



M&V 모델을 통한 그린리모델링 기술요소에 따른 에너지 절감량 분석

Energy Saving Analysis the according to GreenRemodeling Technology Elements through M&V (Measurement & Verification) Model

김진희* · 김하영** · 김준태***

Jin Hee Kim* · Ha Yeong Kim** · Jun Tae Kim***

* Research Professor, Green Energy Technology Research Center, Kongju National Univ., South Korea (jiny@kongju.ac.kr)

** Coauthor, Ph.D Student, Dept. of Energy Systems Engineering, Kongju National Univ., South Korea (kimhayeong@smail.kongju.ac.kr)

*** Corresponding author, Professor, Dept of Green Smart Architectural Engineering, Kongju National Univ., South Korea (jtkim@kongju.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: The Green remodeling Project for public buildings aims to improve the energy efficiency of older buildings and reduce greenhouse gas emissions, with the primary goal of extending these efforts to private buildings. However, the green remodeling projects apply uniform energy technology elements without considering the usage and energy consumption behavior of the target buildings, making it difficult to implement suitable energy technologies for each building. Additionally, there is a difference between the estimated construction cost and the actual construction cost for green remodeling by estimating the construction cost using the same energy technology standard unit cost. Furthermore, the subjective opinions of various green remodeling business operators select energy technology products that only meet the support conditions, not the requirements of a specific building, which can result in high costs compared to energy savings. In this study, a cost-benefit optimization process for green remodeling of public buildings was proposed, energy savings were analyzed through an M&V (Measurement & Verification) simulation model. **Method:** We investigated the problems of the process in public building green remodeling projects and proposed a cost-benefit optimization process that can optimize construction costs compared to energy savings based on the problems. In addition, we performed M&V with actual energy usage using a dynamic simulation tool (DesignBuilder) and analyzed energy savings through simulation models of various energy performance levels. **Result:** The energy saving for the improvement model was confirmed to be at least 5% and at most 53% according to the defined technical elements and levels.

KEYWORD

그린리모델링
비용편익 최적화
동격해석 시뮬레이션
M&V 모델

Green Remodeling
Cost-Benefit Optimization
Dynamic Analysis Simulation
Measurement & Verification Model

ACCEPTANCE INFO

Received Sep. 20, 2024
Final revision received Oct. 30, 2024
Accepted Nov. 4, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

전세계적으로 건물 분야의 온실가스 배출량은 15.3GT로 연간 약 42%를 차지하고 있으며, 건물운영으로 약 27.3%(9.9 GT), 시멘트, 철, 강철, 알루미늄 건축 및 인프라 자재의 내재 탄소가 연간 약 15%(5.4 GT)를 차지한다[1]. 2018년 기준 국내 건물 부문 온실가스 배출량은 52.1 백만 CO₂e_q로 전체 분야의 7%를 차지한다. 정부는 지난 23년 3월에 ‘국가 탄소 중립·녹색성장 기본계획(안)’을 발표하였으며, 2018년 온실가스 배출량 대비 40% 감축하는 NDC (Nationally Determined Contribution) 상향안(‘23. 3)을 목표로 설정하였다[2]. 이에 건물 분야에서는 에너지 효율 강화를 목표로 제로에너지건축물 의무화 및 공공건축물 그린리모델링 사업을 추진하고 있다.

그린리모델링 사업은 기존 노후 건축물의 에너지 효율을 높이고 온실가스 배출을 낮추는 것을 목표로 진행하고 있다. 사업 대상은 준공 후 10년 이상 된 취약계층 이용 및 에너지 다소비 공공건축물(어

린이집, 보건소, 의료기관, 파출소, 경로당, 도서관)이며, 에너지성능 개선 및 쾌적한 환경을 조성하고 함께 그린리모델링의 저변 확산 및 시장생태계 조성 유도를 목적으로 하고 있다[3].

현재 사업 진행 시 건물의 현황 및 노후도는 현장조사 기반으로 파악하고 있다. 이후 사업에서 정해진 기준에 따라 에너지기술을 선정하고, 사업비 산출 시트를 활용하여 에너지기술별 표준 단가를 통해 공사비를 산출하거나 사업자의 재량에 따라 지원 조건에 부합하는 제품을 선정하여 공사비를 산출한다. 이는 대상 건물의 용도 및 에너지사용 행태를 반영하지 않아 적합한 에너지기술 적용이 어려우며, 사업자의 주관적인 의견 및 지원 조건에 맞는 제품을 선정하여 공사비용 대비 에너지 절감효과에 대한 의문점이 발생한다. 또한, 실제 그린리모델링 공사 시 비용과의 차이가 큰 문제점이 발생한다. 이를 해결하기 위해 그린리모델링 대상 건물의 용도 및 현황에 따라 에너지기술요소를 선정하고, 기술별 성능에 따른 에너지 절감량을 분석하여 적합한 에너지 기술요소를 적용하는 것이 필요하다.

이와 관련된 연구로서, 김성민(2017)의 연구에서는 그린리모델링 시행에 따른 에너지 효율 개선 효과를 분석하였다. 분석대상 건물의 용도는 다가구 주택, 기숙사, 의료시설로 다양했으나, 에너지기술이 창호, 단열, 냉난방기로 국한되어 적용되었다[4]. 전선하

(2022)의 연구에서는 단독주택 에너지 성능개선을 위한 리모델링 방안을 제시하였으며, 건물의 에너지 요구량 및 소요량 등을 ECO2 시뮬레이션을 통해 분석하였다[5]. 방주예 외(2022)의 연구에서는 2021년에 준공된 ‘공공건축물 그린리모델링 사업’ 대상 중 서울 지역 어린이집을 대상으로 적용된 그린리모델링 요소기술 및 이를 통한 에너지 절감효과를 분석하였다. 분석결과, 기술적용 빈도수는 고효율 창호(25.7%), 고효율 보일러(17.3%), 고효율 냉난방기(16.8%), LED(14%), 단열강화(9.8%), 열회수환기장치(9.3%)순으로 나타났다. 또한, 그린리모델링 요소기술 적용에 따른 에너지요구량은 15.7%, 에너지소요량은 19.1% 감소하였으며, 1차 에너지소요량은 14.7% 감소하였다. 이때 요소기술 적용 수가 증가할수록 1차 에너지소요량은 증가하는 추세로 나타난다고 발표하였다[6]. 이후 연구[7]에서는 노후 어린이집을 대상으로 그린리모델링 전, 후 사례 분석을 통해 Base-Model을 구축하고 요소기술별 1차 에너지소요량 절감률을 확인하고 우선순위를 도출하였다. 연구결과로서, 고성능 창 및 문 교체 공사가 가장 많이 적용되는 것으로 나타났으며, 고효율 냉·난방장치, 고효율 보일러, 외벽 단열 보강, 열회수환기장치, 고효율 조명, 지붕 단열 보강, 신재생에너지 순으로 적용되고 있음을 확인하였다고 보고하고 있다.

