



## 노후 보건소의 그린리모델링 전후에 따른 탄소배출량 전과정평가

### *A Life Cycle Assessment of Carbon Emissions Before and After Green Remodeling of Old Public Health Centers*

김원예\* · 남유진\*\*

Kwonye Kim\* · Yujin Nam\*\*

\* Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (ellie20@pusan.ac.kr)

\*\* Corresponding author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (namyujin@pusan.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** This study aims to evaluate the effectiveness of green remodeling strategies in reducing life cycle carbon emissions in aging public health centers. With the growing emphasis on carbon neutrality, improving the energy performance of public buildings through sustainable renovation is becoming increasingly important. The objective is to compare the carbon emissions before and after remodeling and to assess the benefits of incorporating low-carbon materials and high-efficiency systems. **Method:** Two aged public health centers were selected as case studies. A Life Cycle Assessment (LCA) approach was applied to estimate both operational and embodied carbon emissions. Energy simulation was performed using ECO2-OD to assess energy consumption before and after remodeling. Key elements analyzed included thermal insulation, high-performance glazing, and energy-efficient HVAC systems. A comparative analysis of a conventional remodeling approach (Option A) and an LCA-based optimized approach (Option B) was conducted. **Result:** The results showed that Option B achieved greater reductions in total life cycle carbon emissions compared to Option A. Operational carbon was significantly reduced, and although embodied carbon slightly increased, the overall carbon payback period was shorter. The findings confirm that integrating low-carbon materials and renewable energy technologies in green remodeling can enhance long-term carbon reduction performance in public buildings.

#### KEYWORD

노후건축물  
그린리모델링  
건물 에너지 성능 평가  
탄소배출량  
건물 전과정평가

Old Building  
Green Remodeling  
Building Energy Performance Analysis  
Carbon Emission  
Building Life Cycle Assessment

#### ACCEPTANCE INFO

Received Apr. 25, 2025

Final revision received May 20, 2025

Accepted May 26, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구 배경

국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)에 따르면, 건축 부문은 전 세계 온실가스 배출량의 약 40%를 차지하는 주요 배출원으로, 탄소중립 실현을 위해 건축물의 에너지 효율 개선과 탄소배출 저감 전략이 필수적으로 요구되고 있다[1]. 특히 기존 건물의 노후화가 가중됨에 따라, 건축물 철거 없이 개보수를 통해 에너지 성능을 향상시키고 탄소 배출량을 줄일 수 있는 그린리모델링(Green Remodeling)이 탄소중립 실현을 위한 핵심 기술로 주목받고 있다[2].

2022년 기준 국내 전체 735만여 동의 건축물 중 준공 후 20년 이상 경과한 노후 건축물 비율은 60.4%에 달하며, 그중 30년 이상 경과한 건축물은 301만여 동의로 전체의 41.0%를 차지하고 있다[3]. 이에 따라 국내외적으로 노후 건축물의 에너지 성능 개선과 탄소배출 저감을 위한 효과적인 대안으로 그린리모델링이 주목받고 있다[4].

특히, 의료시설과 같은 노후 공공건축물은 연중 운영으로 냉난방 및 전력 소비가 높아 그린리모델링을 통한 에너지 절감 및 탄소 감축 효과가 클 것으로 기대된다. Fig. 1은 최근 3년 동안의 단위면적당

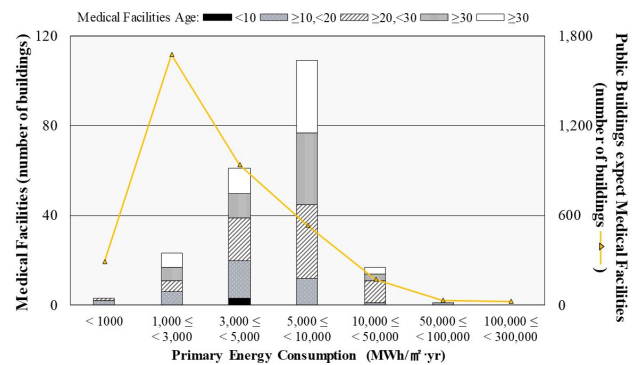


Fig. 1. Current status of existing buildings by year

연간 1차 에너지소비량을 나타낸다. 의료시설은 다른 공공건축물이 2,520MWh/m<sup>2</sup>인데 비해 6,200MWh/m<sup>2</sup>으로 높아, 에너지 절감을 위한 그린리모델링 적용이 필수적인 상황이다[2].

### 1.2. 연구 필요성

현재 선행연구를 통해 그린리모델링의 효과와 한계에 대한 논의가 지속되고 있음을 확인하였다. 배영현 외(2021)는 ECO2-OD를 활용한 노후 공공건축물의 에너지 절감 효과 분석을 통해, 벽체 및

창호 단열 개선이 가장 효율적인 기술 요소임을 입증하였고[5], 우수진과 이상운(2022)은 보건소와 같은 소규모 공공건축물에서 최대 45.8%의 에너지 절감 효과를 확인하며, 용도별 맞춤형 리모델링 전략의 필요성을 강조하였다[6]. 또한, 노상태(2024)는 ECO2-OD 시뮬레이션을 기반으로 보건소의 난방기기 교체 시 약 최대 60%의 에너지 절감과 함께, 단위면적당 요소별 비용대비 에너지 절감 효과를 분석하였다[7].

