/m²)

출처: 연구진 작성

3) 패키지 적용 시 단지별 ZEB 등급

기존 ZEB 인증제에 따르면 주거용 건축물이 5등급을 받기 위해서는 에너지 효율등급 1++ 등급, 즉 단위면적당 연간 총 에너지 소비량 $90 \text{ kWh/m}^2\text{yr}$ 미만 기준을 충족하고 에너지 자립률 20%를 달성해야 했다. 2025년 1월 1일부터 적용되는 통합 제로에너지건축물 인증제도에서는 등급용 1차 에너지 소요량과 에너지 자립률 중 한 가지만을 선택하여 평가를 받을 수 있게 변경되었으며, 이에 따라 재생에너지를 활용하여 자립률을 높이는 것과 에너지 소요량을 줄이는 것의 두 가지 접근이 가능하게 되었다.

본 연구의 탄소 감축 패키지는 재생 에너지 생산을 통한 에너지 자립률 20%를 가정함으로써 패키지 적용 시 통합 인증제도의 ZEB 5단계 기준을 이미 충족하였고, 전기에너지 소요량에 재생에너지 생산량이 반영되어 있다. 따라서 패키지 적용 시 각 아파트 단지의 여건에 따라 산정되는 1차 에너지 소요량을 통합 인증제에 적용할 경우 획득할 수 있는 ZEB 등급이 달라질 수 있다. 재건축 전과 후, 가장 기본적인 ‘핵심’ 패키지를 적용했을 때 획득할 수 있는 ZEB 등급을 비교하여 탄소 감축 패키지의 효과를 검증하였다.

[표 4-20] 통합 ZEB 인증제도 평가 기준(안)

등급	에너지 자립률	등급용 1차 에너지 소요량		건축물 에너지 관리 시스템	비고
		주거용	비주거용		
ZEB Plus	120% 이상	-10 미만	-70 미만	설치유무	인증 신청시 에너지 자립률 또는 등급용 1차 에너지 소요량 중 택1 가능
ZEB1	100% 이상	-10 이상 10 미만	-70 이상 -30 미만		
ZEB2	80% 이상	10 이상 30 미만	-30 이상 10 미만		
ZEB3	60% 이상	30 이상 50 미만	10 이상 50 미만		
ZEB4	40% 이상	50 이상 70 미만	50 이상 90 미만		
ZEB5	20% 이상	70 이상 90 미만	90 이상 130 미만		

출처 : 국토교통부·산업통상자원부, (2024). p.12

재건축 이전의 단위면적 당 에너지 소비량을 살펴보면, $73.12 \text{ kWh/m}^2\text{yr}$ 로 ZEB 5등급 기준을 충족하는 야탑동 탑마을의 3단지 타워빌을 제외하고 모든 단지가 ZEB 등급 기준을 충족하지 못한다. 재건축 후에는 기존에 5등급 기준을 충족했던 야탑동 탑마을 3단지 타워빌과 함께 서현동 시범단지의 삼성한신, 한양, 현대아파트와 수내동 푸른마을 벽산 쌍용신성아파트의 6곳이 ZEB 5등급 기준을 달성하였다. 그 외 단지들은 모두 ZEB 등급 기준을 충족하지 못하는 것으로 나타났다.

탄소 감축 ‘핵심’ 패키지를 적용했을 시에는 분당 아파트 단지 전체가 ZEB 5등급 기준보다 낮은 단위면적당 에너지 소비량을 보여 요건을 충족하는데, 총 26개의 단지가 4등급 기준을, 1개의 단지가 3등급으로 나타났다. 추정 결과, 핵심패키지 적용만으로 1차 에너지 소요량 측면에서도 전 단지가 ZEB 5등급 기준을 충족할 수 있었으며, 4등급, 3등급까지 달성하는 단지도 있어 핵심패키지의 효과성이 검증되었다고 볼 수 있다.

단, 본 연구에서 사용한 모형은 분당 아파트 단지 전체를 대상으로 구축된 모형으로서 개별 아파트 단지 레벨에서의 추정치는 오차 범위가 클 수 있으므로, 단지별 추정 결과를 규제 기준으로 삼기보다는 노후도시 공동주택 재건축에서 에너지 소비량 감축 요소를 도입했을 시 기대 효과에 대한 근거 정도로 활용하는 것이 적절할 것이다.

[표 4-21] 분당 아파트 단지별 핵심패키지 적용 시 단위면적당 에너지 소비량 및 추정 ZEB 등급

(에너지 소비량 단위: kWh/m²yr)

동/마을/아파트 단지	재건축 전		재건축 후		
	2023년	용적률 150% 증대	핵심 패키지 적용		
	에너지 소비량	에너지 소비량	ZEB 등급	에너지 소비량	ZEB 등급
구미동	134.48	132.50	-	73.68	-
까치	138.68	130.66	-	73.23	-
1단지대우롯데선경	139.02	130.88	등급외	74.36	5등급
3단지신원	115.59	116.19	등급외	67.42	4등급
건영	206.00	167.99	등급외	87.49	5등급
금성백조	216.98	171.89	등급외	87.35	5등급
롯데선경	137.66	126.93	등급외	72.70	5등급
우방,우성	125.55	101.93	등급외	55.23	4등급
주공2단지	144.05	142.96	등급외	79.17	5등급
무지개	128.62	132.82	-	75.08	-
10단지삼성건영	127.70	121.35	등급외	71.28	5등급
11단지금강	148.96	158.98	등급외	85.14	5등급
12단지주공	137.73	139.05	등급외	78.13	5등급
1단지대림	140.34	138.62	등급외	77.00	5등급
2단지LG	124.52	130.24	등급외	73.90	5등급
3단지신한건영	114.31	130.31	등급외	73.88	5등급
5단지청구	143.06	134.29	등급외	75.25	5등급
6단지건영	116.48	126.98	등급외	72.21	5등급
7단지라이프	115.24	128.38	등급외	73.13	5등급
8단지제일	118.85	136.22	등급외	76.78	5등급
9단지동아	119.83	137.68	등급외	77.98	5등급

하얀	143.67	135.16	-	71.00	-
6단지	157.05	130.11	등급외	67.51	4등급
그랜드빌	135.83	144.38	등급외	75.95	5등급
주공5단지	145.68	143.24	등급외	75.32	5등급
화이트빌	121.91	122.14	등급외	65.30	4등급
금곡동	137.49	139.39	-	76.94	-
청솔	137.49	139.39	-	76.94	-
10단지동아	116.42	133.10	등급외	74.81	5등급
1단지계룡	132.38	151.42	등급외	81.25	5등급
1단지서광영남	116.08	148.01	등급외	81.82	5등급
2단지유천화인	137.02	144.58	등급외	80.00	5등급
3단지한라	152.32	143.49	등급외	77.77	5등급
7단지성원	122.00	131.59	등급외	74.12	5등급
8단지대원	141.36	126.99	등급외	72.55	5등급
공무원5단지	131.66	150.84	등급외	82.00	5등급
주공6단지	162.93	133.65	등급외	71.36	5등급
주공9단지	140.14	144.40	등급외	80.41	5등급
분당동	176.69	145.73	-	80.49	-
샛별	143.64	137.92	-	77.06	-
동성	143.30	140.73	등급외	79.45	5등급
라이프	144.52	136.02	등급외	76.39	5등급
삼부	146.33	144.35	등급외	79.62	5등급
우방	141.33	132.64	등급외	73.92	5등급
장안타운	242.54	158.93	-	86.30	-
건영	285.13	157.66	등급외	86.44	5등급
건영3차	152.77	162.57	등급외	86.60	5등급
건영두산	171.27	160.94	등급외	86.49	5등급
한신라이프	185.03	158.97	등급외	85.55	5등급
서현동	124.81	97.24	-	58.32	-
시범	122.52	87.63	-	53.95	-
삼성한신	123.21	89.05	5등급	54.71	4등급
우성	131.58	94.27	등급외	57.08	4등급
한양	116.53	84.42	5등급	52.70	4등급
현대	120.25	83.62	5등급	51.68	4등급
효자촌	130.92	121.83	-	69.51	-
대명	182.51	166.83	등급외	85.96	5등급
동아	129.36	124.42	등급외	70.68	5등급
삼환	138.08	132.61	등급외	74.32	5등급
임광	121.17	123.09	등급외	70.38	5등급

정도	189.99	172.20	등급외	87.55	5등급
현대	124.69	94.63	등급외	58.24	4등급
수내동	170.25	102.43	-	60.62	-
양지	128.87	113.26	-	64.61	-
2단지청구	128.87	113.26	등급외	64.61	4등급
파크타운	139.33	120.02	-	69.50	-
대림	139.33	120.02	등급외	69.50	4등급
푸른	209.35	88.47	-	54.35	-
벽산쌍용신성	209.35	88.47	5등급	54.35	4등급
야탑동	134.33	122.61	-	67.62	-
매화	150.83	150.62	-	79.16	-
건영1차	185.66	173.46	등급외	88.65	5등급
공무원1단지	135.58	152.53	등급외	81.77	5등급
공무원2단지	135.86	138.71	등급외	74.18	5등급
동신건영2차	191.63	174.06	등급외	88.95	5등급
주공3단지	159.30	130.75	등급외	70.09	5등급
주공4단지	142.56	154.38	등급외	79.30	5등급
청구	165.55	166.30	등급외	86.66	5등급
현대벽산	178.30	173.83	등급외	88.10	5등급
화성빌리지	162.98	165.43	등급외	87.12	5등급
목련	157.19	156.82	-	81.32	-
SK	157.14	157.66	등급외	81.97	5등급
대원	188.03	172.27	등급외	87.73	5등급
대원3단지	175.32	171.27	등급외	87.61	5등급
두원	164.77	168.74	등급외	87.70	5등급
미원	146.61	165.82	등급외	87.11	5등급
성환	170.03	167.62	등급외	87.66	5등급
영남	147.21	157.19	등급외	84.52	5등급
주공1단지	151.99	136.33	등급외	68.03	4등급
한신	151.03	163.54	등급외	85.00	5등급
한일	151.97	159.81	등급외	84.85	5등급
화성빌리지	160.14	162.11	등급외	86.60	5등급
분당	109.40	149.10	-	80.87	-
동원로얄듀크	109.40	149.10	등급외	80.87	5등급
장미	165.94	112.97	-	64.55	-
1단지동부	273.10	140.09	등급외	76.71	5등급
8단지현대	126.85	102.83	등급외	60.01	4등급
탑	107.03	96.41	-	56.56	-
1단지선경	136.68	129.78	등급외	73.09	5등급

2단지대우	114.83	116.34	등급외	66.64	4등급
3단지타워빌	73.12	57.60	4등급	35.68	3등급
5단지동아	194.37	171.63	등급외	87.24	5등급
6단지벽산7단지경남 아너스빌	120.86	102.41	등급외	64.03	4등급
8단지주공	151.76	153.53	등급외	76.90	5등급
이매동	127.19	124.15	-	69.96	-
아름	120.47	110.71	-	63.97	-
1,2,3단지건영한성태 영	124.82	98.72	등급외	58.79	4등급
4단지두산삼호	119.39	111.46	등급외	63.79	4등급
5단지풍림	117.89	121.86	등급외	69.20	4등급
7단지효성	114.29	127.15	등급외	71.58	5등급
이매촌	131.89	133.53	-	74.15	-
10단지삼성	126.57	120.35	등급외	67.86	4등급
11단지삼환	118.92	135.24	등급외	74.99	5등급
1단지금강	135.02	150.43	등급외	80.56	5등급
2단지한신	141.64	134.23	등급외	73.35	5등급
3단지동신	131.03	137.30	등급외	76.78	5등급
5단지동부코오롱	117.03	140.04	등급외	76.66	5등급
6단지청구	144.43	125.84	등급외	71.40	5등급
7단지성지	137.70	149.05	등급외	83.17	5등급
8단지진흥	133.01	134.66	등급외	75.36	5등급
9단지동신	128.28	140.57	등급외	76.97	5등급
정자동	149.21	130.80	-	73.06	-
느티	125.13	120.63	-	65.72	-
경남선경	125.13	120.63	등급외	65.72	4등급
분당	123.79	121.37	-	75.97	-
로얄팰리스	110.76	138.77	등급외	85.34	5등급
아이파크분당1	131.83	110.83	등급외	70.29	5등급
상록	200.49	143.20	-	75.62	-
1,2단지라이프	162.58	151.56	등급외	81.41	5등급
3단지우성	248.31	135.63	등급외	69.44	4등급
4단지임광보성	149.32	147.59	등급외	80.62	5등급
정든	128.82	132.97	-	74.50	-
신화5단지	123.70	139.76	등급외	77.81	5등급
우성4단지	121.51	134.05	등급외	74.32	5등급
우성6단지동아2단지	135.23	123.77	등급외	70.74	5등급
한진6단지	118.77	140.52	등급외	77.77	5등급
한진7단지	153.18	154.27	등급외	83.24	5등급

한진8단지	121.11	126.61	등급외	71.60	5등급
한솔	160.96	129.45	-	70.29	-
1단지청구	147.98	132.27	등급외	75.00	5등급
2단지LG	114.84	121.08	등급외	69.18	4등급
3단지한양	135.63	141.13	등급외	79.84	5등급
4단지주공	202.14	125.66	등급외	66.88	4등급
5단지주공	171.73	135.66	등급외	73.98	5등급
6단지주공	181.76	132.04	등급외	62.05	4등급
7단지주공	179.17	124.45	등급외	64.16	4등급
전체 계	138.71	123.23	-	69.40	-

출처 : 연구진 작성

4) 패키지 적용의 비용 절감 효과

패키지 적용의 경제적인 유용성 검증を 위하여, 각 패키지 적용 시 에너지 소요량에 대하여 사용 요금을 추정하였다. 전기에너지와 난방에너지는 요금계산 시 계절별로 차등 요금을 적용하고, 두 에너지 모두 소비량이 많은 계절이 겨울이므로 동절기를 기준으로 계산하였다. 전기에너지는 계약 방식에 따라 주택용 전력이 저압과 고압으로 나뉘어 있는데 호수별로 검침하는 방식인 주택용 저압으로 통일하여 계산하였다. 에너지원 모두 별도의 할인은 없는 것으로 하였으며, 연료비 연동제로 시기에 따라 요금이 달라지므로 2024년 9월 4일 현재의 요율을 적용하였다. 에너지원당 요금은 한 세대 당 한 달치 요금을 기본으로 구하였다.

모든 에너지원에 대하여 요금을 추정하여 패키지 적용 시 변화 금액을 살펴보았으며, 제로에너지주택 건설비용 증가 금액을 대략적으로 추산하여 패키지 적용 시의 절감 효과도 추정하였다.

[표 4-22] 추정 대상 에너지원의 적용 요금제

에너지원	현재 공급방식	단위	계절 특성	요금제
전기 에너지	한국전력공사(KEPCO) 생산 국가 전력망	kWh	여름과 겨울에 첨두 소비량에 도달	주택용 저압 기타계절
가스 에너지	삼천도시가스(주) 산하 삼천리와 코원에너지서비스 도시가스사	MJ	계절 특성은 약함	주택용 취사
난방 에너지	열병합 방식의 지역난방 설비 한국지역난방공사에서 생산된 열을 각 아파트 단지로 공급(천연가스 연료)	Mcal	겨울에 첨두 소비량에 도달	주택용 난방 동절기

출처 : 연구진 작성

① 전기에너지 요금 추정

□ 전기요금 계산식

- 전기요금=기본요금+전력량요금+기후환경요금±연료비조정요금
- 청구금액=전기요금+부가가치세+전력산업기반기금

전기요금의 기본요금과 전력량요금은 사용량에 따라 달라진다. 본 연구의 연구 단위는 아파트 단지로, 세대별로 요금 구간을 모두 적용하여 전기세를 구할 수 없어 구간별 요금의 평균을 원단위로 반올림한 값을 전기요금으로 사용하였다.

[표 4-23] 주택용전력(저압, 기타계절) 기본요금 및 전력량요금

기본요금(원/호)		전력량요금(원/kWh)	
200 kWh 이하 사용	910	처음 200 kWh까지	120.0
201~400 kWh 사용	1,600	다음 200 kWh까지	214.6
400 kWh 초과 사용	7,300	400 kWh 초과	307.3
평균	3,270	평균	214

출처 : KEPCO. (2024). 주택용 전기요금(저압)
* 기타계절: 1월 1일~6월 30일, 9월 1일~12월 31일

기후환경요금은 깨끗한 에너지 제공에 소요되는 비용으로 단가는 매년 변동된다. 연료비조정요금은 연료비 변동 분을 반영하는 요금으로 단가는 3개월마다 변동된다. 부가가치세와 전력산업기반기금은 원미만과 10원 미만에 대해 별도의 규정이 있으나, 본 연구에서는 원단위로 반올림하여 사용하였다.

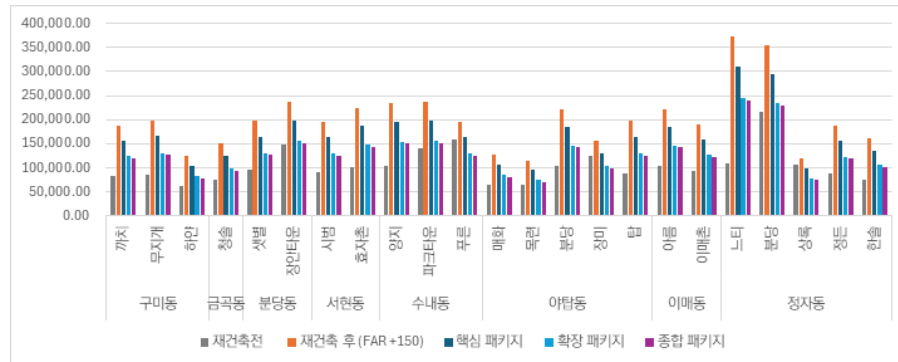
[표 4-24] 전기요금 계산식에 포함되는 비용

구분	부과방식		단가	비고
요금	기후환경요금	기후환경요금단가×사용전력량	9원/kWh	-
	연료비조정요금	연료비조정단가×사용전력량	5원/kWh	상하한 ±5원/kWh
부가가치세	전기요금×10%			원미만 4사 5입
전력사업기반금	전기요금×3.2%			10원미만 절사

출처 : KEPCO. (2024). 주택용 전기요금(저압)

전기요금의 추산 결과, 재건축 후 ‘핵심’ 패키지를 적용할 경우 평균 16.73%가, ‘확장’의 경우 ‘핵심’ 보다 평균 20.49%, ‘종합’을 적용할 경우 ‘확장’ 보다 평균 3.83%의 감소율을

보인다. 요금의 증감 금액으로 살펴보면, 월간 전기요금은 재건축 전보다 재건축 후 평균 77,076.83원 증가하며, '핵심' 패키지 적용 시 재건축 후 요금보다 평균 30,463원, 확장패키지 적용 시 평균 61,520.27원, 종합패키지 적용 시에는 평균 66,141.06원이 저렴해진다.



[그림 4-6] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 월간 전기요금 (단위: 원)

출처: 연구진 적성

[표 4-25] 분당 마을별 재건축 및 패키지 적용 시 세대 당 월간 전기요금 추정

동/마을	(단위: 요금 원, 증감률 %)						
	재건축 후	핵심 패키지 적용		확장 패키지 적용		종합 패키지 적용	
	전기 요금	전기 요금	재→핵 증감률	전기 요금	핵→확 증감률	전기 요금	확→종 증감률
구미동	179,616	149,570	-16.73	118,938	-20.48	114,152	-4.02
까치	188,541	156,970	-16.74	124,784	-20.50	119,863	-3.94
무지개	198,906	165,565	-16.76	131,574	-20.53	127,098	-3.40
하안	124,416	103,798	-16.57	82,778	-20.25	77,549	-6.32
금곡동	150,352	125,304	-16.66	99,768	-20.38	95,041	-4.74
청솔	150,352	125,304	-16.66	99,768	-20.38	95,041	-4.74
분당동	211,257	175,806	-16.78	139,664	-20.56	134,787	-3.49
샛별	198,489	165,220	-16.76	131,301	-20.53	126,728	-3.48
장안타운	236,967	197,125	-16.81	156,506	-20.61	151,014	-3.51
서현동	204,277	170,019	-16.77	135,092	-20.54	130,631	-3.30
시범	196,691	163,729	-16.76	130,123	-20.53	125,738	-3.37
효자촌	224,350	186,663	-16.80	148,241	-20.58	143,577	-3.15
수내동	214,810	178,752	-16.79	141,992	-20.57	137,607	-3.09
양지	233,597	194,331	-16.81	154,299	-20.60	150,091	-2.73
파크타운	237,069	197,210	-16.81	156,573	-20.61	152,350	-2.70
푸른	196,761	163,787	-16.76	130,169	-20.53	125,635	-3.48

야탑동	153,311	127,757	-16.67	101,706	-20.39	96,887	-4.74
매화	127,870	106,662	-16.59	85,040	-20.27	79,696	-6.28
목련	115,219	96,172	-16.53	76,753	-20.19	71,444	-6.92
분당	221,663	184,435	-16.79	146,481	-20.58	142,381	-2.80
장미	155,242	129,359	-16.67	102,971	-20.40	98,741	-4.11
탑	197,334	164,262	-16.76	130,544	-20.53	126,149	-3.37
이매동	202,730	168,736	-16.77	134,079	-20.54	129,727	-3.25
아름	222,164	184,851	-16.80	146,810	-20.58	142,459	-2.96
이매촌	191,492	159,417	-16.75	126,717	-20.51	122,365	-3.43
정자동	183,010	152,384	-16.73	121,161	-20.49	116,658	-3.72
느티	373,873	310,648	-16.91	246,189	-20.75	239,552	-2.70
분당	354,687	294,738	-16.90	233,621	-20.74	230,609	-1.29
상록	118,911	99,233	-16.55	79,171	-20.22	74,851	-5.46
정든	186,511	155,287	-16.74	123,454	-20.50	119,006	-3.60
한솔	161,113	134,227	-16.69	106,817	-20.42	101,936	-4.57
평균	182,056	151,593	-16.73	120,536	-20.49	115,915	-3.83

출처 : 연구진 작성

[표 4-26] 분당 마을별 패키지 적용 시 월간 전기요금 감소 금액

(단위: 원)

동/마을	단계별 감소 금액			재건축 후 요금 대비 감소금액	
	재건축→핵심	핵심→확장	확장→종합	재건축→확장	재건축→종합
구미동	-30,046.17	-30,632.32	-4,785.81	-60,678.49	-65,464.29
까치	-31,570.57	-32,186.46	-4,920.54	-63,757.03	-68,677.57
무지개	-33,340.98	-33,991.40	-4,476.19	-67,332.38	-71,808.57
하얀	-20,618.01	-21,020.23	-5,229.04	-41,638.25	-46,867.28
금곡동	-25,047.90	-25,536.54	-4,726.61	-50,584.45	-55,311.06
청솔	-25,047.90	-25,536.54	-4,726.61	-50,584.45	-55,311.06
분당동	-35,450.41	-36,141.99	-4,877.81	-71,592.40	-76,470.21
샛별	-33,269.76	-33,918.79	-4,572.81	-67,188.55	-71,761.37
장안타운	-39,841.77	-40,619.01	-5,492.02	-80,460.77	-85,952.79
서현동	-34,258.31	-34,926.63	-4,461.65	-69,184.94	-73,646.59
시범	-32,962.65	-33,605.70	-4,384.88	-66,568.35	-70,953.23
효자촌	-37,686.78	-38,421.98	-4,664.79	-76,108.76	-80,773.55
수내동	-36,057.24	-36,760.66	-4,384.69	-72,817.90	-77,202.59
양지	-39,266.18	-40,032.20	-4,208.22	-79,298.38	-83,506.60
파크타운	-39,859.13	-40,636.71	-4,223.32	-80,495.83	-84,719.16
푸른	-32,974.62	-33,617.90	-4,533.49	-66,592.52	-71,126.01
야탑동	-25,553.23	-26,051.72	-4,818.87	-51,604.95	-56,423.82

매화	-21,207.91	-21,621.64	-5,344.14	-42,829.55	-48,173.69
목련	-19,047.14	-19,418.72	-5,309.30	-38,465.87	-43,775.17
분당	-37,227.73	-37,953.98	-4,099.59	-75,181.71	-79,281.30
장미	-25,883.07	-26,388.00	-4,230.11	-52,271.07	-56,501.18
탑	-33,072.44	-33,717.62	-4,394.67	-66,790.06	-71,184.73
이매동	-33,994.05	-34,657.21	-4,351.68	-68,651.26	-73,002.94
아름	-37,313.42	-38,041.34	-4,350.50	-75,354.76	-79,705.26
이매촌	-32,074.61	-32,700.33	-4,352.37	-64,774.94	-69,127.30
정자동	-30,625.90	-31,223.36	-4,503.16	-61,849.26	-66,352.42
느티	-63,225.24	-64,458.65	-6,636.93	-127,683.89	-134,320.83
분당	-59,948.23	-61,117.71	-3,011.92	-121,065.94	-124,077.86
상록	-19,677.68	-20,061.55	-4,320.26	-39,739.23	-44,059.50
정든	-31,223.86	-31,832.98	-4,448.55	-63,056.84	-67,505.39
한솔	-26,885.88	-27,410.38	-4,881.16	-54,296.26	-59,177.41
전체 계	-30,463.00	-31,057.27	-4,620.79	-61,520.27	-66,141.06

출처 : 연구진 작성

② 가스에너지 요금 추정

□ 가스요금 계산식

• 주택용 취사 가스요금=[기본요금+사용열량×단가+계량기교체비]×1.1(부가가치세)

가스요금은 지역에 따라 달라지므로, 분당신도시가 위치한 경기도 요금을 기준으로 하였다. 계량기 교체비는 10등급 미만 일반계량기의 비용은 요금에 포함되며, 주택용은 기본요금에 포함되어 있다.⁶⁸⁾ 추후 어떤 계량기를 설치하게 될지 알 수 없으므로, 기본 요금에 포함되는 것으로 보았다.

[표 4-27] 경기도 주택용 취사 가스 기본요금 및 사용량요금

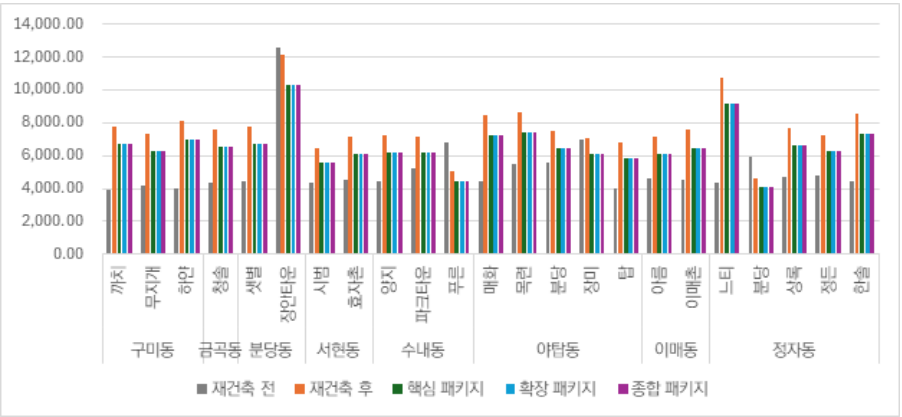
기본요금(원/호)	사용량요금(원/MJ)
1,200	22.5593

출처 : 한국도시가스협회 홈페이지. (<http://www.citygas.or.kr/info/charge.jsp>). (검색일: 2024.9.4.)

가스에너지 요금 추산 결과, 아파트 단지의 건축적 특성의 영향이 커서 단지별 편차가 크

68) 경기도 도시가스 공급규정 제14조제3항

지만 재건축 후 평균 58.49%, 금액으로는 7,513.03 원 증가하는 것으로 나타났다. ‘핵심’ 패키지 적용 시 재건축 후 요금보다 평균 14.08% 감소하며, 금액으로는 1,057.77원 감소한다. 가스에너지는 핵심 패키지 적용 시에만 감소하므로, 가스요금은 핵심, 확장, 종합 패키지 모두 동일하다.