한편, 김은정 외(2014)는 업무용 건축물을 대상으로 외벽, 바닥, 창호, 지붕의 열관류율을 대상 건축물의 단열성능에서 10%씩 강화하고 이에 따른 에너지 성능개선을 분석하였다. 이는 적용 기술요소별로 에너지부는 저감률을 파악할 수 있는 좋은 기초연구 자료라 할 수 있다[8].

최근 그린리모델링에 따른 건물의 에너지부는 개선에 관한 연구 및 활동이 활발히 진행되고 있으나, 법적 기준에 따른 에너지기술을 선정하고 선정된 기술요소를 모두 적용했을 때 에너지 절감률을 분석하고 있다. 따라서, 기술요소별 에너지 절감효과 및 우선순위를 선정하기에는 부족한 기초자료라 할 수 있으며 관련 연구는 미진한 실정이라 할 수 있다.

본 연구에서는 공공건축 그린리모델링의 최적화 모델을 위한 비용 편익 최적화 프로세스를 제안하였으며 건축물의 현황 및 에너지 사용 행태를 반영하여 그린리모델링 기술요소를 선정하고, M&V (Measurement & Verification) 시뮬레이션 모델을 통한 에너지 절감량을 분석하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 공공건축 그린리모델링 사업의 기존 프로세스의 문제점을 조사하고 이를 바탕으로 에너지 절감 대비 공사비용을 최적화할 수 있는 비용 편익 최적화 프로세스를 제안하였다. 그리고 제안된 프로세스에 따른 동적 시뮬레이션 도구, 디자인빌더 (DesignBuilder) 활용을 통한 실제 에너지사용량과의 M&V를 수행하고 시뮬레이션 모델을 통해 에너지 절감량을 분석하였다. 에너지 절감량 분석을 위해 공공건축물로서 업무시설인 농업기술센터(충남 아산시 소재)를 대상으로 하였으며 다양한 에너지성능은 수준의 시뮬레이션 모델을 통해 에너지기술요소에 대한 절감량을 분석하였다.

본 연구는 공공건축물의 그린리모델링 비용 편익 최적화 모델 도출을 위한 프로세스를 제안하였으나 기술요소적용에 따른 비용편익

분석 및 최적 모델 도출은 본 연구범위에서 제외하였으며, 이에 관한 내용은 향후 연구를 통해 제시하고자 한다.

농업기술센터 대상 건축물은 연면적 3천여 제곱미터의 중·대규모 비주거 공공건축물로서 선정되었으며 해당 건축물이 모든 비주거 공공건축물을 대표하는 것은 아니다. 대상 건물은 에너지기술요소별 에너지 절감효과 분석 및 향후 최적화 모델 도출을 위한 방법론을 제시하기 위해 사례 건축물로서 활용되었다는 것을 밝힌다.

2. 그린리모델링 프로세스 분석 및 제안

2.1. 기존 그린리모델링 프로세스

기존 프로세스의 문제점을 파악하기 위해 총 4단계로 구분하여 분석하였으며, [현장조사] - [에너지기술 선정] - [공사비 산출] - [에너지 저감률 도출]로 구분하였다.

1) 현장조사를 통한 노후화 평가

그린리모델링의 노후화 평가를 위해 대상 건물에 대해 현장조사를 하며, 관리자 청문 및 설계도서를 기반으로 구조체, 기계설비의 하자 등을 육안으로 확인한다. 더구나 20~30년 이상 된 대상 건물은 설계도서가 부재한 경우가 많아 건축물의 부위별 정확한 정보를 확인할 수 없으며 건물 및 설비 외관 확인만을 통해 노후 정도를 판단한다. 따라서 건축물의 단열 부위 및 창호 등 정확한 노후도를 파악하기 어렵고 그린리모델링 이전 건물의 에너지성능 수준을 파악하기 어렵다.

2) 에너지기술 선정 및 정의

현장조사를 통해 확인한 건물의 구조체 및 기계설비 하자를 기반으로 지원 한도 내에서 정부에서 제공한 사업비 산출 시트를 활용하여 에너지기술을 선정하고 공사비를 산출한다. 이때 각 기술 성능은 에너지 절감설계기준의 지역별 부위별 열관류율[9] 등 현행법적 기준만을 활용하여 정의하는 것으로 조사되었다. 이는 대상 건물의 현황 및 에너지사용 행태를 반영하여 에너지기술을 선정하는 것이 아닌, 그린리모델링 사업을 통해 공공건축물 그린리모델링 설계 가이드라인[10]의 건물 용도별 준공연도별 열관류율 기준 등 정해진 기준에 따라 획일적인 에너지기술을 적용하고, 대상 건물의 효율적인 에너지 절감을 위한 에너지기술 선정이 어렵다.

3) 공사비 산출

기존 프로세스에서 공사비 산출은 엑셀 기반의 사업비 산출 시트를 통해 대상 건물의 연면적에 따른 지원 한도 내에서 에너지기술별 표준 단가를 활용하여 작성된다. 이러한 방식은 모든 대상 건물이 동일한 에너지기술의 표준 단가를 활용하여 공사비를 산출하므로 추후 실제 그린리모델링 공사 시 소요 비용과 차이가 발생한다. 또한, 그린리모델링 사업자의 주관적인 의견에 따라 각자 다른 에너지기술 제품을 선정하여 공사비 폭이 크며, 대상 건물에 적합한 제품이 아닌 사업 지원 조건에 맞는 제품을 선정함으로써 에너지 절감 대비 공사비가 많이 소요될 수 있다.

4) 프로그램을 활용한 에너지 저감률 도출

에너지기술 요소 적용으로 나타나는 에너지 절감률 분석을 위해 정부에서 제공하는 에너지소요량 프로그램인 ECO2, ECO2-OD를 사용한다. 이를 통해 기술적용 시 총 에너지소요량 절감률 및 에너지성능 개선비율(절감률) 도출한다. 그러나 ECO2 및 ECO2-OD는 대상 건물의 공간별 공조 여부와 에너지 용도(난방, 냉방, 조명 기기)별 사용 특성 반영이 불가능해 정확한 에너지 절감률 도출이 어렵다. 특히, 기존건축물의 에너지사용량 고지서가 존재하여도 이를 반영하지 못하는 실정이다.

