



## 기존 건축물의 지속 가능성 확보를 위한 리트로핏 전략 비교 평가

### Comparative Evaluation of Retrofit Strategies for Enhancing the Sustainability Existing Building

박해둔\* · 정현우\*\* · 변지영\*\*\* · 신세윤\*\*\*\* · 장성진\*\*\*\*\*

Haedeun Park\* · Hyeonwoo Jeong\*\* · Jiyeong Byeon\*\*\* · Seyoun Shin\*\*\*\* · Seong Jin Chang\*\*\*\*\*

\* Graduate Student, Dept. of Interior Materials Engineering, Gyeongsang National Univ., South Korea (haedeun00@gnu.ac.kr)

\*\* Coauthor, Graduate Student, Dept. of Interior Materials Engineering, Gyeongsang National Univ., South Korea (hyeonwoo@gnu.ac.kr)

\*\*\* Coauthor, Undergraduate Student, Graduate Student, Dept. of Interior Materials Engineering, Gyeongsang National Univ., South Korea (byeonjiyeong@gnu.ac.kr)

\*\*\*\* Coauthor, Undergraduate Student, Graduate Student, Dept. of Interior Materials Engineering, Gyeongsang National Univ., South Korea (seyoun@gnu.ac.kr)

\*\*\*\*\* Corresponding author, Associate Professor, Dept. of Interior Materials Engineering, Gyeongsang National Univ., South Korea (sjc@gnu.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** This study aims to analyze retrofit strategies for enhancing the sustainable use of nationally registered cultural heritage buildings. It focuses on improving energy performance and managing moisture risks to ensure the longevity and usability of these historic structures. **Method:** On-site measurements and building performance simulations were conducted for the G Medical Museum. Parameters such as thermal transmittance, solar heat gain coefficient (SHGC), and air leakage rates were assessed. Additionally, hygrothermal simulations using WUFI were carried out to evaluate the risk of moisture accumulation and mold formation. Various retrofit scenarios, including airtightness enhancement, wall insulation, and window upgrades, were analyzed for their energy efficiency and moisture control effectiveness. **Result:** The initial evaluation revealed substandard performance: thermal transmittance values of 1.94W/m<sup>2</sup>K and 4.30W/m<sup>2</sup>K, SHGC of 0.70, and severe air leakage of 63 ACH. WUFI simulations indicated a high risk of condensation and mold. Among the proposed retrofit strategies, the D scenario—combining airtightness improvement, insulation, and window upgrades—achieved the best results, reducing energy consumption by 45.4%. However, increased cooling demand highlighted the need for additional shading and ventilation strategies. These findings underscore the necessity of an integrated approach combining energy efficiency and moisture management in retrofitting cultural heritage buildings.

#### KEYWORD

국가등록문화재  
건물에너지 성능  
수분  
리트로핏

National Registered Cultural Heritage  
Building Energy Performance  
Moisture  
Retrofit

#### ACCEPTANCE INFO

Received Jul. 30, 2025

Final revision received Aug. 27, 2025

Accepted Sep. 2, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

기후변화 대응과 지속 가능한 도시 개발이 글로벌 주요 이슈로 부각되면서, 건물 부문에서의 온실가스 감축이 필수적인 과제가 되고 있다. 특히, 전 세계적으로 2050 탄소중립 목표가 추진되면서, 각국은 산업, 교통, 에너지, 건물 부문에서 다양한 온실가스 저감 전략을 시행하고 있다[1,2]. 건물 부문은 전 세계 에너지 소비의 약 36%를 차지하며, 온실가스 배출의 주요 원인 중 하나로 지목된다. 이에 따라, 건물 에너지 효율 개선 및 탄소 배출 저감이 필수적인 과제로 떠오르고 있으며, 신축 건물의 친환경 설계뿐만 아니라 기존 건물, 특히 역사적 건물의 지속적 활용과 에너지 성능 개선이 2050 탄소중립 목표 달성에 중요한 요소로 작용할 수 있다.

기존 건물은 전체 건축 부문에서 차지하는 에너지 소비 비율이 높으며, 이에 따른 탄소 배출 또한 상당한 수준에 이른다[3]. 이러한 문제를 해결하기 위해 신축 건물의 친환경 설계가 강조되고 있지만, 역사적 건물의 보존과 지속적 활용 또한 온실가스 감축을 위한 효과적인 전략 중 하나로 주목받고 있다. 특히, 기존 건축물은 노후화로 인

해 단열 성능 저하, 기밀성 부족 등의 문제가 발생하며, 이에 따라 실내 온도 차이로 인한 결로 및 습기 축적이 쉽게 발생할 수 있다. 이러한 습기 문제는 건축물의 내구성을 저하시킬 뿐만 아니라 곰팡이 성장 등의 실내 환경 악화를 초래할 수 있어 이에 대한 개선이 필요하다[4]. 역사적 건물은 단순한 구조물이 아닌, 문화적·사회적 유산으로서 지역 정체성과 역사적 가치를 보존하는 역할을 하며, 관광산업과 지역 경제 활성화에도 기여할 수 있다[5]. 또한, 기존 건물을 철거하고 신축하는 과정에서 발생하는 탄소 배출을 줄이는 데 기여할 수 있으며, 이를 통해 온실가스 감축 효과를 극대화할 수 있다.

