



공공보건소 그린리모델링 적용요소에 따른 에너지 절감률 및 공사비회수기간 우선순위 도출

Deriving Priorities for Energy Savings Rates and Construction Cost Simple Payback Periods According to Green Remodeling Measures in Public Health Centers

김준규* · 송용우** · 박진철*** · 권영철****

Jun Kyu Kim* · Yong Woo Song** · Jin Chul Park*** · Young Cheol Kwon****

* Main author, Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., Seoul, South Korea (s214385@naver.com)

** Coauthor, Research Professor, Dept. of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., Seoul, South Korea (yongma0930@naver.com)

*** Coauthor, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., Seoul, South Korea (jincpark@cau.ac.kr)

**** Corresponding author, Professor, Dept. of Architecture, Halla Univ., Wonju, South Korea (yckwon@halla.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: The global average temperature has risen by over 1°C in the past century as atmospheric CO₂ concentrations increased from about 280 ppm in the pre-industrial era to nearly 400 ppm today. In response, many countries have implemented carbon-neutral strategies centered on the building sector. Korea has declared carbon neutrality by 2050 and aims to cut national greenhouse-gas emissions by 40% by 2030 (from 2018 levels), including a 32.8% reduction in the building sector. To achieve this, the government promotes green remodeling of existing public buildings. However, implementation remains challenging due to variations in cost, energy performance, and payback across technologies. This study analyzes the energy performance and economic feasibility of green remodeling technology combinations for public health centers to identify optimal strategies at the early design stage. **Method:** Using survey data from 51 buildings (10–20 years old), 25 combinations integrating passive (insulation, windows), active (equipment, boilers, ventilation), and renewable (PV) technologies were simulated with ECO2-OD. **Result:** The window+heat-source system+PV (Comb. 18) showed the best balance between performance and cost, while insulation+window+equipment+PV (Comb. 22) achieved the highest energy savings but a longer payback due to higher initial costs.

KEYWORD

그린리모델링
공공 보건소
단순회수기간법(SPP)
에너지절감률

Green Remodeling
Public Health Center
Simple Payback Period (SPP)
Energy Saving Rate

ACCEPTANCE INFO

Received Oct. 20, 2025
Final revision received Nov. 10, 2025
Accepted Nov. 14, 2020

© 2025. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

지난 100년간 지구 평균기온은 최소 1°C 이상 상승하였으며, 이는 산업화 이전 약 280ppm 수준이던 대기 중 온실가스 농도가 현재 약 400ppm까지 증가한 결과로 볼 수 있다[1]. 이러한 기후 위기에 대응하기 위해 2015년 파리기후협약에서는 각국에 국가온실가스감축목표(NDC, Nationally Determined Contribution) 설정을 의무화하였으며[2], 이에 따라 독일과 프랑스 등 주요 국가는 건물 부문을 핵심 감축 분야로 지정하여 중·장기 로드맵을 수립하였다. 독일은 2050년을 목표로 단기·중기·장기 단계별 에너지 소비 절감 계획을 수립하였고[3,4], 프랑스는 2012년 대비 2050년까지 1차 에너지 소비량을 50% 감축하기 위해 매년 약 50만 동의 건축물 대상으로 에너지 리트 로핏을 시행하여 건물의 에너지 성능을 향상시키고 있다[5]. 또한, 일본은 2013년 대비 2030년 온실가스 배출량 26% 감축을 목표로 하고 있으며, 중국과 인도는 각각 2005년 대비 2030년까지 탄소집약도를 60~65%, 33~35% 감축하는 계획을 수립하였다[6].

전 세계적인 탄소중립 흐름에 발맞추어 대한민국 또한 2050 탄소

중립을 선언하고, 2030년까지 국가 온실가스 총배출량을 2018년 대비 40% 감축하는 목표를 수립하였다[7]. 정부는 온실가스 배출원을 수송, 산업, 건물 등 10개 부문으로 구분하고 각 부문별 감축목표를 설정하였으며[8], 이 중 건물 부문은 2018년 대비 32.8% 감축을 목표로 하고 있다. 이를 달성하기 위해 국토교통부는 신축 건물의 제로 에너지화와 기존 건물의 그린리모델링 활성화를 핵심 전략으로 제시하였다. 이에 따라 2020년부터는 공공보건소를 포함한 공공건축물 그린리모델링 사업이 본격 시행되고 있다[9].

