

실제 에너지 사용량 기반 공공 어린이집의 그린리모델링 효과 분석을 위한 데이터셋 구축 및 분석

김내경¹ · 김지원² · 조수현² · 홍장호³ · 광영훈⁴ · 문선혜^{5†}

¹서울시립대학교 건축공학과, 석사과정

²서울시립대학교 건축공학과, 박사과정

³서울시립대학교 건축학부 건축공학전공, 학사과정

⁴서울시립대학교 건축학부, 연구교수

⁵서울시립대학교 건축학부, 교수

Dataset Construction and Analysis for Evaluating Green Remodeling Effects in Public Daycare Centers Based on Actual Energy Consumption

Kim Naekyung¹ · Kim Jiwon² · Cho Suhyun² · Hong Jangho³ · Kwak Younghoon⁴ · Mun Sunhye^{5†}

¹Master's Student, Department of Architectural Engineering, University of Seoul

²Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, University of Seoul

³Undergraduate Student, School of Architecture and Architectural Engineering, University of Seoul

⁴Research Professor, Department of Architecture, University of Seoul

⁵Professor, Department of Architecture, University of Seoul

[†]Corresponding author: msh@uos.ac.kr

Abstract

Energy efficiency improvement in the building sector has gained considerable attention as a policy to achieve carbon neutrality. Green Remodeling (GR) projects targeting public buildings are actively being undertaken to enhance building energy performance. However, most GR impact assessments rely heavily on simulation-based approaches, with empirical analyses using energy consumption data remaining limited. This study investigated GR projects at public daycare centers completed in 2020. A dataset was compiled by integrating pre- and post-GR energy consumption data and their associated technological measures. Core GR interventions, including insulation reinforcement, window replacement, and heating and cooling system upgrades, were identified from energy performance reports. Energy consumption data from 2019 and 2022 were analyzed to measure the effectivity of GR by comparing pre- and post-retrofit energy consumption data. Additionally, a change-point model was applied to the dataset, incorporating weather data to estimate heating and cooling sensitivities (slopes) and base loads (intercepts). The dataset structure was organized according to energy impact categories outlined in IEA EBC Annex 53: *Climatic conditions, building envelope, energy systems, occupant profiles, operational patterns, and indoor air quality*. By integrating energy consumption data with the technical details of GR measures, this study presents a robust empirical dataset. This dataset can provide support for future research on individual GR intervention effectiveness and increasing evaluation model accuracy.

Keywords: 공공 어린이집(Public daycare centers), 그린리모델링(Green Remodeling, GR), 적용기술(Applied technologies), 실제 에너지 사용량(Actual energy consumption)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.45, No.3, pp.83-98, June 2025
<https://doi.org/10.7836/kses.2025.45.3.083>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 7 April 2025

Revised: 28 May 2025

Accepted: 30 May 2025

Copyright © 2025 Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

전 세계적으로 기후 위기에 대응하기 위한 탄소중립 실현의 필요성이 지속적으로 강조되고 있다. 특히 온실가스 배출의 상당 부분을 차지하는 에너지 부문은 탄소중립 달성을 위한 핵심 감축 대상이며¹⁾, 이 중 건물 부문은 전 세계 에너지 소비의 약 36%, 온실가스 배출의 약 39%를 차지하는 주요 분야로 지목된다²⁾. 이에 따라 국내에서도 신축 건축물은 제로에너지건축(Zero Energy Building, ZEB) 의무화를 단계적으로 확대하고 있으며, 기존 건축물에 대해서는 그린리모델링(Green Remodeling, GR)과 같은 에너지 성능 개선 사업을 통해 탄소중립 전략을 적극적으로 추진하고 있다³⁾.

그린리모델링은 노후화된 기존 건축물의 에너지 성능을 향상하고 효율성을 개선하기 위한 리모델링 과정이다⁴⁾. 이를 위한 기술로는 단열 보강, 창호 교체, 폐열회수형 환기장치, 고효율 냉난방장치, 신재생에너지(태양광) 설치 등이 있으며, 건물의 용도 및 특성에 따라 다양한 기술 조합의 형태로 적용된다. 국내에서는 2020년부터 ‘공공건축물 그린리모델링 지원사업’을 추진하고 있으며, 어린이집, 보건소, 의료기관 등 주요 공공시설을 대상으로 1차 에너지소요량의 30% 이상 감축을 목표로 하고 있다⁵⁾.

현재 그린리모델링 사업의 성과 평가는 사업 전·후 시뮬레이션(ECO2-OD)을 활용한 1차 에너지소요량의 비교 방식을 통해 이루어지고 있으며, 이는 실제 절감량과 차이를 초래할 수 있다⁶⁾. 실제 에너지 사용량은 IEA EBC Annex 53에서 제시한 바와 같이 기후, 건물 외피, 에너지 시스템, 재실자의 활동 및 행태, 건물 운영 및 유지 관리, 실내 공기질 등 크게 6가지 요인의 영향을 받지만⁷⁾, ECO2-OD 시뮬레이션은 외기 조건 수정이 어렵고 재실 부하 및 내부 설정값이 고정되어 있으며, 복합 설비 입력이 불가능한 구조적 특성으로 인해 실제 운용 환경의 특성을 충분히 반영하기 어렵다⁸⁾. 따라서 그린리모델링 사업의 실질적 효과를 평가하기 위해서는 단순히 시뮬레이션 결과에 의존하는 방식을 넘어, 실제 에너지 사용량과 그에 영향을 미치는 주요 요인을 종합적으로 고려한 실증 분석이 필요하다. 그러나 현재 그린리모델링 사업 관련 데이터는 기술 요소, 에너지 사용량, 기상 정보, 재실 정보 등 다양한 항목들이 기관별로 분산되어 있을 뿐만 아니라, 일부는 비정형 형태로 관리되어 있어 체계적인 활용이 어려운 실정이다.