Fig. 1.은 국가등록문화재의 현황과 현재 활용 상태를 나타낸 것이다. Fig. 1. a)는 2019년부터 2023년까지 국가등록문화재의 수가 지속적으로 증가하고 있음을 보여주며, 국가등록문화재의 수는 꾸준히 증가하고 있음에도 불구하고, 상당수의 건물은 에너지 효율이 낮고, 기밀성이 부족하며, 냉난방 시스템이 비효율적으로 운영되는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 적절한 개보수 전략을 도입하여 건물의 지속적인 활용을 도모해야 한다[6].

Fig. 1. b)는 현재 문화재가 전시, 주거, 종교시설, 교육시설, 상업시설 등 다양한 용도로 활용되고 있음을 나타낸다. 그러나 일부 문화재는 활용되지 않고 방치되고 있으며, 이러한 미활용 건물의 에너지 성능 개선을 통해 지속 가능한 활용 방안을 마련이 필요하다[7]. 특

히, 역사적 건물은 전시 및 교육시설, 종교시설 등 다양한 용도로 활용되고 있지만, 여전히 일정 비율의 건물이 미활용 상태로 남아 있다. 따라서 이러한 건물의 적극적인 활용과 에너지 성능 개선이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 역사적 건물의 지속적 활용을 위한 리트로핏(Retrofit) 기술 적용 및 운영 방안을 분석하고, 이를 통해 온실가스 감축 효과를 극대화할 수 있는 최적의 전략을 도출하고자 한다. 본 연구는 단순한 건물 보존을 넘어, 에너지 성능 개선을 통해 건물을 효율적이며 지속적으로 활용할 수 있는 방안을 제시하는 데 중점을 둔다. 이를 통해, 역사적 건물의 문화적 가치를 유지하면서도, 환경적 지속 가능성을 확보할 수 있는 방향을 모색하는 것이 본 연구의 주요 목적이다.

1.2. 연구 방법

본 연구는 건축물의 단열 및 수분 성능 개선을 위한 리트로핏 적용 기술을 분석하고, 이에 따른 에너지 절약 효과를 평가하는 것을 주요 목표로 한다. 기존 건축물은 준공된 지 오랜 시간이 경과하면서 단열 성능이 저하되고, 구조적 특성상 수분 관련 문제가 발생할 가능성이 크다[8]. 이에 따라 본 연구에서는 기존 건축물의 열적·수분적 성능을 정량적으로 분석하고, 개선된 벽체 시스템을 적용함으로써 건축물의 환경 성능이 어떻게 변화하는지를 검토하고자 한다.

연구 대상 건물은 Table 1.과 같이 국가등록문화재로 지정된 G 의료박물관을 선정하였다. 이 건물은 경상남도 거창군에 위치하고 있으며, 1954년에 준공되었다. 본관동, 병동, 주택동의 세 개 영역으로 구성된 이 건물은 초기에는 의료시설로 활용되었으며, 이후 2013년부터 전시시설로 용도가 변경되었다. 문화재로서의 역사적 가치를 보존해야 하는 동시에, 기존의 노후된 단열성능과 수분 문제를 해결할 필요가 있다.

건물의 전체 연면적은 약 443m<sup>2</sup>이며, 주요 구조는 외피 부분이 조적조로 구성되어 있다. 지붕은 시멘트 기와, 주요 골조는 목구조로 이루어져 있다. 또한, 창호 시스템은 6mm 투명 유리와 5mm 불투명 유리가 사용된 목재 프레임 창으로 구성되어 있다.

본 연구는 기존 외벽과 유리의 성능 및 기밀 성능, 수분 거동을 분석한 후, 건물 성능 개선을 위한 리트로핏을 적용하여 건축물의 열·수분적 성능 변화를 평가하였다. 이를 통해 개선된 외벽 시스템이 기존 외벽 대비 에너지 절약 및 실내 환경 개선에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 역사적 가치를 유지하면서도 건축물의 기능적 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

2. 건물 진단 평가

2.1. 현장 측정을 통한 건물에너지 성능 진단

G 의료 박물관은 1954년 준공 건물로 단열 및 기밀성능이 낮음을 확인하기 위해 현장 측정을 진행하였다. 측정 항목의 경우 Fig. 2.와 같이 외벽과 창호의 열관류율, 창호의 SHGC (Solar Heat Gain Coefficient, 태양열획득계수), 기밀성능을 대상으로 측정했다.