2.2. 그린리모델링 비용편의 최적화 프로세스 제안

그린리모델링은 기존건축물의 에너지기술 공사를 통해 에너지 효율화를 수행하는 것이다. 전술한 바와 같이 현재 건축물의 현황 및 에너지사용 행태를 반영하고 있지 않아 공사비용 대비 에너지 저감률이 최적화된 방안이라고 하기 어렵다. 본 연구에서는 현재 프로세스에서 에너지 절감 대비 공사비용을 최적화한 프로세스를 제안하였으며 기존 그린리모델링 사업 프로세스와 함께 Fig. 1.과 같이 나타냈다.

1) 현장 진단을 통한 건물 현황 및 특성 조사

대상 건물의 현장 진단을 통해 건축물의 현황과 특성을 조사하고, 도서와의 차이를 분석한다. 특히 본 프로세스는 동적 해석 도구를 활용하므로 사용자의 재실 특성, 공간 특성 등을 포함하여 조사한다.

2) 동적 해석 도구 활용을 통한 실제 에너지사용량과의 M&V 수행

현재 국내에서는 ECO2 및 ECO2-OD 프로그램을 사용하고 있으나, 이는 건물의 세부 특성 반영이 불가능하고 M&V 수행이 불가능하다. 이를 해결하기 위해 기존건축물의 에너지 사용량(고지서)을 취득하여, 시뮬레이션과의 M&V를 통해 그린리모델링 기술 도입 시 에너지 절감량을 사용량 기반으로 정량화하여 분석하는 프로세스를 제안하였다. 동적해석도구 도입을 통해 다양한 기술적용이 가능하여 그린리모델링 기술 확대에 기여하고자 한다.

3) 대상 건물 노후화 평가 및 에너지기술 선정

기존 프로세스에서는 현장조사만을 통해 노후화 평가를 진행하며, 준공 이후 10년 이상 된 건물을 중점으로 추진하고 있다. 특히 국토안전관리원에서 수행하고 있는 사전 조사 영역은 건물의 에너지 기술을 획일화하여 그린리모델링 사업효과를 분석하고 있다. 이에 본 연구에서 제안하는 프로세스는 대상 건물의 현장조사 및 시뮬레이션을 통해 도출한 에너지성능을 현행기준과 비교하여 노후화를 평가하고, 평가 결과물을 활용하여 대상 건물 현황에 적합한 에너지 기술을 확대 및 선정한다.

4) 에너지기술 성능 단계선정 및 성능 정의

기존 프로세스에서는 에너지기술의 다양한 성능을 적용하지 않고 법적 기준만을 활용하고 있다. 그러나 이는 건물마다 에너지 용도(난방, 냉방, 조명, 기기 등)별 사용 특성이 상이하므로 에너지기술 성능에 따라 에너지 최적화 성능이 다를 수 있다는 문제점을 내포하

Process	Existing Green Remodeling Projects	Cost-Benefit Optimization Process	Difference
Status Analysis	① Target buildings for support and deterioration assessment through site surveys	① Investigation of the building status and characteristics through on-site diagnosis ② Conducting M&V (Measurement & Verification) by using dynamic analysis tools to compare with actual energy consumption	· Analysis of energy savings from the introduction of energy technologies through an M&V model that reflects the building status, occupant characteristics, and actual energy consumption (utility bills)
Selection Of Energy Technology	② Energy technology selection and performance definition ③ Deriving energy savings using ECO2 and ECO2-OD	③ -1 Deterioration assessment of target buildings ③ -2 Selection of energy technologies ④ -1 Selection of performance levels for energy technologies ④ -2 Calculation of energy savings through the M&V simulation model	· Using a simulation model to derive and evaluate the quantitative degradation levels of different building parts · Expanding and selecting applicable energy technologies for the target building based on the results of the degradation evaluation · Define various performance levels instead of a uniform energy technology performance · Derive energy savings from energy technologies through an M&V model using dynamic analysis tools for optimized technology analysis
Calculation of Construction Cost	④ Construction cost estimation	⑤ Actual unit costs/Construction costs by energy technology	· Derive standard structures for energy technology performance reflecting the current status of the target building · Select actual products suitable for the standard structures by performance and apply unit costs to derive construction costs
Derivation of Optimization Model	-	⑥ -1 Deriving the optimal model through energy savings unit cost analysis, priority setting, and cross-analysis of ROI ⑥ -2 Proposing optimized energy technologies and performance levels for the target building	· Derive ROI by technology through cross-analysis of energy unit costs by performance level of energy technologies. · Develop an optimization model for green remodeling costs considering changes in the priority of energy technologies by performance level.

Fig. 1. Summary of existing green remodeling projects and cost-benefit optimization process

고 있다. 따라서 대상 건물에 적용 가능한 에너지기술별로 다양한 에너지성능을 정의하고, 이에 따른 절감량을 분석함으로써 대상 건물의 사용 특성을 반영하여 에너지 절감 최적화 기술을 도출하는 프로세스를 제안하였다.

5) 물가정보 및 일위대가 분석을 통한 에너지기술별 실제 단가 / 공사비 조사

기존 프로세스에서는 에너지기술별 표준 단가를 활용하거나 그린리모델링 사업자의 재량에 따라 사업지원 조건에 적합한 제품을 선정하여 단가 반영 및 공사비를 산출하였다. 그러나 이는 추후 그린리모델링 공사 시 소요 비용과 차이가 발생하고, 사업자의 주관적 의견이 반영된 제품을 적용하여 공사비의 폭에 영향을 준다. 이를 개선하기 위해 대상 건물의 현황을 참조하여 에너지기술 성능별 표준구조를 도출하고, 2023년도 기준(해당연도)의 단가 자료(물가정보, 일위대가 등) 및 내역서 등을 참고하여 에너지기술의 단가를 설정하였다. 또한, 공사비는 앞서 도출한 표준구조에 따라 건물 현황을 참조하여 산출하였다. 이는 에너지성능 단계별로 실제 제품의 단가를 적용함으로써 실제 적용 단가에 가까운 금액 산정이 가능하므로 비교적 정확한 공사비 산출이 가능하다는 이점이 있다.

6) 에너지 절감 원 단가 분석, 우선순위, ROI 교차 분석을 통한 최적화 모델 도출

기존 프로세스에서는 기술별 성능을 현행법적 기준에 맞추어 분석을 수행하고 있다. 다만 건물의 용도, 지역, 사용자 행태, 용도별 부하 등의 차이로 건물의 에너지 용도별 사용량 비중이 상이하므로 투자대비수익률(ROI; Return On Investment) 등의 결과 차이가 나타난다. 이를 반영하기 위해 에너지기술 성능 수준을 다양화하여 성능 수준별 에너지원 단가 및 ROI 분석하고, 에너지기술의 성능 수준에 따라 기술별 또는 기술 간 우선순위가 변경되는 현황을 반영하여 기술을 선정한다. 이는 에너지 절감 대비 공사비용이 최적화된 기술별 성능을 제시할 수 있으며, 성능 수준 변경에 따른 기술 간 우선순위 변경을 분석하여 실제 그린리모델링 공사 시 대상 건물의 현황에 적합한 에너지기술 적용 및 공사비 도출이 가능하도록 한다.