이에 따라 그린리모델링 사업의 실질적 효과를 분석하기 위해서는, 그린리모델링 전후의 실제 에너지 사용량과 주요 영향 요인을 통합한 데이터셋의 구축이 선행될 필요가 있다. 본 연구에서는 국공립 어린이집을 대상으로, 그린리모델링 적용기술, 건물 물리적 특성, 재실 정보, 외부 환경 등 에너지 사용에 직·간접적으로 영향을 미치는 요인을 수집하고 이를 체계화하여 통합 데이터셋을 구축하였다. 또한 Change Point Model (CPM)을 활용하여 기저 부하와 냉난방 부하를 분리함으로써 단순 수집이 아닌 분석 기반의 정제된 데이터셋을 구성하였다. 이는 실측 기반 데이터를 포함함으로써 시뮬레이션 중심의 평가 방식에서 벗어나 실제 변화 양상을 분석할 수 있는 기반을 제공하며, 향후 그린리모델링 기술 요소별 효과 검증과 에너지 성능 평가모델 개발, 나아가 공공건축물의 에너지 성능 향상을 위한 정책 및 기술 전략 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 문헌분석

2.1 시뮬레이션 기반 그린리모델링 효과 분석

공공건축물의 그린리모델링 효과 분석은 주로 시뮬레이션을 기반으로 수행되어 왔다. Bang et al. (2024)⁹⁾은 공공 어린이집 69개소를 대상으로 ECO2-OD 시뮬레이션을 활용해 그린리모델링 전후의 1차 에너지소요량을 비교하였다. 분석 결과 평균 15.6%의 절감률이 확인되었으며, 창호(12.8%), 외벽 단열(5.8%), 지붕 단열(3.6%) 순으로 절감 기여도가 높게 나타났다. Chung et al. (2023)¹⁰⁾은 수도권 소재 공공 어린이집 16개소를 패시브, 액티브, 패시브+액티브 전략으로 구분하고 그린리모델링 적용 효과를 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 패시브+액티브 전략이 가장 높은 절감률을 보였으며, 창호 및 단열 보강이 주요 절감 요인으로 확인되었다. Kang et al. (2025)¹¹⁾은 서울시 내 공공 어린이집 20개소를 대상으로 노후화된 건물에 대한 그린리모델링 효과를 분석하였으며, 에너지소요량은 최대 67%, 1차 에너지소요량은 최대 46%, 탄소 배출량은 약 27.4% 감소한 것으로 나타났다. 주요 절감 요인으로는 창호와 외피 성능 개선, 고효율 설비 도입이 제시되었다. 이처럼 시뮬레이션 기반 분석은 그린리모델링 적용기술별 절감 기여도를 정량화하는데 유용하나, 표준화된 조건을 기반으로 하기 때문에 실제 운용 환경의 특성을 충분히 반영하기는 어렵다. 이에 따라 보다 현실적인 평가를 위해 실제 에너지 사용량 데이터를 기반으로 한 보완적 분석이 필요하다.

2.2 실제 사용량 기반 그린리모델링 효과 분석

시뮬레이션 기반 접근이 일반적으로 활용되는 가운데, 실제 에너지 사용량 데이터를 활용한 그린리모델링 효과 분석도 일부 연구를 통해 수행되고 있다. An et al. (2023)¹²⁾은 포항 소재 아파트 단지를 대상으로 그린리모델링 전후의 전기 및 가스 사용량 변화를 분석하였다. 월별 사용량 데이터를 기반으로, 전기 사용량은 약 6.2%, 가스 사용량은 약 15.6% 감소한 것으로 나타났다. Kim (2017)¹³⁾은 안산, 서울, 대구의 공공 및 공동주택 3개소를 대상으로 국가 건물에너지관리시스템(BEMS)을 활용하여 그린리모델링 전후의 에너지 사용량 및 부하 변화를 분석하였다. 분석 결과 연간 에너지 사용량은 최소 2.1%에서 최대 16.6%까지 감소하였으며, 피크 부하량 또한 최대 17.6%까지 저감된 것으로 나타났다. Lee and Choi (2022)¹⁴⁾는 공공건축물 1개소를 대상으로 그린리모델링 전후의 1차 에너지 사용량을 비교하였으며, 연간 사용량은 약 34.2%, 하절기에는 40% 이상의 절감률이 나타났다. 특히 해당 연구에서는 시뮬레이션 결과보다 실제 사용량 기반 분석에서 더 큰 절감 폭이 나타난 것으로 보고되어, 실제 운용 조건을 반영한 평가의 필요성이 강조되었다. 이처럼 실제 사용량 기반 접근은 에너지 사용 특성을 정확히 반영할 수 있는 장점이 있으며, 그린리모델링 효과를 현실적으로 파악할 수 있는 수단이 될 수 있다. 다만 기존 연구는 분석 대상이 소수에 그치거나 특정 사례에 한정되어 있어, 동일 건축 유형에 대한 체계적이고 확장된 분석이 요구된다.

3. 연구 대상 및 데이터셋 구성

3.1 연구 대상 선정

본 연구는 2020년에 완료된 그린리모델링 사업 중 공공 어린이집을 대상으로 수행하였다. 그린리모델링 사업은 2020년을 기점으로 본격 추진되었으며, 이후 일정 기간이 경과한 시점에서 실측 에너지 사용량을 확보할 수 있다는 점에서, 2020년 완료 사업을 연구 대상으로 선정하였다.

2020년 한 해 동안 완료된 그린리모델링 사업은 총 815건이며, 이 중 어린이집은 408건으로 전체의 약 50.1%를 차지하였다(Table 1). 같은 해 보건소는 367건(45.0%), 의료시설은 40건(4.9%)으로, 어린이집은 단일 용도 건축물 중 가장 많은 수가 그린리모델링 대상으로 선정되었다. 또한 어린이집 그린리모델링 사업은 수도권(서울, 경기, 인천)을 포함한 전국 주요 권역에 고르게 분포하였다. 2020년부터 2022년까지의 그린리모델링 완료 건수를 살펴보면, 수도권 613건, 강원권 67건, 충청권 77건, 경상권 189건, 전라권 157건으로 나타나 전국적으로 고르게 분포되어 있음을 확인할 수 있다(Fig. 1). 이러한 지역별 분포 특성은 특정 지역에 편중되지 않은 균형 잡힌 분석 대상 확보가 가능함을 보여준다.

Table 1 Number of completed green remodeling projects

Category	2020	2021	2022	Annual Total
Capital Region	236	211	166	613
Gangwon Region	26	28	13	67
Chungcheong Region	27	25	25	77
Gyeongsang Region	72	88	29	189
Jeolla Region	47	85	25	157
Regional Total	408	437	258	1,103

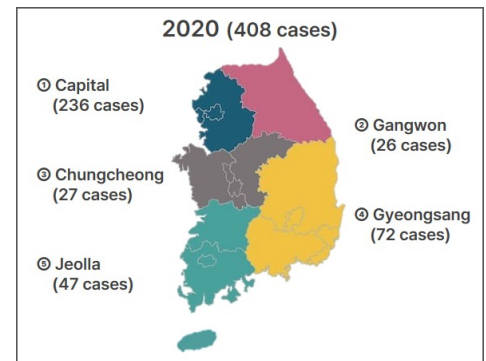


Fig. 1 2020 regional distribution

또한 어린이집은 그린리모델링 대상 건축물 중에서도 사용자 구성과 운영 패턴이 비교적 일정하여¹⁵⁾, 에너지 사용량 예측 시 불확실성이 상대적으로 적은 특성을 지닌다. 대부분의 어린이집은 보육시설로 활용되며, 연면적과 공간 구성에서도 큰 차이를 보이지 않아 건물 간 비교와 그린리모델링 적용기술의 효과 분석에 유리한 조건을 갖추고 있다. 아울러, 어린이집은 영유아가 장시간 머무르는 공간으로 실내 환경 개선이 보육 환경과 이용자의 건강에 직결된다는 점에서 본 연구의 분석 대상으로 선정하였다¹⁶⁾.

