



## 국공립 어린이집 그린리모델링 사업의 리트로핏 대안별 에너지 성능 및 경제성 비교 분석 - 단일 사례의 시뮬레이션 기반 분석 중심으로 -

### *Energy Performance and Economic Analysis on Each Retrofit Alternative for the Public Daycare Center Green Remodeling Project*

- Focused on Simulation-based Analysis of a Single Case -

최령희\* · 김병선\*\*

Ryeong-Hee Choi\* · Byungseon Sean Kim\*\*

\* Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (crh0926@yonsei.ac.kr)

\*\* Corresponding author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (sean@yonsei.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** The purpose of this study was to present an optimized green remodeling retrofit plan through energy performance and economic analysis of the public daycare center for which green remodeling has been completed. **Method:** By collecting data on public building green remodeling project management in 2020 from the Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, target daycare centers that are single-use and can collect monthly building energy consumption data through a public data open system were extracted. The building outline and operating conditions were investigated, and energy performance was analyzed using Design Builder, a dynamic building energy analysis program. After calibration, an alternative model analysis for each technical element was performed, including the basic base model. Then, economic analysis was performed using the net present value method. **Result:** The results of this study were as follows. After comprehensively analyzing energy performance and economic feasibility, ALT-4(heat recovery ventilation system), ALT-9 (heat recovery ventilation system+high-efficiency air conditioning+LED lighting replacement), ALT-6(LED lighting replacement) models were determined by the final priority. ALT-4(heat recovery ventilation system) as a single element model and ALT-9(heat recovery ventilation system+high-efficiency air conditioner+LED lighting replacement) as a combined element model were the best alternative when comprehensively considering energy performance and economic feasibility in green remodeling.

#### KEYWORD

국공립 어린이집  
그린리모델링  
리트로핏 방안  
에너지 성능  
경제성

Public Daycare Center  
Green Remodeling  
Retrofit Plan  
Energy Performance  
Economic Feasibility

#### ACCEPTANCE INFO

Received Jan. 30, 2023  
Final revision received Mar. 31, 2023  
Accepted Apr. 3, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 기후위기에 대응하기 위한 탄소중립 논의가 확산되고 있다. 이에 따라 우리나라도 2050 탄소중립 시나리오[1]와 2030 국가온실가스 감축목표(NDC)를 설정하였다[2].

2021년 대한민국 정부 발표에 따르면 2030 국가온실가스 감축목표(NDC)가 상향되어 2030년까지 2018년 온실가스 총 배출량 대비 40% 감축 목표를 제시하였으며, 건물 분야에서는 2018년 총 배출량 대비 32.8% 감축을 목표로 하고 있다[2].

이에 따라 건물 분야에서는 기존건축물 에너지 성능 개선을 위하여 공공건축물 그린리모델링 사업을 추진하고 있으며, 국토교통부에서는 매년 사업 대상을 선정한 후 공사비를 지원하고 있다[3].

2020년 공공건축물 그린리모델링 사업은 어린이 및 노약자 등 취약계층이 이용하는 노후 공공건축물에 대한 에너지 성능 향상 및 생활환경 개선 사업으로서 총 821개(어린이집 411개소, 보건소 369개

소, 병원 41개소)의 건축물을 선정하고 공사비를 지원하였다[3,4].

해당 사업은 국토교통부, LH를 중심으로 지방자치단체 담당 공무원 등과 협력하여 건축물 선정, 사전조사, 설계, 시공 등의 과정이 진행되었으며, 전문가 컨설팅을 통하여 사업이 수행되고 있다고 볼 수 있다. 하지만 최종적으로는 사업 기획 시 지방자치단체 등에서 희망하는 요소기술을 주어진 예산 범위 내에서 선택하는 방식으로 설계에 반영하는 것이 대부분이며, 현실적으로 그린리모델링 공사 전 실제적인 에너지 성능 개선 효과 분석을 통한 사전 검토 등은 어려운 상황이다.

또한, 최근 그린리모델링 관련 정책사업이 활발하게 진행되는 것에 비해 실제 에너지 성능 개선 효과 및 경제성 분석과 관련된 연구가 부족하여 제한된 예산범위 내 효율적인 설계방안 설정을 위한 실질적 자료가 필요한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 그린리모델링 공사를 수행한 실제 사례 중 국공립 어린이집 건물을 대상으로 해당 사업에서 제시하고 있는 요소 기술을 중심으로 에너지 성능 및 경제성 분석을 통하여 최적화된 리트로핏 방안을 제시하고자 한다.

이를 통해 주어진 예산범위 내에서 에너지 절감률을 높여 실제 은

Table 1. Analysis process

|   |  |
|---|--|
| 1 | Extraction of completed and single-use buildings participating in the public building green remodeling project in 2020   |
| 2 | Extraction of buildings that can collect monthly building energy consumption data through an open public data system   |
| 3 | 1) Building target selection considering total floor area, number of floors, space composition, shape, etc.<br>2) Conducting surveys on building outlines and operating conditions, etc. |
| 4 | Energy performance analysis using Design Builder   |
| 5 | Economic analysis using the net present value method   |
| 6 | Proposal of optimized green remodeling retrofit plan   |

실가스 감축에 기여할 수 있을 것이며, 향후 공공건축물 뿐만 아니라 민간건축물 그린리모델링 사업에서 공사 전 최적화된 리트로핏 방안을 모색하고 설계 방향을 설정하는데 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

### 1.2. 연구의 방법 및 절차

본 연구에서는 국공립 어린이집의 최적화된 리트로핏 방안을 제시하기 위하여 다음과 같은 절차를 거쳐 사례 분석 대상 건물을 선정하고 에너지 성능 및 경제성 분석을 수행하였다.

Table 1.은 분석 절차이다.

첫째, 국토안전관리원 2020년 공공건축물 그린리모델링 사업관리 자료를 수집하여 2021년 5월 기준 공사가 완료된 어린이집(노유자시설) 건물이면서 단일용도의 건물을 추출한 13-다. 둘째, 추출된 건물 대상으로 공공데이터 개방시스템을 통하여 월별 건물 에너지 소비량 자료 수집이 가능한 건물을 추출한다. 셋째, 추출된 건물 중 연면적, 층수, 공간 구성, 형태 등을 고려하여 가장 일반적인 건물 대상을 선정 후 건물 개요 및 운영 조건 등에 대한 조사를 실시한다. 넷째, 동적 건물에너지 해석 프로그램인 Design Builder를 사용하여 에너지 성능 분석을 수행한다. 에너지 성능 분석은 사례건물의 그린리모델링 공사 완료 후 현황을 기준으로 모델링하여 실제 월별 에너지 소비량과 보정(Calibration)을 수행한다. 이후 기본 베이스 모델을 포함하여 기술요소별 대안 모델 분석을 수행한다. 다섯째, 순현재가치(Net Present Value)법을 사용하여 경제성 분석을 수행한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 그린리모델링 개념

그린리모델링 지원사업 운영 등에 관한 고시에 따르면 ‘그린리모델링’이란 에너지 성능 향상 및 효율 개선 등을 통하여 기존 건축물을 녹색건축물로 전환하는 활동을 말한다[5].