3. 그린리모델링 노후화 평가 및 개선 모델안 에너지성능 분석

3.1. 대상 건축물 개요

본 연구에서는 제안한 그린리모델링 비용 편익 최적화 프로세스에 따라 대상 건물에 대한 노후화 평가 및 에너지기술을 도출하였으



Fig. 2. Front (left) and rear (right) elevation of a building

며 개선모델 안에 대한 에너지 절감량을 분석하였다.

대상 건축물은 충남 아산시에 위치한 농업기술센터이며, 외관은 Fig. 2.와 같다. 본관과 지식농업관을 대상으로 현황을 조사하였다. 해당 건물은 1996년에 준공되었으며 연면적 2,911m², 지하1층/지상3층 규모의 철근콘크리트조 업무용 시설이다.

3.2. 노후화 평가

1) 현장 진단을 통한 건물 현황 및 특성 조사

본 연구에서는 아산 농업기술센터를 대상으로 현장 진단 및 도서 분석을 통해 현황조사를 진행하였다. 본 건물은 본관 건물과 지식농업관이 결합되어 있다. 본관 건물의 경우 업무 용도로 활용하고 있으며, 지식농업관은 대규모 강당 및 교육실 용도로 사용되고 있다. 현장 진단에서는 기존 도서와 실제 사용하고 있는 평면 및 입면을 비교 분석하였으며, 수행 결과 기존 평면도와 실제 활용하고 있는 평면이 상이하여 이를 반영하여 프로세스를 진행하였다. 또한, 창 면적을 분석하여 시뮬레이션 프로그램에 적용하였다. 건물의 에너지사용 행태를 반영하기 위해 2020년부터 2022년까지의 전기사용량 고지서를 활용하였으며, Table 1.과 같이 조사되었다. 본 건물은 전기를 활용하는 개별실 냉난방기기를 활용하여 별도의 가스 사용량은 검출되지 않으며, 전기사용량만이 조사되는 것으로 확인하였다.

본 연구에서 제안하는 프로세스는 건물의 에너지사용량과 시뮬레이션 결과와의 M&V를 활용하여 공사 비용 편익 최적화를 수행하는 것으로서, 고지서의 에너지사용량을 에너지 용도별로 분개하였다. 에너지 용도는 난방, 냉방, 기저(조명/기기) 부하로 한정하여 분석하였다. 여기서 난방 부하의 경우 전기사용량 중 기저 부하를 제외한 11~4월 용량의 합산하여 정의한다. 냉방부하의 경우 전기사용량 중 기저 부하를 제외한 5~10월 사용량의 합을 냉방부하로 정의한다. 또한, 기저 부하는 전기사용량 중 최저사용량인 달을 기준으로 산정하며, 최저사용량의 12개월을 곱하여 연간 기저 부하를 산정하였다. 이에 에너지사용량 분개에 따른 에너지 용도별 사용량은 Table 2.에 나타냈으며, 이를 활용하여 시뮬레이션과의 M&V 분석을 수행하여 기존 건물에 대한 시뮬레이션 모델을 도출하였다.

Table 1. Electric energy consumption of the building [kWh]

Month	2020	2021	2022	Average
January	24,124	28,283	37,973	30,127
February	23,929	27,213	31,712	27,618
March	19,827	20,032	24,191	21,350
April	14,992	14,040	19,179	16,070
May	8,562	11,409	9,644	9,872
June	9,801	10,404	9,595	9,933
July	11,731	14,007	16,353	14,030
August	15,950	17,530	17,389	16,956
September	14,310	13,221	14,135	13,889
October	8,824	10,193	11,207	10,075
November	11,648	14,656	13,131	13,145
December	19,145	23,863	23,736	22,248
Total	182,843	204,851	228,245	205,313

Table 2. Energy consumption by purpose [kWh]

Month	Cooling	Heating	Base load
January	-	20,255	9,872
February	-	17,746	9,872
March	-	11,478	9,872
April	-	6,199	9,872
May	-	-	9,872
June	62	-	9,872
July	4,159	-	9,872
August	7,085	-	9,872
September	4,017	-	9,872
October	203	-	9,872
November	-	3,273	9,872
December	-	12,376	9,872
Total	15,526	71,327	118,464

2) 동적해석도구 활용을 통한 실제 에너지사용량과의 M&V 수행

본 연구에서는 동적해석도구인 DesignBuilder를 활용하여 에너지 해석을 수행하였다. DesignBuilder는 EnergyPlus를 기반으로 활용하는 동적 시뮬레이션 평가 프로그램이며, EnergyPlus는 미국 에너지부(DOE)가 개발한 에너지 해석 및 열부하 시뮬레이션 프로그램이다. 특히 시간의 흐름에 따라 내외부 표면에서의 복사/대류 효과를 동시 계산하도록 하는 열평형에 기반을 둔 해석기법을 사용한다. 본 프로그램은 LEED와 ASHRAE 90.1 데이터가 탑재되어 있으며, 건물의 빛, 온도, CO2 등의 환경에 대한 동적 시뮬레이션 해석이 가능하다. 또한, 건물의 물리적 구성 및 기타 세부 조건들을 설정하여 실제 건물과 유사한 모델링이 가능하며, 실의 용도에 따라 난방, 냉방, 급탕, 재실자의 스케줄 등을 기본 데이터로 설정할 수 있어 건물의 세부적 특성을 반영한 에너지사용량 도출이 가능하다. 또한, 실제 에너지사용량(고지서)과 M&V가 가능하여 기존건축물과 정확도가 높은 모델 도출이 가능하고, 에너지기술 도입 시 실제 절감량 예측이 가능하므로 공사 비용 편의 최적화 모델 도출에 적합한 시뮬레이션이다.