3.2 그린리모델링 적용기술 구성 및 분류

본 연구에서는 IEA EBC Annex 53에서 제시한 건물 에너지 사용량 영향 요인을 기반으로, 그린리모델링 사업의 특성과 확보 가능한 데이터를 고려하여 변수 체계를 재구성하였다. 영향 요인별 세부 항목과 본 연구에서

활용한 데이터 출처는 Table 2에 정리하였다. 이에 따라 분석에 활용된 변수 그룹은 GR 적용기술(③), 건물 물리적 특성(② + ⑤), 재실정보(④), 외부환경(① + ⑥)의 네 가지이다.

Table 2 Factors influencing building energy use and data collection framework

Data Type	① Climate	② Building Envelope	③ Energy System	④ Occupancy Information	⑤ Building Operation	⑥ Indoor Air Quality
Data Source	KMA Open Data Portal (data.kma.go.kr)	Energy Performance Report	Energy Performance Report	Childcare Center Info Portal (info.childcare.go.kr)	Energy Performance Report	Environmental Statistics Portal (stat.me.go.kr)
Collected Data	Monthly avg. outdoor temperature & Relative humidity	Geometric info (e.g., floor height, window/door area), Change in avg. U-value after GR	Pre/Post-GR mechanical systems, Cooling capacity & COP, Heating system efficiency	Monthly number of children & staff	Annual operation status & Energy consumption	Monthly avg. PM 10 & PM 2.5 (proxy for indoor air quality)

(1) 그린리모델링 적용기술

그린리모델링 적용기술은 사업 완료 후 성과 평가를 위해 필수적으로 작성·제출되는 에너지성능보고서를 통해 정리되었다. 그린리모델링 사업은 필수공사와 선택공사로 구성되어 있으며, 적용기술 목록은 Table 3과 같다. 에너지성능보고서에는 건물별로 적용된 기술과 함께 열관류율, 설비용량, 효율 등의 성능 정보가 포함되어 있으며, 이를 기반으로 데이터셋을 구축하였다. 데이터셋의 구성 항목과 세부 지표는 Table 4와 같다. 주요 적용기술은 단열, 창호, 폐열회수형 환기장치, 고효율 냉난방설비, 고효율 보일러, 조명, 신재생에너지, BEMS 및 원격검침장치로 구성된다. 또한 석면제거, 일사조절장치, 스마트에어샤워, 순간온수기, 쿨루프(Cool Roof) 등 선택공사 항목은 적용 여부를 확인하여 함께 반영하였다.

Table 3 Classification of essential and optional green remodeling measures

Category	Technical Elements
Essential Measures	External and internal insulation, Floor insulation and heating, High-performance windows and doors, Heat recovery ventilation system, High-efficiency heating and cooling system, High-efficiency boiler, High-efficiency lighting (LED), Renewable energy system (photovoltaic panels), Building Energy Management System (BEMS) or remote electronic metering system, Cool roof (solar-reflective coating)
Optional Measures	Solar control devices, Smart air shower system, Instantaneous water heater, and other additional measures approved by the Green Remodeling Center for enhancing energy performance and indoor environment

Table 4 Classification of green remodeling applied technologies

Category	Technical Elements	Collected Variable	Unit
Insulation	External Wall Insulation	Average U-value	W/m ² K
	Roof Insulation	Average U-value	W/m ² K
	Floor Insulation	Average U-value	W/m ² K
Window	Window	Average U-value	W/m ² K
Heat Recovery Ventilation	Heating / Cooling	Heat Recovery Rate, Total Capacity	%, kW
High-Efficiency HVAC	Heating / Cooling	Total Capacity, COP	kW, COP
High-Efficiency Boiler	Heating / Domestic Hot Water	Total Capacity, Capacity-weighted Average Efficiency	kW, %
Lighting (LED)	Lighting (LED)	Lighting Power, Lighting Power Density Change	kW, W/m ²
Renewable Energy	Solar PV	PV Module Installation Area	m ²
BEMS	BEMS	Installation Status	-

(2) 건물 물리적 특성

건물의 물리적 특성은 에너지 사용량 분석을 위한 기초 정보로 활용된다. 에너지성능보고서를 통해 층고, 천장고, 냉난방면적, 거실면적, 외벽, 창호, 지붕, 바닥면적 등 공간 및 외피 정보를 정리하였으며, 그린리모델링 전후 시뮬레이션을 통해 산출된 에너지소요량 및 1차 에너지소요량도 함께 확보하였다. 변수별 세부 항목은 Table 5와 같다.

Table 5 Building physical characteristics and energy simulation results

Category	Indicator	Unit
Shape	Floor Height	m
	Ceiling Height	m
Area	Heating and Cooling Area	m ²
	Living Room Area	m ²
Envelope Area	Sum of Exterior Wall Area	m ²
	Sum of Window and Door Area	m ²
	Sum of Roof Area (Top Floor)	m ²
	Sum of Floor Area (Bottom Floor)	m ²
Energy Simulation	Final Energy Demand	kWh/m ² ·yr
	Primary Energy Demand	kWh/m ² ·yr

(3) 재실 정보

재실 정보는 어린이집의 에너지 사용량에 영향을 미치는 중요한 요인이다. 어린이집은 영유아의 장시간 재실로 인해 냉난방 및 환기설비 사용량이 재실 규모에 따라 달라지는 특성을 보인다. 이에 따라 어린이집 정보공개 포털을 활용하여 그린리모델링 사업 전후 기간의 월별 어린이 현원과 교직원 수를 수집하였다. 관련 변수는 Table 6에 정리하였다.

Table 6 Occupancy information

Category	Indicator	Unit
Occupancy	Monthly Number of Children	persons
	Monthly Number of Staff	persons

(4) 외부 환경

외부 환경에는 기후 및 공기질 조건을 반영하였다. 기상정보개방포털을 통해 지역별 월평균 외기온도와 상대습도를 수집하였으며, 공기질 정보로는 지역별 월평균 미세먼지 농도(PM10, PM2.5)를 확보하였다. 실내 공기질 자료는 확보가 어려워, 외부 미세먼지 농도를 간접적인 지표로 활용하였다. 관련 변수는 Table 7에 정리하였다.