[그림 4-7] 분당 마을별 탄소 감축 패키지 적용 시 월간 가스요금 (단위: 원)
출처: 연구진 작성

[표 4-28] 분당 마을별 재건축 및 패키지 적용 시 세대 당 월간 가스요금

(단위: 요금 원, 증감률 %)

동/마을	재건축 후			핵심 패키지 적용		
	가스요금	요금 증감액	전→후 증감률	가스요금	요금 감소액	재→핵 증감률
구미동	7,635.66	3,591.20	88.79	6,556.95	-1,078.72	-14.13
까치	7,776.13	3,882.12	99.69	6,673.42	-1,102.71	-14.18
무지개	7,300.53	3,125.55	74.86	6,279.06	-1,021.48	-13.99
하얀	8,123.98	4,117.19	102.76	6,961.86	-1,162.12	-14.30
금곡동	7,566.95	3,252.66	75.39	6,499.97	-1,066.98	-14.10
청솔	7,566.95	3,252.66	75.39	6,499.97	-1,066.98	-14.10
분당동	9,221.60	2,091.65	29.34	7,872.01	-1,349.59	-14.64
샛별	7,776.65	3,328.00	74.81	6,673.86	-1,102.80	-14.18
장안타운	12,131.41	-398.09	-3.18	10,284.83	-1,846.59	-15.22
서현동	6,658.20	2,226.62	50.24	5,746.43	-911.76	-13.69
시범	6,480.56	2,093.88	47.73	5,599.14	-881.42	-13.60
효자촌	7,128.25	2,577.88	56.65	6,136.20	-992.05	-13.92
수내동	6,055.43	157.06	2.66	5,246.62	-808.81	-13.36
양지	7,225.10	2,818.14	63.95	6,216.51	-1,008.59	-13.96

파크타운	7,147.16	1,883.52	35.78	6,151.88	-995.28	-13.93
푸른	5,059.55	-1,779.70	-26.02	4,420.83	-638.72	-12.62
야탑동	7,711.28	2,732.29	54.88	6,619.65	-1,091.63	-14.16
매화	8,485.35	4,045.17	91.10	7,261.51	-1,223.84	-14.42
목련	8,623.39	3,160.18	57.84	7,375.97	-1,247.42	-14.47
분당	7,470.50	1,935.26	34.96	6,420.00	-1,050.51	-14.06
장미	7,037.11	101.83	1.47	6,060.63	-976.48	-13.88
탑	6,822.18	2,829.98	70.89	5,882.40	-939.77	-13.78
이매동	7,390.88	2,847.88	62.69	6,353.97	-1,036.91	-14.03
아름	7,114.59	2,471.41	53.23	6,124.87	-989.72	-13.91
이매촌	7,550.65	3,065.58	68.35	6,486.45	-1,064.19	-14.09
정자동	7,700.68	2,977.01	63.02	6,610.86	-1,089.82	-14.15
느티	10,756.34	6,398.51	146.83	9,144.61	-1,611.73	-14.98
분당	4,641.56	-1,302.00	-21.91	4,074.24	-567.32	-12.22
상록	7,686.27	2,994.76	63.83	6,598.91	-1,087.36	-14.15
정든	7,259.42	2,511.61	52.90	6,244.97	-1,014.45	-13.97
한솔	8,528.57	4,073.31	91.43	7,297.35	-1,231.22	-14.44
평균	7,513.03	7,513.03	58.49	6,455.26	-1,057.77	-14.08

출처: 연구진 작성

③ 난방에너지 요금 추정

□ 열요금 계산식

• 주택용 난방용 열요금=[기본요금+사용량요금]×1.1(부가가치세)

분당은 지역난방으로 한국지역난방공사에서 난방 에너지를 공급받고 있으므로, 한국지역난방공사에서 제공하는 열요금 표를 이용하여 추정하였다. 열요금은 계약면적당 부과하는데, 계약면적은 '건축물관리대장 등 공부상의 세대별 전용면적의 합계와 세대별 발코니 확장면적의 합계 및 공용면적 중 지역난방열을 사용하는 관리사무소, 노인정, 경비실 등의 건축연면적 합계'⁶⁹⁾이다. 본 연구에서는 연면적을 이용한다.

난방에너지에 대한 요금인 열요금은 탄소 저감 패키지 적용 시 매우 크게 감소한다. 핵심패키지 적용 시에는 재건축 후 열요금보다 평균 55.74%, 확장 패키지 적용 시에는 핵

69) 한국지역난방공사 홈페이지. (<https://www.kdhc.co.kr/kdhc/main/contents.do?menuNo=200270>). (검색일: 2024.9.4.)

금액으로 살펴보면, 재건축 후 열요금은 평균 91,552.64원 증가하며, 핵심 패키지 적용 시 77,530.88원, 확장 패키지 적용 시 115,706.62원 감소한다.

샛별	93,623.80	161,407.19	72.40	70,576.98	-56.27	25,852.72	-63.37
장안타운	155,486.90	231,368.65	48.80	99,546.96	-56.97	34,638.76	-65.20
서현동	98,565.04	115,692.21	17.38	53,450.53	-53.80	22,803.11	-57.34
시범	97,662.82	98,173.76	0.52	46,444.28	-52.69	20,973.00	-54.84
효자촌	100,952.42	162,048.09	60.52	71,989.89	-55.57	27,645.78	-61.60
수내동	133,098.47	128,490.68	-3.46	58,733.19	-54.29	24,385.03	-58.48
양지	129,638.17	169,681.55	30.89	75,947.62	-55.24	29,793.60	-60.77
파크타운	106,852.69	158,052.77	47.92	70,562.86	-55.35	27,483.35	-61.05
푸른	146,042.35	97,278.69	-33.39	45,917.13	-52.80	20,627.00	-55.08
야탑동	78,118.00	137,344.68	75.82	60,559.36	-55.91	22,750.73	-62.43
매화	66,747.03	152,418.82	128.35	65,552.51	-56.99	22,780.06	-65.25
목련	61,285.51	150,425.82	145.45	64,397.55	-57.19	22,037.74	-65.78
분당	85,094.87	208,288.55	144.77	90,042.22	-56.77	31,818.45	-64.66
장미	90,859.85	114,528.63	26.05	51,293.63	-55.21	20,157.09	-60.70
탑	91,879.83	126,162.26	37.31	57,945.19	-54.07	24,355.51	-57.97
이매동	96,066.85	157,590.21	64.04	69,696.80	-55.77	26,418.61	-62.09
아름	102,676.41	151,408.71	47.46	68,143.77	-54.99	27,144.61	-60.17
이매촌	92,244.84	161,164.69	74.71	70,594.85	-56.20	25,998.80	-63.17
정자동	82,271.02	127,236.51	54.66	55,947.87	-56.03	20,845.77	-62.74
느티	144,139.14	347,461.11	141.06	153,103.55	-55.94	57,403.06	-62.51
분당	146,005.72	150,103.43	2.81	68,493.26	-54.37	28,308.90	-58.67
상록	99,210.88	137,271.51	38.36	59,304.48	-56.80	20,913.98	-64.73
정든	82,074.00	149,320.44	81.93	65,540.09	-56.11	24,287.15	-62.94
한솔	59,716.39	102,019.57	70.84	44,734.18	-56.15	16,527.19	-63.05
평균	88,012.37	139,091.80	58.04	61,560.92	-55.74	23,385.18	-62.01

출처 : 연구진 작성

[표 4-31] 분당 마을별 재건축 전/후 및 패키지 적용 시 월간 열요금 증감액

(단위: 원)

동/마을	증가		감소	
	재건축 전→후	재건축 후→핵심	핵심→확장	재건축→확장
구미동	106,382.12	84,823.61	41,766.64	126,590.25
까치	104,925.38	85,104.12	41,904.76	127,008.88
무지개	104,645.75	84,783.70	41,746.99	126,530.69
하얀	112,391.40	84,461.66	41,588.42	126,050.08
금곡동	95,317.56	74,925.35	36,892.79	111,818.14
청솔	95,317.56	74,925.35	36,892.79	111,818.14
분당동	124,339.68	104,431.57	51,421.48	155,853.05

셋별	111,062.43	90,830.22	44,724.25	135,554.47
장안타운	151,077.11	131,821.69	64,908.21	196,729.90
서현동	62,017.62	62,241.68	30,647.43	92,889.10
시범	45,022.35	51,729.47	25,471.28	77,200.76
효자촌	106,989.10	90,058.20	44,344.12	134,402.31
수내동	58,952.63	69,757.48	34,348.17	104,105.65
양지	100,767.68	93,733.93	46,154.02	139,887.96
파크타운	100,362.06	87,489.91	43,079.51	130,569.42
푸른	22,316.04	51,361.57	25,290.13	76,651.69
야탑동	94,574.81	76,785.33	37,808.63	114,593.96
매화	115,761.89	86,866.31	42,772.45	129,638.75
목련	116,673.49	86,028.27	42,359.80	128,388.08
분당	161,019.89	118,246.32	58,223.78	176,470.10
장미	66,442.99	63,235.00	31,136.54	94,371.54
탑	75,195.10	68,217.07	33,589.68	101,806.75
이매동	105,499.63	87,893.41	43,278.19	131,171.60
아름	95,280.21	83,264.94	40,999.16	124,264.10
이매촌	111,409.05	90,569.84	44,596.05	135,165.89
정자동	83,485.60	71,288.64	35,102.10	106,390.74
느티	262,097.89	194,357.55	95,700.49	290,058.05
분당	74,723.50	81,610.17	40,184.36	121,794.53
상록	86,513.38	77,967.03	38,390.50	116,357.52
정든	104,573.16	83,780.35	41,252.94	125,033.30
한솔	69,736.43	57,285.39	28,206.98	85,492.37
전체 계	91,552.64	77,530.88	38,175.74	115,706.62

출처 : 연구진 작성

④ 패키지별 절감 금액 종합

패키지별 절감 금액을 종합하여 살펴보면, 재건축 후 에너지 요금보다 ‘핵심’ 패키지는 평균 33.18%, ‘확장’ 패키지는 평균 54.25%, ‘종합’ 패키지는 평균 55.65% 절감되었다.

[표 4-32] 분당 마을별 탄소 저감 패키지별 에너지 요금 및 재건축 이후 요금 대비 감소율

(단위: 원)

동/마을	핵심 패키지		확장 패키지		종합 패키지	
	에너지 요금	감소율(%)	에너지 요금	감소율(%)	에너지 요금	감소율(%)
구미동	222353.7	-34.27	149954.8	-55.67	145169.0	-57.09
까치	230418.5	-33.83	156327.3	-55.10	151406.7	-56.52
무지개	238386.6	-33.32	162648.2	-54.51	158172.0	-55.76
하얀	175445.2	-37.72	112836.6	-59.94	107607.5	-61.80
금곡동	189707.9	-34.75	127278.5	-56.22	122551.9	-57.85
청솔	189707.9	-34.75	127278.5	-56.22	122551.9	-57.85
분당동	263867.8	-34.86	176304.4	-56.48	171426.6	-57.68
샛별	242470.5	-34.05	163827.5	-55.44	159254.7	-56.69
장안타운	306957.3	-36.11	201430.1	-58.08	195938.0	-59.22
서현동	229215.9	-29.82	163641.8	-49.90	159180.2	-51.27
시범	215772.2	-28.40	156695.2	-48.00	152310.3	-49.46
효자촌	264789.5	-32.71	182023.4	-53.75	177358.7	-54.93
수내동	242732.2	-30.52	171623.4	-50.87	167238.7	-52.13
양지	276495.3	-32.64	190309.1	-53.64	186100.8	-54.67
파크타운	273924.5	-31.91	190208.3	-52.72	185985.0	-53.77
푸른	214124.8	-28.41	155216.8	-48.11	150683.3	-49.62
야탑동	194936.5	-34.67	131076.1	-56.07	126257.3	-57.68
매화	179475.8	-37.85	115081.7	-60.15	109737.6	-62.00
목련	167945.3	-38.77	106166.7	-61.29	100857.4	-63.23
분당	280897.1	-35.78	184719.3	-57.77	180619.7	-58.71
장미	186713.1	-32.55	129188.5	-53.33	124958.4	-54.86
탑	228089.3	-30.95	160782.0	-51.33	156387.4	-52.66
이매동	244786.8	-33.43	166851.4	-54.62	162499.7	-55.81
아름	259119.5	-31.93	180079.0	-52.70	175728.5	-53.84
이매촌	236498.8	-34.34	159202.4	-55.80	154850	-57.01
정자동	214943	-32.40	148617.6	-53.26	144114.4	-54.67
느티	472895.8	-35.40	312736.6	-57.28	306099.7	-58.19
분당	367305.9	-27.90	266003.8	-47.78	262991.9	-48.38
상록	165136.2	-37.42	106684.2	-59.57	102363.9	-61.21
정든	227072.3	-33.82	153986.4	-55.12	149537.8	-56.41
한솔	186258.8	-31.44	130641.4	-51.91	125760.3	-53.71
평균	219609.6	-33.18	150376.6	-54.25	145755.8	-55.65

출처 : 연구진 작성

4. 소결

본 장에서는 전문가 FGI와 자문 등을 통하여 재건축 단지에 적용 가능한 탄소배출 저감 요소를 도출하고, 이 요소들을 이용한 단계별 패키지를 개발하여 그 효과를 검증하였다.

전문가 FGI 결과를 살펴보면 탄소배출 저감요소의 적용가능성에 영향을 미치는 주된 요인은 입주민의 반대 등 입주민의 수용 가능성 여부, 기술의 비용 절감 입증 필요, 초기 설치비용, 투자대비 회수비용 등 비용의 문제, 감리 필요, 운영주체의 관리 필요 등 건설 및 운영 단계에서의 유지·관리의 문제, 규모화의 어려움, 토지 확보 등 공간 문제 등으로 도출되었다. 이 중 가장 자주 언급된 것은 비용으로, 입주민과 건설사의 입장에서는 비용이 가장 어려우면서도 중요한 문제이기 때문일 것이다. 건축물의 운영 단계와 관련된 신재생에너지 및 에너지효율 건축물 관련 요소는 초기투자비용이 높더라도 추후 요금 절감 등을 통하여 비용 회수의 여지가 있으나, 자재 재활용률 확대, 탄소배출 저감형 건설 자재 사용 등 건설 단계의 저감요소는 비용절감 여부가 불투명하고 건설 단계에서의 관리감독이 필요하며 입주민들의 거부감이 커 경제적 지원 외에 인식개선 또한 필요한 것으로 보인다. 기후변화 적응 및 흡수원 확대 부문은 공간의 확보와 이에 따른 비용이 가장 중요한 쟁점으로, 녹지 등의 흡수원이 재생에너지 생산시설 등과 입지에서 경합할 가능성이 높다. 그린 인프라 등의 흡수원은 도시의 어메니티로서도 중요한 기능을 하므로, 재생에너지 시설과 함께 흡수원을 위한 공간 또한 확보하는 것이 필요할 것이다. 에너지효율 건축물 부문의 기술요소는 필요성과 적용 가능성이 모두 높은 것으로 평가되어, 에너지효율 건축물 인증제도와의 연계 및 활용이 재건축 단지의 탄소배출 저감에 핵심적인 요소인 것으로 나타났다.

탄소배출 저감 패키지는 적용가능성 및 적용의 용이성 등을 고려하여 운영 단계의 요소들로 구성된 ①핵심, ②확장 패키지와, 해체, 건설 단계의 요소들까지 포함한 ③종합 패키지로 구성하고 전기, 가스, 난방의 에너지원별 이산화탄소 감축량을 추정하였다. 추정 결과, 패시브 기술 중심의 핵심패키지만으로도 패키지 적용 전 운영단계 배출량의 절반이 넘는 양인 296.66 kton이 감축되는 것으로 나타났으며, 액티브 기술이 적용된 확장 패키지의 경우 핵심패키지보다 84 kton 이상 감축되었고, 종합패키지는 운영 단계에서 확장패키지보다 10 kton 가량, 해체 단계에서는 206.54 kton, 건설 단계에서는 1,642.58 kton이 감축되는 것으로 나타났다. 또한 패키지 적용 시 핵심 패키지만으로 분당의 모든 아파트 단지가 ZEB 5등급 기준을 충족하며, 총 26개의 단지가 4등급, 1개의 단지가 3등급 기준을 달성하는 것으로 나타났다. 패키지 적용 이후 각 에너지원의 요

금을 추정하여 종합적으로 절감되는 금액을 추정한 결과 재건축 후 에너지 요금보다 핵심 패키지는 평균 33.18%, 확장 패키지는 평균 54.25%, 종합 패키지는 평균 55.65% 절감되는 것으로 나타나 그 효과성이 정량적으로 검증되었다.

해체 단계와 건설 단계의 이산화탄소 감축량을 제외한 이산화탄소 감축량 및 ZEB 등급 추정, 에너지원 요금 추정 등 모든 계산 및 추정은 아파트 단지 단위로 수행되었으나, 3장의 생애주기별 이산화탄소 배출량 추정과 마찬가지로 도시 전체를 대상으로 한 모형을 아파트 단지별로 적용하였으며 재건축 이후의 모습은 용적률 상승만을 가정하였으므로 단지별 추정 결과는 오차 범위가 클 수 있다는 한계가 있다. 또한 각 패키지별 이산화탄소 감축량의 추정은 특정 제품의 성능에 기반한 것이 아니라 선행연구에서 추정된 감축치를 종합하여 사용한 것으로, 실제 적용 시 사용하는 자재의 성능 및 수준에 따라 추정치에 못 미칠 수도, 반대로 추정치보다 더 많이 감축할 수도 있다. 마찬가지로의 이유로 패키지에 적용된 감축량 달성을 위해 필요한 건설비용의 산출과 건설비용에 대한 경제성 분석이 불가능하였다. 따라서 본 장에서 추정된 결과는 탄소배출 저감 효과를 정량적으로 추정하고 검증하였다는 데에 의의가 있으며, 단지별 결과는 규제의 기준으로 삼기보다는 기대효과에 대한 근거 정도로 활용하는 것이 적절할 것이다.

탄소배출 저감을 위한 요소 기술은 아직 초기 단계로, 미래의 발전을 더 기대할 수 있는 분야이다. 기술이 발전하기 위해서는 시장의 규모가 중요하므로, 대규모 개발이 예상되는 노후계획도시 재건축은 미래기술의 발전과 지속가능한 도시 건설이 선순환을 이루는 시작점이 될 수 있다. 미국의 경우 2000년대 중반 이후 친환경 인증 기준인 LEED 적용에 따라 그린빌딩 시장이 급성장했다.⁷⁰⁾ 따라서 건설사, 입주민 등 이해관계자들이 탄소배출 저감요소 도입에 적극적으로 참여할 수 있도록 경제적 유인, 인식 개선 등 다양한 측면에서의 접근이 필요하며, 향후 미래의 기술개발에 대처할 수 있는 법적 근거 또한 필요할 것이다.

70) 이홍일, (2022), p.22.

제5장 노후계획도시 재건축 공동주택 단지의 탄소배출 저감을 위한 정책방안

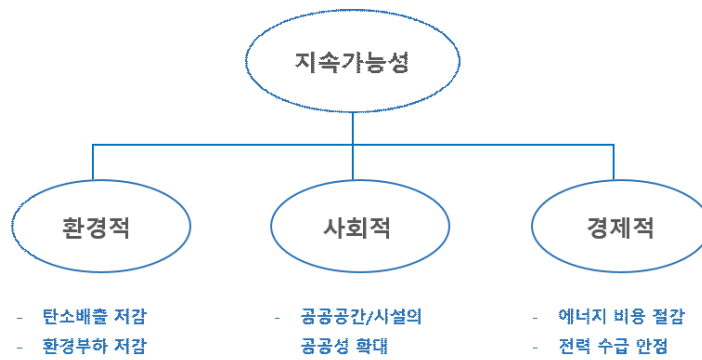
- 1. 정책 목표 및 추진 방향 설정
 - 2. 관련 정책 연계 및 제도 개선 방안
-

1. 정책 목표 및 추진 방향 설정

1) 정책 목표 설정

본 연구의 노후계획도시 재건축 공동주택단지의 탄소배출 저감을 위한 정책 방향은 ‘탄소배출 저감을 통한 지속가능한 도시 공간 관리 향상’으로 요약할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서 제시하는 건축물 생애 주기에 대한 탄소배출 저감요소를 적용할 것을 제안하며, 다음의 지속가능성 증진을 위한 부문별 정책 목표를 설정하였다.

- ① 환경적 지속가능성 : 탄소배출을 저감함으로써 환경에 대한 부하를 저감하여 환경적 지속가능성을 증진한다.
- ② 사회적 지속가능성 : 공공공간 및 공공시설의 공공성을 확대하고 공동 이용과 관리의 책임을 확대함으로써 사회적 지속가능성을 증진한다.
- ③ 경제적 지속가능성 : 에너지 효율화 등을 통한 에너지 비용을 절감하며, 국가적 차원에서는 전력 수급의 안정성을 향상하는 등 경제적 지속가능성을 증진한다.



[그림 5-1] 지속가능성 증진을 위한 정책 목표
출처: 연구진 작성

2) 정책 추진 방향 설정을 위한 전문가 FGI

본 연구에서 도출한 탄소배출 저감요소의 도입과 관련 정책의 실현 가능성을 제고하기 위해 2차 전문가 FGI를 실시하였다. 정책 연계 및 정비 방안에 대한 각계 전문가들의 의견 수렴을 통해 구체적인 정책적 방안을 도출하고자 하였다.

□ 개요

• 조사목적

전문가 의견 수렴을 통해 최종 도출한 탄소배출 저감요소를 재건축 과정에서 적극적으로 도입하기 위한 실효적인 정책적 방안을 모색하기 위함이다.

• 조사기간 및 방법

조사는 1차 FGI와 동일하게 관련 분야(건축, 도시, 환경 등) 학계·민간·공공 전문가 총 18인을 대상으로 하였으며, 약 7일 간(2024년 8월 7일 ~ 8월 13일) 온라인 설문으로 진행되었다.

□ 탄소배출 저감을 위한 정책방안 및 관련 법령 검토

본 연구에서는 관련 문헌 및 정책 검토를 통해 노후계획도시 재건축 시 탄소배출 저감을 유도할 수 있는 정책적 방안을 크게 ①인센티브 제공, ②인증제도, ③공간 확보 3개 부문으로 구분하였다.

‘인센티브 제공’ 부문에서는 재건축 단지의 용적률 완화나 보조금 지원, 세금공제 등을

통해 탄소배출 저감 노력을 유도 및 강화할 수 있는 방안을 모색하고자 하였으며, ‘인증 제도’에서는 제로에너지건축물 인증, 건축물에너지효율등급 인증 등 기존의 관련 인증 제 활용에 대한 의견을 검토하고자 하였다. ‘공간 확보’ 부문에서는 탄소흡수원, 도시농장 등 탄소 저감을 위한 관련 인프라의 설치를 고려하여 단지 내 공간 확보를 장려할 수 있는 정책적 방안에 대해 검토하고자 하였다.

다음의 표와 같이 부문별 연계·활용을 위한 기존의 관련 법령을 살펴보고, 각 측면에서 관련 정책이 실제로 작동하도록 노후계획도시에만 예외적으로 적용할 수 있는 규정, 추가 검토가 필요한 타 법령 등을 검토하였다.

[표 5-1] 탄소배출 저감을 위한 정책적 방안 및 관련 법령

구분	세부내용	관련 법령	주요 내용
1. 인센티브 제공	용적률 완화	「노후계획도시정비법」	제7조(기본계획의 내용) 제12조(특별정비계획의 수립) 제25조(건축규제의 완화 등에 관한 특례)
		「녹색건축물조성지원법」	제15조(건축물에 대한 효율적인 에너지 관리와 녹색건축물 조성의 활성화)
	보조금, 세금공제 등 지원	「녹색건축물조성지원법」	제25조(녹색건축물 조성사업에 대한 지원·특례 등) 제26조(금융의 지원 및 활성화)
2. 인증제도	제로에너지건축물 인증, 건축물 에너지효율등급 인증	「녹색건축물조성지원법」	제17조(건축물의 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증)
			제18조(건축물 에너지성능정보 공개)
			제24조(녹색건축물 조성 시범사업 실시)
3. 공간 확보	관련 시설 및 인프라 설치를 위한 단지 내 공간 확보	-	-

출처 : 연구진 작성

「노후계획도시정비법」 제7조(기본계획의 내용)

- ① 기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.

(중략)

8. 건폐율·용적률 등에 관한 건축물의 밀도계획

(중략)

12. 저탄소 녹색도시로의 전환을 위한 추진계획

13. 건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등 재활용 촉진계획

「노후계획도시정비법」 제12조(특별정비계획의 수립)

- ① 특별정비계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.

(중략)

10. 노후계획도시정비사업별 용적률·건폐율 및 높이 등에 관한 건축계획

(중략)

17. 녹색건축 등 건축물 에너지효율화 계획

18. 건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등에 관한 계획

「노후계획도시정비법」 제25조(건축규제의 완화 등에 관한 특례)

- ① 지정권자는 특별정비구역에서 다음 각 호의 사항에 대하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 완화된 기준을 적용할 수 있다. 다만, 제3호의 경우 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제78조 및 관계 법령에 따른 용적률 최대한도의 100분의 150을 초과할 수 없다.

「녹색건축물조성지원법」 제15조(녹색건축물 조성사업에 대한 지원·특례 등)

- ① 국가 및 지방자치단체는 녹색건축물 조성을 위한 사업 등에 대하여 보조금의 지급 등 필요한 지원을 할 수 있다.

「녹색건축물조성지원법」 제26조(금융의 지원 및 활성화)

정부는 녹색건축물 조성을 촉진하기 위하여 다음 각 호의 사항을 포함하는 금융 시책을 수립·시행하여야 한다.

「녹색건축물조성지원법」 제17조(건축물의 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증)

- ① 국토교통부장관은 에너지성능이 높은 건축물을 확대하고, 건축물의 효과적인 에너지관리를 위하여 건축물 에너지 효율등급 인증제 및 제로에너지건축물 인증제를 시행한다.

「녹색건축물조성지원법」 제18조(건축물 에너지성능정보 공개)

- ① 국토교통부장관은 대통령령으로 정하는 건축물의 연간 에너지 사용량, 온실가스 배출량 또는 제17조에 따라 인증받은 해당 건축물의 에너지효율등급 등이 표시된 건축물 에너지 평가서를 제10조제5항에 따른 방법으로 공개하여야 한다.

「녹색건축물조성지원법」 제24조(녹색건축물 조성 시범사업 실시)

- ① 중앙행정기관의 장 및 지방자치단체의 장은 녹색건축물에 대한 국민의 인식을 높이고 녹색건축물 조성의 촉진을 위하여 다음 각 호의 사업을 시범사업으로 지정할 수 있다.

□ 정책연계 및 정비 방향에 대한 주요 의견

• 인센티브 제공

인센티브 부문에서는 용적률 완화와 금융적 지원(보조금, 세금공제 등)에 대한 내용이 주요 의견이었다. 먼저, 용적률 완화에 대해서는 대부분의 전문가들이 탄소배출 및 에너지 소비량 감축을 유도하기 위한 방안으로 법령 상한 용적률과 용적률 완화 조건을 활용하는 것에 동의하였다. 기본계획상 기준 용적률을 낮추어 인센티브 용적률과 격차가 커지도록 계획함으로써 용적률 완화를 인센티브 요소로 사용할 수 있도록 하자는 의견이 많았다. 과도한 용적률 인센티브 남발이 되지 않도록, 기준 용적률을 높지 않게 설정한 후 탄소배출 저감요소를 도입하여 재건축하는 경우 부여하는 인센티브 조항을 신설하자는 의견도 제시되었다. 또한, 용적률 완화를 인센티브 요소로 사용하되 보조금이나 세금공제 등 금전적인 지원책과 연계하여 활용할 수 있는 방법을 모색할 필요가 있다는 의견도 있었다.

[표 5-2] 인센티브 제공(용적률 완화) 관련 주요 의견 및 관련 법령

구분	주요 내용	관련 법령
용적률 완화	- 에너지 소비량 및 탄소배출 감축 요인 도입과 연계한 용적률 완화 인센티브 부여 및 조건부 완화	- 「노후계획도시정비법」 제7조(기본계획의 내용), 제12조(특별정비계획의 수립), 제25조(건축규제의 완화 등에 관한 특례) 등 - 「건축법」 제5조의2(적용의 완화)
	- 법령에서의 상한 용적률 및 용적률 완화 조건의 활용과 확대 또는 지구단위 계획을 통한 용적률 인센티브 제공	- 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제78조(용도지역의 건폐율) 및 제78조의2(용적률 완화) - 「녹색건축물 조성 지원법」 제15조(건축기준의 완화 등) - 「도시 및 주거환경정비법」 제55조(건축규제의 완화 등) - 각 지방자치단체의 조례

출처 : 연구진 작성

보조금이나 세금공제 등 금융적 지원과 관련해서는 직접 비용 보조, 저금리 융자 및 이자 비용 보조 등 다양한 방법을 활용하는 것에 대한 의견이 있었다. 재산세, 취득등록세 감면 등 대폭적인 세제혜택이 필요하며, 녹색건축 인증제도나 녹색금융 지원 등과 연계함으로써 정책 효과를 높일 수 있다고 하였다. 또한, 준공 이후 운영단계에서의 배출량 저감과 연계한 세금공제 등 건축물 생애주기 관점에서 탄소배출 저감을 유도할 수 있는 금융적 지원에 대한 내용도 언급되었다. 금융적 지원의 실효성을 높이기 위해서는 지원 무효 사례가 생기지 않도록, 실제 인증 시기와 세금 납부(감면) 등의 시기를 잘 조정해야 한다는 의견도 제시되었다.

금융적 지원에는 동의하나 도시의 규모나 위치, 성장/쇠퇴 여부 등에 따라 보조금 및 세금공제의 범위를 다르게 설정할 필요가 있다는 의견도 있었다. 지원대상과 범위에 대한 기준은 있겠으나 지자체의 부담이 발생할 수 있는 사항에 대해서는 관련 조건을 명확히 할 필요가 있음을 주장하였다. 한편으로는, 노후계획도시 정비대상은 지구단위계획에서 특별히 어느 수준을 더 맞추고, 나머지 추가 사항에 대한 인센티브를 어떻게 지정할 것인지 검토하는 것이 바람직하다는 의견도 제기되었다.

또한, 장기적인 관점에서는 조성 후 약정기간 등 사후관리 측면의 문제도 중요하다는 지적이 있었다. 실제로 유지관리나 수선비용의 문제 등으로 신축 시에는 설치를 했지만 입주 후에는 사용하지 않는 경우도 많기 때문이다. 따라서 건축물의 탄소저감 기능을 꾸준히 유지하는 주체에게는 매년 검증을 통해 재산세 대폭 감면 등의 혜택을 주는 반면, 약정 성능에 못 미치는 경우에는 개선 및 환수 등을 포함한 관리방안을 마련할 필요가 있다는 의견이 많았다. 분양으로 갈음하는 아파트의 경우 검증 후 관리비, 재산세 등을 감면해 줌으로써 소유주가 직접적으로 혜택을 체감하고, 꾸준히 탄소 중립 노력을 할 수 있도록 유도할 필요가 있겠다.