정부에서는 녹색건축 활성화를 위한 정책 사업으로 2013년부터 그린리모델링 사업을 운영해왔으며, 그간 공공건축물 사업기획/시공지원사업, 민간건축물의 이차지원사업을 운영하였다. 또한, 2020년 한국판 뉴딜 10대 대표 과제의 일환으로 새로운 공공건축물 그린리모델링 사업을 운영하고 있다[6].

Table 2. Technical elements of energy retrofit

| Division  | Element  |
|-----------|--|
| Necessary | - High-performance windows and doors   |
|           | - Heat recovery ventilation system   |
|           | - Interior and exterior insulation   |
|           | - High-efficiency air conditioner  |
|           | - High-efficiency boilers  |
|           | - High-efficiency lighting(LED)  |
|           | - Renewable energy(Photovoltaic)   |
| Optional  | - Building energy management system(BEMS) or remote meter reading electronic meter |
|           | - Cool roof(heat reflective paint)   |
|           | - Solar control system   |
|           | - Smart air shower   |
|           | - Instantaneous water heater   |

### 2.2. 2020년 공공건축물 그린리모델링 사업 개요

‘2020년 공공건축물 그린리모델링 사업’은 국토교통부에서 주관하는 사업으로 노후된 공공건축물의 에너지 성능 향상 및 생활환경 개선을 위하여 공사비를 지원하는 사업이다.

국토교통부에서는 공공건축물 중 사용승인일이 10년 이상이면서 취약계층이 주로 이용하는 어린이집, 보건소, 의료시설을 대상으로 2020년부터 매년 사업 대상을 선정하고 있으며, 에너지 성능 개선 공사비의 일부를 지원하고 있다[3].

공공건축물 그린리모델링 사업 공고문에 따르면 그린리모델링 기술요소는 Table 2.와 같이 필수공사와 선택공사로 구분된다. 필수공사는 고성능 창과 문, 열회수형 환기장치, 내·외부 단열보강, 고효율 냉난방장치, 신재생에너지(태양광) 등을 포함하며, 선택공사는 쿨루프, 일사조절장치 등을 포함한다. 사업에 신청하기 위해서는 필수공사 항목 중 최소 1개 이상을 포함하여 사업계획을 수립하여야 한다[3].

### 2.3. 선행연구 고찰

기존건축물의 에너지 성능 및 경제성 분석에 관한 연구는 다양하게 수행되고 있다.

로마 공립 학교 건물의 에너지 소비 절감을 위하여 L. de Santoli et al.은 리트로핏 요소의 우선순위 도출을 위한 에너지 성능 및 경제성 분석을 하였으며, 이를 통해 에너지 소비 뿐만 아니라 경제적, 환경적 측면을 고려한 종합적인 평가가 필요하다고 판단하였다[7].

Hikmat Ali et al.은 요르단의 단열되지 않은 공립 학교 건물에 대한 외피 개보수 설계 방안을 제안하였으며, Design Builder를 이용하여 에너지 성능 분석을 수행하였고 단순회수기간법(Simple Payback Period Analysis)을 사용하여 경제성 분석을 수행하였다. 그 결과, 제안된 방안(Walls' insulation+Roof insulation+Roof reflectance+Window replacement+Shading devices)으로 개보수 시 5.5년의 투자 회수 기간에 최대 54%의 에너지를 절약할 수 있음을 밝혔다[8].

또한, A. Galatioto et al.은 이탈리아 4개 기후 지역의 공공 역사적 건물에 대하여 실제로 시행할 수 있는 리트로핏 기술요소에 대한 에너지 성능 및 경제성을 분석하였다. 그 결과, 외피 리트로핏 요소 조합

(Thermal coat insulation+Roof Insulation+Window substitution + Shading devices)이 에너지 측면에서는 가장 좋은 대안임을 밝혔다. 그러나 순현재가치법(Net Present Value method)을 사용한 경제성 분석 시 회수 기간이 길어 비효율적이므로 이에 대한 해결책으로 PV 시스템 설치를 제안하였다[9].

선행연구 분석 결과, 주로 공사 전 건물을 대상으로 단열, 창호 등 패시브 기술요소 중심의 대안별 시뮬레이션 결과 비교를 통하여 에너지 성능 개선 효과를 예측해보는 연구가 대부분이었다. 그리고 간단한 경제성 분석을 더하여 대안별 우선순위, 최적의 리트로핏 방안 등을 제시하였다.

본 연구에서는 실제 공사가 완료된 어린이집 건물을 대상으로 실측 데이터를 통하여 보정한 후 시뮬레이션을 통한 에너지 성능 분석을 수행하였다. 또한, 패시브 기술요소 뿐만 아니라 열회수형 환기장치, 고효율 냉난방 장치 등 액티브 기술요소까지 포함한 대안별 에너지 성능 및 경제성 분석 연구를 수행하였다는 점에서 기존 연구와 차별성이 있다.

### 3. 대상 건물 및 대안 선정

#### 3.1. 대상 건물 선정

국토안전관리원의 2020년 공공건축물 그린리모델링 사업 세부 추진현황 자료에 따르면 해당 사업에 참여한 건물 중 2021년 5월 이전에 공사가 완료된 어린이집(노유자시설) 건물은 총 69개로 나타났다[4]. 그 중 복합용도가 아닌 단일용도의 건물을 조사한 결과, 45개의 건물이 추출되었다.

이 건물 중 건축데이터 민간개방 시스템을 통하여 월별 건물 에너지 소비량 자료 수집이 가능한 건물을 조사한 결과[10], 15개의 건물이 추출되었다. 추출된 건물 중 연면적, 층수, 공간 구성, 형태 등의 기준이 평균치에 해당하며 도면 확보가 가능한 건물 대상 1개를 선정하였다.

이 건물은 해당 기준으로 추출된 건물 중 가장 다양한 그린리모델링 기술요소를 적용한 건물로서 대안별 분석을 다양하게 수행할 수 있어 최적의 리트로핏 방안을 검토하는데 적합하다고 판단하였다. 이에 따라 최종적으로 대상 건물로 선정하게 되었다.