Table 7 Outdoor environment information

Category	Indicator	Unit
Outdoor Environment	Monthly Average Outdoor Temperature	°C
	Monthly Average Relative Humidity	%
	Monthly Average PM 10 Concentration	µg/m ³
	Monthly Average PM 2.5 Concentration	µg/m ³

데이터 구축 과정에서 몇 가지 특징과 한계가 확인되었다. 그린리모델링 사업 관련 정보는 에너지성능보고서, 어린이집 정보공개포털, 기상정보개방포털 등 다양한 출처를 통해 수집되었으나, 자료의 형식과 구조가 일관되지 않았다. 특히 에너지성능보고서는 건물별로 작성 양식이 상이하고, 주요 정보가 도면과 부속 자료 등에 비정형으로 산재되어 있어 정량화 및 전산화에 많은 시간이 소요되었다. 또한 그린리모델링 사업 정보는 개별 프로젝트 단위로 관리되어 왔기 때문에 통합된 데이터베이스가 부재하여 분석에도 제약이 있었다. 주요 기술 변수는 다양한 자료로부터 직접 선별해야 했고, 일부 정보는 누락되어 추가적인 보완이 요구되었다. 향후 그린리모델링 사업 데이터의 활용성과 접근성을 높이기 위해서는 보고서 양식의 표준화와 통합 데이터베이스 구축이 필요할 것으로 사료된다.

3.3 그린리모델링 전후 에너지 사용량 데이터 구축 및 분석 개요

그린리모델링 전후의 에너지 절감 효과 분석을 위해, 2019년과 2022년을 기준으로 월별 전력 및 가스 사용량 데이터를 구축하였다. 그린리모델링 사업은 2020년을 기점으로 본격 추진되었으나, 건물별로 공사 완료 시점에 차이가 있어 일부는 2021년에 공사가 완료되었다. 이에 따라 그린리모델링 사업 시행 전후의 변화를 충분히 반영할 수 있도록 에너지 사용량 데이터를 확보하였으며 분석 대상 기간은 Fig. 2에 제시하였다.

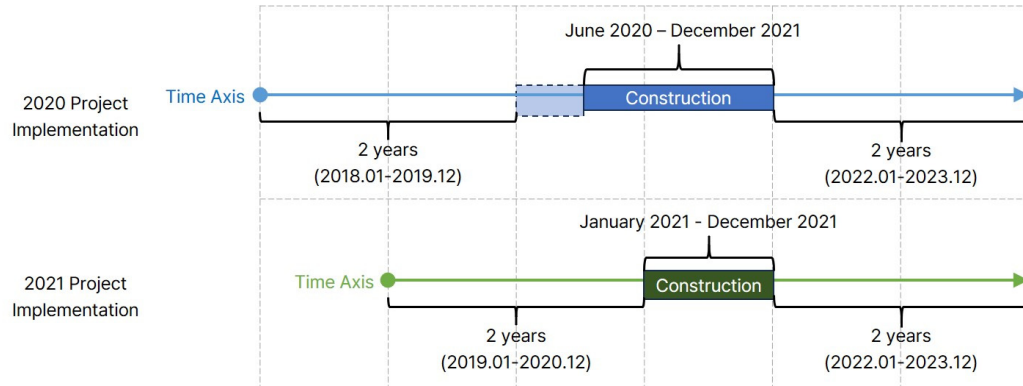


Fig. 2 Timeline of green remodeling implementation and data collection

에너지 사용량 데이터는 한국건설기술연구원에서 제공한 실제 계량기 기반의 월별 전력 및 가스 사용량을 활용하였으며, 해당 데이터를 기반으로 사전에 수행된 Change Point Model (CPM) 분석 결과도 함께 활용하였다. 특히 그린리모델링 사업은 냉난방 부하 저감을 주요 목표로 추진되어 온 만큼, 분석 과정에서 기저 부하(비계절성 부하)와 냉난방 부하(계절성 부하)를 구분하는 절차가 필요하다. CPM 분석에는 건물별 외기온도와 월별 에너지 사용량 시계열이 사용되었으며, 그린리모델링 전 기간은 2018년과 2019년 데이터를 포함하여 최대 24개월의 시계열로 구성되었다. 반면, 그린리모델링 후 기간은 공사 완료 시점과 지역별 데이터 품질의 제약으로 인해 주로 2021년 11월부터 2022년 10월까지의 12개월 데이터를 활용하였으며, 7개월 미만의 데이터만 확보된 건물은 분석에서 제외하였다.

CPM은 외기온도에 따른 건물의 에너지 사용량 변화를 분석하여 임계온도(Change Point)를 기준으로 냉난방 부하와 기저 부하를 구분하는 회귀 모형으로¹⁷⁾, 분석 목적과 건물의 에너지 사용 특성에 따라 총 다섯 가지 유형(1P ~ 5P)으로 구분된다. 1P 모델은 외기온도와 무관한 기저 부하만을 반영하며, 2P 모델은 기저 부하와 냉방 또는 난방 중 하나의 부하를 고려한다. 3P 모델은 기저 부하가 일정한 상태에서 냉방 또는 난방 부하를 함께 반영하며, 4P 모델은 기저 부하가 외기온도에 따라 선형적으로 변하는 경우이다. 5P 모델은 냉난방이 발생하지 않는 중간 외기온도 구간(Intermediate Region)을 포함하여 냉방과 난방 부하를 모두 고려하는 형태이다.

본 연구에서는 전체 CPM 결과 중 3P_h (난방 중심), 3P_c (냉방 중심), 5P (냉난방 모두 반영) 모델을 중심으로 분석을 수행하였다. 각 건물의 기저 부하는 CPM 회귀식의 절편 계수(b_0)로 정의되며, 이를 연간 기준으로 환산한 뒤 냉난방 면적으로 정규화하여 건물 간 에너지 사용량 특성 비교·분석에 활용하였다. 이를 통해 기존 연구에서 단순화되었던 기저 부하 분석의 한계를 보완하고, 보다 세분화된 에너지 성능 비교가 가능하도록 하였다.

3.4 데이터셋 구축 및 분석 대상 선정

그린리모델링 사업의 에너지 절감 효과 분석을 위해, 본 연구에서는 분석 대상 설정과 데이터 전처리 과정을 단계적으로 수행하였다. 전체 과정은 Fig. 3에 정리하였다.

우선 초기 분석 대상은 2020년까지 그린리모델링 사업이 완료된 공공 어린이집 408건으로 설정하였다. 이후 에너지성능보고서 확보 여부, 에너지 사용량의 캘린더라이제이션(calendarization) 수행 여부, 부지 조건(단독 용지 여부)을 기준으로 전처리를 수행하였으며, 이를 통해 207건을 1차 분석 대상으로 선정하였다.