현장 진단을 통해 대상 건물의 냉난방 실내 기기를 조사하고, 건물의 평면도를 통해 공조/비공조 공간을 Table 3.과 같이 분류하였다. 이는 냉난방 시스템의 가동 여부의 공간을 정의하며, 에너지사용량의 정의하는 데 있어 주요한 요소이다. 건물의 용도에 따라 사무동(본관)의 경우 근무자 인터뷰를 근거로 입력하였으며, 교육동(지식농업관)은 아산시 농업기술센터에서 2023년에 진행한 교육의 모집인원 및 근무자 평균을 스케줄을 적용하였다. 또한, 실내 냉난방 설정 온도, 기기 밀도 등은 건축물 에너지효율등급 인증제도 운영규정에 따라 Table 4.와 같이 입력하였다. 사무동의 스케줄은 평일 09:00~18:00, 주말은 근무 일정이 없는 것으로 조사되어 재실자 스케줄 및 HVAC, 조명, 기기 스케줄을 설정하였다. 교육동의 경우 일정한 시간에 사용하지 않으므로 프로그램 내 강의실 스케줄로 정의하였다.

건물의 구조체 정보의 경우, 도서 부재로 정확한 열관류율 판단이

Table 3. Building space classification (conditioned / unconditioned)

Floor	Conditioned	Unconditioned	Total
B1F	-	301.99	301.99
1F	866.03	426.66	1,292.69
2F	831.32	451.05	1,282.37
3F	-	34.53	34.53
Roof	-	83.79	83.79
Total	1,697.35	1,298.02	2,995.37

Table 4. Indoor setpoints by usage

Office building			Education building		
Type		Input	Type		Input
Occupancy	Density	0.058 people/m ²	Occupancy	Density	0.106 people/m ²
Activity	Factor	0.90	Activity	Factor	0.90
Environment control	Heating (set back)	20°C (12°C)	Environment control	Heating (set back)	20°C (13°C)
	Cooling (set back)	26°C (28°C)		Cooling (set back)	26°C (32°C)
Office equipment	Gain	11.77W/m ²	Office equipment	Gain	1.0W/m ²
Air-tightness		1.1ac/h	Air-tightness		1.1ac/h

어렵다. 이에 따라 건축물의 에너지 절약설계기준 해설서를 참고하여 준공연도별 열관류율을 적용하였다. 따라서 대상 건물의 준공연도는 1996년이며, 남부지역 열관류율을 참고하여 외벽과 지붕은 0.756W/m²K, 바닥은 0.523W/m²K으로 입력하였다. 창호의 열관류율도 동일한 기준을 적용하여 3.605W/m²K으로 입력하였다.

현장조사 결과 냉난방기기는 대부분 EHP (Electric Heat Pump)를 사용 중인 것을 확인되었으나, 각 EHP의 설비효율을 상세 확인이 불가하여 정확한 효율 판단이 어렵다. 이에 난방효율은 준공연도 기반으로 국내 EHP 소비효율 등급 부여 기준에서 멀티전기 히트펌프시스템 정격냉방용량 20kW 이상 70kW 미만 냉난방 겸용기기의 난방효율 최저기준인 2.3을 입력하였다. 냉방효율은 효율 관리 기자의 전기 냉방기 최저 소비효율 기준인 2.37을 입력하여 시뮬레이션을 수행하였다. 한편, 대상 건물의 조명시스템은 4년 전 LED 조명으로 100% 교체하였다. 그러나 정확한 조명 발열량 파악이 어려우므로 건축물의 에너지 절약설계기준의 배점표를 근거로 최대배점 기준인 7W/m²로 조명밀도를 입력하였으며, 시뮬레이션 결과는 Table 5.와 같다.

대상 건물의 노후도 평가와 에너지기술 적용 시 도출되는 에너지 절감량 예측을 정량화하기 위해 시뮬레이션 및 M&V를 진행하였다. 시뮬레이션 분석결과 난방 소요량은 72.087kWh, 냉방 소요량은 15,637kWh이며, 기저 부하는 19,876kWh으로 나타났다. M&V 분석결과, 난방 1.05%, 냉방 0.72%, 기저 1.18% 오차율로 분석되며 이는 Table 6.과 같다. 이는 ASHRAE Guideline 14의 오차 지표 기준의 CV (RMSE) ±15%를 만족하는 결과로 분석되었다. 이에 본 시뮬레이션 모델은 기존건축물의 다양한 실제 현황(재실자 스케줄, 공간 특성 등)과 실제 에너지사용량 기반의 건물 부하 패턴을 반영

Table 5. Results of energy simulation analysis for buildings

Type		Energy consumption (baseline design) [kWh]
Heating	Electricity	72,087.43
	Gas	0.00
Cooling	Electricity	15,637.68
Lighting	Electricity	119,876.10
Equipment	Electricity	
Fans	Electricity	0.00
Pumps	Electricity	0.00
Energy production	Electricity	0.00
Gas building consumption		0.00
Electricity building consumption		207,601.21
Total building consumption		207,601.21

Table 6. M&V analysis results

Type	Consumption [kWh]	Simulation [kWh]	Error (%)
Heating	71,328	72,087	1.05%
Cooling	15,525	15,637	0.72%
Base load	118,460	119,876	1.18%

하였으므로 정량화된 분석이 가능할 것으로 사료된다.

3) 현황조사 기반 대상 건축물 노후화 평가

기존건축물의 노후화 평가는 대상 건축물의 개선할 건물 부위를 평가하고, 대상 건축물에 적용이 필요한 에너지기술을 도출하는 과정이다. M&V 모델을 활용해 현행기준의 성능과 비교분석을 수행하였다. 노후도 평가는 외피 부위 및 요소별(벽체, 지붕, 창호, 냉난방설비, 조명) 열관류율 및 설비효율을 현행기준으로 적용하였을 때와 비교하여 에너지소요량 변화를 분석하였으며, 이를 Table 7., Table 8.에 나타냈다.

노후도 평가결과, 벽체 열관류율은 0.756W/m²K로 현행기준과 비교하였을 때 단열수준은 68.3% 낮은 것으로 확인되었다. 이는 현행기준 단열수준의 건물 냉난방 부하보다 13,482kWh 더 높은 것으로 분석되었으며, 총 에너지소요량의 약 6.5%에 해당한다. 지붕의 경우, 단열수준은 현행기준 대비 80.2% 낮으며, 이에 따라 건물 냉난방부하는 15,557kWh 더 높은 것으로 분석되었다. 이는 총 에너지소요량의 약 7.5% 해당한다. 창호의 열관류율은 3.605W/m²K로 현행기준 대비 창호의 성능은 58.4% 낮다. 이에 따라 냉난방 부하는 현행기준의 건물보다 13,674kWh 더 높으며, 총 에너지소요량의 약 6.6%에 해당된다. 냉난방설비의 경우, COP는 냉방 2.37, 난방 2.3으로 현행기준 대비 각각 33.8%, 57% 낮은 성능이다. 이에 따른 건물의 냉난방 부하는 현행기준 대비 28,082.93kWh 높은 것으로 분석되며, 이는 총 에너지소요량의 13.5% 차이로 크다고 할 수 있다.