#### 3.2. 대상 건물 현황

##### 1) 건물개요

대상 건물로 선정된 건물은 OO시에 위치한 어린이집으로 건축연도는 2005년이며 2021년 5월 그린리모델링 공사가 완료된 2층 규모의 단일 용도, 노유자시설 건물이다.

Table 3.은 대상 건물의 건축개요이다.

##### 2) 운영상의 특징

대상 건물은 국공립 어린이집으로 평일 7:30~19:30 동안 운영하는 건물이다. Table 4.와 같이 운영시간 전후 수업 준비 및 정리 시간을 포함한 실제 재실 스케줄은 7:00~20:00이며, 실내 냉난방 설정 온도는 24℃, 26℃이다.

Table 3. Characteristics of the target building

|                     |                               |
|---------------------|-------------------------------|
| Location            | OO City                       |
| Building Completion | 2005                          |
| Use of building     | Daycare Center                |
| Building area       | 334m <sup>2</sup>             |
| Total floor area    | 547m <sup>2</sup>             |
| Number of stories   | 2F                            |
| Structure           | Reinforced concrete structure |

Table 4. Simulation setting conditions

|   |  |
|---|--|
| Height                                  | 3.6m   |
| Window to wall ratio                    | north: 23%<br>east: 27%<br>south: 22%<br>west: 28% |
| Heating and cooling setting temperature | heating: 24℃<br>cooling: 26℃                       |
| Density                                 | 0.186 people/m <sup>2</sup>                        |
| Schedule                                | weekdays: 7:00~20:00<br>weekends: off              |

재실인원은 영유아 84명, 교직원 18명으로 총 102명이며, 17:00 이후부터는 연장보육 시간으로 재실인원이 감소하는 특성을 가지고 있다.

Table 4.는 시뮬레이션 입력 조건을 나타낸 표이다.

#### 3) 그린리모델링 공사 내용

해당 건물은 그린리모델링 공사 시 벽체 외단열, 지붕 외단열, 창호 교체, 열회수형 환기장치, 고효율 냉난방장치, 조명(LED) 등의 기술요소를 적용하였다.

Table 5.는 그린리모델링 공사 개선 전후 상세 내용이다. 벽체 및 지붕, 창호의 개선 전 열관류율은 당시 법적기준으로 열관류율을 예측한 값이며, 그 외 개선 후 열관류율, 냉난방장치의 COP 개선 정도, 교체 조명 종류 및 조명밀도는 실제 값을 적용하였다[11].

벽체 열관류율은 기존 0.760W/m<sup>2</sup>·K에서 0.234W/m<sup>2</sup>·K로 개선되었고, 지붕 열관류율은 기존 0.520W/m<sup>2</sup>·K에서 0.173W/m<sup>2</sup>·K로 개선되었다. 또한, 창호 열관류율은 기존 3.600W/m<sup>2</sup>·K에서 1.800W/m<sup>2</sup>·K로 개선되었다.

열회수형 환기장치는 기존에 없었으나 리모델링 공사 후 새로 설치되었으며, 냉난방장치의 COP는 기존 3.0에서 3.12로 개선되었다. 또한, 조명은 기존 형광등에서 LED 조명으로 교체되었으며, 조명밀도는 13.87W/m<sup>2</sup>에서 8.67W/m<sup>2</sup>로 개선되었다.

#### 3.3. 대안 선정

대안 선정을 위하여 2020년 공공건축물 그린리모델링 사업에 참여한 411개 어린이집 건물에 실제 적용한 공사내용을 분석하였다. 그 결과, 가장 많은 기술 요소를 적용한 건물은 벽체 및 지붕 단열 강화, 창호 교체, 열회수형 환기장치, 고효율 냉난방장치, LED 조명 교체의 요소를 적용하였음을 알 수 있었다. 따라서 이와 같은 기술요소가 Table 2.의 기술요소 중 어린이집 용도 건물에 실제적으로 적용 가능한 기술요

Table 5. Details before and after improvement

| Item                                   | Unit                                      | Before                | After        |
|--|---|-----------------------|--------------|
| Wall Insulation                        | W/m <sup>2</sup> ·K<br>(U-value)          | 0.760                 | 0.234        |
| Roof Insulation                        | W/m <sup>2</sup> ·K<br>(U-value)          | 0.520                 | 0.173        |
| Window substitution                    | W/m <sup>2</sup> ·K<br>(U-value)          | 3.600                 | 1.800        |
| Heat Recovery ventilation system       | -   | N                     | Y            |
| High Efficiency EHP                    | COP                                       | 3.0                   | 3.12         |
| Lighting sources substitution with LED | W/m <sup>2</sup><br>(Light power density) | fluorescent,<br>13.87 | LED,<br>8.67 |

Table 6. List of the proposed retrofit actions

| Division | Description   |
|----------|---|
| BASE     | Base model(before)  |
| ALT-1    | Wall Insulation   |
| ALT-2    | Roof Insulation   |
| ALT-3    | High-performance window substitution  |
| ALT-4    | Heat Recovery ventilation system  |
| ALT-5    | High Efficiency EHP   |
| ALT-6    | Lighting sources substitution with LED  |
| ALT-7    | Wall Insulation+Roof Insulation   |
| ALT-8    | Wall Insulation+Roof Insulation+High-performance window substitution  |
| ALT-9    | Heat Recovery ventilation system+High Efficiency EHP+Lighting sources substitution with LED   |
| ALT-10   | Wall Insulation+Roof Insulation+High-performance window substitution+Heat Recovery ventilation system+High Efficiency EHP+Lighting sources substitution with LED (calibration model(after)) |

소로 판단되어 Table 6.의 ALT1~6 대안으로 우선 선정하였다.

그리고 대안별 분석을 위하여 ALT1~6 대안을 토대로 총 10가지의 대안을 선정하였다. 개선 전 기본 모델에서부터 단일요소 반영 모델, 외피 단일 기술요소의 조합 모델, 패시브 기술요소의 조합 모델, 액티브 기술요소의 조합 모델, 전체 기술요소의 조합 모델로 선정하였다.

이와 같이 선정한 이유는 단일 기술요소별 에너지 성능 개선 효과와 패시브/액티브 기술요소별 에너지 성능 개선 효과를 분석하기 위함이다.

대안별 상세 내용은 Table 6.과 같다.

## 4. 에너지 성능 분석

### 4.1. 시뮬레이션 모델 구축

EnergyPlus 기반의 동적 건물에너지 해석 프로그램인 Design Builder를 사용하여 대상 건물을 모델링하여 에너지 성능 분석을 수행하였다.