그린리모델링이란 기존 리모델링과 달리 노후 건축물을 대상으로 에너지 효율과 온실가스 저감의 동시 달성을 목표로 한 건축적·설비적 개선을 의미하며, 적용 기술로는 창호, 외벽, 지붕등의 외피 성능 향상과 같은 패시브 요소와 냉·난방장치, 환기장치 등 기계·전기 설비의 효율화, 신재생에너지 시스템 도입과 같은 액티브 요소가 있다[10~12].

패시브 기술은 주로 단열, 창호, 기밀성능 개선 등을 통해 냉난방 부하를 감소시키는 방향으로 적용되어 왔으며, 단독주택과 공동주택의 표준모델을 구축하여 요소기술별 절감효과를 검증한 연구가 이루어졌다[13,14]. 반면, 액티브 기술은 열원, 조명, 환기, 신재생에너지 시스템 등의 효율 향상을 통해 건물의 운전 에너지를 절감하는 접근으로 발전하고 있으며, 최근에는 패시브와 액티브 기술의 상호 작용을 고려한 민감도 분석을 통해 요소 간 상관관계가 에너지 절감

성능에 미치는 영향을 평가하려는 시도가 이루어지고 있다[15]. 그러나 실제 사업에서는 높은 초기 투자비용과 회수기간 지연이 주요 장애요인으로 지적되고 있으며, 그린리모델링 창조센터에 등록된 사업자를 대상으로 한 설문조사에서도 이와 같은 경향이 확인되었다[16]. 이는 기술적 성능 향상만으로는 정책적 효과 달성이 어렵고, 경제성 및 투자 회수 가능성을 병행 검토할 필요가 있음을 보여준다.

이에 따라, 최근 연구에서는 그린리모델링의 경제성 분석을 중점으로 한 접근이 활발히 이루어지고 있다. 건물 외피의 열적 특성을 최적화하여 에너지 절감과 비용 효율 간의 균형점을 제시하거나, 다목적 최적화 기법을 통해 리트로핏 전략을 도출하는 연구가 수행되었다[17,18]. 또한, 단열 공사비 데이터를 대규모로 구축하여 공사비 예측모델을 제안하거나, 국내 공공건축물의 리모델링 사례를 기반으로 에너지 절감 효과와 공사비 간의 상관관계를 평가한 연구도 제시되었다[19,20]. 한편, 민간 건축물을 대상으로 수행된 연구에서는 국가 건물에너지 통합관리시스템의 데이터를 이용하여, 창호·단열·열원 설비 등 적용 요소기술의 유형과 공사 전후 에너지 사용량 변화를 분석하였다[21].

한편, 경제성 분석과 함께 그린리모델링의 적용 우선순위를 도출하려는 연구도 이루어졌다. 관련 연구에서는 예산, 노후도, 사용자 요구도 등의 지표를 통해 공중빌 우선순위를 산정하거나, 에너지 성능·경제성·사용자 선호도를 통해 단일 요소기술 적용 순위가 제시되었다[22~24]. 또한, 실제 기숙사 건물을 대상으로 단열, 창호, 조명, 열원설비 등 네 가지 요소기술의 조합을 16개 CASE로 구성하여 시뮬레이션을 통해 에너지 절감률을 산출하고, 실행견적서를 기반으로 공사비와 회수기간을 산정한 연구가 수행되었다[25]. 대학 건물을 대상으로 한 연구에서는 ECO-CE3를 이용해 외피 단열, 창호 성능, 기밀 개선, 조명 교체 등 요소기술 적용에 따른 에너지 사용량 변화를 분석하고, 기술별 절감 효과를 비교하여 적용 우선순위를 도출하였다[26].

이와 같이 기존 연구들은 그린리모델링의 기술적 성능과 경제적 효율성을 중심으로 다양한 분석 방법을 적용해 왔으나, 대부분이 단일 요소기술 단위의 접근에 머물러 복합적 조합 효과를 검토하는 데에는 한계가 있거나 하나의 대상을 기준으로 분석한 연구가 대부분이었다. 그러나 실제 사업에서는 다양한 공공건축물을 대상으로 여러 요소기술이 동시에 적용되며, 이러한 조합이 에너지 절감률과 공사비에 직접적인 영향을 미친다. 따라서, 패시브·액티브 요소기술의

조합 단위에서 성능과 경제성을 통합적으로 평가하고, 이를 통해 기술 조합별 우선순위를 체계적으로 도출하는 연구가 필요하다[27].