[표 5-3] 인센티브 제공(금융 지원) 관련 주요 의견 및 관련 법령

구분	주요 내용	관련 법령
보조금, 세금공제 등 지원	- 감축요인 도입 시 보조금 지원 범위 확대	-「노후계획도시정비법」 제21조(비용의 보조 또는 융자) -「탄소중립기본법」 제29조(탄소중립 도시의 지정 등), 제31조(녹색건축물의 확대), 제32조(녹색교통의 활성화) 등 -「녹색건축물조성지원법」 제25조(녹색건축물 조성사업에 대한 지원·특례 등), 제26조(금융의 지원 및 활성화) -「지방세특례제한법」 및 동법 시행령
	- 준공 이후 운영단계에서 배출량 저감과 연계한 세금공제	
	- 공사비 증가분을 고려한 대출시 추가 지원, 기존대비 세금 공제 확장	
	- 감축량에 대한 크레딧 인증, 거래 지원 및 허용	
	- 에너지 효율 등급이 높은 건축물에 대하여 추가적인 세금 공제 혜택을 부여	
	- 노후계획도시 정비법에 에너지 효율화 사업에 대한 금융 지원 의무화 조항 추가	

출처: 연구진 작성

이외 추가적인 인센티브로 탄소배출 감축량에 대한 크레딧 발행 및 인증 시스템 구축에 대한 의견도 제시되었다. 재건축 시 탄소저감 요소 도입을 통해 감축한 탄소배출량에 대하여, 크레딧 인증과 함께 배출권 거래 제도를 허용 및 지원하기 위한 정책적 방안 마련 필요성을 언급하였다.

한편, 인센티브 제공 부문과 관련해 여러 전문가들은 중복 인센티브에 대한 고려가 필요하다는 의견을 제시하였다.

• 인증제도

인증제도 부문에 대해서는, 인증 취득을 위해 요구되는 비용에 대한 적극적 지원이 필요하며 타 인센티브와의 연계성을 통해 정책효과를 높일 수 있다는 의견이 많았다. 또한, 기존의 인증 제도를 간소화하고 지원 체제를 구축할 필요가 있으며, 국제 표준과의 교차 인증을 추진하여 감축 성과에 대한 크레디트를 부여하는 등 민간의 적극적인 참여를 유도하기 위한 노력이 필요하다는 의견도 제시되었다.

노후계획도시 재건축 시 특별정비구역에서 제로에너지건축물 인증 대상을 확대하고, 최소 등급을 상향하여 전반적인 건축물 에너지 효율을 높이거나, 지역 녹색건축물 조성 계획 수립 시 노후계획도시 대상 지역 내 기본계획, 정비계획 내용과 연계하여 체계적인 지원을 강화하는 방안에 대한 의견도 있었다.

제로에너지건축물 인증 의무화와 관련된 의견도 많았다. 인증 의무화는 아파트의 분양가 상승을 초래할 수 있으므로 분양가 상한제에 대한 검토가 선행될 필요가 있다고 당부하였다. 이와 함께, 탄소배출 저감요소 도입을 통해 발생하는 입주 및 거주자에 대한 혜택이 명확하게 제시되어야 한다고 언급하였다. 또한, 현재 제로에너지 건축물 5등급이 의무화되어있는 노후계획도시 재건축 단지들에 대하여, 향후 더 높은 수준의 등급을 인증할 경우 인센티브를 어떻게 제공할 것인지 등 인증 등급에 따른 인센티브 차등 적용에 대한 논의도 필요하다는 의견도 제시되었다. 앞에서의 인센티브 제공 부문에서도 비슷한 의견이 제시되었으며, 금융 지원 부문과 연계하여 방안을 마련할 필요가 있겠다.

한편, 건축물의 에너지 효율과 관련하여 외단열, 외부차양, 자연환기 등의 패시브 기술 요소나 옥상녹화 및 벽면녹화 부문은 각종 인증(제로에너지 등)에서 정량적 평가를 받지 못해 실제 적용사례가 거의 없음을 언급하여, 이러한 항목에 대한 평가와 인증을 유도할 수 있는 방안을 함께 마련해야 한다는 의견도 제시되었다.

시간의 흐름에 따라 건축물의 탄소배출 저감 성능이 떨어질 수 있으므로 이에 대한 관리 장치 마련이 필요하다는 의견 등이 제시되었다.

[표 5-4] 인증제도 관련 주요 의견 및 관련 법령

구분	주요 내용	관련 법령
제로에너지 건축물 인증 등	- 인증 취득에 필요한 비용 지원(취득세/재산세 등 감면)	-「노후계획도시정비법」 -「녹색건축물조성지원법」 제17조(제로에너지건축물 인증)
	- 특별정비구역 내 제로에너지건축물 인증대상 확대, 최소등급 상향	-「탄소중립기본법」 제31조(녹색건축물의 확대) 등

구분	주요 내용	관련 법령
	- 에너지 자립률 이외에 다양한 저감요소의 복합 활용 시 추가/중복 인센티브 제공	- 「건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증에 관한 규칙」
	- 제로에너지 건축물 시범(특화)사업 추진 및 인증 의무화	- 「주택법」 제38조(장수명 주택의 건설기준 및 인증제도 등)
	- 인증 등급에 따른 인센티브 차등 부여	
	- 장수명주택인증 기준의 강화 및 적용	

출처 : 연구진 작성

• 공간 확보

재건축 시 단지 내 공간 확보에 대해서는 다수의 전문가들이 공감대를 형성하였다. 신재생에너지 발전 관련 설계·시공요소 등 기술이 발전함에 따라 고려해야할 요소들을 미리 고려 및 검토하여 재건축 초기 단계에서부터 관련 공간을 선 확보할 필요가 있음을 강조하였다. 미래적 수요시설 조성을 위한 공간의 선 확보를 통해 관련 요소들의 적극적 도입을 유도하고, 이를 통해 탄소배출 및 에너지 사용량을 절감할 수 있는 등 그 당위성을 함께 언급하였다. 한편으로는, 탄소중립도시 지정을 통해 탄소중립도시 조성 관련 공간 환경 사업에 대한 정부 지원을 연계 및 강화하고 대표적인 특화모델로 개발하는 방안도 제시하였다.

또한, 지구단위계획을 통해 각 세부 용도지역 및 세부 구역에 대한 설치 비율을 의무화하는 등 설치 의무와 공간 확보에 대한 새로운 기준과 규정을 마련해야한다는 의견도 함께 제기되었다. 탄소흡수 차원에서 단지 내 그린인프라 관련 공간 확보를 위해 녹지의 무비율 확대 및 탄소 흡수원 설치를 지원하는 법적 근거 마련 필요성도 언급되었다. 이와 함께, 용적률 등 앞에서의 인센티브 항목과 연계하여 탄소 저감이나 기후변화 대응 등을 위해 특정 공간이 소요되는 경우 이에 대한 일정 비율을 보상해주는 등의 방안도 검토할 것을 권장하였다.

[표 5-5] 공간 확보 관련 주요 의견 및 관련 법령

구분	주요 내용	관련 법령
관련 인프라 설치를 위한 단지 내 공간 확보	- 설치 의무에 대한 새로운 기준 및 규정 마련	- 「노후계획도시정비법」 및 「녹색건축물조성지원법」, 「탄소중립기본법」에 단지 내 탄소저감 시설 설치를 위한 공간 확보 의무화 조항 신설
	- 단지 내 자립률 개선을 위한 신재생에너지 발전 공간 선 확보 및 확대 필요	
	- 용적률 등과 연계하여 공간 확보에 대한 추가적 인센티브를 부여하는 제도의 수립	
	- 탄소중립도시 지정 및 지원, 탄소중립시설 유형 별도 신설	

구분	주요 내용	관련 법령
	- 단지 내 그린 인프라 설치를 통해 실거주자에게 인센티브가 제공되도록 설계	

출처 : 연구진 작성

□ 저감요소 도입을 위한 정책 연계방안

인센티브, 인증제도, 공간 확보 부문에서의 정책방안에 대한 전반적인 의견과 함께, 4장에서 최종 도출한 운영단계 탄소배출 저감요소(3개 부문, 19개 요소)를 재건축 과정에 적극적으로 도입하기 위해 연계·활용할 수 있는 정책 방안에 대한 의견도 살펴보았다.

신재생에너지 및 에너지 효율 건축물 항목에서는 15개 저감요소 모두 인증제도와 연계 가능성이 가장 높은 것으로 평가되었다. 재생에너지의 자체적 발전 및 사용, 건축물 에너지 소비 효율 증대 등을 통한 에너지 자립률 증대를 유도하고, 이에 대한 다양한 혜택을 제공할 수 있도록 관련 인증제도의 적극적 활용 방안을 마련할 필요가 있었다.

한편, 기후변화 적응 및 흡수원 확대 부문은 4개 저감요소 모두 공간 확보와의 연계성이 가장 높았다. 이는 재건축 시 단지 내 기술요소의 적용뿐만 아니라, 기후변화 적응 및 탄소흡수 관련 시설 설치를 위해 관련 공간이 선 확보될 필요가 있음을 시사한다. 재건축 단지 내 관련 시설/공간의 확보를 지원 및 유도하기 위한 관련 기준과 법적 근거 마련이 필요할 것으로 보인다.

[표 5-6] 탄소배출 저감요소 도입을 위한 정책 연계 가능성

구분	주요 저감요소	정책방안			
		1. 인센티브 제공		2. 인증제도	3. 공간 확보
		보조금, 세금공제 등	용적률 완화	제로에너지 건축물 인증 등	
신재생 에너지	5 태양광 발전	24.2%	11.3%	45.10%	19.4%
	9 지열에너지 활용	29.1%	9.1%	43.70%	18.2%
	10 바이오에너지 활용	31.9%	8.5%	38.30%	21.3%
에너지 효율 건축물	12 고성능 창호	24.4%	2.4%	70.70%	2.4%
	13 고기밀 시공	20.0%	5.0%	72.50%	2.5%
	14 패시브 외단열 시공	19.5%	7.3%	70.70%	2.4%
	15 외부차양	13.9%	11.1%	69.40%	5.6%
	16 자연채광	17.9%	10.7%	67.80%	3.6%
	17 자연환기	17.9%	7.1%	67.80%	7.1%

구분	주요 저감요소	정책방안			
		1. 인센티브 제공		2. 인증제도	3. 공간 확보
		보조금, 세금공제 등	용적률 완화	제로에너지 건축물 인증 등	
	18 고효율 보일러	23.8%	2.4%	71.50%	2.4%
	19 고효율 가전제품	25.0%	2.8%	72.30%	0.0%
	20 고효율 LED 조명	19.4%	2.8%	77.70%	0.0%
	21 열회수형 환기장치	22.7%	4.5%	70.50%	2.3%
	22 일조, 풍향 고려 건축물 배치	13.0%	17.4%	43.50%	26.1%
	23 에너지 효율 향상 시스템	20.5%	9.1%	61.30%	9.1%
	24 옥상녹화 및 벽면녹화	12.5%	27.5%	27.50%	32.5%
기후변화 적응 및 흡수원 확대	25 녹색공간 및 녹색기반시설	9.8%	24.4%	26.80%	39.0%
	26 도시농장(농업)	15.6%	21.9%	9.40%	53.1%
	27 빗물관리 인프라	18.4%	26.3%	15.80%	39.5%

출처 : 연구진 작성

3) 재건축 공동주택단지의 탄소배출 저감을 위한 정책 방향

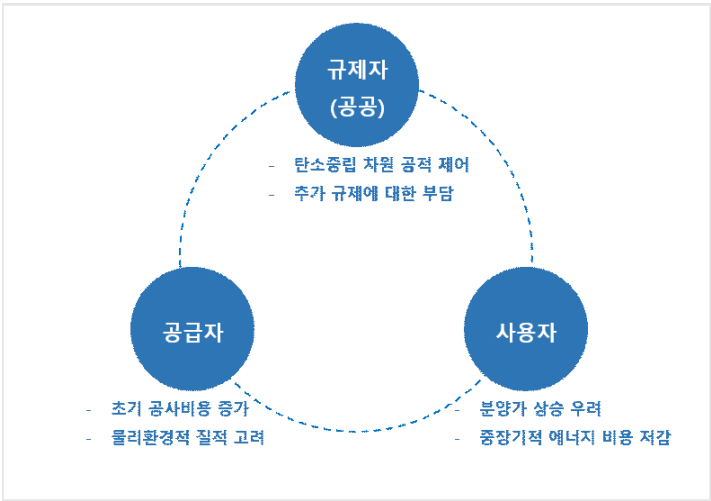
□ 이해관계자별 쟁점 및 정책 목표 설정

노후계획도시 중 특히 본 연구에서 시뮬레이션 대상으로 삼은 분당 등 1기 신도시에 대한 재건축은 기존 노후 공동주택 단지의 재건축이 향후 어떻게 나아가야 하는가에 대한 시사점을 제시해 주는 중요한 사례가 될 것이다. 「노후계획도시정비법」은 특례조항 등이 이용되는 사례이다. 그러나 용적률 특례로 대표되는 시장에서의 자율적 작동 유도와 본 연구에서 강조하는 탄소배출 저감요소 적용에 있어서는 다음과 같은 이해관계자별 쟁점사항의 차이점이 있을 것으로 예상된다.

먼저 규제자(Regulator)인 공공의 입장에서는 탄소배출 차원의 공적 제어에 대한 필요성은 인식하고 있으나, 탄소배출 저감요소의 도입을 도하기 위한 정책 매커니즘에서 추가 규제사항으로 작동할 수 있는 쟁점사항이 예상된다. 다음으로 공급자(Producer) 입장에서 탄소배출 저감요소의 도입이 초기 공사비용을 증가시키는 요인으로 작동할 수 있으며, 물리환경적 질적 요소를 고려하여 세밀하게 적용해야 하는 노력이 수반된다. 공급자 입장에서는 분양 등의 엑시트 시점까지의 관리에 초점을 맞추므로 건축물 사용 단계에 있어서의 탄소배출 저감은 별개의 문제로 인식하는 경향이 높아 쟁점사항으로

예상된다. 마지막으로 사용자(User) 입장에서는 분양가 및 자기 부담금이 증가할 수 있는 우려가 있으며, 중장기적으로 에너지 비용의 절감을 감안하더라도 경제적 비용의 측면은 쟁점사항으로 예상된다.

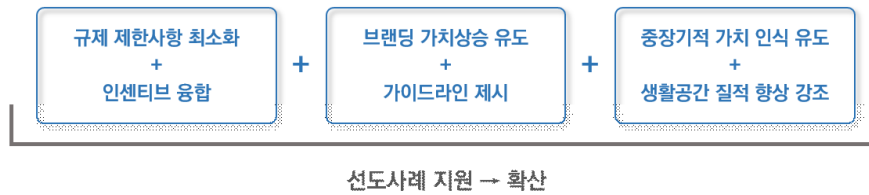
또한 본 연구에서 제시하는 생애주기별 탄소배출 저감요소를 효과적으로 도입하기 위해서는 위에서 제시한 세 주체별로 실행 가능한 정책으로 또 다른 규제를 제안하는 것보다 특별법 내 인센티브나 경제적 이익 실현과 같은 긍정적 유도 정책이 가장 효과적이라고 판단된다. 재건축 재건축의 특성상 민간의 적극적인 참여가 필요한 시장에서 현재의 규제들에 더해서 또 다른 강제적 규제사항을 두는 것은 시장의 반발만 불러올 뿐 실질적인 정책도입 효과가 없을 것으로 예상되기 때문이다.



[그림 5-2] 이해관계자별 쟁점사항
출처 : 연구진 작성

따라서 노후계획도시 재건축 공동주택단지의 탄소배출 저감을 위하여 다음의 정책 추진 방향을 제안한다.

- ① 규제자 측면: 규제 제한사항 최소화, 인센티브 융합
- ② 공급자 측면: 브랜딩 가치 상승 유도, 가이드라인 제시
- ③ 사용자 측면: 중장기적 가치 인식 유도, 생활공간의 질적 향상 강조



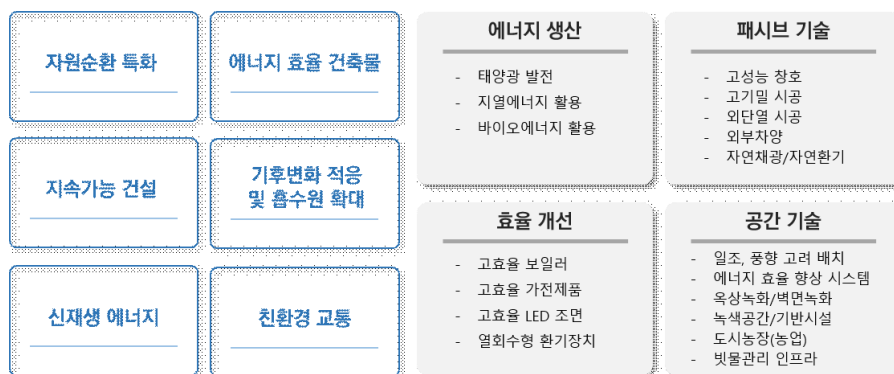
[그림 5-3] 정책 추진 방향 제안

출처: 연구진 작성

□ 노후계획도시 재건축시 탄소배출 저감요소의 적극적 적용 유도

본 연구에서 사례 조사 및 시뮬레이션 등에 적용한 탄소배출 저감요소와 기술들을 적극적으로 노후계획도시 공동주택단지의 재건축시 적용할 수 있도록 유도할 필요가 있다. 탄소배출 저감 요소의 적극적 도입을 위해 자원순환 특화를 위한 폐기물의 저감 관리나 지속가능 건설을 유도하는 탄소배출 저감용 자재 및 재활용, 신재생 에너지의 적극적 도입을 장려할 수 있다. 또한 에너지 효율 건축화를 위한 패시브 및 액티브 기술의 적용, 에너지 효율 향상 시스템의 적용 등을 장려할 수 있으며, 기후변화 적응 및 흡수원 확대를 위한 녹색공간 조성 및 빗물관리 인프라 등의 시설 설비 등을 장려할 수 있다. 도시 교통 이용 행태에 있어서도 친환경 교통수단 도입 등도 간접적 수단으로 장려할 수 있다.

이러한 저감요소의 도입을 위한 활동으로 인허가 시의 심의나 가이드라인을 통한 유도 및 포상 등의 브랜딩화를 통한 유도, 정책 홍보 및 캠페인 등을 통한 유도 활동이 포함될 수 있다.



[그림 5-4] 탄소배출 주요 저감요소 및 기술

출처: 연구진 작성

2. 관련 정책 연계 및 제도 개선 방안

앞서 설정한 '탄소배출 저감을 통한 지속가능한 도시 공간 관리 향상'의 정책 목표 달성을 위한 여러 실천 가능한 정책 방안을 정리하였다. 구체적으로, 노후계획도시 재건축시 탄소배출 저감요소의 적극적 도입을 유도하기 위한 정책적 아이디어를 ① 인센티브 제공, ② 인증제도 활용, ③ 공간 확보의 총 세 가지 항목으로 구분하여 각 항목에서 관련 법령 내 개선방안이나 캠페인, 가이드라인 등의 방법으로 추진하는 방안을 제안하였다.

1) 인센티브 제공 방안

□ 용적률 완화

에너지 소비량 및 탄소배출 감축 요인 도입과 연계하여 용적률 완화 인센티브를 부여하거나 조건부로 완화하는 방안을 제시할 수 있다. 이를 위해서 용적률 완화를 인센티브로 사용하되 보조금/세금공제 등 금전적인 지원책과 연계하여 활용하는 등의 방법들이 제시될 필요가 있다.

용적률 완화를 인센티브로 부여하기 위해서는 먼저 기본계획상 기준 용적률을 낮추어 인센티브 용적률과 격차가 커지도록 계획하는 것이 선행되어야 한다. 과도한 용적률 인센티브가 되지 않도록, 기준 용적률을 높지 않게 설정한 후 탄소배출저감 및 제로에너지 건물로 재건축 시 부여하는 인센티브 조항을 신설할 필요가 있다. 또한 추가 용적률 부여 조건으로 탄소배출 저감을 위한 추가적인 개발 부담금 부여 방안을 고려해 볼 수 있다. 이에 대한 대안에 대한 예시는 다음과 같다.

- 「노후계획도시정비법」 제7조(기본계획의 내용), 제12조(특별정비계획의 수립) 내 탄소배출 저감을 위한 계획 내용 포함
- 「노후계획도시정비법」의 제25조(건축규제의 완화 등에 관한 특례) 조항인 150% 상한 용적률과 「녹색건축물 조성 지원법」 제 15조의 15% 완화조건의 활용
 - 대안 1 : 기준 용적률을 135%로 규정하고 탄소배출저감(흡수원 등) 및 제로에너지 건물로 재건축 시 150%로 상향시켜주는 인센티브 조항 신설
 - 대안 2 : 추가 용적률 부여 시 탄소배출저감 요소 도입을 위한 추가적인 개발 부담금 부여 방안 신설

[표 5-7] 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」 개선(안) 예시

법	내용	
	기존	개선예시
노후 계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법	제7조	기본계획의 내용
	① 기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다. 12. 저탄소 녹색도시로의 전환을 위한 추진계획 13. 건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등 재활용 촉진계획	〈신설〉 14. 대상 지역의 에너지소비량 및 온실가스 배출량 15. 해체, 건설, 운영 단계별 탄소 배출저감계획
	제12조	특별정비계획의 수립
	① 특별정비계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다. 17. 녹색건축 등 건축물 에너지효율화 계획 18. 건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등에 관한 계획	〈신설〉 19. 대상 지역의 에너지소비량 및 온실가스 배출량 20. 해체, 건설, 운영 단계별 탄소배출저감계획
	제25조	건축규제의 완화 등에 관한 특례
	① 지정권자는 특별정비구역에서 다음 각 호의 사항에 대하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 완화된 기준을 적용할 수 있다. 다만, 제3호의 경우 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제78조 및 관계 법령에 따른 용적률 최대한도의 100분의 150을 초과할 수 없다. 1. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제76조에 따른 용도지역·용도지구에서의 건축물의 건축 제한(중략) 5. 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」 제14조에 따른 도시공원 또는 녹지의 확보기준 ② 특별시장·광역시장·특별자치시장·특별자치도지사·시장 또는 군수는 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제40조의2제1항에도 불구하고 특별정비구역 일부를 같은 법 제40조의2에 따른 입지규제최소구역으로 지정 또는 변경할 수 있다. ③ 제2항에 따른 입지규제최소구역의 지정 등에 관한 사항은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제40조의2제2항부터 제5항까지를 준용한다.	〈신설〉 6. 「녹색건축물조성지원법」 제15조 「에너지절약설계기준」 제17조에 따른 건축기준 완화

출처: 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」(2023.12.26. 법률 제19847호) 발췌하여 연구진 작성

또한 본 연구에서 제시하는 생애주기별 감축 요소 패키지를 도입하여 제로에너지 건축물 5등급 이상을 달성할 시, 다음의 유관 법령에서 제시하는 항목을 모두 달성한 것으로 인정해주는 것이 필요하다. 이는 노후계획도시의 경우 관련 인센티브를 하나로 일원화하고 사후에도 이에 대한 이행여부를 확인하기 위해 필요하다. 또한 이와 같은 건축기준이나 용적률 완화는 노후계획도시정비법에서 정해놓은 상한선을 초과할 수 없는 것을 명시할 필요가 있다.

- 「건축법」 제5조의2(적용의 완화): 건축물의 에너지 이용과 관련된 성능 향상 시 건축기준의 완화를 규정
- 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제78조(용도지역의 건폐율) 및 제78조의2(용적률 완화)
: 에너지 절약형 건축물에 대한 용적률 완화를 규정
- 「녹색건축물 조성 지원법」 제15조(건축기준의 완화 등): 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증을 받은 건축물에 대해 건축 기준의 완화를 규정
- 「녹색건축물 조성 지원법」 및 동법 시행령, 건축물의 에너지절약설계 기준 [별표 9]
- 「도시 및 주거환경정비법」 제55조(건축규제의 완화 등): 정비사업의 경우 에너지 절약형 건축물에 대한 건축 기준 완화를 규정
- 각 지방자치단체의 조례: 많은 지방자치단체들이 그린 리모델링과 관련된 용적률 완화에 대한 세부 사항을 조례로 정함(ex. 성남시 건축 조례)

□ 보조금, 세금공제 지원

탄소배출 감축 패키지 도입 시 보조금 지원 범위를 확대하는 방안이 있다. 여기에는 공급자에게 저리 용자 제공 및 이자 비용 지원 등에 대한 구체적인 방안이 포함된다. 보조금은 각 지자체별 조례로 그 근거를 마련하되 중앙정부의 예산과 매칭하여 제공하는 방안이 필요하다. 특별법에 의한 사업 추진 시 발생하는 개발이익을 활용하여 별도의 재원이 마련될 필요가 있다.

또한 재건축 단지의 준공 후 본 연구에서 제시한 운영단계 배출량 저감과 연계한 세금공제 혜택을 주는 방안이 있다. 이 방안은 일정기간 적용하되, 인증등급이 높은 경우 공제기간이 길어지도록 설정하는 것이 필요하다. 특히 제로에너지건축물 5등급이 의무화 되

어 있으나 그 이상 등급의 건축물을 장려하기 위한 공사비 증가분을 고려한 대출시 추가 지원, 기존대비 세금 공제 확장 정책이 필요하다. 단 조성 후 약정기간 사후관리, 약정 성능에 못 미치는 경우, 개선 및 환수 등을 포함한 관리방안도 필요하다.

생애 주기별로 먼저 해체나 건설단계에서는 자재의 재활용이나 친환경 건축 자재 사용에 대한 세금 감면 적용을 통해 공급자에 대한 경제적 이익을 실현 시켜주는 것이 필요하다. 다음으로 운영 단계에서는 장기적인 관점에서 모니터링을 통해 효과적으로 탄소배출량을 감축한다면 그 감축량에 대한 크레디트를 인증해주는 방안도 고려해 볼 수 있다. 이는 탄소배출 거래제를 활용하여 수익원을 창출하고 제도를 마련하여 특별법을 근거로 거래 지원 및 허용하는 방안을 제시할 수 있다.

이상의 내용을 실행하기 위해서는 이와 관련된 다음의 법령들에 대한 조문과의 연계성을 특별법에 명시할 필요가 있다.

- 「녹색건축물조성지원법」 제25조(녹색건축물 조성사업에 대한 지원·특례 등): 녹색건축물 조성 사업에 대한 국가 및 지방자치단체의 보조금 지급
- 「녹색건축물조성지원법」 제26조(금융의 지원 및 활성화): 녹색건축물 촉진을 위한 금융 시책 수립 및 시행
- 「탄소중립기본법」 제29조(탄소중립 도시의 지정 등), 제31조(녹색건축물의 확대), 제32조(녹색교통의 활성화) 등
- 「지방세특례제한법」 및 동법 시행령

단 재산세 감면과 같은 취득등록세 인센티브는 인증완료 시기와 감면받는 시기가 어긋나는 경우가 많아서 지원 무효 사례가 많은 만큼 이에 대한 보완이 필요하다. 또한 유지관리비용, 수선비용 등의 문제 등으로 탄소 저감 건축물을 보유하고 꾸준히 탄소 저감 기능을 유지·보수하는 단지 주체에게는 매년 검증을 통한 지자체 자원의 재산세 대폭 감면하는 혜택도 고려해 볼만 하다. 노후계획도시 재건축 아파트 단지를 선도 사례로 삼아 탄소배출 저감에 대한 검증 절차를 체계화할 필요가 있다. 탄소배출 저감 노력을 성실히 이행한 자는 관리비, 재산세 등의 직접적인 경제적 혜택을 줌으로써 소유주에게 탄소 저감의 혜택을 피부로 느낄 수 있게 하는 것이 정책 실효성을 높이는데 중요하다.

2) 인증제도 활용 방안

□ 제로에너지 건축물 인증제도 활용

현재 노후계획도시 재건축 단지들은 신축 시 제로에너지 건축물 5등급이 의무화 되어있다. 하지만 이와 같은 건축 규제 사항은 공사비 상승으로 이어지기 때문에 공급자 입장에서는 사업성이 낮아지는 문제가 있다. 또한 사용자인 주민 입장에서는 분양가 상승으로 인한 자금조달 문제 등에 대한 하나의 장애 요인으로 인식되고 있는 상황이다. 하지만 초기 비용은 에너지 요금 절약을 통해 회수가 가능하므로 이와 같은 내용을 이해관계자에게 제시하여 설득하는 것이 중요하다.

현재의 ZEB 5등급 의무화 기준은 현재 기준으로 달성할 수 있는 탄소배출량에 대한 최소한의 기준이며 향후 국가적 탄소중립을 달성해야 하는 2030년과 2050년에는 현행 5등급보다 더 높은 수준의 등급이 의무화된다. 따라서 이와 같은 상황에 대비하기 위해서는 이와 같은 인증제도를 더 적극적으로 강화할 수 있는 인센티브가 필요가 있다. 예를 들어 재건축 시 의무화인 5등급 보다 더 높은 4등급 이상의 인증을 취득한 경우 추가적으로 취득세 및 재산세 등을 감면 해주고 공급자에게는 소득세 및 법인세 공제해주는 방안이 필요하다. 또한 건설 당시 인증 취득에 필요한 부대비용을 공공인 지자체나 중앙정부 차원에서 지원해 줄 필요가 있다. 이와 같은 내용은 이미 「녹색건축물 조성지원법」 17조 등에 명시되어 있는 만큼 노후계획도시정비법에 이와 같은 조항과 연계 할 수 있는 내용만 추가해 주는 것만으로도 실현 가능할 것이다. 또한 「노후계획도시정비특별법」 시행령에 「녹색건축물 조성지원법」의 인증 획득 시 가능한 추가적인 인센티브를 명시하는 것도 고려할만 하다.