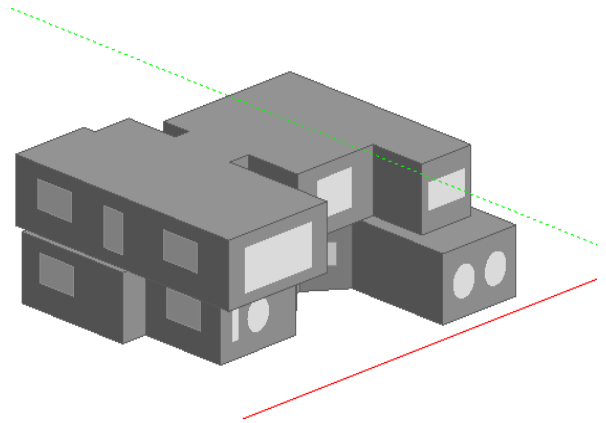


Fig. 1. Building 3D model of the daycare center

Table 7. Calibration indicators and ranges, calculated values

| Calibration indicator and range | Calculated value |
|---------------------------------|------------------|
| -5%≤NMBE≤5%                     | 3.85%            |
| CV(RMSE)≤15%                    | 12.55%           |

대상 건물의 그린리모델링 공사 완료 후 현황을 기준으로 모델링하여 실제 월별 에너지 소비량과 비교하여 보정 단계를 거쳐 검증하였다.

이후 공사 전 현황을 기준으로 베이스 건물을 모델링하고 각 기술요소별, 조합별로 대안별 모델링을 수행하였다.

Fig. 1.에 대상 건물 3D 모델을 나타내었다.

### 4.2. 시뮬레이션 모델 검증

해당 건물을 Design Builder 시뮬레이션 프로그램으로 구축한 후 계산한 월별 에너지 소비량과 개선 후 실제 월별 에너지 소비량을 비교 분석하여 보정을 수행하였다.

이는 보정을 거쳐 검증한 시뮬레이션 모델이 실제와 동일하다는 것으로 판단하고 대안별 에너지 성능 분석을 수행하기 위함이다.

보정을 위하여 2021 ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI) Chapter19를 참고하여 월별 기준 평균 편향 오차(Normalized Mean Bias Error: NMBE(%))와 평균 제곱근 오차의 변동 계수(Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error: CV(RMSE)) 지표를 사용하였다.

보정에 사용한 NMBE, CV(RMSE) 계산식은 다음과 같다[12].

$$NMBE = \frac{\sum(V_{actual} - V_{modeled})}{(N-1) \times \text{Mean}(V_{actual})} \times 100\% \quad (\text{Eq. 1})$$

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum(V_{actual} - V_{modeled})^2}{N-1}}}{\text{Mean}(V_{actual})} \times 100\% \quad (\text{Eq. 2})$$

V = monthly whole building energy consumption

V<sub>actual</sub> = parameter's measured or metered value for each time step

V<sub>modeled</sub> = parameter's simulation outputs for each time step

N = number of time steps being analyzed during period of evaluation

Table 7.은 NMBE, CV(RMSE)의 범위 및 계산 값이다.

ASHRAE 지침에 따르면 월별 에너지 소비량 기준으로  $-5\% \leq NMBE \leq 5\%$ ,  $CV(RMSE) \leq 15\%$  범위를 만족하여야 하며[15], 계산한 결과 값은 NMBE는 3.85%, CV(RMSE)는 12.55%로 해당 범위에 만족하는 것으로 나타났다.

다만, 4,5,8월은 휴가로 인한 휴원 등 특정 사유로 인한 과도한 차이가 있어 계산 값에 비정상적인 영향을 주는 것으로 판단되어 그 부분은 제외하고 산정하였다.

### 4.3. 대안별 에너지 성능 분석 결과

단일요소 반영 모델, 외피 단열 기술요소 조합 모델, 패시브 기술요소 조합 모델, 액티브 기술요소 조합 모델, 전체 기술요소 조합 모델 등 총 10가지 대안의 에너지 성능 분석 결과, Fig. 2.와 같이 연간 총 에너지 소비량이 도출되었다.

개선 전 베이스 모델의 연간 총 에너지 소비량이 가장 높았고, 개선 후 모델인 ALT-10(벽체 단열+지붕 단열+창호 교체+열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체)의 연간 총 에너지 소비량이 가장 낮은 것으로 나타났다.

ALT-2(지붕 단열), ALT-3(창호 교체), ALT-5(고효율 냉난방장치) 모델은 연간 총 에너지 소비량이 비교적 높은 편으로 나타났

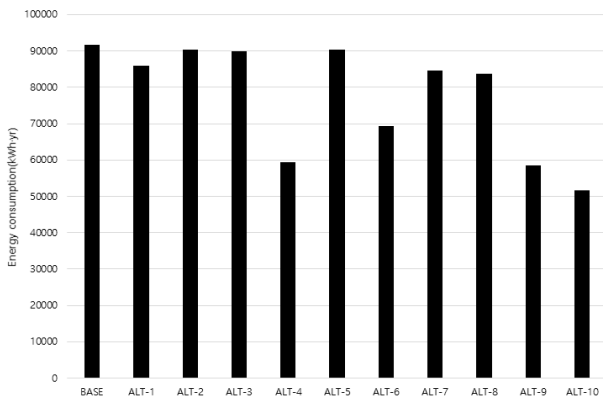


Fig. 2. Total energy consumption of the building per each case

Table 8. Total energy consumption and saving of the building per each alternative

| Division | Total energy consumption (kWh·yr) | Saving (%) | Priority |
|----------|-----------------------------------|------------|----------|
| BASE     | 91587.09                          | -          | -        |
| ALT-1    | 85912.56                          | 6.20       | 7        |
| ALT-2    | 90425.99                          | 1.27       | 10       |
| ALT-3    | 89850.61                          | 1.90       | 8        |
| ALT-4    | 59455.53                          | 35.08      | 3        |
| ALT-5    | 90336.20                          | 1.37       | 9        |
| ALT-6    | 69434.96                          | 24.19      | 4        |
| ALT-7    | 84641.77                          | 7.58       | 6        |
| ALT-8    | 83755.92                          | 8.55       | 5        |
| ALT-9    | 58615.73                          | 36.00      | 2        |
| ALT-10   | 51751.95                          | 43.49      | 1        |

으며, ALT-4(열회수형 환기장치), ALT-6(LED 조명 교체), ALT-9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델은 연간 총 에너지 소비량이 비교적 낮은 편으로 나타났다.