이에 본 연구는 기존의 단일 기술 또는 단일 사례 중심의 분석에서 확장하여, 다수의 공공건축물을 대상으로 요소기술의 조합 단위에서 에너지 절감 성능과 경제성을 통합적으로 평가하고자 한다. 이를 위해 공공 보건소 51개소의 실증 데이터를 활용하여 각 조합의 에너지 절감률과 단순회수기간(Simple Payback Period)을 산정하고, 두 지표를 기준으로 기술 조합별 우선순위를 도출하였다. 이러한 정량적 비교를 통해 에너지 성능과 경제성의 균형을 체계적으로 검토함으로써, 그린리모델링 사업의 설계 초기 단계에서 효율적 의사결정을 지원하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 공공보건소를 대상으로 그린리모델링에 적용되는 주요 요소기술의 조합별 에너지 절감률과 회수기간을 분석하였다. 이를 위해 실제 사업이 수행된 51개 건물의 데이터를 수집하고, 연면적·외벽면적·창면적비 등 주요 물리적 특성의 평균값을 반영하였다. 51개소의 평균 장단면비는 약 1.16:1로, 대부분 정방형에 가까운 평면 형태를 보였으며, 외피가 실외에 직접 노출되는 비율이 높은 소규모 2층 구조로 나타났다. 이러한 형태적 특성이 냉·난방 부하에 직접적인 영향을 미치는 점을 고려하여, Table 1.과 같이 대표모델을 구성하였

Table 1. Common characteristics of the base model

Category	Input data	Category	Input data
Building type	2 stories above ground	Total floor area	348.83m ²
Floor height	3.33m	Ceiling height	2.61m
Floor area	173.71m ²	Roof area	169.21m ²
Window-to-wall ratio	25.60%	Door area (south)	4.5m ²
Wall area (east)	63.5m ²	Wall area (west)	63.5m ²
Wall area (south)	70.45m ²	Wall area (north)	70.45m ²
Window area (east)	17.5m ²	Window area (west)	16.75m ²
Window area (south)	19.25m ²	Window area (north)	10.5m ²
Aspect ratio	1.16:1	-	-

Table 2. Element technology combination

Group 1 (G1)		Group 2 (G2)		Group 3 (G3)	
No.	Combination	No.	Combination	No.	Combination
1	Insulation+Window	11	Insulation+Window+Equipments	21	Insulation+Window+Equipments+Ventilation
2	Insulation+Equipments	12	Insulation+Window+Ventilation	22	Insulation+Window+Equipments+PV
3	Insulation+Ventilation	13	Insulation+Window+PV	23	Insulation+Window+Ventilation+PV
4	Insulation+PV	14	Insulation+Equipments+Ventilation	24	Insulation+Equipments+Ventilation+PV
5	Window+Equipments	15	Insulation+Equipments+PV	25	Window+Equipments+Ventilation+PV
6	Window+Ventilation	16	Insulation+Ventilation+PV	*Through field investigation, it was confirmed that the health center's lighting used 100% LED. Therefore, it was excluded from the factor combination in this study.	
7	Window+PV	17	Window+Equipments+Ventilation		
8	Equipments+Ventilation	18	Window+Equipments+PV		
9	Equipments+PV	19	Window+Ventilation+PV		
10	Ventilation+PV	20	Equipments+Ventilation+PV		

Table 3. Calculating the cost of green remodeling public buildings

Div.	Elements		Unit	Construction cost (₩/unit)	
Required construction	Passive	Wall	Insulation	95,216	
		Roof		83,403	
		Floor		88,403	
		Window	Low Emissivity glass	561,700	
		Door	Main entrance	EA	3,800,000
	Active	Heat recovery ventilation		m ²	62,993
		Equipment	EHP (1st grade)		120,479
				Heat pump boiler	kW
	Renewables	PV		m ²	253,050
	Etc.	Architectural construction work		8% of the required construction cost	
Additional construction	Demolition work	Removal of existing materials		3% of window construction cost	
		Waste removal		3% of the required construction cost	
	Building	Construction-related auxiliary work		20.0% of construction cost	
	Facilities	Equipment-related auxiliary construction		20.0% of the facility cost	

Table 4. Annual energy usage calculation criteria

Base (₩/kW)	Electricity (₩/kWh)			Climate environment fee
	Summer	Spring, fall	Winter	
6,160	132.4	91.9	119	Climate environment fee unit price×Power usage
	Average:114.43			

다. 패시브 요소는 외벽·지붕·바닥의 단열성능과 창호·문의 기밀성능 향상으로 정의하였으며, 액티브 요소는 전열교환기, 고효율 냉난방 장치, 보일러 등의 열원설비와 태양광 설비를 적용하였다[28].