다음으로 사업 시작일과 종료일이 2020년과 2021년을 벗어나 그린리모델링 사업 기간을 정상적으로 반영하기 어려운 3건을 제외하여 204건으로 구성하고, 이에 대해 CPM 분석을 적용하였다. 분석 과정에서 공사 완료 시점이 2021년 10월 이후로, CPM 분석이 어려운 5건을 추가로 제외하여 총 199건을 확보하였다. 또한 CPM 기반의 세부 전처리를 수행하였다. 먼저 외기온도에 따른 에너지 사용량 패턴이 불분명한 1P 및 2P 모델로 분류된 사례와, 외기온도와의 결정계수(R^2)가 0.5 미만으로 모델의 신뢰성 확보가 어려운 사례를 제외하였다. 이어서 그린리모델링 전후 분석의 일관성을 확보하기 위해 사업 전과 후 분석 모두에서 공통으로 존재하는 건물 106건을 최종 분석 대상으로 선정하였다. 전기 사용량 분석의 경우, 그린리모델링 이후 월별 에너지 사용량 샘플 수가 7건 이하로 부족한 건물 2건과, CPM 분석 결과에서 3P_h 모델로 분류된 건물 1건을 추가로 제외하였다. 이러한 사례는 전기 부문에서 일반적이지 않은 형태로, 에너지성능보고서와의 검토 결과에서 시뮬레이션 입력 값과 실제 사용 형태 간의 불일치가 확인되어 제외하였다.

마지막으로 발전량 및 기여량을 정량적으로 반영하기 어려운 신재생에너지가 적용된 건물 9건, 에너지 사용량 데이터가 누락된 건물 1건을 제외하였다. 또한 냉난방 면적 정보가 부재한 건물(시그니처 사업 포함) 2건을 추가로 제거하였다. 이 과정을 거쳐 전기 사용량 분석에는 91건, 가스 사용량 분석에는 94건의 건물이 최종 분석 대상으로 선정되었다. 전기 사용량 분석 대상은 가스 사용량 분석 대상과 동일한 건물 중 일부로 구성된다.

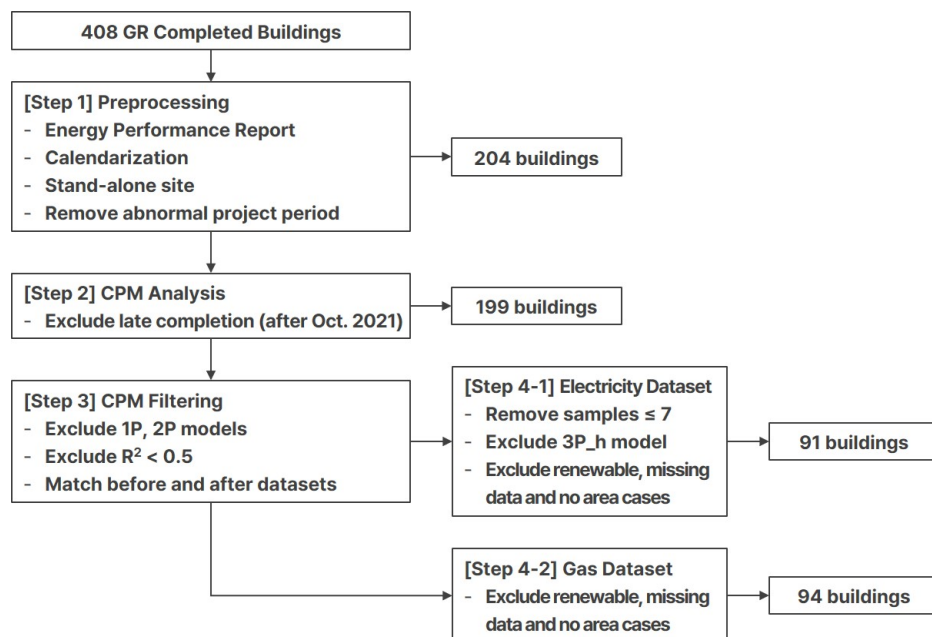


Fig. 3 Flowchart of data preprocessing and sample selection

4. 데이터셋 기반 분석 결과

4.1 그린리모델링 적용기술 구성 및 분포 분석

공공 어린이집에 적용된 그린리모델링 기술의 현황과 그린리모델링 전후의 성능 변화를 파악하기 위해, 필수 공사 기준에 해당하는 주요 기술 항목을 중심으로 기술별 적용 빈도와 성능 변화량을 정리하였다. 분석 대상은 총 94개 건물이며, 기술 항목별 적용 현황은 Table 8에 제시되어 있다.

Table 8 Number and proportion of applied technical elements

Technical Elements	External Wall Insulation	Roof Insulation	Floor Insulation	Window	Heat Recovery Ventilation	High-Efficiency HVAC	High-Efficiency Boiler	Lighting (LED)
Number of Applications	42	26	9	79	32	61	46	35
Proportion (%)	45	28	10	84	34	65	49	37

기술 항목별로 살펴보면, 고성능 창호가 전체의 84% (79건)로 가장 높은 적용률을 보였으며, 고효율 냉난방 장치(65%, 61건), 고효율 보일러(49%, 46건), 외벽 단열 보강(45%, 42건), 고효율 조명(37%, 35건), 폐열회수형 환기장치(34%, 32건) 순으로 높은 빈도를 보였다. 전반적으로 창호 및 기계설비 중심의 기술이 우선 적용된 경향을 보였으며, 이는 시공 난이도, 공사 기간, 예산 소요 등의 측면에서 상대적으로 도입이 용이한 기술들이 우선적으로 선택되었기 때문으로 해석된다.

기술 적용 현황 분석에 있어, 그린리모델링 후 외피 및 설비 성능의 개선 정도를 확인하였다. 관련 수치는 Table 9와 Table 10에 정리되어 있으며, 주요 결과는 다음과 같다. 외피 항목에서는 외벽, 지붕, 바닥, 창호의 열관류율(U-value)이 전반적으로 낮아졌으며, 중앙값 기준으로 약 40 ~ 60% 수준의 성능 향상이 나타났다. 특히 창호의 경우, 중앙값 기준 $3.38 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 에서 $1.6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 약 53% 개선되어 가장 큰 성능 향상을 보였다 (Table 9). 각 외피 항목의 성능 개선 분포는 Fig. 4의 Boxplot을 통해 시각적으로 확인할 수 있다.