그러나 대부분의 기존 연구는 개별 기술의 에너지 절감효과나 경제적 타당성 분석에 초점을 맞추고 있으며, 실제 건축물의 생애주기 전 과정에서 발생하는 환경영향, 특히 탄소 배출량에 대한 통합적 연구는 부족한 실정이다[8~11]. 즉, 건축 자재의 생산·시공·유지관리·폐기 등에서 발생하는 내재탄소(Embodied Carbon)와, 운영 단계에서 발생하는 운영탄소(Operational Carbon)를 통합적으로 고려한 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 기반 노후건축물의 탄소중립 실현에 대해서는 제한적이다.

이에 따라 본 연구는 경성권에 위치한 동일 용도의 노후 보건소 건축물을 대상으로, 그린리모델링 전·후의 에너지 성능과 탄소배출량 변화를 정량적으로 분석하고, 적용된 기술 요소의 차이에 따른 전과정 탄소배출 저감 효과의 특성을 비교·평가하고자 한다. 이를 통해 단순한 에너지 절감을 넘어, 동일 용도의 공공건축물이라 하더라도 적용된 리모델링 기술 구성 및 내·외부 조건에 따라 전과정 탄소배출 성과가 어떻게 달라지는지를 실증적으로 비교·분석하고자 한다. 또한, 운영 단계의 운영탄소 분석뿐 아니라 내재탄소까지 통합적으로 고려한 LCA 기반 정량 분석을 통해, 요소 기술별 탄소저감 기여도와 전략적 우선순위를 제시하고자 한다. 더 나아가 추후에는 다른 용도에 대한 분석을 추가하고자 한다[12].

## 2. 연구 방법 및 대상 선정

### 2.1. 그린리모델링 적용된 노후건축물의 전과정평가

본 연구는 전과정평가를 활용하여 노후 공공건축물의 그린리모델링 적용 전·후의 탄소배출량 변화를 정량적으로 분석하는 것을 목적으로 하며, 이를 위해 대한민국 내 동일 용도의 노후 공공건축물인 보건소 두 곳을 선정하여 에너지 성능 및 탄소배출량을 비교·분석하였다. Fig. 2.와 같이 시스템 경계(System boundary)는 “Cradle to Grave”, 즉 자재 생산부터 건물 철거 및 폐기까지 전과정을 포함하는 것으로 설정하였다. 기능 단위는 건물 1m<sup>2</sup>당 연간 CO<sub>2</sub>-eq 배출량(kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>·yr)으로 정의하였다. 또한, ISO 14064-2:2019 및 ISO 14067:2018 원칙에 타당성을 인정받은 탄소중립건축지수(Zero Carbon Building Index, ZCBI)의 리모델링건축물 기준을 참고한 시스템경계로, 특히 그린리모델링 과정에서 발생하는 기존건축물의 해체 및 폐기물 처리 과정을 이전단계(P1-4)로 설정하고 기축 건물에 대한 데이터를 수집하였다. LCA 분석은 ISO 14040 및 EN 15978 표준을 준용하여 수행되었으며, 운영과정에서 발생하는 에너지 소요량 예측을 위해 현재 그린리모델링 에너지 ECO2-OD 시뮬레이션을 활용하여 그린리모델링 적용 전·후의 에너지 성능 변화를 분석하였다. 또한, 창호 개선, 단열 보강, 고효율 설비 적용 등

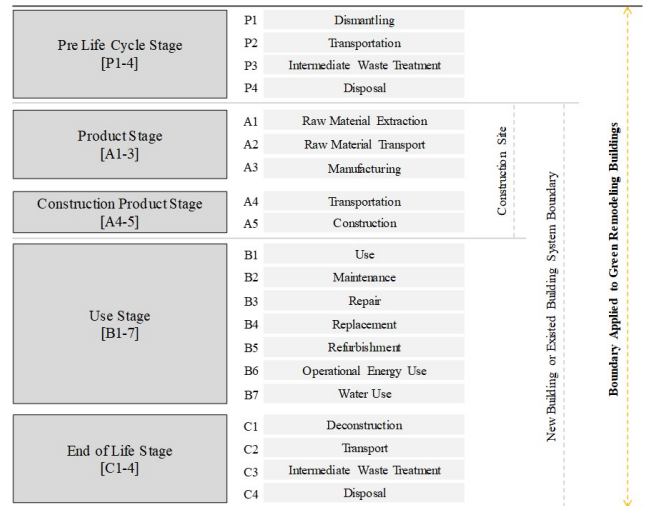


Fig. 2. LCA system boundary for green remodeling

주요 그린리모델링 기술 요소별 탄소 감축 기여도를 비교 분석함으로써, 특정 기술이 배출량 저감에 미치는 상대적 영향을 평가하였다. 단, ZCBI가 탄소 감축 기여를 탄소중립 관점에서 평가하는 방식이라면, 본 연구는 전 생애주기에서의 절대적인 탄소배출량 변화를 단계별로 정량적으로 분석한다는 점에서 차이가 있으며, 이를 통해 노후 건축물의 탄소중립 실현 가능성을 검증하고 보다 효과적인 리모델링 전략을 도출하는 데 기여할 것으로 기대된다.