Fig. 2. a)는 외벽과 창호의 단열성능을 평가하기 위해 ISO 9869

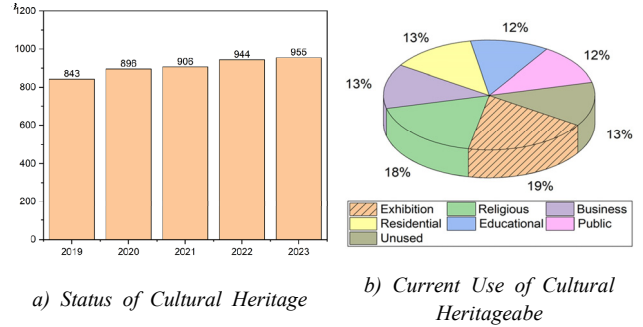
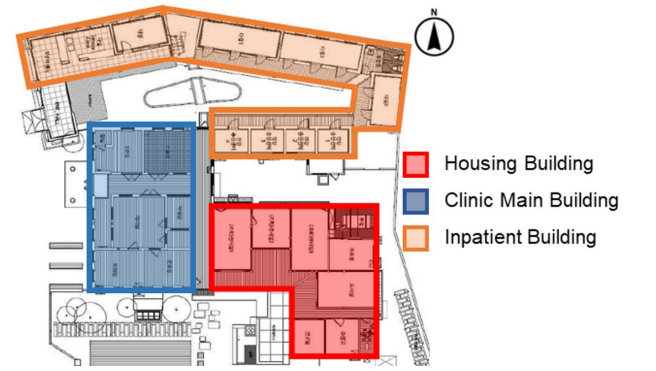


Fig. 1. Status of nationally registered cultural properties

Table 1. Characteristics of studied building

Classification	Contents
Location	Geochang
Usage	Exhibition facilities
Completion year	1954
Cultural Heritage	572
Total floor area	Housing building + clinic main building 328 m <sup>2</sup> + inpatient building 115 m <sup>2</sup>
Construction	Masonry (envelope), cement tile structure (roof), wooden structure (frame)
Window system	6-mm clear glazing + wooden frame 5-mm frosted glazing + wooden frame



기준에 따라 진행된 열관류율 측정을 보여준다. 이를 위해 Testo 635 측정 장비를 활용하여 10분 간격으로 72시간 연속 데이터를 수집하였다. 측정된 결과는 건축물 에너지 절약 설계 기준에 따라 분석되었으며, 중부2지역의 기준값인 외벽 0.24W/m<sup>2</sup>K, 창 1.5W/m<sup>2</sup>K 과 비교하여 평가하였다. Fig. 2. b)는 창호를 통한 일사 획득 정도를 분석하기 위해 실시한 측정을 나타낸다. 유리 에너지 프로파일러 WP4500을 활용하여 대상 공간에 적용된 투명 및 불투명 유리를 측정하였으며, 평균값을 도출하여 창호 성능을 평가하였다. 평가 기준으로는 한국패시브건축협회의 기준값인 0.4를 적용하여 비교 분석을 수행하였다. Fig. 2. c)는 실내·외 기압 차에 따른 공기 유입량을 측정하기 위해 실시한 Blower Door Test를 보여준다. 해당 측정은

ISO 9972 기준에 따라 진행되었으며, 기밀 성능의 평가는 한국건축친환경설비학회의 모든 건물에 대한 기준값인 5/h로 비교 분석하였다.

## 2.2. 시뮬레이션을 통한 건물에너지 및 습기 문제 평가

건물의 에너지 효율성과 습기 문제를 종합적으로 평가하기 위해 현장 측정을 통해 도출된 결과를 활용하여 건물 에너지 사용량과 건물의 습기 문제를 진단하였다.

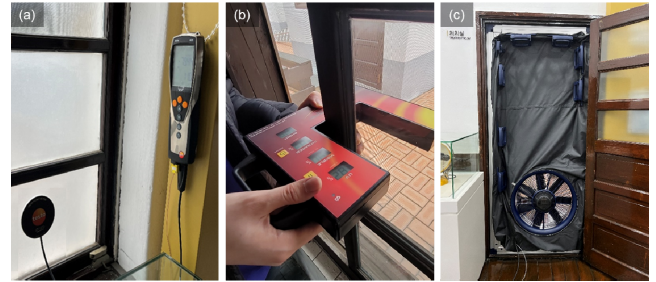
건물 에너지 사용량 분석에는 시뮬레이션 프로그램인 DesignBuilder를 활용하였으며, DOE (미국에너지부)의 EnergyPlus를 기반으로 한 통합 건물에너지 해석 시뮬레이션 프로그램으로, LEED와 ASHRAE 90.1 데이터 값(위치, 날씨, 재실자 사용 스케줄, 창호 타입, 기계 환기 및 급탕 스케줄 등)이 탑재되어 있다. 또한, 건축물 설계 과정에서 쾌적성, 경제성 등 다양한 요구를 충족할 수 있도록 설계된 최적화 시뮬레이션 프로그램으로, 설계 초기 단계에서부터 건물 에너지 사용량을 분석할 수 있으며, 설계 과정의 모든 단계에서 쉽게 적용할 수 있는 특징을 갖는다[9]. 본 연구에서는 DesignBuilder를 활용하여 냉방 및 난방 에너지 사용량과 총 에너지 사용량을 분석하였다. 에너지 사용량 분석 결과를 바탕으로 건물의 효율적 운영을 위한 리트로핏 기술을 도출하였으며, 선정된 기술을 조합하여 최적의 리트로핏 방안을 마련하였다.