설비 항목에서는 폐열회수형 환기장치, 고효율 냉난방장치, 고효율 보일러, 조명 등 주요 시스템에서 전반적인 성능 개선이 확인되었다. 폐열회수형 환기장치의 경우, 신규 설치된 사례에서 난방 및 냉방 회수율은 각각 67.5%, 58.5%로 나타났다. 고효율 냉난방장치의 경우, 냉방시스템의 COP는 3.08에서 3.53로 향상되었고 난방 시스템의 COP 또한 3.00에서 3.82로 향상되었다. 고효율 보일러의 경우, 난방 효율은 84.50%에서 90.50%로, 급탕 효율은 85.00%에서 91.46%로 개선되었다. 조명 항목에서는 형광등에서 LED로의 교체 또는 기존 LED의 고효율화가 반영되어, 전체 조명 전력은 3.03 kW에서 2.61 kW로 감소하였으며, 단위 면적당 조명 전력 밀도는 14.12 W/m^2 에서 13.02 W/m^2 로 개선되었다(Table 10).

이러한 외피 및 설비 성능 개선은 에너지 손실을 줄이고 실내 에너지 효율 향상의 기반이 된다. 향후에는 실제 에너지 사용량 변화 분석의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

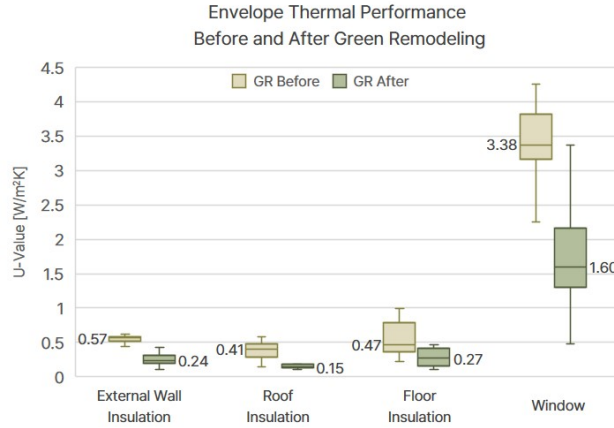


Fig. 4 Envelope thermal performance before and after green remodeling (Boxplot)

Table 9 Comparison of envelope thermal performance before and after green remodeling

Category	GR Before			GR After		
	Min	Median	Max	Min	Median	Max
External Wall Insulation (W/m²K)	0.44	0.57	0.62	0.11	0.24	0.43
Roof Insulation (W/m²K)	0.15	0.41	0.58	0.11	0.15	0.18
Floor Insulation (W/m²K)	0.22	0.47	1.00	0.11	0.27	0.47
Window (W/m²K)	2.25	3.38	4.26	0.47	1.60	3.38

Table 10 Comparison of system performance metrics before and after green remodeling

Category		GR Before			GR After		
		Min	Median	Max	Min	Median	Max
Heating Heat Recovery Rate (%)		-	-	-	15.25	67.50	80.00
Cooling Heat Recovery Rate (%)		-	-	-	18.50	58.50	75.00
High Efficiency Cooling	COP	2.70	3.08	3.50	2.84	3.53	4.65
	Capacity (kW)	14.50	55.40	146.00	9.00	57.00	160.00
High Efficiency Heating	COP	2.80	3.00	4.24	3.00	3.82	4.27
	Capacity (kW)	40.70	101.99	242.24	55.50	130.90	247.80
Heating Boiler	Efficiency (%)	78.90	84.50	91.00	84.40	90.50	100.00
	Capacity (kW)	19.40	116.2	263.78	19.40	109.55	252.50
Domestic Hot Water	Efficiency (%)	82.80	85.00	100.00	85.19	91.46	100.00
	Capacity (kW)	14.18	70.57	178.00	23.90	63.50	205.80
Lighting Power (kW)		0.30	3.03	10.40	0.30	2.61	6.38
Lighting Density (W/m²)		1.41	14.12	15.00	1.41	13.02	10.00

4.2 그린리모델링 전후 에너지소요량 및 에너지 사용량 분석

그린리모델링 전후의 성능 변화를 비교하기 위해, 시뮬레이션 기반으로 산출된 에너지소요량과 실제 에너지 사용량 간의 차이를 분석하였다. 앞선 분석(4.1)에서는 94개 건물을 대상으로 기술 적용 현황과 성능 개선 수준을 검토하였으나, 에너지 사용량 비교는 전기 및 가스 데이터가 모두 확보된 91건을 기준으로 진행하였다.

에너지소요량은 에너지성능보고서에 제시된 연간 단위의 시뮬레이션 결과를 활용하였으며, 실제 에너지 사용량은 2019년과 2022년의 월별 전기 및 가스 사용량 데이터를 합산한 후, 냉난방 면적으로 표준화하여 연간 총사용량으로 환산하였다. 냉난방 면적은 Table 11에 제시된 바와 같이 300 ~ 600 m² 구간이 전체의 59.3%로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 면적 구간별 표준화를 통해 비교의 일관성을 확보하였다. 전기와 가스 사용량은 각각 제시한 후, 이를 합산한 에너지 사용량과 함께 분석함으로써, 에너지원별 특성과 전체 사용량 변화 양상을 종합적으로 검토하였다.

Table 11 Distribution of analyzed daycare centers by conditioned floor area

Conditioned Floor Area Range (m ²)	Less than 300	300-600	600-1,000	More than 1,000	Total
Number of Buildings	18	54	14	5	91
Proportion (%)	19.8	59.3	15.4	5.5	100

그린리모델링 전후의 연간 에너지소요량 변화는 Fig. 5와 Table 12에 정리되어 있다. 중앙값 기준으로, 에너지소요량은 98.20 kWh/m²yr에서 78.75 kWh/m²yr로 약 19.8% 감소하였고, 1차 에너지소요량은 158.05 kWh/m²yr에서 133.40 kWh/m²yr로 약 15.6% 감소하였다. 전반적으로 최솟값과 최댓값 또한 함께 감소하면서 전체 분포가 하향된 양상을 보였다. 실제 에너지 사용량 변화는 Fig. 6과 Table 13에 정리되어 있다. 중앙값 기준으로, 전력 사용량은 60.03 kWh/m²yr에서 61.02 kWh/m²yr로 약 1.65% 증가한 반면, 가스 사용량은

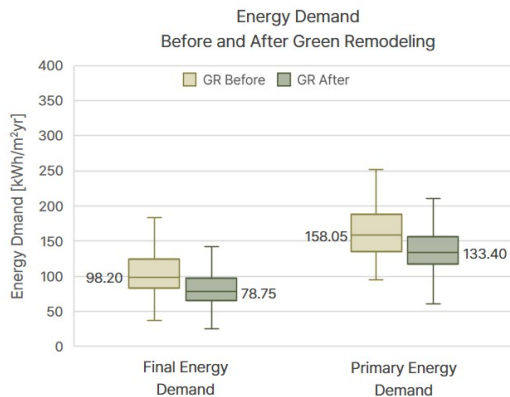


Fig. 5 Comparison of energy demand before and after green remodeling (Boxplot)