각 요소의 적용 여부에 따라 Table 2.와 같이 총 25개의 조합을 구성하였으며, 기술의 수에 따른 성능 변화를 비교하기 위해 Group 1은 두 가지 기술을 결합한 조합, Group 2는 세 가지 기술을 결합한 조합, Group 3은 네 가지 기술을 결합한 조합으로 구분하였다. 공사비 산정은 「2024년 공공건축물 그린리모델링 종합 사업지원」 지침을 기준으로 하였으며 외벽·지붕·바닥의 단열공사비, 창호 교체비, 기계·전기 설비 교체비, 신재생에너지 설치비 및 부대공사비 등을 포함하였다. 공사비 단가는 Table 3.과 같이 B사의 견적서 및 EMS7 건축자원 자료와 한국물가정보를 반영하였다. 연간 에너지 사용 단가는 기본요금 6,160원/kW, 전력요금 평균 114.43원/kWh로 설정하였으며, 연료비 조정 요금은 고려하지 않았다(Table 4.).

회수기간은 Eq. 1과 같이 공사에 투입된 총비용을 연간 에너지 절감액으로 나눈 단순회수기간으로 산정하였다[29].

$$SPP = \frac{C_{total}}{S_{annual}} \quad (Eq. 1)$$

이를 통해 도출된 에너지 절감률과 회수기간을 기준으로 각 조합의 성능을 평가하였다. 두 지표는 단위와 특성이 상이하여 직접적인 비교가 어려우므로, 본 연구에서는 이를 동일 척도로 정량화하기 위해 상대평가 방식을 적용하여 우선순위 도출을 위한 평가기준을 마

련하였다. 에너지 성능과 경제성을 동일한 비중으로 반영하기 위해 별도의 가중치는 적용하지 않았다.

Group 1과 Group 2는 각 항목에 1점부터 10점까지 차등 부여하여 총 20점 만점으로 평가하였다. Group 3은 조합 수가 5개로 제한됨에 따라, 비교의 일관성을 확보하기 위해 평가 구간을 6~10점으로 조정하였으며 동일하게 총 20점 만점으로 산정하였다. 전체 25개 조합을 대상으로는 절감률과 회수기간 점수를 각각 25점으로 환산하여 총 50점 만점으로 평가하였다. 이러한 평가체계는 에너지 절감 효과와 회수기간을 균형 있게 반영함으로써, 기술 조합의 규모와 구성에 따른 성능과 경제성을 정량적으로 비교·분석하기 위한 합리적인 기준으로 활용될 수 있다.

2. 시뮬레이션 입력값

본 연구에서는 그린리모델링 전과 후의 에너지 성능을 정량적으로 비교하기 위하여 ECO2-OD 프로그램을 활용하였다. ECO2-OD는 ISO 13790[30]과 DIN V18599[31]를 기반으로 건축물의 에너지 성능을 평가하는 정적 시뮬레이션 프로그램이다. 이 프로그램은 ISO 52016 등 국제규격에 부합하며[32,33], 입력변수의 표준화로 인해 사용자의 주관적 판단이 배제되는 장점이 있다[34]. 다만, monthly calculation과 simple hourly calculation을 사용하므로, 동적 시뮬레이션에 비해 시간 해상도가 낮고 내부 열용량에 의한 지연 효과를 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다[35]. 이러한 한계에도 불구하고, 모델 구성과 조작이 간단하며, 행정기관의 에너지절약 설계기준 평가도구로 공식 활용되고[36,37] 있다는 점에서 본 논문에서는 ECO2-OD 프로그램을 에너지 분석에 활용하였다.