Table 8.은 연간 총 에너지 소비량 및 베이스 모델 대비 절감률과 우선순위를 나타낸 표이다.

총 10가지 대안 중에서 4가지 대안의 절감률이 24% 이상으로 높은 편으로 나타났으며, 나머지 6가지 대안의 절감률은 9% 미만으로 낮은 편으로 나타났다.

모든 기술요소를 적용한 ALT-10(벽체 단열+지붕 단열+창호 교체+열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델의 연간 총 에너지 소비량은 51751.95kWh·yr로 가장 낮게 나타났으며, 절감률은 43.49%으로 가장 높았다. 두 번째로는 ALT-9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델의 소비량이 58615.73kWh·yr로 낮게 나타났으며, 절감률은 36%이었다.

세 번째로는 ALT-4(열회수형 환기장치) 모델의 소비량이 59455.53kWh·yr로 낮게 나타났으며, 절감률은 35.08%이었다. 네 번째로는 ALT-6(LED 조명 교체) 모델의 소비량이 59455.53kWh·yr로 낮게 나타났으며, 절감률은 24.19%이었다.

베이스 모델 대비 절감률은 ALT-10(43.49%) > ALT-9(36.00%) > ALT-4(35.08%) > ALT-6(24.19%) > ALT-8(8.55%) > ALT-7(7.58%) > ALT-1(6.20%) > ALT-3(1.90%) > ALT-5(1.37%) > ALT-2(1.27%) 순으로 나타났다.

이를 통하여 ALT-10(벽체 단열+지붕 단열+창호 교체+열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체)과 같이 모든 기술요소를 적용한 모델에서 가장 높은 에너지 절감이 가능한 것을 알 수 있었다. 또한, 1,2,3,4순위 모델에 열회수형 환기장치 및 LED 조명 교체 기술요소가 포함된 것으로 보아 이와 같은 요소들이 에너지 절감에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

패시브 조합 모델과 액티브 조합 모델 비교 시에는 액티브 조합 모델이 에너지 절감률이 더 높은 것으로 나타났으며, 단일요소 반영 모델 중에서는 열회수형 환기장치가 가장 에너지 절감률이 높아 그린리모델링 시 에너지 절감에 유리한 요소로 판단된다.

## 5. 경제성 분석

### 5.1. 경제성 분석 지표

경제성 분석을 위하여 LCC(Life Cycle Cost) 분석을 수행하였다.

건물에서의 Life Cycle Cost는 건물의 전생애주기 비용으로서 건물의 설계, 시공, 운영, 유지관리, 폐기와 관련된 모든 비용을 말한다[13].

다시 말해 초기투자비와 유지관리비, 에너지비용, 철거 비용을 모두 포함하는데, 본 연구에서는 유지관리비 등은 동일하다고 가정하고 초기투자비 및 에너지비용을 중심으로 LCC를 분석하였다[14].

LCC를 분석하기 위하여 순현재가치법(Net Present Value method)을 사용하였으며, 미래에 발생하는 비용을 현재가치로 환산하여 환산한 비용의 누적 합계로 최종 비용을 산정하였다.

순현재가치법에 따른 비용 환산을 다음과 같이 계산하였다[15].

$$PV = FV \left[ \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

PV = present value

FV = future value of expenses

n = number of years between time of analysis and time of expense

i = discount rate

LCC의 분석기간은 LCC가 분석되는 시간의 범위로 나타내며, 시설 등 분석 대상의 전체 수명 주기가 아닌 경제적 수명으로 제한하는 것이 대부분이다.

특히 건물 분야에서는 40년 이후의 미래비용의 현재가치는 큰 의미가 없는 것으로 판단되므로 일반적으로 25~40년 기간을 제시하고 있다[16].

본 연구에서는 분석기간을 최대 기간인 40년으로 설정하고 분석하였다.

### 5.2. 초기투자비 산정

초기투자비는 각 대안별 에너지 성능 개선 공사 시 소요되는 총 비용으로서 해당 건물에서 실제로 그린리모델링 사업을 수행하면서 소요된 비용을 조사하여 산정하였다. 이 비용에는 설계비, 공사비,

Table 9. Initial investment cost per each alternative

| Division | Initial investment cost (Won) |
|----------|-------------------------------|
| BASE     | 0                             |
| ALT-1    | 107,140,538                   |
| ALT-2    | 42,097,246                    |
| ALT-3    | 35,885,652                    |
| ALT-4    | 10,116,738                    |
| ALT-5    | 15,827,280                    |
| ALT-6    | 20,659,277                    |
| ALT-7    | 149,237,784                   |
| ALT-8    | 185,123,436                   |
| ALT-9    | 46,603,295                    |
| ALT-10   | 231,726,731                   |

Table 10. Seasonal electric charge

| Division                 | ① Base charge (Won/kWh) | ② Electric Charge (Won/kWh) |  |                     |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|--|---------------------|
|                          |                         | Summer (Jun.~ Aug.)         | Spring, Autumn (Mar.~may., Sep.~ Oct.) | Winter (Nov.~ Feb.) |
| General use, Low tension | 6,160                   | 113.0                       | 72.5                                   | 99.6                |

③ Climate environment fee: 7.3Won/kWh

④ Fuel cost adjustment fee: 5Won/kWh

⑤ 30% discount on social welfare facilities

⑥ VAT: 10%

⑦ Power Industry Infrastructure Fund: 3.7%

감리비 등이 모두 포함된다.

Table 9.는 대안별 초기투자비를 나타난 표이다.

다양한 기술요소를 개선한 ALT-10(벽체 단열+지붕 단열+창호 교체+열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델의 초기투자비가 가장 높았고, 그 다음으로는 ALT-8(벽체 단열+지붕 단열+창호 교체), ALT-7(벽체 단열+지붕 단열), ALT-1(벽체 단열) 순으로 높았다.

가장 초기투자비가 낮은 대안은 ALT-4(열회수형 환기장치) 모델이었으며, 그 다음으로는 ALT-5(고효율 냉난방장치) 모델, ALT-6(LED 조명 교체) 모델 순으로 낮았다.

### 5.3. 연간 에너지 비용 산정

대상 건물의 연간 에너지 비용을 산정하기 위하여 한국전력공사 홈페이지를 통하여 전기요금 구성 체계를 조사하였다.

대상 건물은 일반용(갑) 저압 건물로, Table 10.과 같이 전기 요금 체계가 구성되어 있으며 계절별로 요금이 다르게 부과된다.