- 「녹색건축물 조성지원법」: 건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 관련 조항 : '노후계획도시의 경우 특별법 내 지침을 먼저 준용한다'라는 조항 신설
- 「녹색건축물 조성지원법」 제17조(제로에너지건축물 인증) : 인증대상 확대, 최소등급 상향

이밖에 「탄소중립기본법」의 제31조의 저감요소 중 본 연구에서 제시한 저감 패키지 요소를 포함시켜 추가적인 인센티브를 제공하거나 「건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증에 관한 규칙」에서 제로에너지 건축물 시범사업 중의 하나로 노후계획도시 단지를 선정하여 관련 사업을 추진하는 것도 제안할 수 있다.

- 「탄소중립기본법」 제31조(녹색건축물의 확대) 등 : 다양한 저감요소를 복합적으로 도입할 경우 추가 또는 중복 인센티브 고려
- 건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증에 관한 규칙 : 제로 에너지 건축물 시범(특화)사업 추진, 인증 의무화

이와 연계한 노후계획도시정비법의 시행령 중 건축규제 완화 등에 관한 특례 적용 범위에 본 연구의 탄소절감패키지에 대한 내용을 추가하는 방안도 고려할만 하다.

[표 5-8] 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」 시행령 개선 예시

법	내용	
	현행기준	개선방안
노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법 시행령	제26조 건축규제 완화 등에 관한 특례의 적용범위	
	① 시장·군수등은 법 제25조제1항에 따라 다음 각 호의 사항에 대하여 해당 호에서 정하는 완화된 기준을 적용할 수 있다. 1. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제76조에 따른 용도지역·용도지구에서의 건축물의 건축 제한: 같은 법 시행령 제30조제1항 각 호 안에서 세분된 용도지역 사이에서만 다른 용도지역에서 건축할 수 있는 건축물의 건축을 허용할 수 있다. (중략) 5. 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」 제14조에 따른 도시공원 또는 녹지의 확보기준 가. 특별정비구역의 면적이 50만 제곱미터 미만인 경우: 도시공원 또는 녹지 확보기준을 적용하지 않을 수 있다. 나. 특별정비구역의 면적이 50만 제곱미터 이상인 경우: 도시공원 또는 녹지 확보기준을 2분의 1 범위에서 완화할 수 있다.	신설 6. 「녹색건축물조성지원법」 제15조 「에너지절약설계기준」 제17조에 따른 인센티브

출처 : 「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」(2023.12.26. 법률 제19847호) 발췌하여 연구진 작성

이밖에 본 연구에서 제시하는 감축패키지를 적용하여 그 효과를 입증할 시 노후계획도시정비법 상 기존 도시개발 시 필수적으로 해야 하는 심의과정에 대한 심의를 통과하는 것으로 해주어 사업실행과정을 간소화 해주는 방안이 있다. 특히 특별법 제24조에 명기된 심의 사항 이외에 23년부터는 탄소중립법에 근거한 기후영향평가에 대한 심의가 의

무화 되었다. 따라서 본 연구에서 제시하고 있는 패키지를 적용한 건축물로 재건축 할 시에는 이와 같은 심의를 통과한 것으로 인정해 주는 등 과 같이 관련 인센티브 조항을 고도화 하는 방안이 필요하다.

3) 탄소배출저감 및 흡수원 관련 시설 설치를 위한 단지 내 공간 확보 방안

재건축 단지 내 운영단계에서 액티브 방식의 탄소배출저감 전략으로 자립률 개선을 위한 신재생에너지 발전을 위한 공간의 선제적 확보 및 확대를 위한 방안이 필요하다. 이는 설치 의무에 대한 새로운 기준 및 규정을 마련하기 위해 환경부에서 주관하는 탄소중립도시 지정 및 지원, 탄소중립시설 유형의 별도 신설도 고려해 볼만 하다. 본 연구에서 제시한 단지 내 그린인프라 설치를 통해 실거주자에게 인센티브가 제공되도록 설계하는 것으로 공동주택 단지 내 옥상, 체육시설, 주차장 등에 태양광 발전시설을 설치하고, 공용전기로 적극 활용하게 하는 방안이 필요하다. 이를 위해서는 지구단위계획 수립 시 공간 확보를 위해 세부 용도지역 및 세부 구역에 대해 설치 비율을 의무화하는 방안도 고려해 볼 수 있다. 또한 재생에너지나 재난방지 등을 위해 지하 공간 등이 소요되는 경우 그에 대한 일정 비율을 용적률 인센티브로 추가하는 방안도 필요하다.

이를 위해서는 「노후계획도시정비특별법」에 단지 내 탄소저감 시설 설치를 위한 공간 확보 의무화 조항 신설 또는 가이드라인을 제시하는 방안이 있다.

- 「노후계획도시정비법」 제7조(기본계획의 내용), 제12조(특별정비계획의 수립), 제25조(건축규제의 완화 등에 관한 특례) 조항에 해당하는 시행령 마련
 - 「녹색건축물 조성 지원법」의 제15조(용적률 완화), 제17조(제로에너지건축물 인증), 제18조(건축물 에너지성능정보 공개), 제24조-제26조(녹색건축물 조성 시범사업 및 지원)와 관련된 내용과 연계
 - 특별법 하위 지침 및 기준으로 활용
- 「노후계획도시정비특별법」 시행령에 단지 내 탄소저감 시설 설치를 위한 공간 확보 의무화 조항을 신설하고 시행규칙에 세부 가이드라인 제시
 - 재생에너지 확보를 위한 패널 및 모듈 확장 및 교체 용이성을 위한 건축물 입면 및 옥상공간 활용에 관한 사항
 - 공간단위를 단지, 근린 단위 등으로 구분하고 단위별 용량을 감안한 폐기물 처리, 교통 처리, 흡수원 설치, 보행교통 등을 고려한 공간 확보 및 인센티브 조항 신설

도시단위에서는 「탄소중립기본법」상 기본계획 내용에 탄소중립도시를 조성할 때 도시 또는 단지 차원에서 유보지 개념의 공간 확보를 의무화하는 내용을 신설할 필요가 있다.

- 「탄소중립기본법」: 단지 내 공간 확보 내용 신설
 - 강제력은 없으나 지침으로 활용할 수 있는 친환경주택건설기준, 제로에너지 설계 가이드라인, 노후계획도시 재건축 가이드라인 등에 공간 확보와 관련된 내용을 추가하여 제시할 필요가 있다.
- 에너지절약형 친환경주택의 건설기준, 공동주택의 제로에너지 설계가이드라인 활용 및 보완
 - 소형재생에너지 시설, 폐기물 처리시설, 흡수원, 스마트팜 등으로 활용될 공간 확보 방안 마련
 - 주차 공간 확보 및 향후 미래 자율주행, 설비 수요를 감안한 유연성 있는 공간 활용 가능하도록 명문화

[표 5-9] 노후계획도시 탄소배출저감을 위한 가이드라인(안)

공공성 지표	분석항목	기본방향 및 가이드라인
탄소배출 저감	신재생 에너지	- 태양광, 지열에너지, 바이오에너지를 활용할 수 있는 공간을 단지 내 또는 건축물 단위에서 확보한다.
	에너지 효율 건축물	- 패시브 방식의 고성능 창호, 고기밀 시공, 외단열 시공, 외부차양, 자연채광, 자연환기를 고려한 설계를 해야 한다. - 액티브방식의 고효율보일러, 고효율 가전제품, 조명, 열회수형 환기장치를 설치한다. - 일조 풍향 등을 고려하여 건축물을 배치하고 이에 대한 영향평가를 실시한다. - 에너지 효율 향상 시스템을 적용한다.
	기후변화 적응 및 흡수원 확대	- 옥상 및 벽면 녹화를 할 수 있는 설비 및 공간을 설계시 반영하여야 한다. - 녹색기반시설, 도시농장, 빗물관리 인프라로 활용될 수 있는 공간을 지하 또는 지상에 확보해야 한다.

주) 김성준 외. (2023). p138.의 연구의 결과로 제시한 '노후계획도시 재건축 기본방향 및 가이드라인(안)'에 추가되는 내용으로 탄소배출 저감에 대한 공공성 지표로 제시함
출처 : 연구진 작성

제6장 결론

- 1. 연구 요약 및 연구의 의의
 - 2. 연구의 한계 및 후속연구 제안
-

1. 연구요약 및 연구의 의의

1) 연구요약

본 정책 연구는 전 세계 도시들이 지속 가능한 도시로 전환하기 위해 도시 설계 측면에서 구체적인 전략을 요구하고 있는 상황에서 한국의 탄소중립 관련 정책 및 그 한계에 대해 논의하기 위한 연구 중의 하나이다. 특히 80-90년대에 건설된 대규모 신도시들의 재정비가 필요한 시점에서, 정부가 추진 중인 노후계획도시의 재정비, 재건축 정책이 본격적으로 민간에 의해 진행되는 가운데 탄소중립이라는 큰 목표를 달성하기 위한 대응의 필요성 차원에서 수행되었다.

노후계획도시라 명명된 초기 신도시들은 재건축 과정에서 많은 추가적인 탄소 배출이 예상되며, 이에 대한 대응책이 필요하다. 에너지 효율화와 탄소 배출 저감이 필수적인 상황에서, 국토교통부는 공공주택에 대해 제로에너지 인증을 의무화하는 등의 기준을 강화하고 있지만, 여전히 구체적인 실행 계획이 부족하다. 노후계획도시들이 탄소중립 도시로 전환되기 위해서는 기술적 측면뿐 아니라 정책적 대안 마련이 절실하며, 건물의 생애주기 전반에 걸친 탄소 배출 저감을 유도하기 위한 정책 수단이 필요한 상황이다.

연구의 전반부에서는 노후계획도시의 탄소배출 저감과 관련된 문헌과 정책들을 검토하였다. 이를 요약해보면 다음과 같다.

건축물에서 발생하는 탄소는 건축물의 운영단계에서 사용 시 배출되는 운영탄소와 건

축자재 생산, 운송, 건축, 시공, 수선 및 폐기 과정에서 발생하는 탄소를 구분된다. 건축물의 생애주기 단계별로 탄소배출량 비중을 살펴보면 대체적으로 건설단계에서 30% 운영단계에서 70% 내외의 탄소가 배출되며, 건설 폐기물의 재활용을 통해 약 0~2%의 탄소배출을 감축할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 생애주기별로 모두 탄소를 감축하려는 노력이 중요하다. 그리고 제로에너지건축물에서는 냉·난방 에너지요구량을 최소화하는 패시브 기술, 에너지소비량을 최소화하는 액티브 기술, 신·재생에너지 생산기술, 건물에너지 관리시스템 등 다양한 요소기술의 활용이 필요하다.

또한 운영탄소 감축에서 신·재생에너지를 생산하는 것이 에너지 자립률을 높이는 데 필수적이다. 따라서 건축물에 단열 등 패시브 시스템과 고효율보일러 등 액티브시스템 요소기술을 설치하는 것과 신·재생에너지 생산까지 고려하는 것이 필요하다. 신·재생에너지 생산 시스템으로는 태양광발전시스템이 가장 활용도 및 경제성이 높은 것으로 선행 연구에 공통적으로 언급되고 있으며, 지붕에 우선적으로 설치하고 필요시 입면에 건축물일체형 시스템을 설치하는 것이 경제적인 것으로 나타났다.

현재 정부는 탄소중립기본법, 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 기본계획에 건물 부문 감축목표를 설정하고 있다. 노후계획도시의 탄소배출과 관련된 법령을 살펴보면 「녹색건축물 조성 지원법」, 제로에너지 건축물 인증제 등을 명시하고 있으며, 재건축 건축물에는 제로에너지 건축물 5등급이 의무화 적용이 되고 있다. 또한 「노후계획도시정비 및 지원에 관한 특별법」에서는 기본계획 수립 시 ‘저탄소 녹색도시로의 전환을 위한 추진계획’과 ‘건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등 재활용 촉진계획’을 포함하여야 하며, ‘녹색건축 등 건축물 에너지효율화 계획’과 ‘건설폐기물의 친환경적 처리 및 순환골재의 사용 등에 관한 계획’을 포함해야 함을 명시하고 있다.

다음으로 노후계획도시의 탄소배출 저감을 위해 벤치마킹 할 수 있는 관련 정책 및 기술, 계획기법을 살펴보았다. 이는 정책 및 기술, 계획기법들 중 그 저감 효과가 구체적인 숫자로 검증된 요소들을 선별하여 본 연구의 3장에서의 실증단계에서 적용하여 감축량을 추정하기 위함이다. 그 결과를 요약해보면 다음과 같다.

먼저 국내외의 탄소배출 저감 관련 정책 중 친환경 건축물 인증 프로그램은 여러 국가에서 운영되고 있으며, 실제로 건물의 에너지소비량과 온실가스배출량을 줄이는 데에 효과가 있는 것으로 나타났다. 특히 건축물의 탄소배출과 관련된 해외의 정책은 크게 정부 주도 정책, 정부 정책 기반 민간주도 프로그램, 정책을 강제할 수단으로서의 법안으로 구분된다. 정부주도 정책의 경우 직접적으로 탄소배출을 감축하도록 인센티브나 벌금을 부여하거나(영국), 인증 시스템의 기준을 충족하도록 하고 있으며(중국), 영국의 경우

정책의 대상이 대규모 에너지 집약적 조직으로 특정되어 있어 정책을 적용하거나 효과를 측정하기에 용이한 것으로 나타났다.

다음으로 사례 분석에서 도출된 기술 및 계획기법을 구분하고, 재건축 단지의 특성을 고려하여 재건축시 적용 가능한 기술을 에너지 전환 측면, 흡수원과 관련된 기술, 자원순환, 관리 측면에서 분류하였다. 이와 같은 기술이나 정책들은 넓은 범위에서 전 세계적으로 폭넓게 추진되는 것이나 이를 모두 노후계획도시 재건축 단지에 적용하는 것은 무리가 있다. 따라서 단지 스케일을 넘어서는 도시 단위에서의 계획기법, 물리적인 환경 조성 외의 계획기법은 제외하였고, 향후 재건축 단지에 적용할 필요성이 있다고 판단되는 계획기법은 포함시켰다.

연구의 중반부에서는 분당의 아파트 건축구조 및 단지설계에 따른 에너지 소비량 예측 모델을 구축하고, 이 모델을 통해 향후 재건축 시 용적률 150% 증대에 따라 발생할 것으로 예상되는 에너지 소비 총량 및 탄소 배출량 증가를 추정하였다. 그리고 선행연구 및 사례에서 도출된 기술 등을 적용하여 에너지 소비 총량 및 탄소 배출량의 변화를 추정함으로써, 이들이 얼마만큼의 탄소배출 저감 효과를 보일 수 있는지를 정량적으로 검증하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저 분당 아파트 단지 122개 단지를 대상으로 생애주기는 해체, 건설, 운영의 3단계로 나누고, 각 단계의 주기에 따라 탄소 배출 총량을 산출한 다음 감축 방안을 제안하였다. ‘해체 단계’, ‘건설 단계’에서는 단순 예상 물량을 통한 기초 적산 방식으로 간략하게 탄소배출량을 산정하였다. 그 결과 해체 단계에서는 약 24.06 kton-CO₂/m²의 이산화탄소가 배출되었으며 건설 단계에서는 최대 상향 용적률인 150%를 가정하여 산정한 결과 약 420.43kton-CO₂/m²의 배출량이 도출되었다.

본 연구에서 가장 주안점을 두는 ‘운영’ 단계에서의 탄소배출량은 에너지 소비량을 여러 시나리오별로 추정하여 산정하고 이를 절감할 수 있는 요소들을 적용하여 전후를 비교하였다. 이를 위해 건축물과 사회 경제적 특성을 변수로 한 관련 모형을 설정하였다. 이를 통해 추정한 결과 재건축 후 전기에너지는 73.9%, 가스에너지는 83.8%, 난방 에너지는 54.9% 가량 에너지 소비량이 증대될 것으로 추정되었다. 또한 전체 에너지 소비량은 62.1% 가량 증대될 것으로 산출되었다. 그리고 아파트 규모는 용적률, 연면적, 층수, 가구 수를 통틀어 86% 내외로 증가한 반면, 총 에너지 소비량 평균은 62.1%만 증대될 것으로 추산되었다. 또한 건물 수, 용적률, 건물 당 세대수(건물규모)는 단위면적당 에너지 소비량과 양(+)의 상관관계를 보이는 반면, 연면적, 대지면적 당 세대수(세대밀도), 세대 당 연면적(세대규모)은 단위면적당 에너지 소비량과는 음(-)의 상관관계를 보이는 것으

로 나타났다. 결과적으로 이와 같은 운영 단계에서의 이산화탄소 배출량 추정 결과 분석 대상 분당 아파트 단지는 용적률 150% 상향 조건의 재건축 후 총 558.61 kton 의 이산화탄소를 배출한 것으로 나타났다. 이는 이산화탄소 배출량 총합계 기준으로 했을 때 약 66.9% 증가된 수치이다. 또한 연면적 변화는 82.3% 증대, 에너지 소비량 변화는 62.1% 발생하였다. 전체 이산화탄소 배출량 중 전기 분야는 300.74 톤으로 나타나, 약 53.8 %의 비율을 보였고, 가스는 2.4 %, 난방은 43.8 %의 비율을 보였다.

다음으로 생애주기별 에너지 소비량 및 이산화탄소 배출량 감축량을 추정을 위해서 사례분석에서 도출한 기술요소의 가능성에 대해 전문가 FGI를 진행하였으며, 최종적으로 '자원순환 특화', '지속가능 건설', '신재생에너지', '에너지 효율건축물', '기후변화 적응 및 흡수원 확대'의 대분류 내에서 총 22개 저감요소를 도출하였다. 그리고 이러한 저감요소를 적용하기 위한 단계로써 에너지 소비량 감축 및 재생에너지 생산 요소 패키지를 '핵심', '확장', '종합'의 3가지로 제안하였다.

이와 같이 도출된 세 가지 패키지 요소를 적용하여 생애주기별 감축량을 추정한 결과는 다음과 같다.

먼저 '해체' 단계에서는 현재 건설폐기물 재활용 비율이 98.9%에 달하는 것에 근거하여 산정한 결과, 앞서 산출된 206.54 kton 의 해체 시 발생하는 이산화탄소 배출량은 폐기물 저감, 자재 재활용을 확대, 탄소배출 저감형 건설자재를 사용할 경우 모두 감축할 수 있는 것으로 나타났다. 다음으로 '건설(자재생산 및 시공)'단계에서는 앞서 산출된 6.57 kton의 자재생산 및 시공 시 이산화탄소 배출량의 25%인 1.64 kton의 감축효과가 있는 것으로 추산되었다. 마지막으로 '운영' 단계에서는 탄소배출저감 패키지 적용 전 558.61 kton의 이산화 탄소배출이 예상되며 핵심 패키지 적용 후 261.95 kton으로, 확장 패키지 적용 후 177.69 kton, 종합패키지 적용 후 167.68 kton 으로 각각 감축할 수 있을 것으로 추산되었다. 이를 정리하자면 재건축 발생하는 이산화탄소 중 본 연구에서 제시하는 핵심, 확장, 종합 패키지를 적용할 시 각각 약 53%, 68%, 70%의 이산화탄소 배출 저감이 가능함을 알 수 있다. 에너지원별로는 전기에너지의 경우 '핵심'패키지를 적용했을 때와 '확장'패키지를 적용했을 때 이산화탄소 배출량이 크게 감축되었다. 가스에너지 저감 요소는 연간 에너지 요구량을 절감하는 패시브 기술의 '외부차양'과 '에너지 효율 향상 시스템'이며 난방에너지는 '핵심' 패키지 적용 시 60% 이상, 액티브 기술이 추가된 '확장' 패키지 적용 시 핵심 패키지의 감축된 값에서 다시 70% 이상 추가 감축되는 것으로 나타났다. 또한 핵심패키지를 적용했을 시에는 분당 아파트 단지 전체가 ZEB 5 등급 기준 이하의 단위면적당 에너지 소비량을 요건을 충족하는데, 핵심패키지 적용만

으로 1차 에너지 소요량 측면에서도 전 단지가 ZEB 5등급을 달성하였고, 일부 단지는 4등급, 3등급까지 달성되어 핵심패키지만으로도 효과적으로 탄소배출을 저감할 수 있음을 입증하였다. 마지막으로 에너지 요금을 추산한 결과 재건축 이후 에너지 요금보다 핵심 패키지는 평균 34.71%, 확장 패키지는 평균 56.84%, 종합 패키지는 평균 58.21% 절감되는 것으로 나타났다.

연구의 후반부에서는 이와 같은 연구 결과를 근거로 재건축 공동주택단지의 탄소배출 저감을 위한 정책 방안을 도출하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저 본 연구에서 제시하는 정책 목표는 환경적, 사회적, 경제적 지속가능성 달성의 세 가지 측면에서 제안되었다. 이는 곧 '탄소배출 저감', '공공성 확대', '에너지비용 절감 및 안정적 에너지 공급' 측면에서 그 당위성을 가진다. 또한 정책 방향은 규제자인 '공공'의 입장에서는 규제 사항의 최소화 및 인센티브를 적절히 활용하는 것, '공급자' 측면에서는 자사의 브랜드 가치 상승을 유도하고, 공공이 제공하는 가이드라인을 적절히 활용하는 것, 그리고 '사용자'인 주민 측면에서는 중장기적으로 탄소배출 저감이라는 가치를 인식하고 새로운 생활공간의 질적 향상을 설정하였다.

이와 같은 목표 및 방향에 대한 세부 정책 방안은 전문가 FGI를 통해 목록화, 구체화하여 제시하였고 그 결과 '인센티브 제공방안', '인증제도 활성화방안', '탄소배출저감 및 흡수원 관련 시설 설치를 위한 단지 내 공간 확보방안'의 세 가지 항목으로 요약 정리하여 제시하였다.

먼저 인센티브 제공 방안의 측면에서는 무엇보다 용적률 완화를 인센티브로 사용하되 보조금 및 세금공제 등 금전적인 지원책과 연계하여 활용하는 등의 방법들이 제시될 필요가 있다. 이를 위해서는 특별법상 기준 용적률을 낮추어 인센티브 용적률과 격차가 커지도록 계획하는 것이 선행되어야 한다. 과도한 용적률 인센티브가 되지 않도록, 기준 용적률을 높지 않게 설정한 후 탄소배출저감 및 제로에너지 건물로 재건축 시 부여하는 인센티브 조항 신설할 필요가 있다. 또한 추가 용적률 부여 조건으로 탄소배출 저감을 위한 추가적인 개발 부담금 부여 방안이나 감축요인 도입 시 보조금 지원 범위 확대하는 방안이 있다. 여기에는 공급자에게 저리 용자 제공 및 이자 비용 지원 등에 대한 구체적인 방안이 포함된다. 또한 재건축 단지의 준공 후 본 연구에서 제시한 운영단계 배출량 저감과 연계한 세금공제 혜택을 주는 방안이 있다. 운영 단계에서 효과적으로 탄소배출량을 감축한다면 그 감축량에 대한 크레디트를 인증해주는 방안도 고려해 볼 수 있다. 이는 탄소배출 거래제와 유사한 형태로 제도를 마련하여 거래 지원 및 허용하는 방안을 제시할 수 있다. 그리고 해체나 건설단계에서는 자재의 재활용이나 친환경 건축 자재 사

용에 대한 세금 감면 적용을 통해 공급자에 대한 경제적 이익을 실현 시켜주는 정책도 필요하다.

다음으로 인증제도 측면에서는 지금의 제로에너지 건축물 5등급이 의무화를 넘어 4등급 인증 후 취득세 및 재산세 등을 감면해주고 공급자에게는 소득세 및 법인세 공제해주는 방안이 필요하다. 또한 건설 당시 인증 취득에 필요한 비용을 공공에서 지원해 줄 필요가 있다.

마지막으로 탄소배출저감 및 흡수원 관련 시설 설치를 위한 단지 내 공간 확보 방안의 측면에서는 설치 의무에 대한 새로운 기준 및 규정 마련하기 위해 환경부에서 주관하는 탄소중립도시 지정 및 지원, 탄소중립시설 유형의 별도 신설도 고려해 볼만 하다. 또한 공동주택 단지 내 옥상, 체육시설, 주차장 등에 태양광 발전시설을 설치하고, 공용전기로 적극 활용하게 하는 방안이 필요하다. 이를 위해서 지구단위계획 수립 시 공간 확보를 위해 세부 용도지역 및 세부 구역에 대해 설치 비율을 의무화하는 방안도 고려해 볼 수 있다. 또한 재생에너지나 재난방지 등을 위해 지하공간 등이 소요되는 경우 그에 대한 일정 비율을 용적률 인센티브로 추가하는 방안도 필요하다.

2) 연구의 의의

본 연구는 1기 신도시를 포함하는 90년대 노후계획도시를 대상으로 전면적으로 재건축을 시작하려는 시점에서 건축물 단위에서 기후변화에 대응하기 위한 에너지저감, 탄소배출 저감을 위한 노력으로 기획되었다. 연구의 전반부에도 언급했듯이 현재의 시장구조상 전면 재건축 시 용적률의 증대를 통한 밀도의 증가는 필연적이다. 이는 동일 지역의 건축물의 생애주기인 해체, 건설, 운영단계에서 기존보다 더 많은 탄소를 배출하게 된다. 따라서 향후 각 단지별로 재건축이 시작되면 생애주기별로 에너지절약, 자원순환, 탄소배출 저감 요소기술을 적용한 높은 수준의 친환경 건축물이 조성되기 위하여 민간과 공공, 공급자의 모두의 노력이 필요하다.

이를 위해 진행된 본 연구의 결과는 다음과 같은 네 가지의 측면의 의의가 있다.

첫째, 건축물의 생애주기 관점에서 90년대 지어진 아파트 중심의 신도시에서의 현재 탄소배출량을 산정하고, 이를 근거로 하여 미래 탄소배출량을 예측할 수 있는 모형을 개발하였다. 이전까지는 1기 신도시의 주거단지 전체를 대상으로 에너지 소비량과 탄소배출량이 정량적으로 산정된 적이 없었다. 그렇기 때문에 재건축을 위한 생애주기 관점에서

해체, 건설 단계 뿐 아니라 이후 운영 단계에서 밀도의 증가로 인한 배출량 역시 예측이 불가한 상황이었다. 이는 비단 도시차원의 문제가 아니라 국가차원의 탄소중립2050을 달성하기 위한 대응에서도 문제가 될 수 있다. 물론 개별 단지별로 재건축이 된 이후 모니터링을 통해 검토가 가능할 수 있지만 이에 대한 대응은 사후적 대처가 될 수밖에 없고, 또한 기존 건축물을 건드리지 못한 채 경미한 리모델링이나 강제적 규제사항과 같은 사후대책이 될 수밖에 없다. 이에 본 연구에서 개발한 모형을 근거로 앞으로 재건축·재건축을 추진 중인 노후계획도시들의 수많은 단지들의 미래 탄소배출량을 추정해보고 각 도시별 여건에 맞는 탄소배출 저감요소가 반영된 더 진보된 친환경 건축물을 유도할 수 있게 될 것이다. 이는 곧 과도하거나 느슨한 규제가 아닌 적절한 규제와 경제적 득실을 따져볼 수 있게 함으로서 정책의 실효성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

둘째, 노후계획도시정비법에 의한 재건축 진행시 허용되는 최대 용적률을 달성한다고 가정하고, 증가하는 탄소배출량을 본 연구에서 개발한 모형을 이용하여 정량적으로 산정하였다. 현재 특별법 상에서 제시하는 용적률 상한선에 대해서는 모두가 막연하게 ‘밀도가 높아진다’, ‘혼잡하다’, ‘에너지나 기반시설의 용량이 부족하다’와 같은 근거 없는 우려를 하고 있는 상황이다. 또한 새로운 건축물은 과거의 노후 건축물에 비해 탄소배출량이 현저히 적다고 주장하거나, 이와 관계없이 밀도가 높아지면 무조건 배출량이 많아진다고 주장하기도 한다. 따라서 밀도와 탄소배출량의 관계에 대한 과학적이고 정량적인 검증이 필요하며 본 연구에서는 이에 대한 결과를 제시하였다. 예를 들면 배출량은 단순히 밀도에 비례하는 것이 아니라 우상향 곡선인 로지스틱 커브 형태로 증가하며, 이와 같은 모형에 따라 밀도가 2배 증가할 때 배출량은 약 1.5배 정도 증가하는 것을 알 수 있었다.