건물의 습기 문제를 분석하기 위해 WUFI 시뮬레이션을 활용하였다. WUFI는 실외 기상 환경에 노출된 건축 부재의 열·습기 거동을 1차원 및 2차원적으로 시뮬레이션할 수 있는 프로그램으로, 건축물의 장기적인 습기 문제를 평가하는 데 효과적인 도구로 사용된다[10]. 독일 Fraunhofer IBP에서 개발된 WUFI는 ‘Warme Und Feuchte Instationar’의 약자로, 이는 ‘열과 습기의 비정상 상태’를 의미하며, 실제 기후 조건을 반영하여 건축 부재 내 습기 이동과 축적을 예측할 수 있다[11]. 본 연구에서는 WUFI를 이용하여 기존 외벽의 열·습기 거동을 정량적으로 분석하였으며, 습기 문제를 해결하기 위한 방안을 도출하였다. 이를 통해 벽체 내부에서 발생할 수 있는 결로 및 곰팡이 성장 가능성을 검토하고, 장기적인 습기 문제가 건물의 내구성과 실내 환경에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 기존 외벽의 취약점을 파악하는 동시에, 습기 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 리트로핏 방안을 도출하였다. 습기 문제 해결 방안 도출 과정은 외벽의 재료 구성, 단열재 적용 여부, 투습성 조절 등을 고려하여 다양한 시나리오를 설정하여 최적의 개선안을 제안하였다.

## 3. 연구 결과 및 토의

### 3.1. 대상 건물의 건물에너지 진단 결과

G 의료박물관의 건물 에너지 진단 결과는 Table 2.와 같다. 외벽과 창호의 단열 성능은 각각 1.94W/m<sup>2</sup>K, 4.30W/m<sup>2</sup>K로 측정되었다. 건축물 에너지 절약 설계 기준에 따르면, 중부2지역의 외벽과 유리의 단열 기준은 각각 0.24W/m<sup>2</sup>K, 1.50W/m<sup>2</sup>K이나, 본 연구에서 측정된 열관류율은 이 기준을 크게 초과하여 열 손실이 매우 크다는 점을 확인할 수 있다. 이는 겨울철 난방 부하를 증가시키며, 에너지 소비량이 높은 원인이 될 수 있다.



a) Thermal transmittance of the building envelope and window  
b) Window performance  
c) Airtightness performance

Fig. 2. Building energy diagnosis

Table 2. Characteristics of studied building

Classification		Standard	Studied building
Insulation* (W/m <sup>2</sup> K)	Wall	0.24	1.94
	Window		
Window_SHGC**		0.40	0.70
Airtightness*** (1/h)		5.0	63

\*Building Energy Saving Design Standards

\*\*Passive House Institute Korea

\*\*\*Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems

창호의 SHGC는 0.0에서 1까지의 값을 가지며, 값이 0.0에 가까울수록 태양열 에너지를 차단하고, 1에 가까울수록 태양열 에너지를 획득·투과한다. 본 연구에서 측정된 창호의 SHGC 값은 0.7로, 기준보다 높은 수준을 나타내었다. 이는 창호를 통해 많은 태양열이 실내로 유입될 가능성을 의미하며, 특히 여름철에는 내부 온도가 상승할 위험이 클 것으로 예상된다.

기밀 성능은 63/h로 측정되었으며, 이는 건물이 기밀하지 않음을 의미한다. 기밀 성능 수치가 높을수록 공기 누출이 많다는 것을 나타내며, 이로 인해 냉·난방 효율이 저하되고 에너지 소비가 증가할 가능성이 크다. 또한, 기밀 성능이 낮을 경우 소음 차단 효과가 향상되지만, 반대로 기밀 성능이 높은 경우 외부 공기와 함께 먼지나 습기가 실내로 유입될 수 있어 실내 공기질이 저하되고, 거주자의 쾌적성이 감소할 수 있다.

본 연구에서 G 의료박물관의 건물 에너지 진단을 수행한 결과, 외벽과 창호의 단열 성능이 기준보다 낮아 열 손실이 크고, 이에 따른 냉·난방 부하 증가가 예상됨을 확인하였다. 또한, 창호의 높은 SHGC로 인해 여름철 과도한 태양열 유입이 발생할 가능성이 있으며, 기밀 성능이 낮아 공기 누출이 심각하게 나타났다. 이러한 문제들은 건물의 에너지 소비 증가뿐만 아니라 실내 환경에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

따라서, 건물의 에너지 성능을 향상시키기 위해서는 외벽 및 창호의 단열 성능을 개선하고, 태양열 유입을 조절할 수 있는 적절한 차양 장치 또는 고성능 유리를 적용하는 방안을 도출해야 하며, 기밀 성능을 강화하여 공기 누출을 최소화할 필요가 있다. 이러한 리트로핏 적용을 통해 에너지 효율성을 향상시키는 동시에, 실내 환경의 쾌

적성도 유지할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.2. 건물에너지 사용량 분석 결과

자료 조사를 통해 수집한 건물 정보를 바탕으로, 현장 측정을 통해 얻은 건물 에너지 성능 데이터를 활용하여 DesignBuilder를 이용한 건물 모델링을 수행하였다. 에너지 사용량 분석 결과는 Table 3.으로 제시하였다, 기존 건물의 연간 단위 면적당 에너지 사용량은 365.0kWh/m<sup>2</sup>로 분석되었으며, 냉방 에너지는 9,177.6kWh, 난방 에너지는 22,425.2kWh로 상당한 에너지가 소비되는 것으로 나타났다. 이는 건물의 단열 및 기밀 성능이 미흡하여 냉·난방 부하가 증가한 결과로 해석될 수 있으며, 에너지 효율 향상을 위한 개선 방안이 필요한 것으로 판단된다.