2.1. 패시브 요소

패시브 요소의 열적 성능은 분석 대상 공공보건소의 준공 시기(2000년대 초반)와 동일하게 반영하기 위해 Table 5.와 「건축물의 에너지절약설계기준」의 중부 2지역(2001년 개정안)을 기준으로 설

Table 5. History of revision of overall heat transmission coefficient in central 2 region

Standard	Year	Wall	Roof	Floor	Window
Building act enforcement rules	1980	0.582	0.58	1.16	3.49
	1984			0.582	
	1987				
Rules on building installation standards, etc.	1992	0.47	0.41	0.465	3.84
	2001				3.40
	2008				2.40
	2010				2.10
Energy saving design standards	2013	0.27	0.18	0.29	2.10
	2018	0.24	0.15	0.20	1.00

Table 6. Applied items and their values before and after green remodeling in central 2 region

Category	Item	Unit	Before	After
Passive	Wall U-value	W/m ² K	0.47	0.24
	Roof U-value		0.325	0.15
	Floor U-value		0.465	0.2
	Window U-value		3.84	1.5
Active	EHP COP (cooling/heating)	-	3.52/3.52	3.90/4.30
	Boiler efficiency	%	55	100 (Electric boiler)
	Boiler capacity	kW	34.8	34.8
	Heat recovery ventilation (cooling/heating)	%	-	48/71
	Lighting density	W/m ²	7.5 (LED applied)	7.5
Renewables	PV capacity	kW	-	3

정하였다[38]. 이후 그린리모델링을 통해 외피 성능이 향상된 조건을 반영하기 위해 Table 5.와 같이 2024년 개정 기준을 적용하였다. 이러한 외피 성능 개선은 열손실 저감 및 기밀성 향상을 통해 난방 부하를 효율적으로 감소시켜 에너지 효율 개선의 효과가 있다.

2.2. 액티브 요소

액티브 및 신재생에너지 요소에는 냉난방장치(EHP), 보일러, 전열교환기, 조명설비, 태양광(PV) 시스템을 포함하였다. 각 설비의 용량과 효율은 현장조사와 에너지 성능 지표를 통해 기존 대비 개선된 조건으로 설정하였으며 Table 6.과 같다[39].

냉난방장치는 1등급 EHP의 평균 효율을 적용하였으며, 보일러는 전기식 고효율 보일러로 교체하여 에너지 이용 효율을 개선하였다. 전열교환기는 실내 공기질 개선을 위해 설치된 설비로, 분석 대상 연면적 대비 필요 환기량 3.6CMH/m²을 기준으로 적용하였다. 현장조사 결과 조명은 이미 LED(7.5W/m²)로 운영 중이었으며, 이는 ASHRAE 2017[40], 「공공건축물 그린리모델링 지원사업 가이드라인」 및 한국에너지공단 기준[41]을 모두 충족하므로 개선 항목에서 제외하였다.

신재생에너지는 태양광(PV) 시스템을 적용하였으며, 제로에너지건축물 5등급의 에너지자립률 20% 기준 및 실제 태양광 시스템의 평균 설치 면적을 참고하여 용량 3kW, 설치면적 19m²로 설정하였다[42].

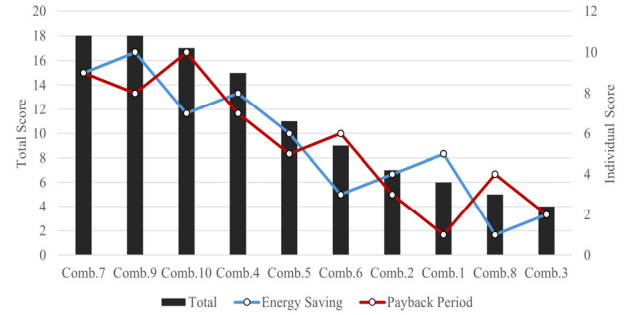


Fig. 1. Performance comparison of two-factor technology combinations

Table 7. Performance evaluation of two-factor technology combinations

Combination	Energy saving (score)	Payback period (score)	Total score
Comb.7	9	9	18
Comb.9	10	8	18
Comb.10	7	10	17
Comb.4	8	7	15
Comb.5	6	5	11
Comb.6	3	6	9
Comb.2	4	3	7
Comb.1	5	1	6
Comb.8	1	4	5
Comb.3	2	2	4

3. 시뮬레이션 결과

앞서 정의된 평가 체계에 따라, 본 장에서는 요소기술 조합별 시뮬레이션 결과를 비교·분석하였다. 본 장의 Fig. 1.~Fig. 4.는 각각 두 가지 요소기술을 결합한 조합, 세 가지 요소기술을 결합한 조합, 네 가지 요소기술을 결합한 조합과 전체 25개 조합 중 상위 10개의 결과를 나타낸다. 이후 절별 분석에서는 조합별 절감 성능의 차이와 회수기간의 변화 요인을 중심으로, 패시브·액티브·재생에너지 기술 간의 상호작용과 효율적 조합 방향을 논의한다.