Fig. 2.와 같이, 전과정평가(LCA)는 제품이나 시스템의 전 생애 주기에 발생하는 환경 영향을 정량적으로 평가하는 방법으로, 국제 표준(ISO 14040 및 ISO 14044)에 따라 수행된다. 건축물의 탄소 배출량은 A 건설 단계(Construction Phase), B 운영 단계(Operational Phase), C 철거 및 폐기 단계(Demolition & Disposal Phase)로 구분되며, 각 단계에서 발생하는 탄소 배출량을 평가하는 것이 중요하다. 일반적으로, 건축물의 탄소배출은 BoM (Bill of Material)과 건축도서, 제품 인증서, 전문가 자문을 기준으로 산출된다.

그린리모델링을 적용한 노후 건축물의 전과정평가는 특히 이전 설계도서에 대한 부분이 명확하지 않으므로 P 이전단계를 추가하여 기축 건물 대비 에너지 절감효과와 탄소 저감효과를 정량적으로 분석하는 데 활용될 수 있으며, 특히 리모델링 과정에서 투입되는 건축 자재와 기술 요소가 환경 부담을 증가시키지 않도록 설계 단계에서 중요한 단계라고 판단된다.

### 2.2. 대상 건물

본 연구는 노후 공공건축물의 그린리모델링이 에너지 성능 개선과 전과정 탄소 배출 저감에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해, 국내에서 실제로 그린리모델링이 완료된 보건소 2개소를 연구 대상으로 선정하였다. 대상 건물은 모두 준공 후 30년 이상 경과한 노후 공공건축물로, 에너지 효율 향상을 주목적으로 한 리모델링이 최근에 완료되었으며, 에너지 사용량 및 탄소 배출량에 대한 시뮬레이션 분석을 수행할 수 있는 설계도서 및 시공 내역, 운영자료 등이 확보 가능한 곳으로 선정되었다. 또한 비교 분석의 신뢰성을 높이기

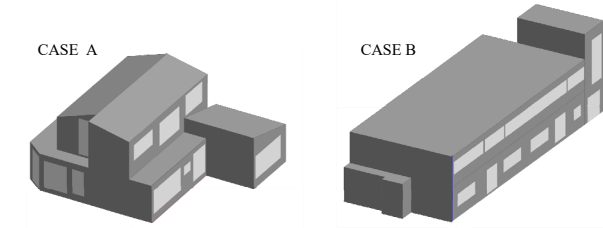


Fig. 3. Modeling of buildings

Table 1. Performance before and after green remodeling

CASE		Exterior wall	Top floor	Bottom floor	Windows	U-value
A	Before	0.382 W/m <sup>2</sup> K	0.523 W/m <sup>2</sup> K	0.756 W/m <sup>2</sup> K	3.10 W/m <sup>2</sup> K	0.688
	After	0.226 W/m <sup>2</sup> K	0.523 W/m <sup>2</sup> K	0.756 W/m <sup>2</sup> K	1.70 W/m <sup>2</sup> K	0.266
B	Before	0.580 W/m <sup>2</sup> K	0.35 W/m <sup>2</sup> K	0.41 W/m <sup>2</sup> K	4.19 W/m <sup>2</sup> K	0.717
	After	0.281 W/m <sup>2</sup> K	0.35 W/m <sup>2</sup> K	0.41 W/m <sup>2</sup> K	1.80 W/m <sup>2</sup> K	0.583

위해, 유사한 용도와 규모를 가진 건물 중 층수, 연면적, 공간구성과 같은 물리적 조건이 유사한 공공의료시설을 대상으로 하였다.

Fig. 3.과 같이, 선정된 두 건물은 각각 연면적 207.59m<sup>2</sup>와 488.80m<sup>2</sup>의 2층 규모 보건소로, 지역 주민에게 일차 의료서비스를 제공하는 공공건축물이다. 두 건물 모두 국책사업을 통해 고성능 단열재, 고효율 이중창호, LED 조명, 고효율 냉난방·환기 시스템(HVAC) 등 주요 에너지 요소에 대한 개선이 이루어졌으며, 특히 건물 B의 경우 바닥단열이 추가로 시공되었고, 5kW 규모의 태양광 발전설비가 설치되어 신재생에너지를 활용한 사례로 포함되었다. 이를 통해 단순한 패시브 성능 개선 외에도 재생에너지 요소의 통합 효과를 비교하고자 한다.