각 부재별 성능 향상 시뮬레이션을 수행한 후 효율적인 운영을 위한 리트로핏 기술을 선정하였다. 기존 외벽은 단열재가 적용되지 않아 단열 성능이 낮았으며, 이에 따라 외부로의 열 손실이 크게 발생하였다. EPS 단열재를 추가하여 건축물 에너지 절약 설계 기준인 0.24W/m<sup>2</sup>K로 개선 후 시뮬레이션을 실시한 결과, 외벽을 통한 열 손실이 감소하여 실내 온도 유지가 용이해졌다. 이에 따라 냉·난방 부하가 감소하면서 연간 29.6kWh/m<sup>2</sup>의 에너지 절감 효과가 나타났다.

창호의 경우, 기존 창호는 높은 열관류율로 인해 외부 공기의 영향을 크게 받으며 실내 열 손실이 많았다. 이를 개선하기 위해 열관류율을 1.8W/m<sup>2</sup>K로 개선하였으며, SHGC를 0.4로 조정하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 단열성능이 향상되어 겨울철 실내 열이 외부로 빠져나가는 것을 줄이고, 여름철 불필요한 태양열 유입을 억제하여 냉·난방 에너지 소비를 줄일 수 있었다. 이에 따라 연간 15.6kWh/m<sup>2</sup>의 에너지 절감 효과가 나타났다.

또한, 기존 조명 시스템은 형광등을 사용하여 소비 전력이 상대적으로 높고, 발열이 많아 추가적인 냉방 부하를 유발할 가능성이 있었다. 이를 LED 조명으로 교체함으로써 조명 효율이 증가하였고, 소비 전력이 감소하여 연간 14.6kWh/m<sup>2</sup>의 추가적인 에너지 절감 효과를

파를 확인하였다. LED 조명은 형광등보다 낮은 발열량을 가지므로 냉방 부하 또한 감소하는 효과가 있다.

기밀 성능 향상 기술을 통해 연간 115.4kWh/m<sup>2</sup>의 에너지 절감 효과가 나타나 기밀 성능 개선이 에너지 절약에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 분석되었다. 이를 통해 각 부재별 성능 향상을 통해 건물의 전체적인 에너지 소비를 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였으며, 리트로핏 적용이 건물의 에너지 효율 개선에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

### 3.3. 리트로핏 방안 도출 결과

본 연구에서는 기밀 성능 향상을 기반으로 외벽 단열, 창호, 조명 시스템 개선을 조합하여 최적의 리트로핏 방안을 도출하고, 이에 따른 에너지 절감 효과를 분석하여 Table 4.에 제시하였다. 시뮬레이션 결과, 모든 조합에서 에너지 소비가 감소하는 경향을 보였으며, 특히 난방 에너지 절감 효과가 두드러졌다. 외벽 단열을 강화한 B 시나리오는 난방 에너지 사용량이 최대 80%까지 절감되어 가장 높은 효율을 보였고, 창호 및 조명 시스템 개선 또한 효과적인 요소로 확인되었다. 또한, 외벽 단열과 조명 개선을 조합한 C 시나리오의 C3 조합은 큰 에너지 절감 효과를 보였는데, 이는 단열을 통한 열 손실 감소와 조명 개선에 따른 전력 사용 및 내부 발열 저감의 결과로 해석된다. 이로써 외벽 단열이 가장 핵심적인 요소로 작용하며, 창호와 조명 시스템과의 조합을 통해 추가적인 에너지 절감 효과를 기대할 수 있음을 확인하였다.

그러나 대부분의 시나리오에서 냉방 부하가 증가하는 경향이 나타났다. 특히 난방 절감 효과가 가장 높았던 B3 조합의 경우, 오히려 냉방 에너지 소비가 높게 나타났는데, 이는 단열 성능 향상으로 여름철 실내 열 축적이 심화된 데 따른 결과로 해석된다. 또한 기밀 성능 향상으로 인해 자연 환기가 제한되면서 냉방 부하가 증가할 가능성도 함께 제기되었다.