전기요금은 ①Base charge(기본요금) + ②Electric Charge(계절별 전력량요금) + ③Climate environment fee(기후환경요금) + ④Fuel cost adjustment fee(연료비조정요금)의 합계 금액이며, 해당 건물은 사회복지시설에 해당하여 이 합계 금액의 30% 할인된 금액이 부과된다. 최종 청구 금액은 30% 할인된 금액에서 부가가치세 10%, 전력 산업 기반 기금 3.7%를 더한 금액으로 계산한다 [17].

연간 에너지 비용은 월별 에너지 소비량에 따른 계절별 전력량 요금을 반영한 금액에 기타요금을 더해 계산한 월별 에너지 비용의 연간 합계로 산정하였다.

Table 11.은 연간 에너지 비용 및 절감액을 정리한 표이다.

연간 에너지 비용 절감액은 ALT10(벽체 단열+지붕 단열+창호 교체+열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델, ALT9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델, ALT4(열회수형 환기장치) 모델 순으로 높았으며, ALT2(지붕 단열) 모델, ALT5(고효율 냉난방장치) 모델 순으로 낮았다.

Table 11. Annual electric use cost and saving cost

| Division | Annual energy consumption (kWh-yr) | Annual electric use cost (Won) | Energy saving cost (Won) |
|----------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| BASE     | 91587.09                           | 9,074,651                      | -                        |
| ALT-1    | 85912.56                           | 8,601,757                      | 472,894                  |
| ALT-2    | 90425.99                           | 8,976,297                      | 98,355                   |
| ALT-3    | 89850.61                           | 8,929,286                      | 145,365                  |
| ALT-4    | 59455.53                           | 6,366,109                      | 2,708,542                |
| ALT-5    | 90336.20                           | 8,965,374                      | 109,277                  |
| ALT-6    | 69434.96                           | 7,219,826                      | 1,854,825                |
| ALT-7    | 84641.77                           | 8,492,970                      | 581,681                  |
| ALT-8    | 83755.92                           | 8,419,104                      | 655,547                  |
| ALT-9    | 58615.73                           | 6,292,861                      | 2,781,790                |
| ALT-10   | 51751.95                           | 5,719,880                      | 3,354,771                |

5.4. 할인율 산정

앞서 언급한 순현재가치법 계산식을 통하여 미래에 발생하는 비용을 현재가치로 환산하기 위해서 실질할인율 산정이 필요하다. 실질할인율은 다음과 같이 계산하였다[18].

$$i = \frac{1+in}{1+f} - 1 \tag{Eq. 4}$$

i = real discount rate  
in = nominal interest rate  
f = inflation rate

Table 12. Calculation of the real discount rate

| Year        | Treasury bond (3years) interest rate (%) | Increase rate of electric charge (%) | Real discount rate (%) |
|-------------|--|--------------------------------------|------------------------|
| '13         | 2.79                                     | 3.5                                  | -0.69                  |
| '14         | 2.59                                     | 0                                    | 2.59                   |
| '15         | 1.79                                     | 0                                    | 1.79                   |
| '16         | 1.44                                     | 0                                    | 1.44                   |
| '17         | 1.80                                     | 0                                    | 1.80                   |
| '18         | 2.10                                     | 0                                    | 2.10                   |
| '19         | 1.53                                     | 0                                    | 1.53                   |
| '20         | 0.99                                     | 0                                    | 0.99                   |
| '21         | 1.39                                     | 0                                    | 1.39                   |
| '22.5       | 3.02                                     | 4.9                                  | -1.79                  |
| Average (%) | 1.94                                     | 0.84                                 | 1.12                   |

실질할인율은 이자율과 전기요금 상승률을 고려하여 계산되므로 이자율[19]과 전기요금 상승률[20]을 조사하여 이를 토대로 Table 12.와 같이 최근 10년간 이자율과 전기요금 상승률을 반영한 실질할인율을 계산하였다.

최종적으로 최근 10년간의 평균치인 1.12%를 실질할인율로 적용하였다.

실질할인율 산정 및 미래에 발생하는 비용을 계산하기 위한 전기요금 상승률은 Table 13.에서 정리한 것과 같이 일반용 전력 요금의 최근 10년간 상승률을 계산한 평균치인 2.86%를 적용하였다.

Table 13. The increase rate of the electric charge

| Usage            | '13.1 | '13.11 | '17   | '19  | '22.4 | Average (%) |
|------------------|-------|--------|-------|------|-------|-------------|
| Residential use  | 2     | 2.7    | -11.6 | -3.7 | 1.5   | -1.82       |
| General use      | 4.6   | 5.8    | 0     | 0    | 3.9   | 2.86        |
| Educational use  | 3.5   | 0      | 0     | 0    | 4.9   | 1.68        |
| Industrial use   | 4.4   | 6.4    | 0     | 0    | 4.8   | 3.12        |
| Agricultural use | 3     | 3      | 0     | 0    | 10.4  | 3.28        |
| Street light     | 5     | 5.4    | 0     | 0    | 4.5   | 2.98        |

5.5. 경제성 분석 결과

앞서 계산한 초기투자비와 연간 에너지 비용과 함께 LCC(40년 동안의 연간 에너지 비용을 현재가치로 환산한 금액의 누적 합계 금액)를 계산하고 이를 토대로 회수기간을 산정하였다.

Table 14.는 기존안의 연간 에너지 비용 및 LCC, 대안별 초기투자비, 연간 에너지 비용, LCC, 회수기간을 계산한 결과이다.

기존안 대비 연간 에너지 비용은 모든 대안에서 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 LCC는 ALT-4(열회수형 환기장치), ALT-6(LED 조명 교체), ALT-9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델에서만 감소하는 것으로 나타났으며, 나머지 대안들은 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

ALT-4(열회수형 환기장치) 모델의 LCC 절감 비용이 143,235,968 원으로 가장 많이 절감되는 것으로 나타났으며, 두 번째로는 ALT-9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델이 110,915,547원 절감되는 것으로 나타났다. 마지막으로 ALT-6(LED