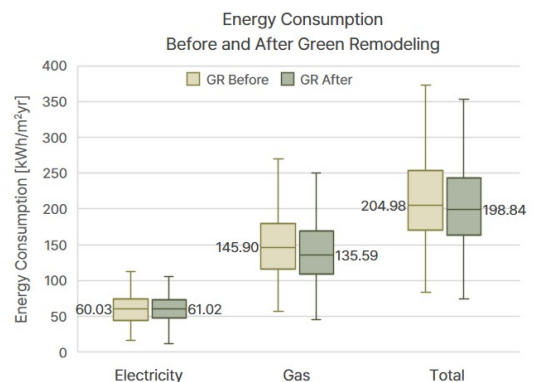


Fig. 6 Comparison of energy consumption before and after green remodeling (Boxplot)

145.90 kWh/m²·yr에서 135.59 kWh/m²·yr로 약 7.07% 감소하였다. 이를 합산한 에너지 사용량은 204.98 kWh/m²·yr에서 198.84 kWh/m²·yr로 약 3.0% 감소하였다. 다만, 전력 사용량의 경우 중앙값은 소폭 증가했으나 최솟값(16.57 → 11.75 kWh/m²·yr) 및 최댓값(113.11 → 105.44 kWh/m²·yr)은 모두 감소하여 일부 건물에서는 실질적인 절감 효과가 있었던 것으로 해석된다.

Table 12 Comparison of energy demand before and after green remodeling

Category	GR Before			GR After			Improvement Rate (%)
	Min	Median	Max	Min	Median	Max	
Final Energy Demand	36.70	98.20	183.30	24.60	78.75	142.10	19.80
Primary Energy Demand	95.1	158.05	251.50	60.00	133.40	211.10	15.60

Table 13 Comparison of energy consumption before and after green remodeling

Category	GR Before			GR After			Improvement Rate (%)
	Min	Median	Max	Min	Median	Max	
Electricity Energy Consumption	16.57	60.03	113.11	11.75	61.02	105.44	-1.65
Gas Energy Consumption	56.68	145.90	269.68	44.93	135.59	249.77	7.07
Total Energy Consumption	83.13	204.98	372.62	74.68	198.84	353.29	3.00

그린리모델링 이후의 실제 에너지 사용량 변화를 보다 명확히 파악하기 위해, 전체 사용량을 기저 부하(Base Load)와 냉난방 부하(Seasonal Load)로 구분하여 분석하였다. 기저 부하는 Change Point Model (CPM)을 통해 도출된 회귀식의 절편 계수(b_0)를 기반으로 산정된 값으로 냉난방과 무관하게 연중 지속적으로 소비되는 에너지이며, 냉난방 부하는 전체 에너지 사용량에서 기저 부하를 제외한 계절적 소비량을 의미한다. Fig. 7과 Table 14에 따르면, 그린리모델링 이후 기저 부하는 전기 1.52%, 가스 1.32%, 전체 에너지 사용량 1.85% 증가

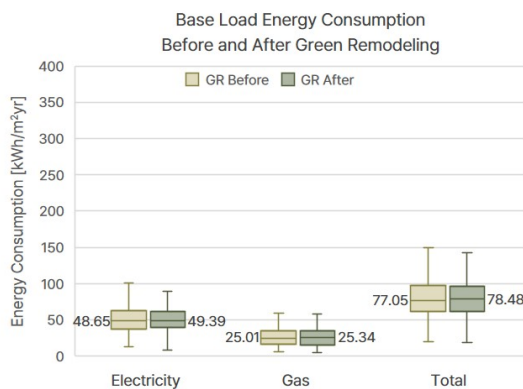


Fig. 7 Comparison of base load energy consumption before and after green remodeling (Boxplot)

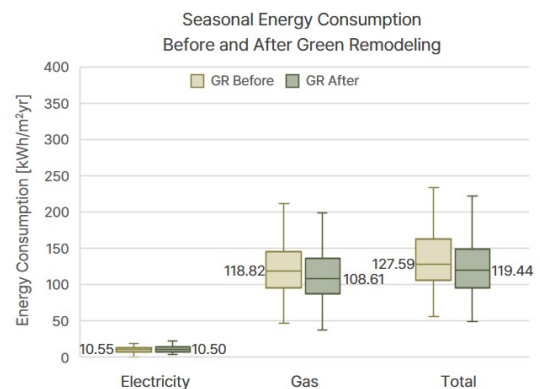


Fig. 8 Comparison of seasonal energy consumption before and after green remodeling (Boxplot)

한 것으로 나타났다. 이는 중앙값 기준의 소폭 증가를 의미하지만, 동시에 최솟값과 최댓값은 모두 낮아져 전체 분포 폭은 줄어든 것으로 해석된다. 반면, Fig. 8과 Table 14에서 제시된 바와 같이 냉난방 부하는 전기 0.47%, 가스 8.59%, 전체 에너지 사용량 6.39% 감소하였다. 이는 그린리모델링이 냉난방 중심의 계절적 에너지 절감에 기여한 것으로 해석될 수 있다.

Table 14 Comparison of base load and seasonal energy consumption before and after green remodeling

Category		GR Before			GR After			Improvement
		Min	Median	Max	Min	Median	Max	Rate (%)
Base	Electricity Energy Consumption	13.53	48.65	100.73	8.83	49.39	89.59	-1.52
	Gas Energy Consumption	6.60	25.01	59.89	5.30	25.34	58.45	-1.32
	Total Energy Consumption	20.14	77.05	149.04	19.03	78.48	143.13	-1.85
Seasonal	Electricity Energy Consumption	0.59	10.55	19.01	3.63	10.50	22.25	0.47
	Gas Energy Consumption	47.24	118.82	212.11	37.42	108.61	199.20	8.59
	Total Energy Consumption	55.62	127.59	233.60	49.60	119.44	221.76	6.39

이러한 결과는 Table 15를 통해 종합적으로 확인할 수 있다. 시뮬레이션 기반의 1차 및 에너지소요량은 각각 15.6%, 19.8%의 절감률을 보였으며, 실제 계량기 데이터를 기반으로 한 에너지 사용량과 계절 부하도 각각 3.0%, 6.39%의 절감 효과를 나타냈다. 다만, 시뮬레이션 기반 절감률과 비교할 때 실제 절감 폭은 다소 낮은 수준이며, 이는 사용자 행태, 재실 밀도, 설비 운영 조건 등의 실제 운용 환경이 영향을 미친 결과로 해석된다. 이에 따라, 그린리모델링 성과를 보다 정밀하게 평가하기 위해서는 시뮬레이션 결과와 더불어, 실제 사용량 데이터를 활용한 분석이 지속적으로 병행될 필요가 있다.