이러한 결과를 종합적으로 고려할 때, 기밀 성능 향상과 외벽 단열, 창호, 조명 시스템 개선이 모두 적용된 D 시나리오가 최적의 리트로핏 방안으로 판단된다. D 시나리오는 전체 에너지 사용량을 45.4% 절감하여 모든 조합 중 가장 높은 절감 효과를 보였으며, 총 에너지 소비량은 199.1kWh/m<sup>2</sup>로 가장 낮았다. 난방 에너지 사용량은 4,364.7kWh로 감소하여 외벽 단열이 포함된 시나리오 중 가장 높은 절감 효과를 나타냈고, 냉방 에너지는 10,660.3kWh로 유지되어 냉방 부하 증가를 최소화하였다. 이는 창호 성능 개선을 통해 일사 유입을 차단하고, 조명 시스템 개선을 통해 내부 발열을 줄인 효과로 해석된다.

기밀 성능 향상은 난방 부하 절감에 유리하지만 실내 환기 제한 시 공기질 저하 및 습도 조절 문제를 야기할 수 있다. 따라서 창호 및 조명 개선을 병행한 D 시나리오는 에너지 절감과 실내 환경 쾌적성 유지라는 두 가지 목표를 모두 달성할 수 있는 최적의 조합으로 평가된다. 결론적으로 D 시나리오는 냉난방 부하의 균형을 유지하면서 가장 우수한 에너지 절감 효과를 보였으며, 향후 연구에서는 차양 장치, 자연 환기, 열 회수 환기 시스템과의 통합적 적용 가능성을 검토할 필요가 있다. 아울러, 계절별 성능 차이 및 실내 공기질 영향을 포함한 종합적 성능 분석을 바탕으로, 건물 유형별 맞춤형 리트로핏 전

Table 3. Simulation results for diagnosing moisture issues within walls using WUFI

	Before retrofit	After retrofit	Energy consumption (kWh/m <sup>2</sup> )	Energy savings (kWh/m <sup>2</sup> )
Wall	Sand finish Solid Brick Without insulation Plywood Paint finish	Sand finish Solid Brick EPS insulation Plywood Paint finish	335.4	29.6
Window	5mm Clear glazing Wooden frame	35mm Low-E triple glazing UPVC frame	349.4	15.6
Lighting	Fluorescent	LED	350.4	14.6
Airtightness	63/h	5/h	249.6	115.4

략을 제시하는 것이 중요하다. 이러한 접근은 향후 지속 가능하고 효과적인 에너지 절감 전략 수립에 기여할 수 있을 것이다.

### 3.4. 건물의 습기 문제 분석 및 결과

본 연구에서는 건물 성능 개선을 위한 리트로핏 전략과는 별도로, 습기 문제 해결을 위한 최적의 벽체 구성을 도출하고자 추가적인 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 이를 위해 기존 외벽과 다양한 개선안을 대상으로 습기 성능을 비교하였으며, 그 결과는 Table 5.에 제시하였다.

기존 외벽의 경우, 내부 습기가 쉽게 축적되며 곰팡이 성장 및 장기적인 구조적 손상을 초래할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 이는 벽체가 외부 환경에 노출되면서 수분을 흡수하는 동시에, 실내외 온도 차이로 인해 내부에서 결로가 발생할 수 있기 때문이다. 이러한 현상은 외벽의 내구성을 저하시킬 뿐만 아니라 실내 공기질에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 외벽의 단열 성능을 개선하기 위해 EPS 단열재를 적용한 외벽의 분석 결과, 열관류율이 기존 외벽 대비 단열 성능이 크게 향상되었음을 확인할 수 있었다. 완전 건조 상태에서는 기존 외벽의 열관류율이 1.831W/m<sup>2</sup>K이었으나, EPS 단열재 적용 후 0.249W/m<sup>2</sup>K로 향상되었다. 이는 외벽을 통한 열 손실을 효과적으로 줄일 수 있음을 의미한다. 그러나 단열 성능 향상과 동시에 벽체 내부의 습기 문제가 증가하는 경향이 나타났다. 단열재가 외부와의 열 교환을 차단하면서도 내부 습기 배출을 방해하기 때문으로 해석된다. 벽체 내부에 습기가 잔류하게 되면, 시간이 지남에 따라 곰팡이 발생 가능성이 높아지고 구조적 손상을 초래할 수 있다. 따라서 단열 성능 향상만으로는 습기 문제를 완전히 해결할 수 없으며, 추가적인 방습 대책이 필요함을 시사한다.

이러한 문제를 해결하기 위해, EPS 단열재와 함께 아크릴 기반 콘크리트 페인트를 적용한 외벽을 분석하였다. 해당 외벽의 열관류율은 단열재만 적용한 외벽과 유사한 수준으로 나타났으며, 벽체 내부의 습기 문제가 감소하는 경향을 보였다. 이는 아크릴 기반 콘크리트 페인트가 외부 수분 침투를 억제하는 동시에, 벽체 내부의 습기 배출을 조절하는 역할을 하기 때문으로 해석된다. 결과적으로, 방습 성능이 추가된 외벽은 기존 외벽 및 EPS 단열재만 적용된 외벽과 비교하여 습기 안정성이 확보되었다.