Table 14. Result of LCC analysis

| Division | Initial investment cost (Won) | Annual electric use cost (Won) | Energy saving cost (Won) | LCC (Won)   | LCC saving cost (Won) | Payback period (year) | Priority |
|----------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| BASE     | 0                             | 9,074,651                      | -                        | 516,135,962 | -                     | -                     | -        |
| ALT-1    | 107,140,538                   | 8,601,757                      | 472,894                  | 596,379,862 | -80,243,900           | -                     | -        |
| ALT-2    | 42,097,246                    | 8,976,297                      | 98,355                   | 552,639,129 | -36,503,167           | -                     | -        |
| ALT-3    | 35,885,652                    | 8,929,286                      | 145,365                  | 543,753,717 | -27,617,755           | -                     | -        |
| ALT-4    | 10,116,738                    | 6,366,109                      | 2,708,542                | 372,199,860 | 143,936,102           | 3                     | 1        |
| ALT-5    | 15,827,280                    | 8,965,374                      | 109,277                  | 525,747,903 | -9,611,941            | -                     | -        |
| ALT-6    | 20,659,277                    | 7,219,826                      | 1,854,825                | 431,298,979 | 84,836,983            | 10                    | 2        |
| ALT-7    | 149,237,784                   | 8,492,970                      | 581,681                  | 632,289,658 | -116,153,696          | -                     | -        |
| ALT-8    | 185,123,436                   | 8,419,104                      | 655,547                  | 663,974,069 | -147,838,107          | -                     | -        |
| ALT-9    | 46,603,295                    | 6,292,861                      | 2,781,790                | 404,520,281 | 111,615,681           | 14                    | 3        |
| ALT-10   | 231,726,731                   | 5,719,880                      | 3,354,771                | 557,054,497 | -40,918,535           | -                     | -        |

조명 교체) 모델에서 84,136,849원 절감되는 것으로 나타났다.

경제성 분석을 통한 회수기간은 ALT-4(열회수형 환기장치) 모델에서 3년, ALT-6(LED 조명 교체) 모델에서 10년, ALT-9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델에서 14년으로 도출되었다. 따라서 우선순위가 ALT-4(열회수형 환기장치), ALT-6(LED 조명 교체), ALT-9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델 순으로 볼 수 있다.

에너지 성능 분석 측면에서는 ALT-10(벽체 단열+지붕 단열+창호 교체+열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델의 우선순위가 가장 높았으나, 경제성 분석 측면에서는 ALT-4(열회수형 환기장치) 모델의 우선순위가 가장 높아 에너지 성능 분석 결과와 경제성 분석 결과에 차이가 있는 것으로 나타났다.

에너지 성능 분석과 경제성 분석을 모두 고려한 최종적인 우선순위는 ALT-4(열회수형 환기장치) 모델, ALT-9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델, ALT-6(LED 조명 교체) 모델 순으로 볼 수 있다.

이러한 모델들은 그린리모델링 시 에너지 성능 및 경제성을 모두 고려했을 때 유리한 대안으로 판단된다.

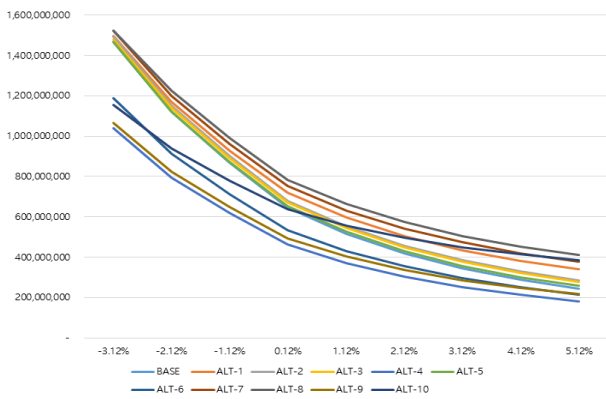


Fig. 3. Result of sensitivity analysis(LCC)

Table 15. Result of sensitivity analysis(Payback period)

| Division | -3.12% | -2.12% | -1.12% | 0.12% | 1.12% | 2.12% | 3.12% | 4.12% | 5.12% |
|----------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| BASE     | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| ALT-1    | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| ALT-2    | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| ALT-3    | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| ALT-4    | 3      | 3      | 3      | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| ALT-5    | 38     | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| ALT-6    | 8      | 9      | 9      | 9     | 10    | 10    | 11    | 11    | 12    |
| ALT-7    | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| ALT-8    | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| ALT-9    | 11     | 12     | 13     | 13    | 14    | 15    | 17    | 18    | 20    |
| ALT-10   | 27     | 30     | 33     | 39    | -     | -     | -     | -     | -     |

### 5.6. 민감도 분석

순현재가치(Net Present Value)법을 사용한 경제성 분석은 현재의 값을 기준으로 실질할인율 등을 계산하여 미래의 값을 예측하는 것이 기본 전제이므로 불확실성을 가질 수 밖에 없다. 따라서 민감도 분석을 통하여 실질할인율의 변화에 따른 LCC 및 회수기간을 계산하고 변화 정도를 분석하였다.

실질할인율은 처음 추정치인 1.2%를 기준으로 -3.12~5.12%의 범위 내에 속할 것으로 가정하였으며, 그에 따른 대안별 LCC를 계산한 민감도 분석의 결과는 Fig. 3.과 같다.

모든 대안에서의 실질할인율은 -3.12~5.12%의 범위에서 양의 방향으로 증가할수록 LCC가 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 실질할인율이 감소할수록 LCC의 변화 정도가 더 크고, 실질할인율이 증가할수록 LCC의 변화 정도가 작은 것을 알 수 있었다.

Table 15.는 실질할인율 -3.12~5.12%의 범위 내에서 대안별 회수기간을 계산한 민감도 분석의 결과이다.

회수기간이 40년 이상인 대안을 제외한 나머지 대안들은 대부분 실질할인율이 증가할수록 회수기간이 늘어나는 것으로 나타났다. 특히 ALT-4는 회수기간에 변동이 거의 없는 것으로 나타났는데, 실질할인율에 따른 LCC 값의 변화가 작기 때문인 것으로 추정된다.

실질할인율은 이자율이 높을수록 증가되므로 최근 기준 금리 상승 추세에 따라 감소보다는 증가할 가능성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 예측한 LCC의 변화 정도가 작을 것이며, 회수기간은 같거나 늘어날 것으로 추정할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 공공건축물 그린리모델링 사업에 참여하여 실제 공사가 완료된 국공립 어린이집을 대상으로 패시브 기술요소 및 액티브 기술요소를 모두 포함한 총 10가지 대안별 에너지 성능 분석



및 경제성 분석을 통하여 최적의 리트로핏 방안을 도출하였다.

첫째, 에너지 성능 분석을 통하여 실제 공사에 적용된 ALT-10 (벽체 단열+지붕 단열+창호 교체+열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델의 에너지 절감률이 가장 높은 것을 알 수 있었다. 또한, 1~4순위 모델에 열회수형 환기장치 및 LED 조명 교체 기술요소가 모두 포함되는 것으로 나타나 이와 같은 요소들이 그린리모델링 시 에너지 절감에 유리한 요소로 판단된다.