한편, 건물의 조명설비는 4년 전 LED 조명으로 100% 교체하여, 조명밀도가 7W/m²로 현행기준과 동일한 성능 수준이다.

4) 에너지기술 성능단계 선정 및 성능 정의

대상 건물에 적용 가능한 에너지기술(패시브, 액티브, 신재생 등)

Table 7. Thermal transmittance (U-value) and efficiency of existing buildings under current standards: HVAC and lighting

Component	Current	Current standard	Reduction ratio (%)	
Wall	0.756	0.24	68.3%	
Roof	0.756	0.15	80.2%	
Floor	0.523	0.17	67.5%	
Window	3.605	1.5	58.4%	
HVAC	Cooling	2.37	3.17	33.8%
	Heating	2.30	3.61	57%
Lighting	7	7	0%	

Table 8. Simulation results of energy demand based on thermal transmittance and efficiency according to standards

Component	Use	Energy consumption [kWh]		Difference [kWh]
		Current	Current standard	
Wall	Heating	72,087.43	58,593.12	-13,494.31
	Cooling	15,637.68	15,650.14	12.46
	Base	119,876.10	119,876.10	-
Roof	Heating	72,087.43	57,817.28	-14,270.15
	Cooling	15,637.68	14,350.50	-1,287.18
	Base	119,876.10	119,876.10	-
Window	Heating	72,087.43	57,972.11	-14,115.32
	Cooling	15,637.68	16,079.49	441.81
	Base	119,876.10	119,876.10	-
HVAC	Heating	72,087.43	47,773.16	-24,314.27
	Cooling	15,637.68	11,869.03	-3,768.65
	Base	119,876.10	119,876.10	-
Light	Heating	72,087.43	72,087.43	-
	Cooling	15,637.68	15,637.68	-
	Base	119,876.10	119,876.10	-

도출을 위해 그린리모델링 지원 관련 국내 정책·제도 등을 조사하였다. 정부에서는 그린리모델링 공사 항목을 에너지 공사 및 추가지원 공사로 분류하여 에너지성능 향상을 위한 에너지기술별 세부 기준을 제시하고, 이에 따라 사업비용 또는 공사비 이자를 지원한다. 적용할 에너지 요소 도출 방법은 대상 건물의 현황조사와 노후화 평가를 통해 적용 부위를 선정하고, 세부 에너지기술을 정의한다. 에너지기술은 패시브, 액티브, 신재생으로 분류하였다. 패시브 요소는 벽, 지붕, 바닥, 창호 등으로 분류되며, 단열 강화, 창호 교체 등을 통해 대상 건물에 적용이 가능할 것으로 사료된다. 그러나 바닥 단열 강화는 근무자들의 재실이 불가능하여 에너지기술에서는 제외하였다. 액티브 기술은 다수의 설비 관련 에너지기술이 조사되었으나, 시뮬레이션 분석을 통해 정량화가 불가능한 에너지기술은 제외하였다. 이에 고효율 냉난방 장치(EHP), 고효율 조명 교체, 조명디밍 시스템 등의 적용 기술을 도출하였다. 이는 기존 그린리모델링 사업 프로세스에서 정의하는 확립된 기술 선정과 달리, 실제 건물의 현황을 활용하고 노후화 평가를 통해 도출된 에너지기술이다.

전술한 바와 같이 에너지기술은 기존 대상 건물에 적용이 가능하며 시뮬레이션 수행이 가능한 항목을 선정하였다. 에너지기술별 성능은 법적 기준(건축물의 에너지절약 설계기준, 효율 관리 기자재 운용 규정)을 활용하여 현행기준의 열관류율 및 냉난방 성능에 대해 상향 10%, 20%, 하향 10%, 20%로 구분하여 총 5가지 수준으로

Table 9.와 같이 정의하였다. 이는 향후, 그린리모델링을 위한 비용 편익 최적화 모델 개발을 위해 기술별 에너지성능과 공사비의 상관 관계를 분석하기 위한 것이다. 다만, 대상 건물의 전체 조명기기는 4

년 전 LED 조명으로 교체되었으므로 건축물 에너지효율등급 최고 배점인 7W/m²으로 분석하였다. 조명디밍시스템(LDS; Lingting Dimming System)과 블라인드(내/외부) 기술은 관련 법규 기준이 부재하여 단계별 성능 정이가 불가능하다. 따라서 해당 기술은 설치/미설치로 구분하여 에너지기술 성능을 분석하였다.

현재 대상 건물에는 옥상에 PV 모듈이 설치되어 있으므로 한국에너지공단에서 정의한 산-재생에너지 설비 원별 시공 기준에서 박공 지붕의 옥상 태양광 설치 가능 면적 기준으로 반영하였다. 지붕 끝선에서 10cm 이격하여 산정한 옥상 태양광의 최대 설치 면적을 ALT-5로 설정하였으며, ALT-1~4는 ALT-5를 기준으로 10%씩 설치 면적을 줄여 수준별 성능을 정의하였다. BIPV 는 설치 면적에 대한 기준이 존재하지 않으므로 창을 제외한 모든 벽체 면적에 설치가 가능한 것으로 판단하여 최대 설치 가능 면적을 ALT-5로 설정하였으며 ALT-5를 기준으로 10%씩 하향하여 ALT-1~4를 설정하였다.

에너지기술별 수준 정의를 통해 대상 건물의 에너지 절감량을 분석한 결과는 다음 Table 10.과 같다.

Table 9. Performance definition by energy technology

Technology		ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5
Insulation (W/m ² K)	Wall	0.29	0.26	0.24	0.22	0.19
	Roof	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13
Window (W/m ² K)		1.8	1.65	1.5	1.35	1.2
EHP (COP)	Cooling	2.54	2.85	3.17	3.49	3.8
	Heating	2.89	3.25	3.61	3.97	4.33
Blind (-)	Internal	Applied / Not applied				
	External					
LDS						
LED (W/m ²)		6	5.5	5	4.5	4
PV (m ²)		242.14	282.49	322.85	363.2	403.56
BIPV (m ²)		234	273	312	351	390