Table 1.은 대상건물들의 열성능이 개선된 벽체 및 창호의 열관류율을 정리한 것으로 그린리모델링을 통해 벽체 단열 성능 개선으로 평균 41.8% 에너지 성능이 향상되었음을 확인하였다. 외벽 단열 공사가 상대적으로 비용 대비 효율성이 높고 현재 많은 지역에서 에너지 효율 개선을 위한 규제나 인센티브가 외벽에 초점을 맞추고 있어 지붕과 최하층의 열성능 개선 작업에 어려움이 있다. 창호의 경우 3.819W/m<sup>2</sup>K에서 1.751W/m<sup>2</sup>K로 평균 55.3% 열관류율이 향상되었으며, 일사취득계수는 개선은 평균 0.717에서 0.494로 31% 낮아져 냉방 측면의 보완이 이루어짐을 확인하였다. 이는 벽체와 창호의 물리적 성능 향상이 에너지 저감효과에 직접적으로 기여했음을 보여준다. 이러한 조건을 바탕으로, 본 연구는 두 건물의 전과정 탄소배출량을 비교 분석하여, 실제 현장에서 적용 가능한 그린리모델링 기술요소의 효과성을 실증적으로 검토하고자 하였다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1. 그린리모델링 전·후 에너지 성능 비교

본 연구에서는 건물 A와 건물 B에 대해 그린리모델링 전후의 연

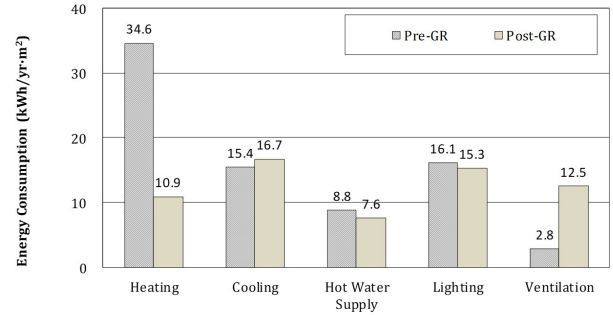


Fig. 4. Energy consumption - building A

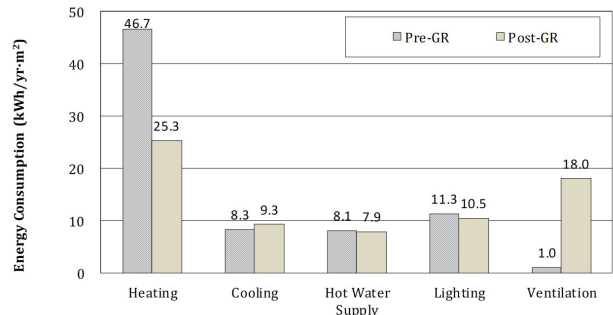


Fig. 5. Energy consumption - building B

간 에너지 소비량을 비교 분석함으로써, 에너지 성능 개선 효과를 정량적으로 평가하였다. 에너지 소비량은 ECO2-OD 시뮬레이션을 활용하여 산출하였으며, 냉방, 난방, 급탕, 조명, 환기 등의 주요 사용 부분별 소비 전력량을 포함하였다(Fig. 4., Fig. 5.).

건물 A의 에너지 성능은 ECO2-OD 시뮬레이션을 통해 항목별 연간 에너지 소비량(kWh/m<sup>2</sup>-yr)을 산정한 뒤, 그린리모델링 전(Pre-GR)과 후(Post-GR)를 비교하여 평가하였다. 분석 대상은 난방, 냉방, 급탕, 조명, 환기 총 다섯 개 항목이며, 이를 통해 전체적인 에너지 소비 변화와 항목별 기여도를 정량적으로 분석하였다. 그린리모델링 전 건물 A의 에너지 소비량은 약 380.5kWh/m<sup>2</sup> 수준이었으며, 리모델링 후에는 약 291.0kWh/m<sup>2</sup>로 감소하였다. 이를 통해 전체 에너지 소비량은 약 23.5% 절감된 것으로 나타났다. 개별 항목별로는 난방과 조명에서 뚜렷한 절감 효과가 확인되었으며, 반면 냉방 및 환기 부문에서는 오히려 에너지 소비량이 증가하였다.

가장 큰 절감효과가 나타난 부문은 난방이다. 리모델링 전 난방 에너지 소비량은 약 180kWh/m<sup>2</sup>였으나, 리모델링 이후 85kWh/m<sup>2</sup>로 감소하며 약 52.8%의 절감 효과를 보였다. 이는 외벽과 창호에 고성능 단열재와 고효율 창호를 적용함으로써 열손실이 크게 줄어든 결과로 해석된다. 또한 조명 부문에서도 리모델링 전 70.3kWh/m<sup>2</sup>에서 리모델링 후 40.1kWh/m<sup>2</sup>로 약 42.9% 감소하였으며, 이는 기존 조명을 고효율 LED로 교체한 결과이다. 두 항목의 절감은 전체 에너지 성능 개선에 있어 핵심 기여 요소로 확인되었다.