셋째, 현재 단계에서 적용 가능한 패시브, 액티브 기술과 정책을 선별하고 이를 통하여 도시·건축 분야에서 수용하여 감축할 수 있는 탄소배출량에 대한 원단위를 제시하였다. 그리고 이를 통하여 향후 발생할 것으로 예상되는 탄소배출량을 구체적으로 얼마만큼 저감할 수 있는지를 예시로 제시하였다. 현재 시장에서는 제로에너지건축물을 달성하기 위한 패시브 기술과 함께 건축물 단위에서 에너지를 생산할 수 있는 많은 액티브 기술들이 소개되고 있다. 하지만 현재 실제 건축물에 적용되고 있는 요소들은 매우 제한적인데, 이는 설치비용과 단가, 건설 사업성 등 많은 문제들이 복잡하게 얽혀있기 때문이다. 따라서 먼 미래가 아닌 당장 노후계획도시 내 대규모 아파트 건물의 재건축을 시작해야 하는 지금 시점에서 생애주기별로 적용할 수 있는 요소들을 문헌검토와 다양한 분야의 전문가FGI를 통해 선정하였다. 그리고 선정된 요소가 건축물의 원단위 당 얼마만큼의

탄소배출을 저감할 수 있는지를 제시하였고, 이를 적용하여 향후 발생하는 탄소배출량을 효과적으로 줄일 수 있음을 신뢰도 높은 모형을 통한 추정을 통해 검증하였다.

마지막으로 재건축 공동주택이 높은 단계의 탄소배출 저감요소를 적용한 친환경 건축물로 유도하기 위한 다양한 정책 방안에 대한 아이디어를 여러 법령과 정책과 연결된 특별법을 중심으로 제시하였다. 현재 노후계획도시 정비를 위한 특별법은 시행령과 시행규칙 모두 우선 사업을 시작하기 위한 아주 기본적인 사항으로만 정리되어 있는 상황이다. 또한 탄소배출과 관련된 사항은 기본계획에서의 하나의 고려사항만으로 표기되어 있을 뿐 이를 적극적으로 장려하기 위한 내용은 없는 상황이다. 이는 현재 사업을 시행하는 시점에서 더 많은 규제사항으로 작용할 수 있을 것이란 우려의 측면도 있을 것이라 판단된다. 하지만 이는 탄소배출에 대한 구체적인 근거가 없기 때문이다. 따라서 본 연구의 결과를 바탕으로 최대 허용용적률 내에서 상한 용적률에 대한 밀도 인센티브와 연계하는 조항이나 세금감면과 같은 경제적 인센티브, 인허가 절차 간소화와 같은 정책적 인센티브를 종합적으로 연계하는 방안을 제안하였다.

2. 연구의 한계 및 후속 연구 제안

1) 연구의 한계

본 연구의 한계는 다음과 같다.

첫째, 분석 모형 및 데이터 구축의 한계이다. 본 연구에서 설정한 모형은 기존 문헌 및 논문 등에서 검증된 모형을 변형하여 적용한 것이다. 분석 결과 설명력은 높게 도출되었지만 이와 같은 모형 설정 시 본 연구에서 고려하지 못한 변수, 예컨대, 지금까지 알려지지 않았던 설계기법, 공법 등으로 인해 발생할 수 있는 변화 등은 고려되지 못하였다. 또한 분석에 이용된 데이터는 1기 신도시인 분당 아파트 단지로만 한정하여 진행하였기 때문에 전체 노후계획도시로 확대할 수 있는 일반적인 해석이 부족할 가능성이 있다.

둘째, 탄소배출량 산정 및 추정과 관련하여 분석의 용이성 차원에서 설정한 연구 범위 과정에서 가정과 생략으로 인한 한계이다. 본 연구에서는 재건축 이후의 모습이 결정되어 있지 않은 상태에서 기존의 건물에서 용적률 상승만을 가정하였다. 기존 사례나 모형 검증 단계에서도 언급했듯이 탄소배출량은 새로운 건축물의 형태나 배치에 따라 서로 달라질 수 있기 때문에 향후 실제 단지에서 나타나는 배출량과는 다소 차이가 있을 것으로 예상된다. 실제로 본 연구 진행 시 설정한 모형은 도시 전체 단지의 데이터를 근거로 도출하였는데, 각 개별단지 레벨에서 이를 적용한 예측치에서 음의 값이 도출되기도 하였다. 이는 본 연구에서 도출한 모형이 각기 다른 모든 단지에 일괄적으로 적용되는 과정에서 나오는 오차로서 더 많은 사례 데이터를 분석함으로써 보정이 가능할 것으로 판단된다. 이는 비단 본 연구에서만 한계라기보다 아직 발생하지 않은 미래의 탄소배출량을 추정하는 과정에서 나오는 학계에서 공통적으로 가지고 있는 숙제이며, 조금 더 정확하게 추정하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다.

셋째, 도출된 저감요소 선정 및 저감률과 관련하여 제기될 수 있는 한계이다. 본 연구에서는 현재 적용되고 있는 정책이나 기술들을 조사하여 이를 기반으로 적용 가능성과 저감률이 실증이나 연구를 통해 숫자로 산정되고 검증된 것만을 선별하여 적용하였다. 또한 객관성을 확보하기 위해 전문가 FGI 결과를 바탕으로 저감요소와 관련된 패키지를 최종 도출·제안하였다. 하지만 이 역시 그 과정에서 많은 가정과 일반화가 되어 있다는 것을 감안한다면 분명히 설명력에 대한 한계는 있을 수밖에 없다. 다만 본 연구의 시급성을 고려하고, 연구 결과의 신뢰성을 높이기 위해 최대한 많은 오차를 통제하고 영향력이 높은 변수만을 선별하기 위한 불가피한 판단이었다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서

제시한 결과들은 현재 시점에서 사업이 시작되는 노후계획도시의 탄소배출량에 대한 신뢰 가능한 양적 분석을 통해 도출된 것으로 미래에 발생할 탄소배출을 좀 더 효과적으로 저감하기 위한 정책의 실효성을 높이고, 민간과 공공, 공급자의 이해 주체들을 설득하기 위한 근거로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

넷째, 정책대안으로 제시된 추가 가능 용적률로 대표되는 인센티브 조항에 대한 설득력에 대한 한계이다. 현재 노후계획도시정비법 내 특례조항인 150% 상향의 조항을 본 연구의 결과에 활용하기 위해서는 기존 용적률을 보다 낮은 수준으로 설정하고 본 연구에서 제시하는 감축방안을 적용할 때 비로소 달성할 수 있는 메커니즘을 제안하는 것이 최선이라 판단되었다. 그러나 이와 같은 방안은 또 다른 규제사항으로 시장에서 인식하여 강한 저항이 예상될 수 있다. 따라서 특히 경제성에 민감한 민간(주민)과 공급자(건설사 등)를 설득하기 위해서는 본 연구에서 제시한 감축 효과에 대한 경제적인 수치를 좀 더 고도화 하여 보여주는 것이 필요하다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 에너지요금과 같은 경제적 환산에 대한 분석이 개략적으로만 진행되었다. 이는 연구 결과를 설명하기 위한 단순 참고용의 자료로만 활용이 가능한 수준에서는 무리가 없지만 세부 사항에 대한 설명력은 부족한 것이 사실이다. 이는 최초 연구 설계 시 고려해야 하는 변수와 데이터가 너무 방대해지는 등 분석의 범위를 넘어서고, 사업성과 관계된 부분은 현 시점에서 본 연구의 방향과 관계없는 새로운 논쟁을 일으킬 수 있다는 판단에 의한 불가피한 결정이었다. 이는 분명한 본 연구의 한계이며 이를 보완하기 위한 고도화된 경제성 관련 연구를 후속으로 추진할 필요가 있다.

2) 후속 연구 제안

향후에는 본 연구에서 제시한 한계들이 보완되고, 변화하는 재건축·재건축 여건 등을 반영한 다음과 같은 후속 연구들이 신속히 수행될 필요가 있다.

먼저, 현재의 아파트 단지가 아닌 지구단위 차원에서 교통수단이나 대규모 흡수원까지 반영된 탄소중립도시라는 개념을 가진 단지 스케일 이상 규모에서의 면밀한 배출량 및 감축량을 추정하는 연구가 필요하다. 이는 본 연구의 한계에서 지적했듯이 민간의 영역인 개별 아파트 단지 내에서 공공이 개입하여 탄소배출량을 감축할 수 있는 수단은 많지 않기 때문에 공공의 영역인 최소 지구단위나 도시단위까지 확장하여 노후계획도시라는 특성을 반영하여 종합적으로 분석할 수 있는 연구가 필요하다.

다음으로 이와 같은 정량적인 수치를 기반으로 한 탄소배출과 노후계획도시 재건축의

경제성 또는 사업성에 대한 고도화된 연구가 필요하다. 이는 시장에서 활용될 수 있는 가장 실용적인 연구가 될 것이다. 또한 본 연구에서 제시했던 배출량과 감축량을 근거로 한 양적 연구의 결과를 추가적으로 보완하는 개념으로 배출량에 대한 경제적 손실과 생애주기별로 감축방안을 적용할 때의 지불해야 하는 비용, 운영 단계에서 탄소배출량을 감축함으로써 얻는 경제적 이익 등을 재건축의 사업성과 결합하여 보여줄 필요가 있다. 이를 위해서는 비용편익분석과 같은 사업성 기법을 동반한 생애주기별, 연차별 비용 및 재무 분석을 통한 추정치 도출이 필요할 것이다. 이와 같은 연구는 공공, 공급자, 사용자의 각 이용주체별 쟁점을 최소화 하고 탄소배출 저감에 대한 국가적 목표에 대한 실질적 근거로 작용할 수 있다. 이는 지금 시점이 아닌 현재 추진되고 있는 선도지구에 대한 구체적인 안들이 도출된 이후 진행하는 것이 변수를 줄이는데 효과적일 것으로 판단된다. 향후 이와 같은 연구는 중앙정부 또는 노후계획도시를 추진하는 주체인 지자체가 주도 하고, 건축과 환경, 경제 분야의 연구기관들이 함께 협동연구의 형식으로 3년 정도의 장기 연구 프로젝트로 추진하는 것을 제안한다.

- 강성찬. (2012). '[한미글로벌 공동기획] ⑱ 세계의 건축·건축사 비야케 잉겔스의 8 House... 주거복합 건축물의 상식을 깨다'. 매일경제. 2012.10.05. (<https://m.mk.co.kr/news/business/5307613>) (검색일: 2024.2.3.)
- 관계부처 합동. (2023). 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 기본계획.
- 건설연구원. (2013). 건설공사 표준품셈, 서울.
- 건축물에너지효율등급인증시스템 홈페이지, https://beec.energy.or.kr/BC/BC04/BC04_02_011.do (검색일2024.08.21.)
- 국가LCI DB, <https://ecosq.or.kr/websquare.do#w2xPath=/ui/cer/ic/oh/ICOH110M01.xml&valVl=tabs1&menuSn=20018000> (검색일2024.09.21.)
- 국토교통부. (2019). 보도자료 '제로에너지건축, 건축을 넘어 도시로! 이제 시작합니다.'. 2019.6.21.
- 국토교통부. (2021). 보도자료 '탄소중립 실현을 위한 '제로에너지 특화도시' 조성 추진. 2021.1.1.
- 국토교통부·산업통상자원부. (2024). 제로에너지건축물(ZEB) 인증 관련 「녹색건축물 조성 지원법」 및 하위법령 개정 주요사항.
- 국토교통부 (2024). 보도자료 '제로에너지 공동주택으로 주거비 부담 줄여드립니다'. 2024.4.11.
- 한국건설기술연구원. (2008). 건축자재 환경성 정보 국가 D/B 구축사업 최종보고서. 국토해양부·한국건설교통기술평가원.
- 국회 의안정보시스템, https://likms.assembly.go.kr/bill/billDetail.do?billId=PRC_G2F3E0D2M2K0H1Q3P5F9E1L0K9J1R4 (접속일: 2024.2.3.)
- 권선형. (2023). '[1.5℃ HOW] 국내 탄소 배출 24% 건물, 지난해 에너지 총사용량 5.9% 증가 하며 역주행'. 한스경제. 2023.06.01. (<https://www.hansbiz.co.kr/news/articleView.html?idxno=652768>) (검색일: 2024.1.31.)
- 김동규. (2020). 'LH, 임대주택 태양광 발전으로 탄소배출권 2만 1천t 추가 확보'. 연합뉴스. 2022.08.05. (<https://www.yna.co.kr/view/AKR20200805141400003>) (검색일: 2024.5.16.)

- 김민경·김민영. (2011). 해외제로에너지타운 사례를 통해 본 제로에너지타운 정책 방향. 서울 도시연구. Vol.12 No.1. 서울연구원. pp.159-180.
- 김민휘·안영섭·김종규. (2022). 커뮤니티 탄소중립을 위한 플러스에너지커뮤니티 구현사례. 건축환경설비. Vol.16 No.3. 한국건축친환경설비학회. pp.39-49.
- 김법전·이현승·김지현·신우철. (2020). 공동주택의 제로에너지건축인증을 위한 태양광발전시스템 설치조건 및 에너지자립률 분석. 한국태양에너지학회 학술대회논문집. Vol.2020 No.10. 한국태양에너지학회. p.103.
- 김상조·서덕수·김근태. (2006). 말뫼(Malmö)의 신재생에너지 프로젝트와 알미르(Almere)의 청정도시 프로그램. 국토, 99-104
- 김상훈. (2022). 에너지 수요공급 균형을 고려한 제로에너지도시 계획수립에 관한 연구. 경상국립대학교 대학원 박사학위논문.
- 김성준·이은석·지석환. (2023). 1기 신도시 재건축 단지의 공공성 제고를 위한 정책방향 연구. 건축공간연구원.
- 김신성·진태승. (2018). 제로에너지건축물 조성 활성화를 위한 제도 개선 연구. 건축도시공간연구소.
- 김영환·박상준. (2014). 도시재생사업에서 저탄소 녹색 계획요소 활용 및 탄소 저감 효과에 관한 연구: 청주시 도심부를 중심으로: 청주시 도심부를 중심으로. 한국도시설계학회 지 도시설계, 15(1), 167-182.
- 김종엽. (2005). 전과정평가에 의한 공동주택 건설단계에서의 이산화탄소 배출량 평가. 한양대학교 대학원 박사학위 논문.
- 김태형. (2021). '[심층분석] 반쪽 '넷제로' 정책...아파트 생애주기 탄소배출 외면'. 대한경제. 2021.10.26. (https://m.dnews.co.kr/m_home/view.jsp?idxno=202110250808417590357) (검색일: 2024.2.3.)
- 김태형. (2023). '모듈러 아파트, 탄소 배출량 17.5% 덜 내뿜는다' 대한경제. 2023.06.12. (https://m.dnews.co.kr/m_home/view.jsp?idxno=202306081732397750241) (검색일: 2024.1.31.)
- 노승준·태성호. (2017). 확률론적 분석방법을 이용한 공동주택의 전과정 내재 탄소배출량 분석. 대한건축학회논문집 구조계. Vol.33 No.1. 대한건축학회. pp.65-72.
- 녹색건축인증 홈페이지. (<http://gseed.or.kr/overview.do>) (검색일: 2024.5.8.)
- 대한주택공사. (2006). 공동주택 공사비 분석자료. 경기.
- 문보경. (2023). 2022년 건물 에너지 사용량, 최고점인 2018년보다 늘어. 5월 31일 기사. <https://www.etnews.com/20230531000076> (검색일:2024.1.31.)
- 반영운. (2021). 디지털 기반 탄소중립도시 조성방안. 국토. Vol.479 No.-. 국토연구원. pp.45-52.
- 박민용·정연태. (2023). 건축물 배수를 이용한 초소수력 발전시스템의 신·재생에너지 활용에 관한 연구. 한국건축친환경설비학회 논문집, 17(1), 28-36.
- 배은석·오규식. (2015). 전과정평가에 기반한 서울시 아파트의 이산화탄소 배출량 분석. 국토계획, 50(3), 335-354.

- 배은지·윤용상. (2019). 제로에너지시티 계획을 위한 건물에너지 수요예측 방법론 개발 및 자립률 산정에 대한 연구. 한국태양에너지학회 논문집. Vol.39 No.5. 한국태양에너지학회. pp.29-40.
- 서울시.(2021). 보도자료 '서울시, 시 전역 총 56만 동 건물 '온실가스 집중관리 시스템' 구축'. 2021.3.11. (https://www.seoul.go.kr/news/news_report.do#view/335652) (검색일: 2024.2.4.)
- 서울특별시 자원회수시설 소개 홈페이지 (<https://rrf.seoul.go.kr/content1/kproj1102.do>) (검색일 : 2024.5.8.)
- 석유선. (2011). '시공~해체 건설순과정' 온실가스 계산법' 마련'. 일간투데이. 2011.03.05. (<http://www.dtoday.co.kr/news/articleView.html?idxno=39240>) (검색일: 2024.2.4.)
- 안경애. (2021). '디지털기반' 탄소중립조시' 밑그림 그린다'. 디지털타임스. 2021.06.01. (https://www.dt.co.kr/contents.html?article_no=2021060202101131650001) (검색일: 2024.2.3.)
- 왕광익. (2016). 제로 에너지 스마트 도시 조성방안 연구 - 세종시 건설지역. 국토연구원.
- 우지환. (2011). 환경부하 및 경제성을 고려한 공동주택의 전생애 친환경 최적설계 평가 시스템 개발에 관한 연구. 한양대학교 대학원 박사학위논문.
- 원종연·태영란. (2021). 제로에너지건축물 인증을 고려한 공동주택 태양광 발전시스템 적용 방안. 한국건축친환경설비학회 논문집. Vol.15 No.3. 한국건축친환경설비학회. pp.279-288.
- 유네스코뉴스. 2021. 우리가 살고 싶은 도시. 2021.02.01. (https://www.unesco.or.kr/data/unesco_news/view/776/1224/page/0) (검색일: 2024.1.21.)
- 육균영. (2021). '대전 공동주택, 지역난방으로' 탄소배출권' 확보 시도'. 뉴스본. 2021.11.01. (<http://www.newsbom.co.kr/news/articleView.html?idxno=9105>) (검색일: 2024.5.16.)
- 윤요선·조경주·조동우. (2020). 제로에너지 공동주택을 위한 태양광 발전시스템의 경제성 분석. 한국생태환경건축학회 논문집. Vol.20 No.6. 한국생태환경건축학회. pp.93-99.
- 이명식·이강복. (2011). 저탄소 기술 계획 요소를 활용한 탄소 중립 단지 구성에 대한 연구. 대한건축학회논문집. Vol.27 No.10. 대한건축학회. pp.33-42.
- 이명주·김원석·이우주·이원택. (2012). 건축물에너지절약요소기술 적용에 따른 단독주택 에너지 요구량 절감률 변화에 관한 연구. 대한건축학회 논문집-계획계, 28(5), 275-282.
- 이선주, 유종현. (2023). 빅데이터를 이용한 서울시 주거용 건물 에너지 소비 실증 분석, Journal of Climate Change Research, 14(1), pp. 001-010.
- 이세연·정찬우·안용한. (2023). 모듈러 공동주택과 RC 공동주택의 전과정 탄소배출량 비교·분석. 대한건축학회논문집. Vol.39 No.5. 대한건축학회. pp.225-232.
- 이승언·유기형·이윤규·구보경·김예원. (2017). 제로에너지건축물 활성화를 위한 제도개선 및 지원방안 연구. 국토교통부.
- 이신형. (2021). '대도시 온실가스 배출 심각...중국 도시 배출량 상위 압도적 다수. ESG 경제. 2021.07.13. (<https://www.esgeconomy.com/news/articleView.html?idxno=80>)

0) (검색일: 2024.1.21.)

- 이은석·김성준·지석환. (2023). 기후위기 대응력 강화를 위한 탄소중립도시 종합계획 수립 방안 연구. 건축공간연구원.
- 이인규. (2018). 'ZEB인증 시 신재생E off-site 생산량 인정'. kharn. 2018.11.22. (<http://www.kharn.kr/news/article.html?no=8294>) (검색일: 2024.1.28.)
- 이재준·최석환. (2009). 기후변화 대응을 위한 지구단위계획 차원에서의 탄소완화 계획요소 개발에 관한 연구. 「국토계획」 제44권 제4호. 대한국토·도시계획학회. pp.119-131.
- 이지은. (2020). 에너지효율 1등급 가전제품 사용하면 '전기료 15만 원 절감 효과'. 12월 17일 기사. <https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=5073765> (검색일: 2024.08.19.)
- 이홍석. (2001). 건축물 폐기단계에서 에너지 소비량과 이산화탄소 발생량에 관한 기초연구. 중앙대학교 대학원 석사학위논문.
- 이홍일. (2022). 건설산업의 성공적 탄소중립 추진 전략. 한국건설산업연구원.
- 정영선. (2010). 주거건물의 전과정에 따른 이산화탄소 배출량 예측모델에 관한 연구. 서울시립대학교 대학원 박사학위논문.
- 제로에너지건축물 인증시스템 홈페이지(https://zeb.energy.or.kr/BC/BC02/BC02_03_001.do) (검색일: 2024.1.21.)
- 조상규·이진민. (2010). 저탄소 에너지절약형 공동주택 디자인을 위한 정책방향 연구. 건축도시공간연구소.
- 진명선. (2020). '아파트도 탄소배출권 거래 가능해진다'. 한겨레. 2020.08.25. (https://www.hani.co.kr/arti/economy/economy_general/959239.html) (검색일: 2024.5.16.)
- 채진해. (2023). 탄소중립도시 실현을 위한 민관협력형 그린인프라 운영사례 연구. 도시부동산연구. Vol.14 No.2. 한국도시부동산학회. pp.31-51.
- 한국도시가스협회 홈페이지. (<http://www.citygas.or.kr/info/charge.jsp>). (검색일: 2024.9.4.)
- 한국에너지공단. (2018). 제로에너지빌딩 학습지원 자료집.
- 한국에너지공단 국가온실가스 배출량 종합정보 시스템 홈페이지. (<https://min24.energy.or.kr/netis/CST/home.do>) (검색일: 2024.1.21.)
- 한국에너지정보문화재단 블로그. (2022). '도시 재생 사업으로 탄소중립 성큼, 핀란드 헬싱키 -2022년 에너지 세계일주④' 2022.04.22. (<https://blog.naver.com/energyinfoplaza/222708142722>) (검색일: 2024.2.3.)
- 한국지역난방공사 홈페이지. (<https://www.kdhc.co.kr/kdhc/main/contents.do?menuNo=200270>). (검색일: 2024.9.4.)
- 한상훈. (2021). 탄소중립도시 조성을 위한 국토계획법 개정방안에 관한 연구. 토지공법연구. Vol.95. 사단법인 한국토지공법학회. pp.145-162.
- 환경부. (2011). 제2차 건설폐기물 재활용 기본계획 수립을 위한 연구, 서울.
- 환경부. (2021a). 한국형 녹색분류체계(K-TAXONOMY) 가이드라인.

- 환경부. (2021b). 보도자료 “스마트 그린도시로 대한민국 탄소중립 이끈다” 비전 선포. 2021.03.30. (<https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10525&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1441860>) (검색일: 2024.1.21.)
- 환경부. (2022a). ‘탄소중립 그린도시’ 2곳 뽑아 5년 동안 400억원 지원한다. 정책브리핑. 2022.01.04. (<https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148897649>) (검색일: 2024.2.3.)
- 환경부. (2022b). 보도자료 ‘탄소중립 그린도시 대상지 2곳 선정…탄소중립 이끈다’. 2022.04.27. (<https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10525&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1522020>) (검색일: 2024.1.21.)
- 환경부. (2023). 보도자료 ‘정부-지자체-민간이 함께 ’탄소중립도시‘ 최적지 찾는다’. 2023.11.06. (<https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10525&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1635010>) (검색일: 2024.1.21.)
- 2050 탄소중립위원회. (2021). 2050 탄소중립 시나리오.
- Abe, T., & Arimura, T. H. (2021). *An empirical study of the tokyo emissions trading scheme: An ex post analysis of emissions from university buildings*. Carbon pricing in Japan, 97-116.
- Abouhamad, M., & Abu-Hamd, M. (2021). *Life cycle assessment framework for embodied environmental impacts of building construction systems*. Sustainability, 13(2), 461.
- Adugna, D., Jensen, M. B., Lemma, B., & Gebrie, G. S. (2018). *Assessing the potential for rooftop rainwater harvesting from large public institutions*. International journal of environmental research and public health, 15(2), 336.
- Akgüç, A., & Yilmaz, A. Z. (2022). *Determining HVAC system retrofit measures to improve cost-optimum energy efficiency level of high-rise residential buildings*. Journal of Building Engineering, 54, 104631.
- Arimura, T. H., & Abe, T. (2021). *The impact of the Tokyo emissions trading scheme on office buildings: what factor contributed to the emission reduction?*. Environmental Economics and Policy Studies, 23, 517-533.
- Australia, G. B. C. (2013). *The Value of Green Star: A Decade of Environmental Benefits*. Progress Report, 194.
- Austin, G. (2013). *Case study and sustainability assessment of Bo01, Malmö, Sweden*. Journal of green building, 8(3), 34-50.
- BEAM Plus Online Exhibition 홈페이지. (https://greenbuilding.hkgbc.org.hk/posts/view/BEAMPlus_AssessmentAspects) (검색일: 2024.5.8.)
- Better Building HARBEC 소개 홈페이지. (<https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/showcase-projects/harbec-water-retention-pond>) (검색일 : 2024.5.8.)
- BioRegional. *BedZED: Beddington Zero Energy Development*. (https://pocacito.eu/sites/default/files/BedZED_Beddington.pdf) (검색일 : 2024.5.8.)
- BioRegional. (2017). *The BedZED Story*. Bioregional Development Group.

- Blum, P., Campillo, G., Münch, W., & Kölbl, T. (2010). *CO2 savings of ground source heat pump systems-A regional analysis*. Renewable Energy, 35(1), 122-127.
- BREEAM 홈페이지. (<https://breeam.com/about/how-breeam-works>) (검색일: 2024.5.8.)
- CAG Consultants, Carbon Trust & Imperial College Business School (2015). *CRC Energy Efficiency Scheme Evaluation - Final Synthesis Report*. Research paper, CAG Consultants.
- Cai, L., Feng, X. P., Yu, J. Y., Xiang, Q. C., & Chen, R. (2019). *Reduction in carbon dioxide emission and energy savings obtained by using a green roof*. Aerosol and Air Quality Research, 19(11), 2432-2445.
- Camilleri, M. A. (2021). *A circular economy strategy for sustainable value chains: A European perspective*. Global Challenges to CSR and Sustainable Development: Root Causes and Evidence from Case Studies, 141-161.
- Carpenter, A., Jambeck, J. R., Gardner, K., & Weitz, K. (2013). *Life cycle assessment of end-of-life management options for construction and demolition debris*. Journal of Industrial Ecology, 17(3), 396-406.
- Chastas, P., Theodosiou, T., Kontoleon, K. J., & Bikas, D. (2018). *Normalizing and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO2 emissions of residential buildings*. Building and Environment, 130, 212-226.
- Chiu, Y. R., Tsai, Y. L., & Chiang, Y. C. (2015). *Designing rainwater harvesting systems cost-effectively in a urban water-energy saving scheme by using a GIS-simulation based design system*. Water, 7(11), 6285-6300.
- Chou, J. S., & Yeh, K. C. (2015). *Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction*. Journal of Cleaner production, 101, 137-147.
- Climate Active 홈페이지. (<https://www.climateactive.org.au/be-climate-active/certification>) (검색일: 2024.5.8.)
- City of Helsinki Ministry of the Environment. (2005). *Eco-Viikki: Aims, Implementation and Results*.
- City of Sydney. (2021). *Climate Active Public Disclosure Statement City of Sydney Organisation Certification FY2019-20*. Climate Active.
- Dan Ahu, Michael Kung, & Liang Zhou. (2015). *Analysis of sustainable energy system in ecovillages: A review of progress in BedZED and Masdar city*. Low Carbon Economy. 2015, 6, 1-6.
- Dong, H., Geng, Y., Yu, X., & Li, J. (2018). *Uncovering energy saving and carbon reduction potential from recycling wastes: A case of Shanghai in China*. Journal of Cleaner Production, 205, 27-35.
- e-나라지표. 용도지역 기준 도시지역 인구비율. (https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1200) (검색일: 2024.1.21.)