Table 15 Comparison of energy demand and energy consumption before and after green remodeling

Category	GR Before			GR After			Improvement Rate (%)
	Min	Median	Max	Min	Median	Max	
Final Energy Demand	36.70	98.20	183.30	24.60	78.75	142.10	19.80
Primary Energy Demand	95.1	158.05	251.50	60.00	133.40	211.10	15.60
Total Energy Consumption	83.13	204.98	372.62	74.68	198.84	353.29	3.00
Seasonal Energy Consumption	55.62	127.59	233.60	49.60	119.44	221.76	6.39

5. 결론

본 연구는 2020년 그린리모델링이 완료된 공공 어린이집을 대상으로, 그린리모델링 전후의 적용기술, 외피 및 설비 성능, 에너지소요량, 에너지 사용량 등의 정보를 통합한 데이터셋을 구축하고, 이를 기반으로 에너지 성능 변화의 기초적 경향을 비교·분석하였다. 적용기술은 총 94개소를 대상으로 분석되었으며, 고성능 창호(84%), 고효율 냉난방장치(65%), 고효율 보일러(49%) 등이 주로 적용되었다. 특히 창호의 열관류율은 중앙값 기준 $3.38 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 에서 $1.60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 약 53% 개선되는 등 외피 성능의 향상이 확인되었다.

에너지 성능 비교는 실측 데이터가 확보된 91개소를 기준으로 수행되었으며, 시뮬레이션 기반 에너지소요량 및 1차 에너지소요량은 각각 약 19.8%, 15.6% 절감되었다. 실제 에너지 사용량은 3.0% 감소하였고, Change Point Model을 활용한 부하 구분 결과, 냉난방 부하는 6.4% 감소한 반면, 기저 부하는 소폭 증가하였다. 이는 일부 냉난방 성능의 개선을 시사하지만, 실사용 환경의 다양한 요인이 복합적으로 작용한 결과로 해석할 수 있다.

다만 본 연구는 그린리모델링 적용 범위, 지역 및 건립 시기 등의 차이를 통제하지 않은 상태에서 에너지 성능을 비교하였으며, 개별 그린리모델링 항목의 성능이나 외피 개선 수준에 따른 절감 효과 분석은 제한적이다. 이러한 점에서 분석 결과는 참고 수준의 경향 분석으로 해석되어야 하며, 실사용 환경의 다양한 요인들이 복합적으로 작용한 결과임을 감안할 필요가 있다. 향후에는 건물 특성, 기술 조합, 입지 조건 등을 반영한 후속 연구가 필요하며, 본 연구의 데이터셋은 평가모델 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

후기

본 연구는 정부(국토교통부)의 재원으로 국토안전관리원의 공공건축물 그린리모델링 사업의 지원을 받아 수행된 연구과제입니다. 연구에 활용된 어린이집 대상 사업 목록 및 에너지성능보고서는 국토안전관리원의 협조를 통해 제공받았으며, 건물별 실제 에너지 사용량 및 Change Point Model(CPM) 분석 결과는 한국건설기술 연구원의 지원을 통해 제공받았습니다.

REFERENCES

1. International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2019, 2019. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>. last accessed on the 28th March 2025.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Guideline for Green Remodeling of Public Buildings, Sejong, Republic of Korea, 2022.
3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Land, Infrastructure and Transport Carbon Neutral Roadmap, Sejong, Republic of Korea, 2021.
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Green Buildings Construction Support Act, Sejong, Republic of Korea, 2024.
5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020 Guideline for the Green Remodeling Support Project for Public Buildings, Sejong, Republic of Korea, 2020.

6. Cozza, S., Chambers, J., Brambilla, A., and Patel, M. K., In search of Optimal Consumption: A Review of Causes and Solutions to the Energy Performance Gap in Residential Buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 249, 111253, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111253>.
7. Yoshino, H., Hong, T., and Nord, N., IEA EBC Annex 53: Total Energy Use in Buildings—Analysis and Evaluation Methods, *Energy and Buildings*, Vol. 152, pp. 124-136, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.038>.
8. Bae, S., Lee, K.-H., Yeo, S.-G., Kim, E., Yang, J.-K., Jeon, J.-Y., Lee, J.-H., Bae, Y.-M., Kim, S.-H., and Kang, Y.-M., Comparative Analysis of Energy Performance Using Dynamic Simulation, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 21, No. 6, pp. 62-67, 2017, <https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.6.062>.
9. Bang, J., Lim, S., Kim, M., Kim, H., and Park, J., Deriving Priorities for Element Technology through Green Remodeling Case Analysis - Focusing on Public Daycare Centers, *KIEAE Journal*, Vol. 24, No. 1, pp. 121-132, 2024, <https://doi.org/10.12813/kieae.2024.24.1.121>.
10. Chung, M. H., Kim, S. E., Song, Y. W., and Park, J. C., Strategies for Improving Impact of Energy Renovation: A Case Study on Korean Daycare Centers, *Energy and Buildings*, Vol. 284, 112844, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112844>.
11. Kang, Y., Yun, B. Y., and Kim, S., Energy and Carbon Reduction through Green Remodeling of Daycare Centers in Seoul, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 74, 104163, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104163>.
12. An, J., Jung, D., Jeong, K., Ji, C., Hong, T., Lee, J., Kapp, S., and Choi, J. Energy-Environmental-Economic Assessment of Green Retrofit Policy to Achieve 2050 Carbon-Neutrality in South Korea: Focused on Residential Buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 289, 113059, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113059>.
13. Kim, S. M., Analysis on Application of Green Remodeling Technology and Energy Saving Effect for Existing Buildings, *Journal of KIAEBS*, Vol. 11, No. 3, pp. 238-245, 2017.
14. Lee, H. S. and Choi, G. S., A Study on Energy Consumption Analysis According to Green Remodeling of Public Buildings, *Journal of the Korean Society of Living Environmental System*, Vol. 29, No. 6, pp. 694-701, 2022, <https://doi.org/10.21086/ksles.2022.12.29.6.694>.
15. De Coster, G., Van Overmeiren, P., Vandermeersch, L., Van Langenhove, H., Demeestere, K., and Walgraeve, C., Indoor and Outdoor Air Quality Assessment in Daycare Centres in Ghent (Belgium) in View of Outdoor Sleeping in an Urban Environment, *Atmospheric Environment*, Vol. 303, 119711, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119711>.
16. Choi, J., Chun, C., Sun, Y., Choi, Y., Kwon, S., Bornehag, C. G., and Sundell, J., Associations between Building Characteristics and Children's Allergic Symptoms – A Cross-Sectional Study on Child's Health and Home in Seoul, South Korea, *Building and Environment*, Vol. 75, pp. 176-181, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.019>.
17. Paulus, M. T., Claridge, D. E., and Culp, C., Algorithm for Automating the Selection of a Temperature Dependent Change Point Model, *Energy and Buildings*, Vol. 87, pp. 95-104, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.033>.