한편 냉방 부문에서는 리모델링 전 75.0kWh/m<sup>2</sup>에서 리모델링 후 88.3kWh/m<sup>2</sup>로 약 17.3% 증가하였다. 이는 단열 성능 개선에 따라 냉방 부하가 누적되거나, 에너지 시뮬레이션에서 설정된 쾌적성

기준에 따라 실내 냉방 운영시간이 증가한 결과일 수 있다. 또한, 환기 부문 역시 20.4kWh/m<sup>2</sup>에서 48.0kWh/m<sup>2</sup>로 약 140% 증가하였는데, 이는 자연환기 중심의 기존 방식에서 고효율 기계환기 시스템으로 전환되었기 때문으로 판단된다. 이러한 변화는 실내 공기질 개선과 에너지 회수 환기 기능을 강화한 결과이며, 사용자의 건강 및 쾌적성을 고려한 설계 방향에 따른 것으로 보인다. 급탕 부문은 비교적 완만한 변화가 관찰되었다. 리모델링 전 35.2kWh/m<sup>2</sup>에서 리모델링 후 30.1kWh/m<sup>2</sup>로 약 14.3% 감소하였으며, 이는 급탕 배관의 단열 보강 또는 설비 효율 개선에 따른 것으로 해석된다.

건물 B는 전체 에너지소비량은 리모델링 전 약 360.1kWh/m<sup>2</sup>에서 리모델링 후 약 296.5kWh/m<sup>2</sup>로 감소하여, 총 약 17.7%의 에너지 절감효과가 나타났다. 이는 건물 A보다 다소 낮은 절감률이나, 리모델링 시 신재생에너지(5kW 태양광) 도입과 바닥 단열 추가 시공이 이루어졌다는 점에서 기술적 특징이 있다. 가장 큰 에너지 소비 절감은 난방 항목에서 확인되었다. 리모델링 전 난방 소비량은 약 195.0kWh/m<sup>2</sup>였으나, 리모델링 이후 약 115.0kWh/m<sup>2</sup>로 약 41.0% 감소하였다. 이는 고성능 외벽 단열재 및 고효율 창호 적용과 더불어 바닥 단열까지 포함된 전면적인 외피 성능 향상이 주요 원인으로 판단된다.

반면 냉방 부문에서는 다소 증가가 관찰되었다. 리모델링 전 냉방 에너지소비량은 약 52.1kWh/m<sup>2</sup>였으나, 리모델링 후에는 약 56.1kWh/m<sup>2</sup>로 약 7.7% 증가하였다. 이는 리모델링 이전의 노후화된 건물에서는 냉방설비가 충분히 고려되지 않아 실제 냉방 가동이 제한적이었던 점도 원인으로 고려된다. 리모델링을 통해 냉방설비가 정비되고 정상 가동되면서 실질적인 에너지 소비량이 증가한 것으로, 이는 에너지소비량 증가로 해석되기보다는 실내 쾌적성 확보와 설비 정상화에 따른 현실 반영으로 볼 수 있다.

급탕과 조명 항목에서는 뚜렷한 변화가 없거나 미세한 절감이 확인되었다. 급탕 에너지는 리모델링 전후 모두 약 36.8kWh/m<sup>2</sup> 수준에서 유지되었으며, 조명은 리모델링 전 약 43.3kWh/m<sup>2</sup>에서 리모델링 후 약 41.2kWh/m<sup>2</sup>로 약 4.7% 절감되었다. 이는 고효율 LED 조명으로의 교체에 따른 결과로, 건물 A보다 상대적으로 낮은 절감률을 보였으나 일정 수준의 개선은 있었다. 또한 태양광 발전 시스템(5kW)을 신규 도입함으로써, 연간 약 6,000kWh의 전력을 자체 생산할 수 있으며, 이는 전체 에너지 수요의 약 9.1%를 상쇄할 수 있는 수준으로 분석되었다. 이를 통해 실질적인 에너지 자립률 개선 효과도 기대할 수 있음을 확인하였다.

즉, 패시브 리모델링을 적용한 건물 A보다 패시브와 액티브 요소를 함께 적용한 건물 B가 더 높은 에너지 절감효과를 보였다. 이는 단순히 단열 성능을 향상시키는 것만으로는 한계가 있으며, 액티브 기술 요소를 함께 도입할 경우 에너지 소비 절감효과를 극대화할 수 있음을 시사한다.

### 3.2. 탄소배출량 결과 비교

건축물의 전과정 탄소 배출량을 비교하기 위해 단계별 건물 A와 건물 B의 내재탄소(Embodied Carbon)와 운영탄소(Operational Carbon)를 비교 분석하였다. Fig. 6.은 전과정평가에 큰 비율을 차지하는 운영단계의 운영탄소를 비교한 것이다.