- Enbausa.de. (2021). 'Passivhaustagung 2021: Erfahrungen aus der Bahnstadt'. 2021.09.24. (<https://www.enbausa.de/daemmung/aktuelles/artikel/passivhaustagung-2021-erfahrungen-aus-der-bahnstadt-7586.html>) (검색일: 2024.2.3.)
- energy for london. (2012). *Carbon Visualisation*. (<http://www.energyforlondon.org/carbon-visualisation/>) (검색일: 2024.2.3.)
- Eskola, T. (n.d.). *Viikki - Ecological Housing and Planning in Helsinki*
- ESMD. *Building Energy Efficiency Ordinance (Cap. 610)*. (https://www.emsd.gov.hk/beco/en/mibec_forms.html) (검색일 : 2024.5.8.)
- Farzadkia, M., Mahvi, A. H., Norouzian Baghani, A., Sorooshian, A., Delikhoon, M., Sheikhi, R., & Ashournejad, Q. (2021). Municipal solid waste recycling: Impacts on energy savings and air pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71(6), 737-753.
- Filote, C., Felseghi, R. A., Raboaca, M. S., & Aşchilean, I. (2020). *Environmental impact assessment of green energy systems for power supply of electric vehicle charging station*. *International Journal of Energy Research*, 44(13), 10471-10494.
- Foley, A., Tyther, B., Calnan, P., & Gallachóir, B. Ó. (2013). *Impacts of electric vehicle charging under electricity market operations*. *Applied Energy*, 101, 93-102.
- Galleri Västra Hamnen. *Bo01 - City of Tomorrow*. (<https://gallerivastrahamnen.se/bo01-city-of-tomorrow/>) (검색일 : 2024.5.8.)
- Gercek, C., & Reinders, A. (2019). *Smart appliances for efficient integration of solar energy: A Dutch case study of a residential smart grid pilot*. *Applied Sciences*, 9(3), 581.
- Ghaleb, B., & Asif, M. (2022). *Assessment of solar PV potential in commercial buildings*. *Renewable Energy*, 187, 618-630.
- GOV.UK. *CRC Scheme Case Studies: Participants*. (<https://www.gov.uk/government/publications/crc-case-studies>) (검색일: 2024.5.8.)
- GOV.UK. *VCSE Energy Efficiency Scheme*. (<https://www.gov.uk/guidance/vcse-energy-efficiency-scheme>) (검색일: 2024.5.16.)
- Green Building Council Australia 홈페이지. (<https://new.gbca.org.au/news/green-star-news/what-does-new-4-5-and-6-star-green-star-building-look/>) (검색일: 2024.5.8.)
- Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M., & Cheng, J. C. (2016). *Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA*. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 67-77.
- Hidden London. *BedZED (Beddington Zero Energy Development)*. (<https://hidden-london.com/gazetteer/bedzed/>) (검색일 : 2024.5.8.)
- Hu, Y., Zheng, J., Kong, X., Sun, J., & Li, Y. (2019). *Carbon footprint and economic efficiency of urban agriculture in Beijing--a comparative case study of convent*

- ional and home-delivery agriculture*. Journal of Cleaner Production, 234, 615-625.
- ICLEI. (2021). *City of Malmö*. ICLEI.
- IPEEC Building Energy Efficiency Taskgroup. (2018). *Zero Energy Building Definitions and Policy Activity-An International Review*.
- Jeong, J., Hong, T., Ji, C., Kim, J., Lee, M., & Jeong, K. (2016). *Development of an evaluation process for green and non-green buildings focused on energy performance of G-SEED and LEED*. Building and Environment, 105, 172-184.
- Jeong, K., Hong, T., & Kim, J. (2018). *Development of a CO2 emission benchmark for achieving the national CO2 emission reduction target by 2030*. Energy and Buildings, 158, 86-94.
- Jia, J., & Lee, W. L. (2018). *The rising energy efficiency of office buildings in Hong Kong*. Energy and buildings, 166, 296-304.
- Jong-Hyun Kim, & Jin-Ho Kim (2019). *A Study on the Comparison for Energy Consumption Characteristics between G-SEED certified and non-certified Office Buildings in Korea*. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 20(11), 33-43.
- KEPCO. (2024). 주택용 전기요금(저압). (<https://online.kepco.co.kr/PRM005D00>) (검색일: 2024.9.4.)
- Kramer, N., & Lessmann, C. (2023). *The Effects of Carbon Trading: Evidence from California's ETS*.
- Kong, F., Sun, C., Liu, F., Yin, H., Jiang, F., Pu, Y. & Dronova, I. (2016). *Energy saving potential of fragmented green spaces due to their temperature regulating ecosystem services in the summer*. Applied Energy, 183, 1428-1440.
- KOSIS 홈페이지. 폐기물 처리현황_건설폐기물 2019년 통계. (https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_99_3300316&conn_path=I2). (검색일: 2024.9.4.)
- Kim, G., Choi, S. K., & Seok, J. H. (2020). *Does biomass energy consumption reduce total energy CO2 emissions in the US?*. Journal of Policy Modeling, 42(5), 953-967.
- KT Enterprise 홈페이지, <https://enterprise.kt.com/bt/dxstory/1554.do> (검색일: 2024.08.21.)
- LEED 홈페이지. (<https://www.usgbc.org/leed>) (검색일: 2024.5.8.)
- Lee, G. G., Lee, H. W., & Lee, J. H. (2015). *Greenhouse gas emission reduction effect in the transportation sector by urban agriculture in Seoul, Korea*. Landscape and Urban Planning, 140, 1-7.
- Li, J., Zheng, B., Shen, W., Xiang, Y., Chen, X., & Qi, Z. (2019). *Cooling and energy-saving performance of different green wall design: A simulation study of a block*. Energies, 12(15), 2912.
- Liu, J., Wang, J., Ding, X., Shao, W., Mei, C., Li, Z., & Wang, K. (2020). *Assessing the*

mitigation of greenhouse gas emissions from a green infrastructure-based urban drainage system. Applied energy, 278, 115686.

- Li, X. J., Xie, W. J., Xu, L., Li, L. L., Jim, C. Y., & Wei, T. B. (2022). *Holistic life-cycle accounting of carbon emissions of prefabricated buildings using LCA and BIM.* Energy and Buildings, Vol.266, 1 July 2022, 112136.
- Liu, J., Huang, Z., & Wang, X. (2020). *Economic and environmental assessment of carbon emissions from demolition waste based on LCA and LCC.* Sustainability, 12(16), 6683.
- Mallory-Hill, S., & Gorgolewski, M. (2018). *Mind the Gap: Studying actual versus predicted performance of green buildings in Canada.* Building Performance Evaluation: From Delivery Process to Life Cycle Phases, 261-274.
- Michael Neuman. (2009). *Spatial planning leadership by infrastructure: An American view.* International planning studies 14(2):201-217.
- Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G. M., & Gruner, R. L. (2021). *Investigating the embodied energy and carbon of buildings: A systematic literature review and meta-analysis of life cycle assessments.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 143, 110935.
- Muhammad, H. A., Sultan, H., Lee, B., Imran, M., Baek, I. H., Baik, Y. J., & Nam, S. C. (2020). *Energy minimization of carbon capture and storage by means of a novel process configuration.* Energy conversion and management, 215, 112871.
- Münster, M., & Lund, H. (2010). *Comparing Waste-to-Energy technologies by applying energy system analysis.* Waste management, 30(7), 1251-1263.
- No S, & Won C. (2020). *Comparative Analysis of Energy Consumption between Green Building Certified and Non-Certified Buildings in Korea.* Energies. 2020; 13(5):1049.
- Pan, L., & Chu, L. M. (2016). *Energy saving potential and life cycle environmental impacts of a vertical greenery system in Hong Kong: A case study.* Building and Environment, 96, 293-300.
- Peng, C. (2016). *Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling.* Journal of Cleaner Production, 112, 453-465.
- Poulsen, T. G., & Hansen, J. A. (2009). *Assessing the impacts of changes in treatment technology on energy and greenhouse gas balances for organic waste and wastewater treatment using historical data.* Waste Management & Research, 27(9), 861-870.
- Privacyshield, China - Construction and Green Building 소개 홈페이지. (<https://www.privacyshield.gov/ps/article?id=China-Construction-and-Green-Building>) (검색일 : 2024.5.8.)
- Puranen, P., Kosonen, A., & Ahola, J. (2021). *Techno-economic viability of energy storage concepts combined with a residential solar photovoltaic system: A case*

- study from Finland*. Applied energy, 298, 117199.
- Qerimi, D., Dimitrieska, C., Vasilevska, S., & Rrecaj, A. A. (2020). *Modeling of the solar thermal energy use in urban areas*. Civil Engineering Journal, 6(7), 1349-1367.
- Ram, V. G., Kishore, K. C., & Kalidindi, S. N. (2020). *Environmental benefits of construction and demolition debris recycling: Evidence from an Indian case study using life cycle assessment*. Journal of Cleaner Production, 255, 120258.
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R. & Passer, A. (2020). *Embodied GHG emissions of buildings—The hidden challenge for effective climate change mitigation*. Applied Energy, 258, 114107.
- Ronald Dittermeyer. et al. (2019). *Crowd oil not crude oil*. Nature communications (2019)10:1818
- Sebastian Fastenrath & Boris Braun. (2018). *Sustainability transition pathways in the building sector: Energy-efficient building in Freiburg(Germany)*. Applied Geography 90 (2018) 339-349.
- SenecaESG. *CHINA PROMOTES GREEN BUILDINGS TO PEAK CONSTRUCTION EMISSION BY 2030*. 2023.09.20. SenecaESG. (<https://senecaesg.com/insights/china-promotes-green-buildings-to-peak-construction-emission-by-2030/>) (검색일 : 2024.5.8.)
- Scofield, J. H. (2013). *Efficacy of LEED-certification in reducing energy consumption and greenhouse gas emission for large New York City office buildings*. Energy and Buildings, 67, 517-524.
- Scott, A. (2006). *Emerging forms of sustainable urbanism: Case studies of Vauban Freiburg and solarCity Linz*. Journal of Green Building, 3(2), 65-76.
- Song, X., Lu, Y., Shen, L., & Shi, X. (2018). *Will China's building sector participate in emission trading system? Insights from modelling an owner's optimal carbon reduction strategies*. Energy policy, 118, 232-244.
- Taylor, T. (2015). *Assessing carbon emissions in BREEAM*. Briefing paper. BRE Global Ltd.
- Teng, Y., Li, K., Pan, W., & Ng, T. (2018). *Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: Evidence from and gaps in empirical studies*. Building and Environment, 132, 125-136.
- UN. (2018). *Tracking progress towards inclusive, safe, resilient and sustainable cities and human settlement-SDG 11 synthesis report. High level political forum 2018*.
- UNEP, Global ABC. (2022). *2021 Global Status Report for Buildings and Construction*. UNEP.
- Urban Green-Blue Grids. *Bo01 - City of Tomorrow, Malmö, Sweden*. (<https://urbangreenbluegrids.com/projects/bo01-city-of-tomorrow-malmo-sweden/>) (검색일 : 2024.5.8.)
- Urban Green-Blue Grids. *Bo01 Malmö 001 Plattegrond*. (<https://urbangreenbluegrid>

s.com/bo01-malmoe-001-plattegrond-jonathan-perrin) (검색일 : 2024.5.8.)

Urban Sustainability Exchange. (<https://use.metropolis.org/case-studies/sustainable-urban-district-vauban>). (검색일 : 2024.5.8.)

Vergara, S. E., Damgaard, A., & Horvath, A. (2011). *Boundaries matter: greenhouse gas emission reductions from alternative waste treatment strategies for California's municipal solid waste*. Resources, Conservation and Recycling, 57, 87-97.

Wang, J., Wu, H., Duan, H., Zillante, G., Zuo, J., & Yuan, H. (2018). Combining life cycle assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: A case study. Journal of cleaner production, 172, 3154-3166.

Wu, H. J., Yuan, Z. W., Zhang, L., & Bi, J. (2012). *Life cycle energy consumption and CO 2 emission of an office building in China*. The international journal of life cycle assessment, 17, 105-118.

Zero Waste Korea, 영국 베드제드 사례, (http://www.zero-waste.kr/pdf/04_%EC%98%81%EA%B5%AD_%EB%B2%A0%EB%93%9C%EC%A0%9C%EB%93%9C.pdf) (검색일 : 2024.5.8.)

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

Zhang, K., Lau, H. C., & Chen, Z. (2022). *Regional carbon capture and storage opportunities in Alberta, Canada*. Fuel, 322, 124224.

「건축법」(2024.3.26. 법률 제20424호)

「건축물의 에너지절약설계기준」[국토교통부고시 제2023-104호] 별표9의2.

「건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준」[국토교통부고시 제2023-911호], [산업통상자원부고시 제2023-242호].

「경기도 도시가스 공급규정」(2023.5.8. 시행)

「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 법률 제20234호.

「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(2024.6.9. 법률 제19430호)

「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 시행령」(2024.2.6. 대통령령 제34194호)

「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법」(2023.12.26. 법률 제19847호)

「노후계획도시 정비 및 지원에 관한 특별법 시행령」(2024.4.23. 대통령령 제34443호)

「녹색건축물 조성 지원법」(2022.3.25. 법률 제18469호)

「녹색건축물 조성 지원법 시행령」(2023.12.19. 대통령령 제34006호)

「도시 및 주거환경정비법」(2024.1.30. 법률 제20174호)

「주택건설사업 기반시설 기부채납 운영기준」[국토교통부고시 제2017-543호].

「지방세특례제한법」(2024.1.9. 법률 제19990호)

Carbon Emission Reduction Policies throughout the Lifecycle of Buildings for Reconstructed Apartment Complex of Old New-town

SUMMARY

Kim, Sungjoon

Park, Sungnam

Choi, Gayoon

This policy research was conducted at a time when the redevelopment of aging new towns is necessary, particularly as redevelopment and reconstruction policies are increasingly being driven by the private sector. It emphasizes the need for measures to achieve the overarching goal of carbon neutrality. For the early new towns, referred to as aging planned cities, to transition into carbon-neutral cities, it is critical to develop not only technical solutions but also policy alternatives that induce carbon emission reductions throughout the entire lifecycle of buildings.

The first part of the study reviewed literature and policies related to carbon emission reduction in aging planned cities. The findings can be summarized as follows: Carbon emissions from buildings can be divided into operational carbon, which is emitted during the operational phase, and embodied carbon, which is generated during raw material production, transportation, construction, and disposal. The proportion of carbon emissions by lifecycle stage shows that approximately 30% of emissions occur during the construction phase, and around 70% during the operational phase, with recycling construction waste reducing emissions by about 0–2%.

Reducing operational carbon emissions is essential for increasing energy self-sufficiency, which necessitates the production of new and renewable energy. Therefore, it is necessary to consider both the installation of passive systems like insulation and active system technologies like high-efficiency boilers, as well as the production of new and renewable energy.

Next, policies, technologies, and planning techniques that could serve as benchmarks for reducing carbon emissions in aging planned cities were selected based on their proven effectiveness. Among domestic and international policies related to carbon emission reduction, green building certification programs have been shown to effectively reduce energy consumption and greenhouse gas emissions in buildings. Furthermore, using a framework for planning tools, the study categorized technologies and planning techniques identified in case studies and classified those applicable to reconstruction projects as follows: First, in terms of energy transition, there were renewable energy installations, smart grids and energy storage, energy-efficient buildings, district heating and cooling, electric vehicle charging infrastructure, waste-to-energy facilities, and carbon capture technologies. Second, technologies related to carbon sinks included green roofs and vertical gardens, urban farms, building-integrated urban agriculture, rainwater management infrastructure, and urban resilience infrastructure. Third, regarding resource circulation, there were waste recycling and carbon emissions trading, and in terms of management, there was the establishment of energy management systems.

In the midsection of the research, a model was developed to predict energy consumption based on the architectural structure and site design of Bundang's apartment complexes. This model estimated the total energy consumption and carbon emissions that would result from an expected 150% increase in floor area ratio during future reconstruction. The study then applied technologies and design techniques derived from prior research and case studies to estimate changes in total energy consumption and carbon emissions, assessing how much carbon reduction could be achieved and how these results could be linked to policy alternatives for apartment complex reconstruction. The results are summarized as follows:

First, the lifecycle of 122 apartment complexes in Bundang was divided into three stages: demolition, material production and construction, and operation. Carbon

emissions were calculated for each stage, and reduction measures were proposed. Carbon emissions from the 'demolition' and 'material production and construction' stages were calculated using a basic estimation method based on anticipated material quantities. The demolition stage emitted approximately 24.06 kton-CO₂/m² of carbon dioxide, while the construction stage, assuming the maximum increased floor area ratio of 150%, resulted in an emission of approximately 420.43 kton-CO₂/m².

Carbon emissions during the 'operation' stage were estimated based on projected energy consumption under various scenarios, comparing pre- and post-application of reduction measures. The model accounted for variables such as building and socioeconomic characteristics. The results indicated that, following redevelopment, electric energy consumption would increase by 73.9%, gas energy consumption by 83.8%, and heating energy consumption by 54.9%. Consequently, post-redevelopment, the Bundang apartment complexes under analysis were estimated to emit a total of 558.61 kton of carbon dioxide, a 66.9% increase compared to the pre-redevelopment total carbon emissions. The change in total floor area was 82.3%, and the change in energy consumption was 62.1%. Among the total carbon emissions, electricity accounted for 300.74 tons, or about 53.8%, while gas accounted for 2.4%, and heating 43.8%.

Next, considering lifecycle energy consumption and carbon emission reductions, 22 reduction elements were identified within five major categories—'Resource Recycling Specialization,' 'Sustainable Construction,' 'Renewable Energy,' 'Energy-Efficient Buildings,' and 'Climate Change Adaptation and Carbon Sink Expansion'—based on expert FGI (Focus Group Interview) feedback and applicability. Three reduction packages for energy consumption and renewable energy production were proposed: 'Core,' 'Expanded,' and 'Comprehensive.'

The estimated reduction results from applying these package elements are as follows: First, during the 'demolition' stage, based on the current construction waste recycling rate, which approaches 98.9% with only 0.8% being landfilled, carbon emissions from demolition could be reduced through 100% recycling of construction waste. Next, during the 'material production and construction' stage, assuming a maximum recycling rate of 25% as incentivized, a reduction effect of 1.64 kton, 25% of the initially calculated 6.57 kton carbon emissions during material production and construction, was estimated. Finally, during the 'operation' stage, carbon emissions were expected to

be 558.61 kton before applying the carbon reduction package. After applying the core package, emissions were estimated to reduce to 261.95 kton, 177.69 kton with the expanded package, and 167.68 kton with the comprehensive package. In summary, applying the core, expanded, and comprehensive packages could reduce carbon emissions from redevelopment by approximately 53%, 68%, and 70%, respectively.

In the latter part of the study, based on these findings, policy measures for reducing carbon emissions in the reconstruction of multi-family housing complexes were proposed. The summary of the results is as follows: The policy goals proposed in this study are suggested from three perspectives: environmental, social, and economic sustainability. Detailed policy measures regarding the goals and directions were listed and specified through expert FGIs, and were summarized into three key items: 'Incentive Provision Measures,' 'Activation of Certification Systems,' and 'Securing On-site Space for Facilities Related to Carbon Emission Reduction and Carbon Sinks.'

First, in terms of incentive provision, it is necessary to utilize floor area ratio relaxation as an incentive, but also to consider integrating financial support measures such as subsidies and tax deductions. Second, regarding the certification system, it is necessary to go beyond the current mandatory Zero-Energy Building Grade 5 certification and introduce measures like reducing acquisition and property taxes after Grade 4 certification, while providing income and corporate tax deductions to suppliers. Additionally, public support for the costs associated with obtaining certification during construction is needed. Lastly, in terms of securing on-site space for facilities related to carbon emission reduction and carbon sinks, it is worth considering new standards and regulations for installation obligations, designating carbon-neutral cities and providing support, and establishing specific types of carbon-neutral facilities under the supervision of the Ministry of Environment.

The significance of this study lies in four main aspects: First, it estimates current carbon emissions in 1990s new towns centered around apartment buildings from a lifecycle perspective and develops a model to predict future carbon emissions based on these estimates. Second, assuming the maximum floor area ratio permitted under the Special Act on Aging Planned Cities, it quantitatively estimates the increase in carbon emissions using the model developed in this study. Third, it selects passive and active technologies and policies applicable at this stage, proposing unit standards for the amount of carbon emissions that can be reduced in urban and architectural fields, and providing examples

of the potential carbon reduction that can be achieved in the future. Finally, it offers various policy ideas for guiding the reconstruction of multi-family housing complexes into eco-friendly buildings with high levels of carbon emission reduction elements, focusing on special laws connected with multiple regulations and policies.

Given the current market structure, increasing density through higher floor area ratios in full-scale redevelopment is inevitable. This leads to greater carbon emissions during the lifecycle stages of demolition, construction, and operation compared to the existing structures. Therefore, as reconstruction begins in each complex in the future, efforts from both private and public sectors, as well as suppliers, are required to create high-level eco-friendly buildings by applying energy-saving, resource-circulating, and carbon reduction technologies across the entire lifecycle of buildings.

Keywords :

Old New-town, Carbon Emission Reduction Policies, Lifecycle Assessment, Energy Consumption

부록 1. 「기후위기 대응을 위한 탄소 중립·녹색성장 기본법」 탄소 중립도시 관련 내용

[별표 1] 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 및 동법 시행령 탄소중립도시 관련 내용

번호	내용
제28조	탄소중립 도시의 지정 등
⑨	법 제29조제6항에서 “대통령령으로 정하는 지정기준”이란 다음 각 호의 기준을 말한다. 1. 법 제29조제2항 각 호의 사업 시행을 추진할 것 2. 탄소중립시·도계획 및 탄소중립시·군·구계획과 추진 사업과의 연계성이 확보될 것 3. 사업계획이 구체적이고 실현가능하며, 온실가스중장기감축목표등의 달성에 기여할 수 있을 것
제29조	탄소중립 도시의 지정 등
①	국가와 지방자치단체는 탄소중립 관련 계획 및 기술 등을 적극 활용하여 탄소중립을 공간적으로 구현하는 도시(이하 “탄소중립도시”라 한다)를 조성하기 위한 정책을 수립·시행하여야 한다.
②	정부는 다음 각 호의 사업을 시행하고자 하는 도시를 직접 또는 지방자치단체의 장의 요청을 받아 탄소중립도시로 지정할 수 있다. 1. 도시의 온실가스 감축 및 에너지 자립률 향상을 위한 사업 2. 도시에서 제33조제1항에 따른 탄소흡수원등을 조성·확충 및 개선하는 사업 3. 도시 내 생태축 보전 및 생태계 보전 4. 기후위기 대응을 위한 자원순환형 도시 조성 5. 그 밖에 도시의 기후위기 대응 및 탄소중립 사회로의 이행, 환경의 질 개선을 위하여 필요한 사업
③	제2항에 따라 지정된 탄소중립도시를 관할하는 지방자치단체의 장은 탄소중립도시 조성 사업 계획을 수립·시행하여야 한다.
④	정부는 탄소중립도시 조성 사업의 시행을 위하여 필요한 비용의 전부 또는 일부를 보조할 수 있다.
⑤	정부는 제3항에 따른 사업계획의 수립·시행 및 이행점검, 조사·연구 등을 수행하기 위하여 공공기

번호	내용
	관 중 대통령령으로 정하는 기관을 지원기구로 지정할 수 있다.
	⑥ 정부는 제2항에 따라 지정된 탄소중립도시가 대통령령으로 정한 지정기준에 맞지 아니하게 된 경우에는 그 지정을 취소할 수 있다.
	⑦ 제2항부터 제6항까지의 규정에 따른 탄소중립도시의 지정 및 지정취소, 탄소중립도시 조성 사업 계획의 수립·시행, 지원기구의 지정 및 지정취소 등에 관하여 필요한 사항은 대통령령으로 정한다.
제30조	지역 에너지 전환의 지원
	① 정부는 기후위기에 대응하기 위하여 제3조의 기본원칙에 따라 지역별로 신·재생에너지의 보급·확대 방안을 마련하는 등 지방자치단체의 에너지 전환을 지원하는 정책을 수립·지원하여야 한다.
	② 정부는 제1항에 따른 에너지 전환 지원 정책의 시행에 필요한 비용의 전부 또는 일부를 예산의 범위에서 지방자치단체에 보조할 수 있다.
제31조	녹색건축물의 확대
	① 정부는 에너지이용 효율과 신·재생에너지의 사용비율이 높고 온실가스 배출을 최소화하는 건축물(이하 "녹색건축물"이라 한다)을 확대하기 위한 정책을 수립·시행하여야 한다.
	② 정부는 건축물에 사용되는 에너지 소비량과 온실가스 배출량을 줄이기 위하여 대통령령으로 정하는 기준 이상의 건물에 대하여 중장기 및 기간별 목표를 설정·관리하여야 한다.
	③ 정부는 건축물의 설계·건설·유지관리·해체 등의 전 과정에서 에너지·자원 소비를 최소화하고 온실가스 배출을 줄이기 위하여 설계기준 및 허가·심의의 강화하는 등 건설·유지관리·해체 등의 단계별 대책 및 기준을 마련하여 시행하여야 한다.
	④ 정부는 기존 건축물이 녹색건축물로 전환되도록 에너지 진단 및 「에너지이용 합리화법」 제25조에 따른 에너지절약사업과 「녹색건축물 조성 지원법」 제27조에 따른 그린리모델링 사업을 통하여 온실가스 배출을 줄이는 사업을 지속적으로 추진하여야 한다.
	⑤ 정부는 신축되거나 개축되는 건축물에 대해서는 전력소비량 등 에너지의 소비량을 조절·절약할 수 있는 지능형 계량기를 부착·관리하도록 할 수 있다.
	⑥ 정부는 중앙행정기관, 지방자치단체, 대통령령으로 정하는 공공기관 및 교육기관 등의 건축물을 녹색건축물로 전환하기 위한 이행계획을 수립하고, 제1항에서부터 제5항까지의 규정에 따른 정책을 적용하여 그 이행사항을 점검·관리하여야 한다.
	⑦ 정부는 대통령령으로 정하는 바에 따라 일정 규모 이상의 신도시 개발 또는 도시 재건축을 하는 경우에는 녹색건축물을 적극 보급하여야 한다.
	⑧ 정부는 녹색건축물의 확대를 위하여 필요한 경우에는 대통령령으로 정하는 바에 따라 재정적 지원을 할 수 있다.
제32조	녹색교통의 활성화
제33조	탄소흡수원 등의 확충
	① 정부는 산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지 및 「수산자원관리법」 제2조제6호에 따른 바다숲 등에서 온실가스를 흡수하고 저장(흡수된 온실가스를 대기로부터 여구 또는 반영구적으로 격리하는 것을 말한다)하는 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」 제2조제10항에 따른 탄소흡수원 및 그 밖의 바이오매스 등(이하 "탄소흡수원"이라 한다)을 조성·확충하거나 온실가스 흡수 능력을 개선하기 위한 시책을 수립·시행하여야 한다.