Table 10. Analysis results of energy consumption and savings by performance

Technology			ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5
Insulation	Wall	Energy demand [kWh]	196,622.21	195,315.33	194,119.36	192,912.25	191,634.80
		Energy saving [kWh]	10,979.01	12,285.89	13,481.86	14,688.97	15,966.42
		Energy savings rate	5.29%	5.92%	6.49%	7.08%	7.69%
	Roof	Energy demand [kWh]	194,646.08	193,284.72	192,043.88	190,815.44	189,591.16
		Energy saving [kWh]	12,955.14	14,316.50	15,557.34	16,785.78	18,010.06
		Energy savings rate	6.24%	6.90%	7.49%	8.09%	8.68%
Window		Energy demand [kWh]	196,624.65	195,283.87	193,927.70	192,573.17	191,200.85
		Energy saving [kWh]	10,976.57	12,317.35	13,673.52	15,028.05	16,400.37
		Energy savings rate	5.29%	5.93%	6.59%	7.24%	7.90%
Blind	Internal	Energy demand [kWh]	205,688.37				
		Energy saving [kWh]	1,912.85				
		Energy savings rate	0.92%				
	External	Energy demand [kWh]	150,439.54				
		Energy saving [kWh]	2,378.83				
		Energy savings rate	1.58%				
EHP		Energy demand [kWh]	192,950.76	185,529.91	179,518.30	174,654.41	170,600.57
		Energy saving [kWh]	14,650.46	22,071.31	28,082.93	32,946.81	37,000.65
		Energy savings rate	7.06%	10.63%	13.53%	15.87%	17.82%
LED		Energy demand [kWh]	198,680.25	194,222.47	189,766.64	185,314.14	180,868.74
		Energy saving [kWh]	8,920.97	13,378.75	17,834.58	22,287.08	26,732.48
		Energy savings rate	4.30%	6.44%	8.59%	10.74%	12.88%
LDS		Energy demand [kWh]	173,751.83				
		Energy saving [kWh]	33,849.40				
		Energy savings rate	16.31%				
PV		Energy demand [kWh]	140,569.24	129,380.00	118,264.52	107,293.77	97,203.41
		Energy saving [kWh]	67,031.98	78,221.22	89,336.70	100,307.45	110,397.82
		Energy savings rate	32.29%	37.68%	43.03%	48.32%	53.18%
BIPV		Energy demand [kWh]	160,496.98	152,646.28	144,795.57	136,944.87	129,094.16
		Energy saving [kWh]	47,104.24	54,954.94	62,805.65	70,656.36	78,507.06
		Energy savings rate	22.69%	26.47%	30.25%	34.03%	37.82%

단열 강화 수준별 에너지성능 분석결과, 벽체의 경우 5.29~7.69%의 범위에서 에너지소요량이 절감하였으며 지붕의 경우 6.24~8.68%의 범위에서 에너지소요량이 절감되는 것으로 분석되었다. 고성능 창호 교체로 인한 에너지성능 분석결과는 에너지소요량이 5.29~7.90% 절감되었다. 벽체, 지붕, 창호의 열관류율이 감소할수록 난방 및 냉방 에너지 절감량이 상승하는 것을 알 수 있다.

내부 블라인드 설치에 따른 난방에너지 소요량은 0.47%, 냉방에너지 소요량은 11.2% 절감되는 것으로 확인되었다. 특히 냉방에너지 소요량이 크게 절감된 것으로 분석되는데, 이는 블라인드 설치로 인해 건물 내 일사 유입량이 감소하기 때문이다. 외부 블라인드 설치에 따른 에너지성능 분석결과, 냉방에너지 소요량은 19.58% 감소하였으며, 난방에너지 소요량은 0.25% 증가하였다. 그러나 냉방에너지 소요량이 절감된 것에 비해 총 에너지 절감률은 1.58%로 분석되었으며, 이는 대상 건물의 난방부하가 적기 때문이다. 고효율 냉난방 장치의 수준별 에너지성능 분석결과 7.06%~17.82%의 범위에서 에너지소요량이 절감되는 것으로 분석되며, 설비효율이 상승할수록 난방 및 냉방에너지 절감량이 상승하는 것으로 분석되었다. 특히, 냉방에너지보다 난방에너지 절감량이 크게 증가하는 것으로 분석되는데, 이는 건물의 난방에너지 사용량 비중이 높아 발생하는 결과이다.

고효율 조명(LED)의 조명밀도에 따른 에너지성능 분석결과 4.30%~12.88%의 범위에서 에너지소요량이 절감되는 것으로 분석되며, 조명밀도가 감소할수록 에너지 절감량이 상승하였다. 이로 인해 난방에너지 소요량이 증가하는데, 이는 조명밀도가 낮아짐에 따라 조명발열량이 감소하면서, 난방 부하가 상승하기 때문이다. 조명디밍시스템(LDS)의 분석결과 16.31%의 에너지소요량이 절감되는 것으로 분석되었으며, 조명에너지 절감량이 큰 폭으로 절감되었다.

한편, 난방에너지 소요량은 증가하고, 냉방에너지 소요량은 감소하였다. 이는 디밍제어를 통해 조명밀도가 조절되면서 조명발열량이 감소하고, 이에 따라 난방 부하가 상승하기 때문이다. 옥상 PV 설치에 따른 수준별 에너지성능 분석결과는 32.29%~53.18%의 범위에서 에너지소요량이 절감되는 것으로 분석되었다. 설치 면적이 상승할수록 태양광을 통한 에너지생산량이 상승하였다. BIPV 태양광의 수준별 에너지성능 분석결과 22.69%~37.82%의 범위에서 에너지소요량이 절감되는 것으로 분석되며, 설치 면적이 상승할수록 태양광을 통한 에너지생산량이 상승하였다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 사업의 현황 및 문제점을 파악하고 그린리모델링을 위한 비용 편익 최적화 프로세스를 제안하였으며, 실제 대상 건물에 대한 M&V 시뮬레이션 모델을 통해 노후화 평가 및 개선모델 안 도출에 따른 에너지성능을 분석하였다. 분석결과를 바탕으로 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 제안한 비용 편익 최적화 프로세스는 현장 진단을 수행, 공간별 특성 및 재질 특성 등을 추가로 조사하고 실제 에너지사용량을 수집하며 동적 해석을 통해 M&V를 수행, 노후화 평가를 통해

해당 건물에 적용 가능한 에너지기술을 선정, 시뮬레이션 모델을 분석하였다. 본 과정을 통해 실제 에너지사용량을 반영한 시뮬레이션 분석을 통해 에너지 절감량을 정량화할 수 있으며 건물에 적절한 에너지기술 선정이 가능할 것으로 판단된다.