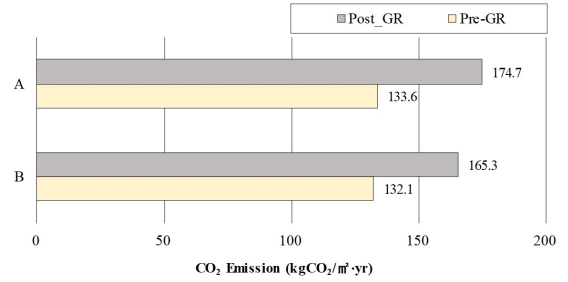


Fig. 6. Comparison of CO<sub>2</sub> emissions - B6

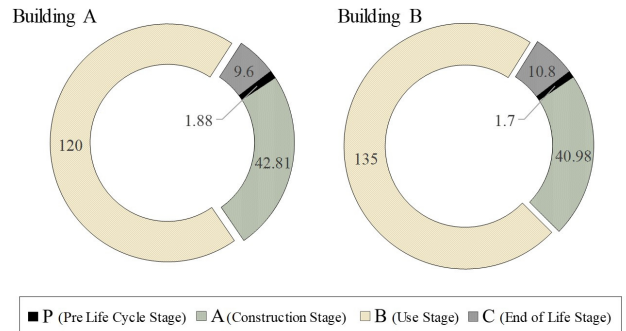


Fig. 7. Comparison of carbon emission per area

운영탄소의 경우, 건물 A는 리모델링 전 연간 약 174.7kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>의 탄소를 배출하였으나, 리모델링 이후 약 133.6kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 감소하여 연간 41.1kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>의 절감 효과가 나타났다. 건물 B는 리모델링 전 165.3kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>에서 리모델링 후 132.1kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 감소하여, 연간 33.2kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>의 탄소를 절감 가능함을 확인하였다. 이를 건물의 수명주기인 30년 기준으로 환산하면, 건물 A는 총 약 1,233kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 건물 B는 총 약 996kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>의 운영단계 탄소를 줄이는 효과를 기대할 수 있다.

반면, 그린리모델링 과정에서는 외벽 및 바닥 단열재, 고효율 창호, 조명, HVAC 설비, 그리고 일부 신재생에너지 설비(건물 B의 태양광 등) 등의 자재 및 시스템이 새로이 투입되며 내재탄소가 발생한다. 관련 선행연구 및 국내 LCI DB, EPD DB 기반의 평균 배출계수를 바탕으로 산정한 결과로 건물 B는 바닥단열과 태양광 발전 시스템을 포함하여 내재탄소량이 건물 A보다 16.5% 더 높았다 (Fig. 7.).

이러한 수치를 바탕으로 탄소회수기간(Carbon Payback Period)을 산정한 결과, 건물 A는 리모델링 이후 약 8.5년이 경과하면 초기 리모델링으로 인해 발생한 내재탄소를 운영단계에서의 절감분으로 모두 상쇄할 수 있으며, 이후에는 순수한 탄소 절감 효과가 지속된다. 건물 B는 회수기간이 약 12.7년으로, 건물 A보다 길지만, 이는 재생에너지 시스템과 같은 추가 기술요소가 투입되며 초기 탄소부하가 증가한 데 따른 것이다.

다만, 건물 B는 5kW 규모의 태양광 발전 시스템이 도입되어 연간 약 6,000kWh의 전력을 자가 생산할 수 있으며, 이를 통해 연간 약 2,754kgCO<sub>2</sub>의 탄소를 상쇄할 수 있다. 이를 건물 전체 면적으로 환산하면 단위면적당 약 5.63kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·yr의 간접 저감 효과가 발생

하며, 이를 반영할 경우 실제 탄소회수기간은 더욱 단축될 수 있다.

### 3.3. 탄소배출 저감효과 분석

건축물의 에너지사용량 또는 1차 에너지절감률을 기준으로 성과를 측정하는 기존 그린리모델링의 경우는 외피 성능 개선과 고효율 설비 도입을 통해 일정 수준의 에너지 성능 향상 및 운영단계 탄소배출 저감효과를 기대할 수 있었다. 하지만 자재 생산·시공 과정에서 발생하는 내재탄소에 대한 고려는 상대적으로 미흡하며 전과정에서의 탄소배출량에 대한 고려가 부족하다. 이에 본 연구에서는 실제 적용된 그린리모델링 사례(이하 a안: Post-GR)와 더불어, 저탄소 인증 또는 재활용 인증을 받은 건축자재의 활용 등 내재탄소 저감을 적극 반영한 최적화 시나리오(이하 b안: GR with LCA)를 비교하여, 두 시나리오 간 전과정 탄소배출량 절감효과를 정량적으로 비교·분석하였다. Table 2.와 Table 3.은 건물 A와 B의 리모델링에 적용된 요소(a)와 전과정 탄소배출량을 고려한 최적 리모델링안(b)을 정리한 것이며, Fig. 8.은 a안과 b안의 결과를 비교한 것이다.