출처 : 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 (2024.6.9. 법률 제19430호), 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 시행령」(2024.2.6. 대통령령 제34194호) 발췌하여 연구진 작성

부록 2. 「탄소중립·녹색성장 국가 기본계획」 건물 부문 핵심 및 세부과제

[별표 2] 「탄소중립·녹색성장 국가 기본계획」 건물 부문 핵심 및 세부과제

관리번호	과제명	주관부처(협조부처)
1-3-1	신규 건축물의 에너지 성능 강화	
	① 제로에너지 건축물 확대 및 성능 강화 - 제로에너지건축물 인증 의무화 대상 확대, 인증등급 단계적 상향, 인증 건물 사후관리 강화 - 신규 민간건축물의 설계기준을 제로에너지건축물 5등급 수준으로 상향 조정, 그 대상을 단계적으로 확대	국토부(산업부)
	② 소형 건축물 에너지 성능 강화 방안 마련 - 현재 관리 대상이 아닌 연면적 500㎡ 미만 소형 건축물에 대해 에너지 평가방법 도입, 평가인력 확충 등을 통한 점진적 성능 제고 추진	국토부
	③ 제로에너지 건축물 확산을 위한 제도 개선 - 건축물에너지효율등급과 제로에너지건축물 인증제도를 통합하여 인증 시간 및 절차 간소화 - 제로에너지건축물 인증 등급별 부여되는 용적률, 높이기준 등 인센티브 확대로 조기 확산 도모 - 건설사 참여 유도를 위해 ZEB 인증 실적을 공공건축 사업 수행 능력평가(PQ) 심사, 공동주택용지 청약 등에서 가점 적용 추진 - 순환경제 개념을 반영하여 전과정평가(LCA)에서의 건축물 탄소배출감소 추진체계 구축	국토부 (산업부, 환경부)
1-3-2	기존 건축물에 대한 그린리모델링 추진	
	① 총량제와 연계한 노후건축물 그린리모델링 로드맵 마련 - 건축물 에너지사용량 총량제와 연계한 '행태개선 유도방안' 등을 담은 노후건축물 그린리모델링 전략·실행방안 등 세부 이행 로드맵 마련	국토부
	② 공공건축물 그린리모델링 사업 지원대상 확대 및 의무화 단계적 추진	국토부

관리번호	과제명	주관부처(협조부처)
	- 에너지 다소비 시설, 다물량 시설 등으로 지원대상 확대 및 리모델링 활성화 사업모델 발굴 - 노후 공공건축물의 그린리모델링 확산을 위해 노후 공공건축물의 그린리모델링 의무화 단계적 적용 - 건축물 유형별 그린리모델링에 따른 성능개선 효과, 비용효율 등을 분석하여, 의무화 적용대상·시기 등을 구체화	
	③ 민간건축물 그린리모델링 확산 - 그린리모델링 비용 민간이자지원사업의 공사대상 확대, 지원을 현실화 등 추진 - 그린리모델링 시 건축물대장상 이력관리 및 인정서 발급 등 국가공인 인증제 도입, 기업의 참여 촉진 위한 ESG 경영평가 연계 추진 - 공공건물이 민간 건물로 임차 시 녹색건축물 임차 의무화, 건축물 에너지사용 총량 규제 검토 등 실행기반 마련 - 노후 건축물 에너지성능 향상 및 활성화 등을 위한 중장기적 그린리모델링 정책 마련	국토부
1-3-3	건물의 에너지 사용효율 향상	
	① 건물 에너지사용설비·관리시스템 효율혁신 - 에너지다소비 설비의 효율 최적화 및 건물 에너지수요관리산업 기반 조성을 위한 선도기술 개발 추진 - 공공건물, 캠퍼스(대학), 물류단지 등 커뮤니티 단위 건물군 중심의 대규모 현장 실증을 통한 사업화 추진	산업부
	② 건물 에너지효율 평가관리기반 강화 및 효율개선 - 대형 건물의 에너지허용 목표설정(면적당 소비량) 및 에너지소비량 평가 등을 통한 건물부문 에너지사용실태 합리화 추진 - 효율목표 미달성 시 개선명령·과태료를 부과하고 달성 시 명단 공개 등 근거 마련 추진 - 에너지효율시장 조성 및 에너지절약시설 설치 용자 사업을 활용하여 중소·중견기업 고효율 히트펌프 교체 지원 - 전력 외 에너지원(가스·열)을 포함한 실시간 에너지사용량 정보제공체계를 구축하여 스마트 에너지관리를 통한 효율개선 촉진 - 건물 성능정보 공개강화를 통한 민간의 자발적 참여기반 확충 - 건물 에너지 데이터의 통합체계 고도화를 통한 건축물 에너지 성능 개선, 행태개선 관련 의사결정 지원 - 가정 및 상업시설 등 건물부문에서 에너지 절약 문화 확산을 위해 탄소중립포인트 등 인센티브 제공 및 민간협업 홍보를 통한 참여 확대	산업부(국토부)
	③ 공공부문의 선도적 온실가스 감축 강화 - 감축목표 설정 및 감축방안 마련을 위해 정부 부문(중앙, 지자체)탄소중립 로드맵 수립 - 시설별 특성을 반영한 공공부문 탄소중립 모델을 개발하여 확산을 유도하고 에너지 효율 개선을 위한 재정 지원 확대	환경부
1-3-4	계획수립·공간조성 탄소중립화	
	① 국토단위 탄소중립을 위해 국토종합계획에 탄소중립 가치 반영 - 국토를 성장형·개발형에서 탄소중립형·에너지감축형으로 전환하기 위한 국토종합계획 수정 검토 - 국가온실가스 감축목표 및 제반여건 등을 감안하여 국토종합계획 상 국토 이용·보전 목표에 탄소중립 가치 반영검토	국토부
	② 도시단위 탄소중립을 위해 도시계획에 탄소중립요소 도입	국토부

관리번호	과제명	주관부처(협조부처)
	- 계획구역의 탄소 흡수량·배출량을 조사하고 계획별 감축목표 설정, 도시 규모·유형별 차별화된 계획요소 반영 유도 - 탄소포집 활용·저장 시설(CCUS), 친환경연료(전기·수소 등) 충전소 등 기반시설을 도시계획시설로 편입 검토	
	③ 탄소중립 지원을 위한 탄소배출 공간지도 구축 - 도시 단위구역 내 배출·흡수원을 시각화한 탄소배출 공간지도 구축 추진 및 탄소중립도시 조성 전략에 활용	국토부
	④ 정주지 온실가스 배출·흡수량 통계산정 체계 구축 - 국가온실가스 인벤토리(NIR)에 미반영된 정주지의 탄소 배출·흡수량 산정, 정주지 지역 배출관리 - 정주지의 변화를 담은 활동자료 구축, 국제표준계수(Tier 1)를 활용한 통계 산출, 향후 국가고유계수(Tier 2) 개발	국토부
	⑤ 계획·개발사업의 탄소중립 내재화를 위한 기후변화영향평가 추진 - 국가의 주요 계획 또는 대규모 개발사업에 대해 기후변화 영향을 사전에 평가하도록 하여 기후위기 적응과 온실가스 감축을 유도	환경부
	⑥ 건물 분야 에너지 전환 및 재생에너지 확대 - 도시재생, 지역개발사업 등과 연계하여 신재생에너지 및 화석연료를 단계적으로 전력화 추진 - 건물 냉·난방시 수열에너지 활용 활성화 추진	국토부 (산업부, 환경부 등)

출처 : 관계부처 합동, (2023). p.48 표에 p.42~47 내용을 추가하여 연구진 수정

부록 3. 분석 대상 분당 아파트별 대지 면적, 건축면적, 연면적, 세대수 및 건물 수

[별표 3] 분석 대상 151개 아파트 단지의 대지면적, 건축면적, 연면적, 세대수 및 건물 수

(단위:㎡, 세대, 동)

동/마을/아파트 단지	대지면적	건축면적	연면적	세대수	건물수
구미동(22개 단지)	783,731	149,402	1,245,803	13,133	271
까치마을(7)	277,350	52,717	429,466	4,434	96
1단지대우롯데선경	61,312	9,156	89,409	976	18
3단지신원	55,183	9,011	116,841	882	15
건영	33,449	10,647	32,305	464	21
금성백조	7,475	2,549	7,381	112	7
롯데선경	57,082	8,208	104,382	1,124	17
우방,우성	24,799	8,375	21,822	108	8
주공2단지	38,050	4,771	57,326	768	10
무지개마을(11)	338,213	52,181	618,250	5,915	94
10단지삼성건영	44,630	6,011	67,791	498	9
11단지금강	10,787	1,929	18,121	216	4
12단지주공	43,550	4,825	66,692	905	10
1단지대림	35,940	5,923	75,468	778	12
2단지LG	45,091	7,592	95,119	888	15
3단지신한건영	39,783	7,064	102,079	964	13
5단지청구	42,500	7,698	87,182	932	14
6단지건영	22,223	3,567	31,263	208	5

7단지라이프	22,863	3,082	32,667	222	5
8단지제일	17,549	2,531	23,672	172	4
9단지동아	13,297	1,959	18,196	132	3
하안마을(4)	168,168	44,504	198,087	2,784	81
6단지	46,306	6,830	76,618	1,489	16
그랜드빌	54,946	20,770	49,358	324	38
주공5단지	29,775	3,552	39,193	779	8
화이트빌	37,141	13,352	32,918	192	19
금곡동(10개 단지)	300,982	44,041	526,173	6,409	87
청솔마을(10)	300,982	44,041	526,173	6,409	87
10단지동아	19,849	2,948	28,995	204	5
1단지계룡	19,651	3,173	40,651	492	7
1단지서광영남	19,107	3,086	39,509	408	7
2단지유천화인	29,455	4,530	54,232	624	9
3단지한라	30,464	5,741	63,362	768	11
7단지성원	29,825	4,283	61,302	454	10
8단지대원	43,106	7,225	88,600	716	13
공무원5단지	25,211	3,260	38,259	474	9
주공6단지	46,319	5,137	56,490	1,249	10
주공9단지	37,995	4,658	54,773	1,020	6
분당동(8개 단지)	275,085	52,016	433,674	4,156	97
샛별마을(4)	162,097	26,301	288,762	2,777	52
동성	39,111	5,107	56,386	582	10
라이프	39,136	6,190	82,625	796	10
삼부	40,632	7,203	58,645	588	18
우방	43,218	7,801	91,106	811	14
장안타운(4)	112,988	25,715	144,912	1,379	45
건영	55,517	7,517	90,004	747	15
건영3차	13,323	4,278	12,928	144	8
건영두산	20,175	6,208	18,821	224	11
한신라이프	23,973	7,712	23,159	264	11
서현동(11개 단지)	736,392	139,005	1,374,814	11,507	217
시범단지(4)	491,693	95,808	952,273	7,769	129
삼성한신	122,378	20,401	228,351	1,781	34
우성	114,397	25,814	219,225	1,874	32
한양	132,721	21,500	267,459	2,419	32
현대	122,197	28,093	237,238	1,695	31
효자촌(7)	244,699	43,197	422,541	3,738	88
대명	9,417	2,909	9,416	144	7

대우대창	41,821	6,424	66,734	802	11
동아	43,098	7,873	78,012	574	14
삼환	43,613	6,709	76,143	632	17
임광	49,267	8,121	93,981	732	15
정도	9,582	3,061	9,482	144	8
현대	47,901	8,100	88,773	710	16
수내동(6개 단지)	360,856	57,734	729,971	5,515	99
양지(1)	53,146	7,490	113,550	768	15
2단지청구	53,146	7,490	113,550	768	15
파크타운(4)	196,770	31,895	416,796	3,025	47
대림	47,402	7,683	100,407	748	11
롯데	56,448	9,150	119,567	841	13
삼익	44,088	7,146	93,387	638	11
서안	48,832	7,916	103,435	798	12
푸른마을(1)	110,940	18,349	199,625	1,722	37
벽산쌍용신성	110,940	18,349	199,625	1,722	37
야탑동(30개 단지)	889,674	170,765	1,518,958	16,042	324
매화마을(10)	234,245	50,526	307,803	4,345	109
건영1차	17,902	5,666	16,989	248	12
공무원1단지	26,467	3,602	43,548	562	8
공무원2단지	49,189	7,255	98,717	1,185	19
대청파크빌	10,685	3,637	10,537	112	6
동신건영2차	17,205	5,716	16,432	240	13
주공3단지	45,448	6,672	46,004	851	16
주공4단지	26,244	3,621	34,965	643	8
청구	13,691	4,759	13,473	136	8
현대백산	16,599	5,823	16,441	252	11
화성빌리지	10,815	3,775	10,697	116	8
목련마을(11)	177,016	42,083	228,666	3,557	85
SK	11,167	2,305	20,086	276	6
대원	11,489	3,463	11,463	172	7
대원3단지	14,588	4,397	14,505	216	10
두원	11,483	3,747	11,414	124	7
미원	9,945	3,170	9,944	108	5
성환	12,319	3,958	12,095	136	8
영남	14,643	2,379	24,599	294	5
주공1단지	44,140	7,113	60,138	1,460	14
한신	13,091	2,782	21,668	269	6
한일	13,759	2,119	22,977	278	5

화성빌리지	20,392	6,650	19,777	224	12
장미마을(2)	134,107	22,613	282,574	2,832	43
1단지동부	37,384	6,150	75,519	696	15
8단지현대	96,723	16,463	207,055	2,136	28
탑마을(6)	334,751	54,318	678,140	5,142	83
1단지선경	51,022	7,469	102,033	976	18
2단지대우	46,259	8,887	97,102	654	14
3단지타워빌	119,445	18,238	253,164	1,166	22
5단지동아	7,655	2,482	7,532	115	6
6단지벽산7단지경남아 너스빌	85,493	13,390	181,946	1,530	13
8단지주공	24,877	3,852	36,363	701	10
마을 없음(1)	9,555	1,225	21,775	166	4
동원로알두크	9,555	1,225	21,775	166	4
이매동(15개 단지)	640,215	104,716	1,257,374	10,676	217
아름마을(5)	272,723	46,174	536,467	4,146	91
1,2,3단지건영한성태영	97,729	17,857	185,954	1,380	31
4단지두산삼호	75,703	12,175	149,901	1,132	27
5단지풍림	54,751	8,842	111,208	876	19
6단지선경	17,033	2,453	31,336	370	6
7단지효성	27,507	4,847	58,068	388	8
이매촌(10)	367,492	58,542	720,907	6,530	126
10단지삼성	72,512	12,327	142,422	1,162	31
11단지삼환	35,746	5,955	70,033	572	12
1단지금강	26,101	3,941	55,192	588	9
2단지한신	45,519	6,787	95,745	1,184	14
3단지동신	29,436	4,921	56,163	460	10
5단지동부코오롱	18,213	2,741	38,601	264	4
6단지청구	50,265	7,192	87,702	710	15
7단지성지	20,000	2,864	32,504	304	5
8단지진흥	40,385	6,467	86,565	828	15
9단지동신	29,315	5,347	55,980	458	11
정자동(20개 단지)	708,565	130,933	1,497,632	15,832	217
느티마을(1)	37,277	12,909	33,236	200	17
경남선경	37,277	12,909	33,236	200	17
상록마을(3)	113,576	20,560	226,925	2,793	48
1,2단지라이프	34,545	5,627	69,999	466	10
3단지우성	52,250	10,053	107,922	1,762	29
4단지임광보성	26,781	4,880	49,004	565	9

정든마을(7)	207,869	32,230	397,961	3,738	64
동아1단지	21,599	3,662	43,624	300	7
신화5단지	31,656	5,594	68,003	634	10
우성4단지	18,757	3,106	39,891	270	7
우성6단지동아2단지	64,546	9,437	112,322	1,412	18
한진6단지	20,181	2,931	38,678	298	7
한진7단지	17,805	2,794	32,566	382	6
한진8단지	33,325	4,706	62,877	442	9
한솔마을(7)	297,305	38,362	477,220	7,406	76
1단지청구	54,033	6,052	83,845	858	16
2단지LG	40,603	6,805	86,052	598	12
3단지한양	29,333	3,279	45,451	416	8
4단지주공	56,281	7,401	83,357	1,651	3
5단지주공	45,046	4,995	76,773	1,156	12
6단지주공	20,736	2,754	35,951	1,039	12
7단지주공	51,273	7,076	65,791	1,688	13
마을 없음(2)	52,538	26,872	362,290	1,695	12
로얄팰리스	18,721	11,937	138,273	624	4
아이파크분당1	33,817	14,935	224,017	1,071	8
전체 계(122개 단지)	4,695,500	848,612	8,584,399	83,270	1,529

출처 : 건축물대장 및 2023년 건축공간연구원 기본연구 “1기 신도시 재건축의 공공성 제고를 위한 단지 분석 및 설계 연구 기
본현황 및 분당 재건축 시뮬레이션 분석” 자료 활용

부록 4. 분당 아파트 단지별 해체 단계 이산화탄소 배출량 산출

[별표 4] 분당 아파트 단지별 해체 단계 이산화탄소 배출량 산출(현재 연면적 기준)

(단위: kton-CO₂/㎡)

동/마을/아파트 단지	현재 연면적 (1,000 ㎡)	해체	운송	처리	소계
구미동	1,245.8	21.71	2.39	5.87	29.97
까치	429.5	7.49	0.82	2.02	10.33
1단지대우롯데선경	89.4	1.56	0.17	0.42	2.15
3단지신원	116.8	2.04	0.22	0.55	2.81
건영	32.3	0.56	0.06	0.15	0.78
금성백조	7.4	0.13	0.01	0.03	0.18
롯데선경	104.4	1.82	0.20	0.49	2.51
우방,우성	21.8	0.38	0.04	0.10	0.53
주공2단지	57.3	1.00	0.11	0.27	1.38
무지개	618.2	10.78	1.19	2.91	14.88
10단지삼성건영	67.8	1.18	0.13	0.32	1.63
11단지금강	18.1	0.32	0.03	0.09	0.44
12단지주공	66.7	1.16	0.13	0.31	1.60
1단지대림	75.5	1.32	0.14	0.36	1.82
2단지LG	95.1	1.66	0.18	0.45	2.29
3단지신한건영	102.1	1.78	0.20	0.48	2.46
5단지청구	87.2	1.52	0.17	0.41	2.10
6단지건영	31.3	0.54	0.06	0.15	0.75
7단지라이프	32.7	0.57	0.06	0.15	0.79
8단지제일	23.7	0.41	0.05	0.11	0.57

동/마을/아파트 단지	현재 연면적 (1,000 m ²)	해체	운송	처리	소계
9단지동아	18.2	0.32	0.03	0.09	0.44
하안	198.1	3.45	0.38	0.93	4.77
6단지	76.6	1.34	0.15	0.36	1.84
그랜드빌	49.4	0.86	0.09	0.23	1.19
주공5단지	39.2	0.68	0.08	0.18	0.94
화이트빌	32.9	0.57	0.06	0.16	0.79
금곡동	526.2	9.17	1.01	2.48	12.66
청솔	526.2	9.17	1.01	2.48	12.66
10단지동아	29.0	0.51	0.06	0.14	0.70
1단지계룡	40.7	0.71	0.08	0.19	0.98
1단지서광영남	39.5	0.69	0.08	0.19	0.95
2단지유천화인	54.2	0.95	0.10	0.26	1.30
3단지한라	63.4	1.10	0.12	0.30	1.52
7단지성원	61.3	1.07	0.12	0.29	1.47
8단지대원	88.6	1.54	0.17	0.42	2.13
공무원5단지	38.3	0.67	0.07	0.18	0.92
주공6단지	56.5	0.98	0.11	0.27	1.36
주공9단지	54.8	0.95	0.11	0.26	1.32
분당동	433.7	7.56	0.83	2.04	10.43
셋별	288.8	5.03	0.55	1.36	6.95
동성	56.4	0.98	0.11	0.27	1.36
라이프	82.6	1.44	0.16	0.39	1.99
삼부	58.6	1.02	0.11	0.28	1.41
우방	91.1	1.59	0.17	0.43	2.19
장안타운	144.9	2.53	0.28	0.68	3.49
건영	90.0	1.57	0.17	0.42	2.17
건영3차	12.9	0.23	0.02	0.06	0.31
건영두산	18.8	0.33	0.04	0.09	0.45
한신라이프	23.2	0.40	0.04	0.11	0.56
서현동	1,374.8	23.96	2.64	6.48	33.08
시범	952.3	16.60	1.83	4.49	22.91
삼성한신	228.4	3.98	0.44	1.08	5.49
우성	219.2	3.82	0.42	1.03	5.27
한양	267.5	4.66	0.51	1.26	6.44
현대	237.2	4.14	0.46	1.12	5.71
효자촌	422.5	7.36	0.81	1.99	10.17
대명	9.4	0.16	0.02	0.04	0.23

동/마을/아파트 단지	현재 연면적 (1,000 m ²)	해체	운송	처리	소계
대우대창	66.7	1.16	0.13	0.31	1.61
동아	78.0	1.36	0.15	0.37	1.88
삼환	76.1	1.33	0.15	0.36	1.83
임광	94.0	1.64	0.18	0.44	2.26
정도	9.5	0.17	0.02	0.04	0.23
현대	88.8	1.55	0.17	0.42	2.14
수내동	730.0	12.72	1.40	3.44	17.56
양지	113.5	1.98	0.22	0.53	2.73
2단지청구	113.5	1.98	0.22	0.53	2.73
파크타운	416.8	7.26	0.80	1.96	10.03
대림	100.4	1.75	0.19	0.47	2.42
롯데	119.6	2.08	0.23	0.56	2.88
삼익	93.4	1.63	0.18	0.44	2.25
서안	103.4	1.80	0.20	0.49	2.49
푸른	199.6	3.48	0.38	0.94	4.80
벽산쌍용신성	199.6	3.48	0.38	0.94	4.80
야탑동	1,519.0	26.48	2.92	7.15	36.55
매화	307.8	5.37	0.59	1.45	7.41
건영1차	17.0	0.30	0.03	0.08	0.41
공무원1단지	43.5	0.76	0.08	0.21	1.05
공무원2단지	98.7	1.72	0.19	0.46	2.38
대창파크빌	10.5	0.18	0.02	0.05	0.25
동신건영2차	16.4	0.29	0.03	0.08	0.40
주공3단지	46.0	0.80	0.09	0.22	1.11
주공4단지	35.0	0.61	0.07	0.16	0.84
청구	13.5	0.23	0.03	0.06	0.32
현대벽산	16.4	0.29	0.03	0.08	0.40
화성빌리지	10.7	0.19	0.02	0.05	0.26
목련	228.7	3.99	0.44	1.08	5.50
SK	20.1	0.35	0.04	0.09	0.48
대원	11.5	0.20	0.02	0.05	0.28
대원3단지	14.5	0.25	0.03	0.07	0.35
두원	11.4	0.20	0.02	0.05	0.27
미원	9.9	0.17	0.02	0.05	0.24
성환	12.1	0.21	0.02	0.06	0.29
영남	24.6	0.43	0.05	0.12	0.59
주공1단지	60.1	1.05	0.12	0.28	1.45

동/마을/아파트 단지	현재 연면적 (1,000 m ²)	해체	운송	처리	소계
한신	21.7	0.38	0.04	0.10	0.52
한일	23.0	0.40	0.04	0.11	0.55
화성빌리지	19.8	0.34	0.04	0.09	0.48
분당	21.8	0.38	0.04	0.10	0.52
동원로얄듀크	21.8	0.38	0.04	0.10	0.52
장미	282.6	4.93	0.54	1.33	6.80
1단지동부	75.5	1.32	0.14	0.36	1.82
8단지현대	207.1	3.61	0.40	0.98	4.98
탑	678.1	11.82	1.30	3.19	16.32
1단지선경	102.0	1.78	0.20	0.48	2.45
2단지대우	97.1	1.69	0.19	0.46	2.34
3단지타워빌	253.2	4.41	0.49	1.19	6.09
5단지동아	7.5	0.13	0.01	0.04	0.18
6단지벽산7단지경남 아너스빌	181.9	3.17	0.35	0.86	4.38
8단지주공	36.4	0.63	0.07	0.17	0.87
이매동	1,257.4	21.92	2.41	5.92	30.25
아름	536.5	9.35	1.03	2.53	12.91
1,2,3단지건영한성 태영	186.0	3.24	0.36	0.88	4.47
4단지두산삼호	149.9	2.61	0.29	0.71	3.61
5단지풍림	111.2	1.94	0.21	0.52	2.68
6단지선경	31.3	0.55	0.06	0.15	0.75
7단지효성	58.1	1.01	0.11	0.27	1.40
이매촌	720.9	12.57	1.38	3.40	17.35
10단지삼성	142.4	2.48	0.27	0.67	3.43
11단지삼환	70.0	1.22	0.13	0.33	1.68
1단지금강	55.2	0.96	0.11	0.26	1.33
2단지한신	95.7	1.67	0.18	0.45	2.30
3단지동신	56.2	0.98	0.11	0.26	1.35
5단지동부코오롱	38.6	0.67	0.07	0.18	0.93
6단지청구	87.7	1.53	0.17	0.41	2.11
7단지성지	32.5	0.57	0.06	0.15	0.78
8단지진흥	86.6	1.51	0.17	0.41	2.08
9단지동신	56.0	0.98	0.11	0.26	1.35
정자동	1,497.6	26.10	2.88	7.05	36.03
느티	33.2	0.58	0.06	0.16	0.80
경남선경	33.2	0.58	0.06	0.16	0.80

동/마을/아파트 단지	현재 연면적 (1,000 m ²)	해체	운송	처리	소계
분당	362.3	6.31	0.70	1.71	8.72
로알팰리스	138.3	2.41	0.27	0.65	3.33
아이파크분당1	224.0	3.90	0.43	1.06	5.39
상록	226.9	3.96	0.44	1.07	5.46
1,2단지라이프	70.0	1.22	0.13	0.33	1.68
3단지우성	107.9	1.88	0.21	0.51	2.60
4단지임광보성	49.0	0.85	0.09	0.23	1.18
정든	398.0	6.94	0.76	1.87	9.57
동아1단지	43.6	0.76	0.08	0.21	1.05
신화5단지	68.0	1.19	0.13	0.32	1.64
우성4단지	39.9	0.70	0.08	0.19	0.96
우성6단지동아2단지	112.3	1.96	0.22	0.53	2.70
한진6단지	38.7	0.67	0.07	0.18	0.93
한진7단지	32.6	0.57	0.06	0.15	0.78
한진8단지	62.9	1.10	0.12	0.30	1.51
한솔	477.2	8.32	0.92	2.25	11.48
1단지청구	83.8	1.46	0.16	0.39	2.02
2단지LG	86.1	1.50	0.17	0.41	2.07
3단지한양	45.5	0.79	0.09	0.21	1.09
4단지주공	83.4	1.45	0.16	0.39	2.01
5단지주공	76.8	1.34	0.15	0.36	1.85
6단지주공	36.0	0.63	0.07	0.17	0.86
7단지주공	65.8	1.15	0.13	0.31	1.58
전체 계	8,584.4	149.63	16.48	40.43	206.54

출처 : 연구진 작성

부록 5. 분당 아파트 단지별 용적률 150% 상향 재건축 건설 단계 이산화탄소 배출량 산출

[별표 5] 분당 아파트 단지별 용적률 150% 상향 재건축 건설 단계 이산화탄소 배출량 산출

(단위: kton-CO₂/㎡)

동/마을/아파트 단지	재건축 후 연면적 (1,000 ㎡)	자재생산	운송	시공	소계
구미동	2421.4	977.08	14.12	26.83	1,018.03
까치	845.5	341.17	4.93	9.37	355.47
1단지대우롯데선경	181.4	73.19	1.06	2.01	76.26
3단지신원	199.6	80.55	1.16	2.21	83.92
건영	82.5	33.28	0.48	0.91	34.68
금성백조	18.6	7.50	0.11	0.21	7.82
롯데선경	190.0	76.67	1.11	2.11	79.88
우방,우성	59.0	23.82	0.34	0.65	24.81
주공2단지	114.4	46.16	0.67	1.27	48.10
무지개	1125.6	454.19	6.56	12.47	473.22
10단지삼성건영	134.7	54.37	0.79	1.49	56.65
11단지금강	34.3	13.84	0.20	0.38	14.42
12단지주공	132.0	53.27	0.77	1.46	55.50
1단지대림	129.4	52.21	0.75	1.43	54.39
2단지LG	162.8	65.68	0.95	1.80	68.43
3단지신한건영	161.8	65.27	0.94	1.79	68.01

동/마을/아파트 단지	재건축 후 연면적 (1,000 m ²)	자재생산	운송	시공	소계
5단지청구	150.9	60.90	0.88	1.67	63.46
6단지건영	64.6	26.07	0.38	0.72	27.16
7단지라이프	67.0	27.02	0.39	0.74	28.15
8단지제일	50.0	20.17	0.29	0.55	21.02
9단지동아	38.1	15.39	0.22	0.42	16.04
하얀	450.3	181.72	2.63	4.99	189.34
6단지	146.1	58.94	0.85	1.62	61.42
그랜드빌	131.8	53.17	0.77	1.46	55.40
주공5단지	83.9	33.84	0.49	0.93	35.26
화이트빌	88.6	35.76	0.52	0.98	37.26
금곡동	977.6	394.50	5.70	10.83	411.03
청솔	977.6	394.50	5.70	10.83	411.03
10단지동아	58.8	23.71	0.34	0.65	24.71
1단지계룡	70.1	28.30	0.41	0.78	29.48
1단지서광영남	68.2	27.51	0.40	0.76	28.66
2단지유천화인	98.4	39.71	0.57	1.09	41.38
3단지한라	109.1	44.01	0.64	1.21	45.85
7단지성원	106.0	42.79	0.62	1.17	44.58
8단지대원	153.3	61.84	0.89	1.70	64.43
공무원5단지	76.1	30.70	0.44	0.84	31.98
주공6단지	126.0	50.83	0.73	1.40	52.96
주공9단지	111.8	45.10	0.65	1.24	46.99
분당동	846.3	341.50	4.93	9.38	355.81
샛별	531.9	214.64	3.10	5.89	223.63
동성	115.1	46.43	0.67	1.27	48.37
라이프	141.3	57.03	0.82	1.57	59.42
삼부	119.6	48.26	0.70	1.33	50.28
우방	155.9	62.92	0.91	1.73	65.56
장안타운	314.4	126.86	1.83	3.48	132.18
건영	173.3	69.92	1.01	1.92	72.85
건영3차	32.9	13.28	0.19	0.36	13.84
건영두산	49.1	19.81	0.29	0.54	20.64
한신라이프	59.1	23.86	0.34	0.66	24.86
서현동	2479.4	1,000.49	14.45	27.47	1,042.41
시범	1689.8	681.87	9.85	18.72	710.45
삼성한신	411.9	166.22	2.40	4.56	173.18
우성	390.8	157.70	2.28	4.33	164.31

동/마을/아파트 단지	재건축 후 연면적 (1,000 m ²)	자재생산	운송	시공	소계
한양	466.5	188.26	2.72	5.17	196.15
현대	420.5	169.69	2.45	4.66	176.80
효자촌	789.6	318.62	4.60	8.75	331.97
대명	23.5	9.50	0.14	0.26	9.90
대우대창	129.5	52.24	0.75	1.43	54.43
동아	142.7	57.57	0.83	1.58	59.98
삼환	141.6	57.12	0.83	1.57	59.52
임광	167.9	67.74	0.98	1.86	70.58
정도	23.9	9.63	0.14	0.26	10.03
현대	160.6	64.82	0.94	1.78	67.53
수내동	1271.3	512.98	7.41	14.09	534.47
양지	193.3	77.99	1.13	2.14	81.26
2단지청구	193.3	77.99	1.13	2.14	81.26
파크타운	712.0	287.29	4.15	7.89	299.33
대림	171.5	69.21	1.00	1.90	72.11
롯데	204.2	82.41	1.19	2.26	85.87
삼익	159.5	64.37	0.93	1.77	67.07
서안	176.7	71.30	1.03	1.96	74.28
푸른	366.0	147.70	2.13	4.06	153.89
벽산쌍용신성	366.0	147.70	2.13	4.06	153.89
야탑동	2853.5	1,151.43	16.64	31.62	1,199.68
매화	659.2	265.99	3.84	7.30	277.14
건영1차	43.8	17.69	0.26	0.49	18.43
공무원1단지	83.2	33.59	0.49	0.92	35.00
공무원2단지	172.5	69.61	1.01	1.91	72.52
대창파크빌	26.6	10.72	0.15	0.29	11.17
동신건영2차	42.2	17.04	0.25	0.47	17.76
주공3단지	114.2	46.07	0.67	1.27	48.00
주공4단지	74.3	29.99	0.43	0.82	31.25
청구	34.0	13.72	0.20	0.38	14.30
현대벽산	41.3	16.68	0.24	0.46	17.38
화성빌리지	26.9	10.86	0.16	0.30	11.32
목련	494.2	199.42	2.88	5.48	207.77
SK	36.8	14.86	0.21	0.41	15.49
대원	28.7	11.58	0.17	0.32	12.06
대원3단지	36.4	14.68	0.21	0.40	15.30
두원	28.6	11.56	0.17	0.32	12.04