- 이는 대상 건물의 실제 에너지사용량 기반의 건물 부하 패턴을 반영해 실제 사용량과 일치도가 높은 시뮬레이션 모델 구축이 가능하며, 보다 정확도가 높은 에너지성능 및 노후도 분석을 수행할 수 있다는 점에서 유의미한 것으로 판단된다. 실제 고지서를 통한 에너지사용량 분석과 M&V 시뮬레이션 수행 결과, 약 1.5% 이내로 ASHRAE M&V 기준에 과 적합한 것으로 확인되었다.
- M&V 시뮬레이션 모델을 통한 에너지성능 노후화 분석결과, 아산 농업기술센터 건물은 현행(2023년)기준의 열관류율 및 설비효율에 따른 노후도는 약 33~80% 낮은 수준으로 확인되었으며 특히, 외벽 및 지붕 등 외피보다 설비의 노후도가 높은 것으로 확인되었다.
- 비용 편익 최적화 모델을 위해 정량화 분석이 가능한 그린리모델링 기술요소는 벽체 및 지붕 단열, 창호 교체, 내외부 블라인드, 고효율 냉난방 장치, 고효율 조명교체, 조명디밍시스템, 옥상 PV 및 BIPV 기술로 정의되었다.
- 정의된 기술요소 및 수준에 따른 개선모델에 대한 에너지 절감량 분석결과, 벽체 및 지붕의 단열 강화 수준별 에너지성능은 약 5~9% 수준으로 에너지소요량이 절감되며 창호 교체에 따른 절감량 수준도 유사한 것으로 확인되었다. 내 외부 블라인드 설치에 따라 냉방에너지 소요량은 약 10~16%로 크게 절감되는 것으로 확인되었으나, 냉방에너지 소요량이 절감된 것에 비해 총 에너지 절감률은 1.15%로, 대상 건물의 난방부하가 적기 때문에 블라인드의 영향은 미미한 수준으로 확인되었다.
- 고효율 냉난방 장치의 수준별 개선안에 따라 에너지소요량 절감량은 7~18% 수준이며, 냉방에너지에 비해 난방에너지 절감량이 크게 증가하는 것으로 확인되었다. 고효율 조명기구의 조명밀도에 따라 4~13%, 조명디밍시스템(LDS)에 의해 약 16%의 에너지소요량이 절감되어 조명에너지 절감량이 큰 폭으로 절감되는 것이 확인되었다.
- 옥상 PV 설치에 따른 수준별 에너지성능은 33~53%의 범위에서 에너지소요량이 크게 절감되며, BIPV의 경우 약 23~38% 수준으로 확인되었다.
- 요컨대, 단열 및 창호 성능의 개선으로 10% 이내, 냉난방 장치는 수준별로 20%까지 에너지소요량 차이가 확인되었다. 조명기구의 경우, 조명밀도에 따라 13% 이내의 차이가 있으나 조명디밍시스템에 따른 에너지소요량 차이는 조명밀도보다 큰 것

으로 확인되었다. 옥상 PV 및 BIPV는 정의된 수준별로 20% 이상 최대 약 50%까지 에너지소요량 변화가 확인되었으며, 이에 따라 1차 에너지소요량 절감을 위해 전기를 생산하는 태양광발전시스템은 필수 불가결한 것으로 판단된다.

본 논문에서 다루어진 에너지성능 분석은 실측에 의한 조사가 아닌 연간 월별 에너지사용량에 의한 M&V 모델로서 에너지 절감량 분석결과에 한계성 존재한다. 다만, 기존 그린리모델링에서 노후건물에 대해 설계도서도 없이 육안검사에 의한 대부분의 가정치로 평가하는 것과 달리, 실제 에너지사용량에 기반하여 단순 평가틀이 아닌 동적시뮬레이션에 의한 M&V를 수행, 분석모델을 도출하고 기술요소 및 수준별 에너지 절감률을 분석했다는 점에서 차별성이 있다. 향후, 건물 현황을 반영하여 에너지기술 성능별 표준구조를 도출하고 이를 바탕으로 기술에 따른 실제 공사단가를 반영, 그린리모델링 기술별 에너지 절감량 및 비용분석의 투자회수기간(ROI) 분석을 통해 비용 최적화 모델 도출을 위한 연구를 진행할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20202020800360).

References

[1] Architecture 2030, Total annual global CO₂ emissions direct & indirect energy & process emissions (36.3 GT), <https://www.architecture2030.org>, 2024.09.14.

[2] 2050탄소중립녹색성장위원회, 제1차 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획('23~'42), 2023.03.21. // (Carbon Neutral Green Growth Committee, 1st national carbon neutral green growth plan, 2023.03.21.)

[3] 국토안전관리원, 공공건축물 그린리모델링 지원사업 가이드라인, 2023.06. // (Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Public building green remodeling support project guidelines, 2023.06.)

[4] 김성민, 기존 건축물 그린리모델링 적용 요소기술 및 에너지절감효과 분석, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제11권 제3호, 2017.06, pp.238-245. // (S.M. Kim, Analysis on application of green remodeling technology and energy saving effect for existing buildings, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 11(3), 2017.06, pp.238-245.)

[5] 전선하, 단독주택의 에너지성능 개선을 위한 리모델링 방안 및 경제성 분석, 한양대학교 석사학위논문, 2022.02. // (S.H. Jun, A study on implementation and economic analysis to improve the energy performance for remodeling house, Master's Thesis of Hanyang University, 2022.02.)

[6] 방주예 외 4인, 서울시 공공어린이집의 그린리모델링 적용 요소기술 및 에너지 절감효과, 대한설비공학회 학술발표대회 논문집, 2022.06, pp.610-613. // (J.Y. Bang et al., Analysis of green remodeling application factors and energy savings in daycare center in Seoul, Conference Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 2022.06, pp.610-613.)

[7] 방주예 외 5인, 그린리모델링 사례분석을 통한 요소기술 우선순위 도출 -공공어린이집을 중심으로-, 한국생태환경건축학회지, 제24권 제1호, 2024.01, pp.121-127. // (J.Y. Bang et al., Deriving priorities for element technology through green remodeling case analysis -Focusing on public daycare centers, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 24(1), 2024.01, pp.121-127.)

[8] 김은정 외 3인, ECO2를 이용한 주요 설계변수가 건물에너지효율등급에 미치는 영향 분석, 대한건축학회 추계학술대회논문집, 제34권 제2호, 2014.10, pp.291-292. // (E.J. Kim et al., Influence of major design variables on building energy efficiency rating with the use of ECO₂, Conference Journal of Architectural Institute of Korea, 34(2), 2014.10, pp.291-292.)

[9] 국토안전관리원, 공공건축물 그린리모델링 설계 가이드라인, 2020.11. // (Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Public building green remodeling design guidelines, 2020.11.)

[10] 국토교통부, 건축물의 에너지절약설계기준 [별표1] 지역별 건축물 부위의 열관류율표 (국토교통부고시 제2024-421호), 2024.08. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Building energy saving design standards [Attached table 1] Heat transmittance table of building parts by region (MOLIT Notice No. 2024-421), 2024.08.)