건물 A의 경우 a안에서는 연간 약 41.1kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>의 운영탄소 절감량과 약 350.5kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>의 내재탄소가 발생하였으며, 30년 기준 총 탄소저감량은 약 882.5kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 나타났다. 반면 b안은 연간 약 58.5kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>의 운영탄소를 절감하였으며, 내재탄소는 395.0kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 소폭 증가하였지만, 총 저감량은 약 1,360kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 약 54% 향상되었다. 탄소 회수기간도 a안의 8.5년에 비해 b안은 약 6.8년으로 단축되었다.

건물 B의 경우에도 유사한 경향을 보였다. a안은 운영탄소 절감량이 연간 33.2kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 내재탄소 420.1kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 탄소 회수기간은 약 12.7년으로 나타난 반면, b안에서는 운영탄소 절감량이 연간 51.0kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 증가하였고, 내재탄소는 470kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 상승하였으나 회수기간은 약 9.2년으로 단축되었다. 총 전과정 탄소배출량은 a안 대비 약 33.0% 저감된 수준으로 평가되었다.

## 4. 결론 및 제언

본 연구는 노후 공공건축물의 그린리모델링을 통해 에너지 성능 개선과 탄소배출 저감을 달성하는 과정에서, 전과정 탄소배출량(Whole Life Carbon Emissions)을 고려한 전략이 어떤 효과를 나타내는지를 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 운영단계 에너지 절감 중심의 기존 리모델링 사례(a안: Post-GR)와, 내재탄소 저감을 위한 요소를 반영한 최적화 시나리오(b안: GR with LCA)를 각각 구성하고, 건물 A와 B에 적용된 기술 요소별 구성 차이와 탄소감축 효과를 비교하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존 리모델링(a안)은 운영탄소 저감에는 효과적이었으나, 내재탄소에 대한 고려가 미흡하여 생애주기 기준 탄소감축 효과에 한계가 있었다. 건물 A와 B 모두 연간 약 33.2~41.1kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>의 운영탄소를 절감하였으나, 내재탄소는 각각 350.5kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 420.1kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 나타났으며, 탄소 회수기간은 8.5년(A), 12.7년(B)으로 비교적 길게 나타났다.
- 2) 반면, b안에서는 운영탄소 절감량이 건물 A의 경우 연간

Table 2. Building a detailed comparison: Post-GR vs GR with LCA

CASE		a	b
A	Window glazing	Double glazing	Triple Low-E glazing
	Insulation material	Glass wool insulation, 200mm	Recycled cellulose/ Low-carbon EPS, 250mm
	Lighting system	LED	Daylight-responsive LED
	HVAC system	High-efficiency boiler+basic	High-performance Heat Pump (COP≥4.0)
	Renewable energy	-	8kW PV+ Solar thermal

Table 3. Building B detailed comparison: Post-GR vs GR with LCA

CASE		a	b
B	Window glazing	AL frame 47T Low-emissivity triple glazing	Triple Low-E glazing
	Insulation material	Glass wool insulation, 200mm	Recycled cellulose / Low-carbon EPS+ floor insulation
	Lighting system	LED	Daylight-responsive LED
	HVAC system	High-efficiency boiler	High-performance Heat Pump (COP≥4.0)
	Renewable energy	5kW PV	8kW PV+ Solar thermal

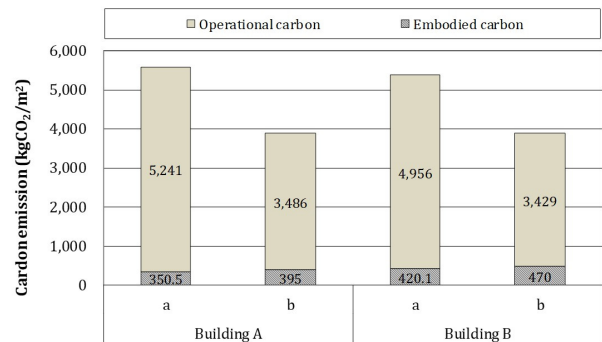


Fig. 8. Comparison of carbon emissions (Post GR vs GR with LCA)

- 58.5kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 건물 B는 51.0kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>로 증가하였으며, 탄소 회수기간은 각각 6.8년, 9.2년으로 단축되었다. 결과적으로 b안은 총 전과정 탄소배출량을 건물 A에서 32.5%, 건물 B에서 33.5% 절감하는 성과를 보여, 내재탄소가 다소 증가하더라도 전반적인 탄소 감축 효과가 더 우수함을 확인하였다.
- 3) 그린리모델링은 단순한 에너지 성능 개선을 넘어, 자재 선택과 설비 구성을 포함한 전략적 접근을 통해 생애주기 전체의 탄소 배출을 줄일 수 있어야 한다. 재활용 단열재, 저탄소 인증 창호,

고성능 히트펌프, 재생에너지 시스템 등의 통합 적용은 초기 내재탄소를 상쇄하고 장기적인 저감 효과를 실현하는 데 기여하며, 탄소중립 목표 달성에 실질적인 수단이 될 수 있다.