둘째, LCC 계산을 통하여 경제성을 분석한 결과, ALT-4(열회수형 환기장치), ALT-6(LED 조명 교체), ALT-9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체) 모델 순으로 회수기간이 짧은 것을 알 수 있었다. 이 3가지 대안 모델은 나머지 대안들에 비해 경제성이 높은 것으로 판단되며, 특히 열회수형 환기장치는 가장 경제성이 높은 것으로 판단된다.

셋째, 에너지 성능 및 경제성을 종합적으로 분석한 결과, 최종적인 우선순위는 ALT-4(열회수형 환기장치), ALT-9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체), ALT-6(LED 조명 교체) 모델 순으로 나타났다. 에너지 성능 및 경제성을 모두 고려했을 때의 분석 결과는 에너지 성능 분석과 경제성 분석을 각각 수행했을 때의 결과와 비교했을 때 우선순위의 변동이 있는 것으로 나타났다.

단일 요소 모델로는 ALT-4(열회수형 환기장치), 조합 요소 모델로는 ALT-9(열회수형 환기장치+고효율 냉난방장치+LED 조명 교체)가 그린리모델링 시 에너지 성능 및 경제성을 종합적으로 고려하였을 때 가장 유리한 대안으로 판단된다.

패시브 기술요소인 벽체 단열, 지붕 단열 공사는 에너지 성능 개선 정도에 비해 투자비가 높아 회수기간이 긴 것으로 판단되어 우선 순위에서 제외되었다. 하지만 어린이집에 재실하는 영유아의 경우 열 환경에 취약하므로 재실자의 건강 및 쾌적성 향상 등을 위해서 건물의 열적 성능 수준에 따라 단열 부분도 추가적으로 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 하나의 국공립 어린이집 건물로 단일 사례만을 분석한 점, 경제성 분석 시 유지관리비 및 철거비용 등이 동일하다는 가정 하에 LCC를 계산하였다는 한계점이 있다. 추후 여러 건물의 사례 분석과 LCC 상세 분석을 통하여 일반적으로 범용 가능한 최적의 리트로핏 방안을 모색하고 국공립 어린이집의 그린리모델링 설계방향을 제시할 수 있도록 보다 심도 깊은 연구가 필요하다.

## References

[1] 대한민국정부, 대한민국 2050 탄소중립 전략, 2020. // (The Government of the Republic of Korea, 2050 Carbon Neutral Strategy, 2020.)  
 [2] 대한민국정부, 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC), 2021. // (The Government of the Republic of Korea, 2030 National Greenhouse Gas Reduction Goal, 2021.)  
 [3] 국토안전관리원, 2021년 공공건축물 그린리모델링 지원사업 공고문, 2021. // (Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, 2021 Public Building Green Remodeling Support Project Notice.)  
 [4] 국토안전관리원, 2020년 공공건축물 그린리모델링 사업 세부 추진현황, 2021. // (Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Details of the 2020 Green Remodeling Project for Public Buildings.)  
 [5] 국토교통부, 그린리모델링 지원사업 운영 등에 관한 고시, 국토교통부 고시 제2020-510호. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Announcement on green remodeling support project operation, etc., 2020.)

[6] 대한민국정부, 한국판 뉴딜 종합계획, 2020. // (The Government of the Republic of Korea, Korean New Deal Comprehensive Plan, 2020.)  
 [7] L. de Santoli et al., Energy performance assessment and a retrofit strategies in public school buildings in Rome, Energy and Buildings, 68, 2014, pp.196-202.  
 [8] H. Ali, R. Hashlamun, Envelope retrofitting strategies for public school buildings in Jordan, Journal of Building Engineering, 25, 2019, pp.100819.  
 [9] A. Galatioto et al., Energy and economic analysis on retrofit actions for Italian public historic buildings, Energy, 176, 2019, pp.58-66.  
 [10] 건축데이터 민간개방 시스템, 유형별 건축데이터, <https://open.eais.go.kr/main/main.do>, 2022.08.05. // (Building Data Private Open System, Construction data by type, <https://open.eais.go.kr/main/main.do>, 2022.08.05.)  
 [11] 국토안전관리원, 취약계층 이용 공공건축물 그린리모델링 에너지 성능 보고서 및 통합 보고서(지역거점 플랫폼), 2021. // (Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Green Remodeling Energy Performance Report and Integrated Report for Public Buildings Used by the Vulnerable Class(regional base platform), 2021.)  
 [12] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers(ASHRAE), ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI), United States: ASHRAE, 2021, Chapter19.  
 [13] R. Flanagan, C. Jewell, G. Norman, Whole Life Appraisal for Construction, UK: Blackwell Publishing Ltd., 2005.  
 [14] 김재문, 이정혁, 이두환, 공공건축물의 그린리모델링 수준별 LCC (Life Cycle Cost) 분석을 통한 경제성 비교, 한국: 한국건설관리학회 논문집, 19(2), 2018.03, pp.38-49. // (J.M. Kim, J.H. Lee, D.H. Lee, The Economic Comparison through LCC Analysis on each Graded Alternatives for Green Remodeling of Public Building, Korea:Korean Journal of Construction Engineering and Management, 19(2), 2018.03, pp.38-49.)  
 [15] S. Rahman, D.J. Vanier, Life cycle cost analysis as a decision support tool for managing municipal infrastructure, Canada: National Research Council (NRC), CIB 2004 triennial congress. Vol. 2. No. 1, 2004.  
 [16] S.J. Kirk, A.J. Dell'isola, Life Cycle Costing for Design Professionals, Second Edition, United States: McGraw-Hill, Inc., 1995.  
 [17] 한국전력공사, 전기요금 개정 추이, <https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/H/C/CYHCHP00105.jsp>, 2022.12.20. // (Korea Electric Power Corporation, Electricity rate revision trend, <https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/H/C/CYHCHP00105.jsp>, 2022.12.20.)  
 [18] C.J. Lee, E.B. Lee, Prediction method of real discount rate to improve accuracy of life-cycle cost analysis, Energy and Buildings, 2017, 135, pp.225-232.  
 [19] e-나라지표, 시장금리 추이, [https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1073](https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1073), 2022.12.20. // (e-country indicator, Market interest rates, [https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1073](https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1073), 2022.12.20.)  
 [20] 한국전력공사, 요금계산-비교, <https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/J/A/CYJAPP000NFL.jsp>, 2022.12.20. // (Korea Electric Power Corporation, Rate calculation/comparison, <https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/J/A/CYJAPP000NFL.jsp>, 2022.12.20.)