본 연구를 통해 외벽의 단열 성능 개선만으로는 습기 문제를 해결

하기 어렵고, 방습 성능이 추가적으로 고려되어야 함을 확인하였다. 특히, EPS 단열재는 열 손실 저감 효과는 우수하지만 벽체 내부의 습기 축적을 유발할 가능성이 높아, 방습 기능이 포함된 마감재의 병행 적용이 보다 효과적인 대안이 될 수 있다. 예를 들어, 아크릴 기반 콘크리트 페인트와 같은 방습 재료를 추가하면 단열 성능을 유지하면서도 습기 문제를 최소화할 수 있어, 보다 안정적인 외벽 구성으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구는 기존 건축물의 지속 가능한 활용을 위한 리트로핏 전략을 비교 분석하기 위해, G 의료박물관을 대상으로 현장 측정 및 시뮬레이션을 통해 건물에너지 및 수분 문제를 진단하고, 이를 기반으로

Table 5. Analysis of retrofit application technology and energy savings in building modeling

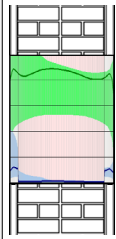
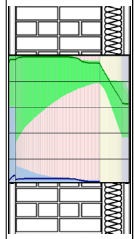
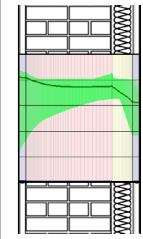
		Existing wall	Thermally improved wall	Moisture-proof wall
Improvement materials		-	EPS insulation	EPS insulation + acrylic-based concrete paint
Thermal transmittance	Completely dry	1.831	0.249	0.249
	Moisture exposure	1.956	0.301	0.257
Moisture issue	Surface	Mold growth not possible		
	Internal	Moisture issue present	Increase in moisture issue	Decrease in moisture issue
Simulation results for different wall types				

Table 4. Building energy usage according to retrofit package technology application

	Airtightness	Window	Lighting	Wall	Cooling (kWh)	Heating (kWh)	Energy consumption (kWh/m <sup>2</sup> )
Ref					9,177.6	22,425.2	365.0
A	O				11,314.3	8,208.7	249.6
B1	O	O			10,653.1	7,282.7	234.5
B2	O		O		10,749.1	8,567.9	232.4
B3	O			O	13,932.3	4,416.1	247.8
C1	O	O	O		10,066.8	7,646.4	217.0
C2	O		O	O	13,204.1	4,706.0	228.1
C3	O	O		O	12,845.1	3,373.1	226.4
D	O	O	O	O	10,660.3	4,364.7	199.1

최적의 리트로핏 기술 적용 방안을 도출하였다.

외벽과 창호의 단열성능, 기밀 성능 측정을 통해 건물의 에너지 성능을 평가하였다. 측정 결과, 외벽과 창호의 단열 성능은 각각 1.94W/m<sup>2</sup>K, 4.30W/m<sup>2</sup>K로 나타나 건축물 에너지 절약 기준을 충족하지 못하는 수준이었다. 창호의 SHGC는 0.70으로 높은 수치를 보였으며, 기밀 성능은 63/h로 측정되어 공기 누출이 심각한 문제로 분석되었다. 또한, WUFI 시뮬레이션을 통해 건물의 수분 문제를 분석한 결과, 기존 벽체에서 습기 축적과 곰팡이 발생 가능성이 높은 것으로 나타났으며, 리트로핏 적용 시 수분 문제를 해결하기 위한 추가적인 방안이 필요함을 확인하였다.

리트로핏 기술을 단일로 적용한 경우 에너지 사용량이 최대 45%까지 절감되었으며, 특히 난방 에너지 절감 효과가 크게 나타났다. 리트로핏 기술을 조합하여 비교 분석한 결과, 기밀 성능과 외벽 단열, 창호 개선, 조명 시스템 개선이 모두 적용된 D 시나리오가 최적의 리트로핏 조합으로 선정되었다. D 시나리오는 총 에너지 사용량을 45.4% 절감하는 효과를 보였으며, 난방 에너지를 45.4%까지 감소시켜 가장 높은 절감 효과를 나타냈다. 그러나 단열 성능 향상이 냉방 부하 증가를 초래할 수 있으며, 이에 따라 추가적인 대책이 필요함을 확인하였다. 또한, 리트로핏 적용 시 수분 문제를 해결하기 위한 방안으로 EPS 단열재 및 아크릴계 콘크리트 페인트를 활용한 벽체 시스템이 습기 저감에 효과적인 것으로 분석되었다. 기존 벽체에서는 내부 수분 증가로 인해 곰팡이 발생 가능성이 높았으나, 리트로핏 적용 후 수분 문제를 감소시키는 효과가 확인되었다. 따라서, 리트로핏 설계 시 에너지 절감뿐만 아니라 수분 문제 해결을 병행하는 것이 중요하며, 적절한 단열 및 마감재 선택이 필수적임을 확인하였다.

본 연구는 역사적 건물의 지속적 활용과 에너지 성능 개선을 위한 리트로핏 기술의 적용 가능성을 분석하고, 이를 통해 온실가스 감축 효과를 극대화할 수 있는 방안을 제시하였다. 향후 연구에서는 실제 사례 분석과 경제성 평가를 통해 보다 실질적인 정책 및 기술적 대안을 도출하는 것이 필요하며, 기후 조건, 지역별 건축 유형 등에 따른 맞춤형 리트로핏 전략을 개발하여 실질적인 탄소 감축 효과를 극대화할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해, 역사적 건물의 보존과 탄소중립 목표 달성을 동시에 실현할 수 있는 지속 가능한 방안을 마련할 수 있을 것이다.