향후 연구는 다양한 공공건축물 유형과 규모를 대상으로, 기밀성·환기제어 시스템 등 비정량적 요소의 정량화, 자재 탄소계수의 정밀화, 경제성 평가와의 통합 분석이 필요하다. 아울러 사회적 수용성과 정책 적용 가능성을 반영한 통합형 탄소중립 리모델링 모델로의 확장이 요구된다. 이를 위해, 향후 공공건축물 리모델링 정책은 전과정 탄소배출량을 고려한 계획 수립과 함께, LCA 기반 요소기술의 적용, 저탄소 자재 활용, 탄소회수효율 기준 마련 등이 제도적으로 병행되어야 한다.

### Acknowledgement

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00512834 and No. 2021R1A2C2014259).

### References

[1] IEA (International Energy Agency), GlobalABC roadmap for buildings and construction 2020-2050, United Nations Environment Programme, 2020.

[2] 국토교통부, 공공건축물 그린리모델링 지원사업 가이드라인, 2023. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Public Building Green remodeling support program guidelines, 2023.)

[3] C. Amoah, J. Smith, Barriers to the green retrofitting of existing residential buildings, *Journal of Facilities Management*, 22(2), 2024, pp. 194-209.

[4] 환경부, 제1차 탄소중립·녹색성장 기본계획(2023-2024), <https://www.2050enc.go.kr>, 2023. // (Ministry of Environment, 1st National Carbon Neutral and Green Growth Basic Plan (2023-2024), <https://www.2050enc.go.kr>, 2023.)

[5] 배영현, 한민지, 최윤정, 충북지역 보건지소·진료소의 그린리모델링 내용 및 에너지 절감효과 분석: 2021 공공건축물 그린리모델링 사업 및 ECO2-OD 모델링을 기반으로, *한국생활과학회지*, 제33권 제1호, 2024, pp.139-153. // (Y.H. Bae, M.J. Han, Y.J. Choi, Analysis on green remodeling contents and energy saving effect of small-sized public health care building in Chungbuk region: Based on 2021 public building green remodeling project and ECO2-OD modeling, *Korean Journal of Human Ecology*, 33(1), 2024, pp.139-153.)

[6] 우수진, 이상운, 탄소중립을 위한 공공건축물 그린리모델링 에너지 절감 효과 분석 - 국공립 어린이집, 보건소, 공공의료시설을 중심으로 -, *KIEAE Journal*, 제22권 제5호, 2022, pp.19-26. <http://doi.org/10.12813/kieae.2022.22.5.019> // (S.J. Woo, S.Y. Lee, An analysis of energy saving effect of green remodeling in Public buildings for net-zero - In case of public daycare center, public health center, public health and medical institution -, *KIEAE Journal*, 22(5), 2022, pp.19-26.)

[7] 노상태, 충북 공공건축물 그린리모델링 시그니처 사업 적용에 따른 에너지 절감효과 사례분석, *KIEAE Journal*, 제24권 제1호, 2024, pp.113-120. // (S.T. No, Case study on energy saving effects through application of green remodeling signature project to public buildings in Chungbuk Province, *KIEAE Journal*, 24(1), 2024, pp.113-120.)

[8] 이주환, 노상태, 공공건축물 그린리모델링 프로세스 문제점 도출을 위한 설문 조사 연구, *KIEAE Journal*, 제25권 제1호, 2025, pp.13-18. // (J.H. Lee, S.T. No, Surveys to identify problems in the green remodeling process of public buildings, *KIEAE Journal*, 25(1), 2025, pp.13-18.)

[9] 정수빈, 김진희, 김준태, 그린리모델링 기술요소 적용에 따른 단독 및 공동주택의 에너지 저감 효과 분석, *한국태양에너지학회 논문집*,

제44권 제5호, 2024, pp.83-97. // (S.B. Jeong, J.H. Kim, J.T. Kim, Analysis of energy-saving effects according to green-remodeling technology elements in apartment and single-family house, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 44(5), 2024, pp.83-97.)

[10] 심성진 외 4인, 그린리모델링 건물의 에너지성능 평가방법에 따른 비교 및 분석, *대한건축학회 학술발표대회 논문집*, 제44권 제2호, 2024, pp.503-504. // (S.J. Sim et al., Comparison and analysis of energy performance according to energy performance evaluation method in green remodeling building, *Conference Journal of the Architects Institute of Korean*, 44(2), 2024, pp.503-504.)

[11] 정수빈, 김진희, 김준태, ECO2를 이용한 노후주택의 그린리모델링 기술요소별 에너지 저감 효과 분석, *한국신·재생에너지학회 학술대회 초록집*, 2024, pp.302-302. // (S.B. Jeong, J.H. Kim, J.T. Kim, Analysis of energy saving effects of residential building according to green-remodeling technology elements using ECO2, *Conference Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy*, 2024, pp.302-302.)

[12] U.S. Department of Energy (DOE), Embodied carbon reduction in new construction: Reference guide, DOE Building Technologies Office, 2024. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-02/bto-abc-embodied-carbon-022624.pdf>