동/마을/아파트 단지	재건축 후 연면적 (1,000 m ²)	자재생산	운송	시공	소계
미원	24.9	10.03	0.14	0.28	10.45
성환	30.6	12.34	0.18	0.34	12.85
영남	46.6	18.79	0.27	0.52	19.58
주공1단지	126.3	50.98	0.74	1.40	53.12
한신	41.3	16.67	0.24	0.46	17.37
한일	43.6	17.60	0.25	0.48	18.34
화성빌리지	50.4	20.32	0.29	0.56	21.17
분당	36.1	14.57	0.21	0.40	15.18
동원로얄듀크	36.1	14.57	0.21	0.40	15.18
장미	483.7	195.20	2.82	5.36	203.38
1단지동부	131.6	53.10	0.77	1.46	55.33
8단지현대	352.1	142.10	2.05	3.90	148.05
탑	1180.3	476.26	6.88	13.08	496.22
1단지선경	178.6	72.05	1.04	1.98	75.07
2단지대우	166.5	67.18	0.97	1.84	70.00
3단지타워빌	432.3	174.45	2.52	4.79	181.77
5단지동아	19.0	7.67	0.11	0.21	7.99
6단지벽산7단지경남 아너스빌	310.2	125.17	1.81	3.44	130.41
8단지주공	73.7	29.73	0.43	0.82	30.98
이매동	2217.7	894.88	12.93	24.57	932.39
아름	945.6	381.55	5.51	10.48	397.54
1,2,3단지건영한성 태영	332.5	134.19	1.94	3.68	139.81
4단지두산삼호	263.5	106.31	1.54	2.92	110.76
5단지풍림	193.3	78.01	1.13	2.14	81.28
6단지선경	56.9	22.95	0.33	0.63	23.92
7단지효성	99.3	40.08	0.58	1.10	41.76
이매촌	1272.1	513.34	7.42	14.10	534.85
10단지삼성	251.2	101.36	1.46	2.78	105.61
11단지삼환	123.7	49.90	0.72	1.37	51.99
1단지금강	94.3	38.07	0.55	1.05	39.66
2단지한신	164.0	66.19	0.96	1.82	68.96
3단지동신	100.3	40.48	0.58	1.11	42.18
5단지동부코오롱	65.9	26.60	0.38	0.73	27.71
6단지청구	163.1	65.81	0.95	1.81	68.57
7단지성지	62.5	25.22	0.36	0.69	26.28

동/마을/아파트 단지	재건축 후 연면적 (1,000 m ²)	자재생산	운송	시공	소계
8단지진흥	147.1	59.37	0.86	1.63	61.86
9단지동신	100.0	40.33	0.58	1.11	42.02
정자동	2560.5	1,033.20	14.93	28.37	1,076.50
노티	89.2	35.97	0.52	0.99	37.48
경남선경	89.2	35.97	0.52	0.99	37.48
분당	441.1	177.99	2.57	4.89	185.45
로얄팰리스	166.4	67.13	0.97	1.84	69.94
아이파크분당1	274.7	110.86	1.60	3.04	115.51
상록	397.3	160.31	2.32	4.40	167.03
1,2단지라이프	121.8	49.16	0.71	1.35	51.22
3단지우성	186.3	75.17	1.09	2.06	78.32
4단지임광보성	89.2	35.98	0.52	0.99	37.49
정든	709.8	286.40	4.14	7.86	298.41
동아1단지	76.0	30.68	0.44	0.84	31.96
신화5단지	115.5	46.60	0.67	1.28	48.55
우성4단지	68.0	27.45	0.40	0.75	28.60
우성6단지동아2단지	209.1	84.39	1.22	2.32	87.93
한진6단지	68.9	27.82	0.40	0.76	28.99
한진7단지	59.3	23.92	0.35	0.66	24.92
한진8단지	112.9	45.54	0.66	1.25	47.45
한솔	923.2	372.52	5.38	10.23	388.13
1단지청구	164.9	66.54	0.96	1.83	69.33
2단지LG	147.0	59.30	0.86	1.63	61.78
3단지한양	89.5	36.10	0.52	0.99	37.61
4단지주공	167.8	67.70	0.98	1.86	70.54
5단지주공	144.3	58.24	0.84	1.60	60.69
6단지주공	67.1	27.06	0.39	0.74	28.19
7단지주공	142.7	57.58	0.83	1.58	60.00
전체 계	15627.6	6,306.07	91.11	173.15	6,570.33

출처 : 연구진 작성

부록 6. 분당아파트 단지별 재건축 전/후 연면적 변화 및 에너지 소비량 변화 추정

[별표 6] 분당 아파트 단지별 재건축 전/후 연면적 변화 및 에너지 소비량 변화 추정

(단위: 연면적 10,000 m², 에너지 소비량 gWh)

동/마을/아파트 단지	연면적			에너지 소비량		
	재건축 전	재건축 후	변화율(%)	재건축 전	재건축 후	변화율(%)
구미동	124.58	242.14	94.4	167.54	320.84	91.5
까치	42.95	84.55	96.9	59.56	110.47	85.5
1단지대우롯데선경	8.94	18.14	102.9	12.43	23.74	91.0
3단지신원	11.68	19.96	70.8	13.51	23.19	71.7
건영	3.23	8.25	155.3	6.65	13.86	108.2
금성백조	0.74	1.86	151.9	1.60	3.20	99.6
롯데선경	10.44	19.00	82.0	14.37	24.12	67.8
우방,우성	2.18	5.90	170.5	2.74	6.02	119.6
주공2단지	5.73	11.44	99.6	8.26	16.35	98.1
무지개	61.82	112.56	82.1	79.52	149.50	88.0
10단지삼성건영	6.78	13.47	98.8	8.66	16.35	88.9
11단지금강	1.81	3.43	89.3	2.70	5.45	102.0
12단지주공	6.67	13.20	98.0	9.19	18.36	99.8
1단지대림	7.55	12.94	71.4	10.59	17.93	69.3
2단지LG	9.51	16.28	71.1	11.84	21.20	79.0
3단지신한건영	10.21	16.18	58.5	11.67	21.08	80.6
5단지청구	8.72	15.09	73.1	12.47	20.27	62.5

동/마을/아파트 단지	연면적			에너지 소비량		
	재건축 전	재건축 후	변화율(%)	재건축 전	재건축 후	변화율(%)
6단지건영	3.13	6.46	106.6	3.64	8.20	125.2
7단지라이프	3.27	6.70	105.0	3.76	8.60	128.4
8단지제일	2.37	5.00	111.2	2.81	6.81	142.1
9단지동아	1.82	3.81	109.6	2.18	5.25	140.8
하얀	19.81	45.03	127.3	28.46	60.87	113.9
6단지	7.66	14.61	90.7	12.03	19.01	57.9
그랜드빌	4.94	13.18	167.0	6.70	19.03	183.8
주공5단지	3.92	8.39	114.0	5.71	12.01	110.4
화이트빌	3.29	8.86	169.2	4.01	10.83	169.8
금곡동	52.62	97.76	85.8	72.35	136.27	88.4
청솔	52.62	97.76	85.8	72.35	136.27	88.4
10단지동아	2.90	5.88	102.7	3.38	7.82	131.7
1단지계룡	4.07	7.01	72.5	5.38	10.62	97.3
1단지서광영남	3.95	6.82	72.5	4.59	10.09	120.0
2단지유천화인	5.42	9.84	81.5	7.43	14.23	91.5
3단지한라	6.34	10.91	72.1	9.65	15.65	62.1
7단지성원	6.13	10.60	73.0	7.48	13.95	86.6
8단지대원	8.86	15.33	73.0	12.52	19.46	55.4
공무원5단지	3.83	7.61	98.8	5.04	11.47	127.8
주공6단지	5.65	12.60	123.0	9.20	16.84	82.9
주공9단지	5.48	11.18	104.1	7.68	16.14	110.3
분당동	43.37	84.63	95.1	76.63	123.33	60.9
샛별	28.88	53.19	84.2	41.48	73.36	76.9
동성	5.64	11.51	104.0	8.08	16.19	100.4
라이프	8.26	14.13	71.0	11.94	19.22	61.0
삼부	5.86	11.96	103.9	8.58	17.26	101.2
우방	9.11	15.59	71.2	12.88	20.68	60.6
장안타운	14.49	31.44	117.0	35.15	49.97	42.2
건영	9.00	17.33	92.5	25.66	27.32	6.5
건영3차	1.29	3.29	154.6	1.98	5.35	170.9
건영두산	1.88	4.91	160.8	3.22	7.90	145.1
한신라이프	2.32	5.91	155.3	4.29	9.40	119.3
서현동	130.81	234.99	79.6	163.26	228.50	40.0
시범	95.23	168.98	77.5	116.67	148.07	26.9
삼성한신	22.84	41.19	80.4	28.14	36.68	30.4
우성	21.92	39.08	78.3	28.85	36.84	27.7
한양	26.75	46.65	74.4	31.17	39.38	26.4

동/마을/아파트 단지	연면적			에너지 소비량		
	재건축 전	재건축 후	변화율(%)	재건축 전	재건축 후	변화율(%)
현대	23.72	42.05	77.3	28.53	35.17	23.3
효자촌	35.58	66.01	85.5	46.58	80.42	72.6
대명	0.94	2.35	150.0	1.72	3.93	128.5
동아	7.80	14.27	82.9	10.09	17.75	75.9
삼환	7.61	14.16	85.9	10.51	18.77	78.6
임광	9.40	16.79	78.6	11.39	20.66	81.5
정도	0.95	2.39	151.6	1.80	4.11	128.0
현대	8.88	16.06	80.9	11.07	15.20	37.3
수내동	41.36	73.08	76.7	70.41	74.86	6.3
양지	11.35	19.33	70.2	14.63	21.89	49.6
2단지청구	11.35	19.33	70.2	14.63	21.89	49.6
파크타운	10.04	17.15	70.8	13.99	20.58	47.1
대림	10.04	17.15	70.8	13.99	20.58	47.1
푸른	19.96	36.60	83.4	41.79	32.38	-22.5
벽산쌍용신성	19.96	36.60	83.4	41.79	32.38	-22.5
야탑동	150.84	282.69	87.4	202.63	346.60	71.0
매화	29.73	63.26	112.8	44.84	95.28	112.5
건영1차	1.70	4.38	158.1	3.15	7.60	141.1
공무원1단지	4.35	8.32	91.2	5.90	12.70	115.1
공무원2단지	9.87	17.25	74.7	13.41	23.93	78.4
동신건영2차	1.64	4.22	157.1	3.15	7.35	133.5
주공3단지	4.60	11.42	148.2	7.33	14.93	103.7
주공4단지	3.50	7.43	112.6	4.98	11.47	130.2
청구	1.35	3.40	152.4	2.23	5.66	153.6
현대벽산	1.64	4.13	151.4	2.93	7.19	145.1
화성빌리지	1.07	2.69	151.7	1.74	4.45	155.4
목련	22.87	49.42	116.1	35.94	77.50	115.6
SK	2.01	3.68	83.4	3.16	5.81	84.0
대원	1.15	2.87	150.3	2.16	4.94	129.4
대원3단지	1.45	3.64	150.9	2.54	6.23	145.1
두원	1.14	2.86	150.9	1.88	4.83	157.0
미원	0.99	2.49	150.0	1.46	4.12	182.8
성환	1.21	3.06	152.8	2.06	5.12	149.2
영남	2.46	4.66	89.3	3.62	7.32	102.1
주공1단지	6.01	12.63	110.1	9.14	17.23	88.4
한신	2.17	4.13	90.6	3.27	6.75	106.4
한일	2.30	4.36	89.8	3.49	6.97	99.6

동/마을/아파트 단지	연면적			에너지 소비량		
	재건축 전	재건축 후	변화율(%)	재건축 전	재건축 후	변화율(%)
화성빌리지	1.98	5.04	154.7	3.17	8.16	157.8
분당	2.18	3.61	65.8	2.38	5.38	126.0
동원로얄듀크	2.18	3.61	65.8	2.38	5.38	126.0
장미	28.26	48.37	71.2	46.89	54.65	16.5
1단지동부	7.55	13.16	74.3	20.62	18.44	-10.6
8단지현대	20.71	35.21	70.1	26.26	36.21	37.9
탑	67.81	118.03	74.0	72.58	113.79	56.8
1단지선경	10.20	17.86	75.0	13.95	23.17	66.2
2단지대우	9.71	16.65	71.5	11.15	19.37	73.7
3단지타워빌	25.32	43.23	70.8	18.51	24.90	34.5
5단지동아	0.75	1.90	152.4	1.46	3.26	122.9
6단지벽산7단지경남 아너스빌	18.19	31.02	70.5	21.99	31.77	44.5
8단지주공	3.64	7.37	102.6	5.52	11.31	105.0
이매동	122.60	216.08	76.2	155.94	268.26	72.0
아름	50.51	88.87	75.9	60.85	98.38	61.7
1,2,3단지건영한성태 영	18.60	33.25	78.8	23.21	32.83	41.4
4단지두산삼호	14.99	26.35	75.8	17.90	29.36	64.1
5단지풍림	11.12	19.33	73.8	13.11	23.56	79.7
7단지효성	5.81	9.93	71.1	6.64	12.63	90.3
이매촌	72.09	127.21	76.5	95.08	169.87	78.7
10단지삼성	14.24	25.12	76.4	18.03	30.23	67.7
11단지삼환	7.00	12.37	76.6	8.33	16.72	100.8
1단지금강	5.52	9.43	70.9	7.45	14.19	90.5
2단지한신	9.57	16.40	71.3	13.56	22.02	62.4
3단지동신	5.62	10.03	78.6	7.36	13.77	87.2
5단지동부코오롱	3.86	6.59	70.8	4.52	9.23	104.3
6단지청구	8.77	16.31	86.0	12.67	20.52	62.0
7단지성지	3.25	6.25	92.3	4.48	9.32	108.1
8단지진흥	8.66	14.71	70.0	11.51	19.81	72.1
9단지동신	5.60	10.00	78.6	7.18	14.05	95.7
정자동	145.40	248.45	70.9	216.96	343.86	58.5
느티	3.32	8.92	168.2	4.16	10.75	158.6
경남선경	3.32	8.92	168.2	4.16	10.75	158.6
분당	36.23	44.11	21.8	44.85	53.54	19.4
로얄팰리스	13.83	16.64	20.3	15.32	23.09	50.7
아이파크분당1	22.40	27.47	22.6	29.53	30.45	3.1

동/마을/아파트 단지	연면적			에너지 소비량		
	재건축 전	재건축 후	변화율(%)	재건축 전	재건축 후	변화율(%)
상록	22.69	39.73	75.1	45.50	56.89	25.0
1,2단지라이프	7.00	12.18	74.0	11.38	18.46	62.2
3단지우성	10.79	18.63	72.6	26.80	25.27	-5.7
4단지임광보성	4.90	8.92	82.0	7.32	13.16	79.9
정든	35.43	63.37	78.9	45.65	84.27	84.6
신화5단지	6.80	11.55	69.8	8.41	16.14	91.9
우성4단지	3.99	6.80	70.5	4.85	9.12	88.1
우성6단지동아2단지	11.23	20.91	86.2	15.19	25.89	70.4
한진6단지	3.87	6.89	78.3	4.59	9.69	110.9
한진7단지	3.26	5.93	82.0	4.99	9.14	83.3
한진8단지	6.29	11.29	79.5	7.62	14.29	87.6
한솔	47.72	92.32	93.4	76.81	138.41	80.2
1단지청구	8.38	16.49	96.7	12.41	21.81	75.8
2단지LG	8.61	14.70	70.8	9.88	17.79	80.1
3단지한양	4.55	8.95	96.8	6.16	12.62	104.8
4단지주공	8.34	16.78	101.3	16.85	39.99	137.3
5단지주공	7.68	14.43	88.0	13.18	19.58	48.5
6단지주공	3.60	6.71	86.5	6.53	8.85	35.5
7단지주공	6.58	14.27	116.9	11.79	17.76	50.7
전체 계	811.58	1,479.83	82.3	1125.70	1842.51	63.7

출처 : 연구진 작성

부록 7. 분당아파트 단지별 재건축 이후 이산화탄소 배출량과 변화율

[별표 7] 분당 아파트 단지별 재건축 이후 이산화탄소 배출량과 변화율

(단위: 이산화탄소 배출량: kton-CO₂/㎡, 변화율: %)

동/마을/ 아파트 단지	전기 에너지		가스 에너지		난방 에너지		전체 에너지원 합계	
	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)
구미동	49.06	103.9	2.25	131.8	44.25	83.8	95.55	94.6
까치	17.40	106.4	0.78	150.8	14.99	73.2	33.17	90.7
1단지대우롯데선경	3.92	105.9	0.17	137.4	3.13	81.0	7.22	94.9
3단지산원	4.20	107.6	0.14	97.3	2.91	52.6	7.25	81.1
건영	1.58	122.9	0.11	229.6	2.16	99.6	3.85	111.0
금성백조	0.32	63.1	0.03	39.6	0.52	119.1	0.86	91.5
롯데선경	4.10	94.2	0.17	194.9	3.12	51.0	7.40	74.5
우방,우성	0.87	158.7	0.03	183.2	0.87	103.5	1.77	128.4
주공2단지	2.42	109.7	0.13	176.0	2.27	89.3	4.83	100.8
무지개	24.52	110.1	0.96	109.5	19.92	76.1	45.40	93.7
10단지삼성건영	3.11	150.4	0.09	110.6	2.00	59.0	5.19	104.5
11단지금강	0.72	64.6	0.04	120.6	0.81	122.5	1.56	91.6
12단지주공	2.86	111.2	0.16	159.0	2.48	91.2	5.49	102.7
1단지대림	2.74	82.4	0.12	106.5	2.48	61.6	5.34	72.6
2단지LG	3.52	108.6	0.14	90.1	2.80	64.4	6.46	86.5
3단지신한건영	3.49	100.3	0.14	82.7	2.79	70.5	6.42	85.8
5단지청구	3.19	73.9	0.14	99.7	2.75	55.2	6.08	65.4
6단지건영	1.41	135.8	0.04	141.1	1.08	118.6	2.52	128.2
7단지라이프	1.48	171.0	0.04	101.0	1.13	108.8	2.65	139.4
8단지제일	1.13	159.9	0.03	142.9	0.91	132.6	2.07	146.8
9단지동아	0.89	196.3	0.03	133.2	0.70	116.4	1.61	154.5
하얀	7.14	80.0	0.51	153.2	9.34	127.5	16.99	105.3
6단지	1.94	2.9	0.23	90.5	2.98	86.4	5.15	42.9

동/마을/ 아파트 단지	전기 에너지		가스 에너지		난방 에너지		전체 에너지원 합계	
	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)
그랜드빌	2.39	221.4	0.10	296.9	2.91	168.7	5.40	191.5
주공5단지	1.34	52.8	0.14	281.9	1.84	132.6	3.31	94.6
화이트빌	1.46	219.0	0.05	132.4	1.61	154.1	3.13	180.4
금곡동	19.96	76.9	1.09	108.6	19.07	93.5	40.12	85.2
청솔	19.96	76.9	1.09	108.6	19.07	93.5	40.12	85.2
10단지동아	1.28	169.3	0.04	140.2	1.06	114.1	2.38	141.2
1단지계룡	1.39	60.2	0.08	102.3	1.57	118.6	3.04	87.0
1단지서광영남	1.53	110.0	0.06	121.0	1.41	125.5	3.00	117.2
2단지유천화인	2.13	84.3	0.10	104.2	1.98	94.7	4.21	89.5
3단지한라	2.14	46.8	0.12	124.0	2.27	67.4	4.53	58.0
7단지성원	2.30	95.2	0.07	90.3	1.87	81.7	4.24	88.9
8단지대원	3.34	74.9	0.11	32.4	2.53	46.3	5.99	60.7
공무원5단지	1.60	112.3	0.08	102.1	1.65	137.4	3.33	123.8
주공6단지	1.94	19.4	0.22	75.3	2.51	129.1	4.68	64.0
주공9단지	2.31	103.9	0.19	367.0	2.22	103.1	4.72	108.2
분당동	18.32	66.5	0.89	36.0	17.24	59.9	36.45	62.4
샛별	11.49	84.7	0.49	106.4	10.02	71.6	21.99	78.9
동성	2.63	110.6	0.11	101.8	2.16	94.8	4.90	103.1
라이프	3.06	76.9	0.13	115.2	2.60	51.2	5.79	65.0
삼부	2.58	91.6	0.11	119.4	2.42	105.6	5.11	98.5
우방	3.21	69.7	0.14	92.8	2.84	54.8	6.19	62.9
장안타운	6.83	42.9	0.40	-3.6	7.22	46.0	14.46	42.5
건영	3.81	6.0	0.25	-29.9	3.87	10.8	7.94	6.5
건영3차	0.69	161.3	0.03	222.3	0.80	173.0	1.53	168.5
건영두산	1.06	152.1	0.05	170.8	1.16	141.0	2.28	146.7
한신라이프	1.27	154.1	0.06	133.1	1.38	106.3	2.71	126.8
서현동	45.59	94.5	1.55	71.6	26.46	12.6	73.61	53.8
시범	31.84	92.2	1.09	68.3	15.96	-5.5	48.89	43.4
삼성한신	7.87	94.4	0.25	22.8	3.98	-0.3	12.10	46.8
우성	7.52	90.2	0.27	105.1	4.16	-2.6	11.95	43.0
한양	8.74	99.4	0.33	104.1	4.07	-10.3	13.14	44.6
현대	7.70	84.5	0.24	59.5	3.75	-8.1	11.68	39.1
효자촌	13.76	100.2	0.46	79.8	10.50	58.7	24.72	79.8
대명	0.42	71.4	0.03	54.1	0.62	164.2	1.08	114.2
동아	3.00	112.7	0.10	72.7	2.34	59.1	5.44	85.1
삼환	3.01	74.2	0.11	94.3	2.55	80.4	5.66	77.3
임광	3.56	115.3	0.12	130.5	2.69	63.5	6.37	90.1
정도	0.41	91.7	0.03	106.5	0.67	143.1	1.11	120.0
현대	3.35	107.0	0.07	28.6	1.64	3.6	5.06	55.4
수내동	14.51	33.7	0.42	3.4	8.97	-8.2	23.90	13.7
양지	3.75	99.7	0.12	91.3	2.86	28.1	6.73	61.3
2단지청구	3.75	99.7	0.12	91.3	2.86	28.1	6.73	61.3

동/마을/ 아파트 단지	전기 에너지		가스 에너지		난방 에너지		전체 에너지원 합계	
	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)
파크타운	3.71	48.6	0.12	47.8	2.60	46.1	6.42	47.6
대림	3.71	48.6	0.12	47.8	2.60	46.1	6.42	47.6
푸른	7.06	8.9	0.17	-32.2	3.51	-39.0	10.75	-14.0
벽산쌍용신성	7.06	8.9	0.17	-32.2	3.51	-39.0	10.75	-14.0
아탑동	50.61	63.3	2.76	74.7	48.58	74.9	101.95	69.0
매화	11.16	75.2	0.82	129.6	14.60	129.4	26.59	103.0
건영1차	0.78	87.7	0.06	110.2	1.22	166.6	2.07	128.3
공무원1단지	1.64	79.2	0.10	94.9	1.88	136.3	3.62	105.4
공무원2단지	3.04	48.7	0.21	97.2	3.56	93.1	6.80	70.4
동신건영2차	0.76	102.8	0.06	492.8	1.18	136.8	2.00	126.4
주공3단지	1.89	84.6	0.14	144.0	2.21	110.2	4.24	98.8
주공4단지	1.14	53.6	0.13	189.1	1.83	165.8	3.09	110.0
청구	0.66	132.5	0.04	168.2	0.88	161.4	1.58	148.6
현대벽산	0.70	103.2	0.06	104.1	1.17	163.8	1.93	136.0
화성빌리지	0.55	142.7	0.03	71.8	0.68	166.8	1.26	152.7
목련	8.42	60.4	0.70	76.3	12.15	147.3	21.28	101.4
SK	0.66	34.9	0.05	10.5	0.91	119.7	1.61	71.0
대원	0.50	89.0	0.04	83.5	0.80	148.7	1.34	120.4
대원3단지	0.64	79.7	0.05	208.6	1.00	172.6	1.69	128.5
두원	0.56	139.6	0.03	213.4	0.76	161.4	1.34	152.9
미원	0.50	151.4	0.03	192.5	0.63	196.3	1.16	175.1
성환	0.61	129.4	0.03	147.3	0.79	157.4	1.43	144.5
영남	0.97	67.5	0.05	87.0	1.08	123.1	2.10	92.6
주공1단지	1.28	-9.0	0.26	60.9	2.87	149.7	4.41	62.3
한신	0.76	50.6	0.05	69.6	1.06	140.0	1.87	91.4
한일	0.88	69.3	0.05	12.1	1.05	125.0	1.98	92.0
화성빌리지	1.07	145.4	0.05	196.0	1.22	161.8	2.34	154.7
분당	0.77	91.9	0.03	45.9	0.78	152.5	1.58	116.4
동원로알듀크	0.77	91.9	0.03	45.9	0.78	152.5	1.58	116.4
장미	9.11	8.9	0.44	1.8	7.11	23.0	16.67	14.3
1단지동부	2.68	-39.0	0.12	-45.2	2.62	20.6	5.42	-20.1
8단지현대	6.44	61.9	0.32	49.7	4.49	24.4	11.25	44.2
탑	21.14	99.5	0.77	105.9	13.93	34.0	35.84	67.7
1단지선경	3.73	94.7	0.16	93.4	3.11	52.2	7.00	73.2
2단지대우	3.38	103.8	0.10	54.3	2.51	59.4	5.99	81.6
3단지타워빌	5.56	102.1	0.14	15.3	2.64	1.3	8.33	52.3
5단지동아	0.33	76.5	0.03	210.6	0.53	137.7	0.88	112.0
6단지벽산7단지경남 아너스빌	7.18	113.0	0.22	275.3	3.27	4.4	10.67	62.6
8단지주공	0.96	34.6	0.13	206.2	1.88	128.7	2.96	88.2
이매동	43.55	88.4	1.70	88.4	35.98	63.1	81.23	76.3
아름	17.52	93.4	0.59	74.4	12.49	45.2	30.60	70.0

동/마을/ 아파트 단지	전기 에너지		가스 에너지		난방 에너지		전체 에너지원 합계	
	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)	배출량	변화율(%)
1,2,3단지간영한성태영	6.44	84.3	0.21	48.4	3.87	19.1	10.52	52.8
4단지두산삼호	5.04	88.7	0.18	101.6	3.81	50.2	9.04	70.5
5단지풍림	3.95	104.0	0.14	85.7	3.11	67.3	7.20	86.0
7단지효성	2.08	118.3	0.06	81.9	1.70	77.3	3.84	97.5
이매촌	26.04	85.2	1.10	96.9	23.49	74.6	50.63	80.3
10단지삼성	4.91	91.6	0.19	21.6	4.05	59.3	9.16	73.9
11단지삼환	2.57	100.7	0.10	619.1	2.32	94.3	4.99	100.5
1단지금강	1.85	60.3	0.10	153.4	2.10	103.9	4.06	82.2
2단지한신	3.06	52.2	0.19	142.1	3.14	63.9	6.40	59.6
3단지동신	2.20	115.0	0.08	104.9	1.88	73.9	4.15	94.1
5단지동부코오롱	1.36	108.3	0.05	123.4	1.31	101.7	2.72	105.3
6단지청구	3.43	85.5	0.12	60.3	2.71	50.6	6.27	68.1
7단지성지	1.46	119.3	0.06	64.8	1.28	105.0	2.80	111.2
8단지진흥	3.13	74.7	0.13	105.3	2.70	69.3	5.95	72.7
9단지동신	2.06	93.1	0.08	134.5	2.00	95.5	4.14	94.9
정자동	59.14	64.1	2.69	87.5	43.98	53.5	105.80	60.0
느티	1.57	205.9	0.05	210.6	1.54	139.1	3.17	169.3
경남선경	1.57	205.9	0.05	210.6	1.54	139.1	3.17	169.3
분당	12.63	46.0	0.15	-28.2	5.49	1.1	18.28	27.8
로얄팰리스	5.20	66.9	0.06	-37.8	2.50	42.2	7.75	56.2
아이파크분당1	7.44	34.3	0.09	-20.4	3.00	-18.6	10.53	12.8
상록	6.83	-2.0	0.48	88.8	8.65	36.5	15.96	17.7
1,2단지라이프	2.47	44.0	0.12	109.3	2.72	69.7	5.32	57.3
3단지우성	2.49	-40.0	0.26	96.7	4.05	8.6	6.80	-15.1
4단지임광보성	1.87	69.1	0.09	52.5	1.88	87.4	3.85	77.1
정든	13.35	90.3	0.55	73.3	11.44	82.2	25.34	86.2
신화5단지	2.50	99.8	0.10	94.5	2.22	87.7	4.83	93.9
우성4단지	1.42	93.4	0.04	104.2	1.26	84.9	2.73	89.5
우성6단지동아2단지	4.30	83.4	0.22	124.1	3.37	60.8	7.89	73.8
한진6단지	1.49	99.2	0.05	116.3	1.35	117.4	2.89	107.6
한진7단지	1.24	67.4	0.07	-3.7	1.34	101.5	2.64	79.5
한진8단지	2.38	100.7	0.07	30.7	1.90	83.9	4.36	91.3
한솔	24.75	92.2	1.45	129.9	16.85	69.3	43.05	83.5
1단지청구	3.59	86.3	0.15	54.7	2.89	71.4	6.63	78.7
2단지LG	3.08	108.8	0.09	86.0	2.32	65.3	5.49	87.6
3단지한양	2.09	126.9	0.07	125.1	1.68	92.7	3.84	110.6
4단지주공	11.39	218.5	0.51	180.4	2.74	54.4	14.64	164.5
5단지주공	2.65	-4.4	0.19	203.0	2.81	88.8	5.65	30.6
6단지주공	0.36	46.7	0.15	210.7	1.61	27.3	2.11	36.0
7단지주공	1.60	-18.5	0.28	79.8	2.81	91.5	4.69	30.8
전체 계	300.74	76.1	13.34	81.1	244.54	56.3	558.61	66.9

출처 : 연구진 작성