### Acknowledgement

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업 ‘(RS-2024-00404631)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00519598).

### References

[1] 김진희, 김하영, 김준태, M&V 모델을 통한 그린리모델링 기술요소에 따른 에너지 절감량 분석, KIEAE Journal, 24(6), 2024, pp.13-21. // (J.H. Kim, H.Y. Kim, J.T. Kim, Energy saving analysis the according to greenremodeling technology elements through M&V (measurement &

verification) model, KIEAE Journal, 24(6), 2024, pp.13-21.)  
 [2] 심홍석, 이성주, 한국의 제로에너지건축 정책 추진에 따른 건축물 에너지기술 성능 연구, 한국산학기술학회 논문지, 22(5), 2024, pp.113-131. // (H.S. Shim, S.J. Lee, A study on the performance increase in building energy technology according to the Korea's zero energy building policy, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 22(5), 2024, pp.543-553.)  
 [3] 박해든 외 4인, 목질화 리모델링 적용에 따른 노후 건축물의 실내 환경 개선 효과 평가, 한국건축환경설비학회 논문지, 18(5), 2024, pp.466-477. // (H.D. Park et al., Evaluation of the impact of wooden remodeling on indoor environmental improvement in aging buildings, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 18(5), 2024, pp.466-477.)  
 [4] 박종일 외 3인, 고시원의 실내습도 및 결로/곰팡이 발생위험성: 환기여부 및 샤워실 유무에 따른 비교연구, 한국생활환경학회지, 30(6), 2023, pp.650-660. // (J.I. Park et al., Indoor humidity and condensation/mold risk in gosiwons: A comparative study of ventilation and moisture sources, Journal of Korean Living Environment System, 30(6), 2023, pp.650-660.)  
 [5] 문승현, 안대환, 근대건축물의 지정종류에 따른 보존 및 활용개념 비교연구 -전주 바다옥과 인천 조흥상회의 활용계획 사례를 중심으로-, 한국산학기술학회논문지, 25(4), 2024, pp.614-623. // (S.H. Moon, D.W. An, Comparative study on conservation and utilization concepts according to the designation types of modern architecture buildings -Focusing on the case studies of Jeonju Bakdaok and Incheon Choheungsanghoe's utilization plans-. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 25(4), 2024, pp.614-623.)  
 [6] H.M. Cho et al., Hygrothermal and energy retrofitplanning of masonry facade historic building used as museum and office: A cultural properties case study, Energy, 201, 2020, 117607.  
 [7] 신현표, 최정민, 건물 용도별 온실가스 배출량 특성에 관한 연구 - 2018~2021년 그린투게더 데이터를 기준으로 -, 대한건축학회논문집, 38(8), 2022, pp.237-246. // (H.P. Shin, J.M. Choi, A study on the characteristics of greenhouse gas emissions by building use - Based on green together data from 2018 to 2021 -. Journal of the Architectural Institute of Korea, 38(8), 2022, pp.237-246.)  
 [8] 손병호, 강재식, 경로당 건물 그린리모델링에 따른 건물 에너지 성능과 운전비용 절감 효과 평가, 한국지역에너지학회논문집, 20(3), 2024, pp.26-38. // (B.H. Sohn, J.S. Kang, Energy performance and operating cost assessment for implementing green remodeling technologies in a senior citizens' center, Journal of the Korean Society for Geothermal and Hydrothermal Energy, 20(3), 2024, pp.26-38.)  
 [9] 최보혜, 송승영, DesignBuilder 프로그램을 이용한 건물에너지 해석에서 열교 영향 모델링 방법 평가, 한국건축환경설비학회 논문지, 18(2), 2024, pp.152-164. // (B.H. Choi, S.Y. Song, Evaluation of thermal bridging effect modeling method in building energy simulation using DesignBuilder program, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 18(2), 2024, pp.152-164.)  
 [10] 강유진, 김수민, WUFI 시뮬레이션 프로그램을 이용한 목조주택 벽체 레이저 구성에 따른 hygrothermal 성능 평가, 목재공학, 44(1), 2016, pp.75-84. // (Y.J. Kang, S.M. Kim, Evaluation of the hygrothermal performance by wall layer component of wooden houses using WUFI simulation program, Journal of the Korean Wood Science and Technology, 44(1), 2016, pp.75-84.)  
 [11] 권해주, 최정만, 습열 거동 분석을 통한 국내 에너지절약설계기준의 방습층에 관한 문제점 분석, 한국생활환경학회지, 26(1), 2019, pp.1-8. // (H.J. Kwon, J.M. Choi, Analysis of the vapor barrier regulations of the Korean building design criteria for energy saving via hygrothermal simulations, Journal of Korean Living Environment System, 26(1), 2019, pp.1-8.)