3.1. Group 1 분석 결과

Fig. 1.은 두 가지 요소기술을 결합한 조합의 시뮬레이션 결과를 활용하여 산출한 평가 결과를 제시하며, 이에 대한 상세결과는 Table 7.에 정리하였다. 두 가지 요소기술 조합 중에서는 창호+태양광설비(Comb.7)와 열원설비+태양광설비(Comb.9)가 가장 우수한 성능을 보였다. 두 조합 모두 태양광 설비가 포함되어 에너지 절감 효과가 높았으며, 공사비가 비교적 낮아 회수기간 측면에서도 유리하였다.

반면, 공조설비가 포함된 조합은 송풍 에너지 소비가 증가하여 절감효과가 상대적으로 낮게 나타났지만 공사비가 낮아 회수기간에서는 높은 점수를 받았다. 한편, 단열과 창호 등 패시브 요소는 열원설비에 비해 중기 노후 건축물에서 에너지 절감 효과 대비 회수기간이 상대적으로 높게 나타났다.

결과적으로, Group 1에서는 태양광 설비를 포함한 조합이 절감률과 회수기간이 균형을 이루는 가장 효율적인 대안으로 도출되었다. 특히 창호+태양광(Comb.7)과 열원+태양광(Comb.9)은 태양

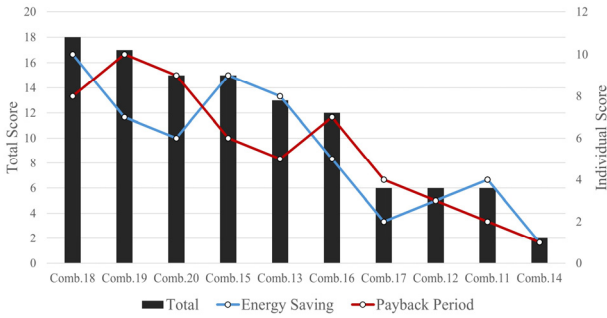


Fig. 2. Performance comparison of three-factor technology combinations

Table 8. Performance evaluation of three-factor technology combinations

Combination	Energy saving (score)	Payback period (score)	Total score
Comb.18	10	8	18
Comb.19	7	10	17
Comb.20	6	9	15
Comb.15	9	6	15
Comb.13	8	5	13
Comb.16	5	7	12
Comb.17	2	4	6
Comb.12	3	3	6
Comb.11	4	2	6
Comb.14	1	1	2

광의 직접적인 절감효과와 창호·열원 개선에 따른 부하 저감이 상호 보완적으로 작용한 결과로, 향후 공공건축물의 단기 회수형 리모델링 전략에 적합한 조합으로 제시될 수 있다.

3.2. Group 2 분석 결과

Fig. 2.와 Table 8.은 세 가지 요소기술을 동시에 적용한 조합의 시뮬레이션 결과를 종합하여 도출한 평가 점수 및 우선순위를 나타낸다. 요소기술의 수가 증가함에 따라 절감률과 회수기간의 균형이 달라지는 양상이 뚜렷하게 나타났으며, 이는 각 기술 간 상호작용에 따른 결과로 해석된다.

세 가지 요소기술 조합 중에서는 창호+열원설비+태양광설비(Comb.18)가 가장 우수한 결과를 보였다. 이 조합은 패시브 기술(창호)에 의한 냉난방 부하 저감, 액티브 기술(열원설비)의 시스템 효율 향상, 그리고 재생에너지(태양광)의 전력 대체 효과가 상호보완적으로 작용하여 에너지 절감과 경제성이 동시에 확보된 사례로 분석된다. 반면, 태양광 설비를 제외하고 공조설비가 포함된 조합은 냉난방 부하 및 송풍 에너지 소비 증가로 인해 전체 절감효과가 일부 상쇄되는 경향을 나타냈다.

결과적으로, Group 2에서는 창호+열원+태양광 조합이 기술적·경제적 측면 모두에서 가장 효율적인 대안으로 도출되었으며, 이는 공공건축물의 복합형 리모델링 설계 전략 수립에 유의미한 근거를 제공한다.

3.3. Group 3 분석 결과

Fig. 3.과 Table 9.는 네 가지 요소기술을 동시에 적용한 조합의 시뮬레이션 결과를 활용하여 도출한 우선순위 결과를 보여준다. 네 가

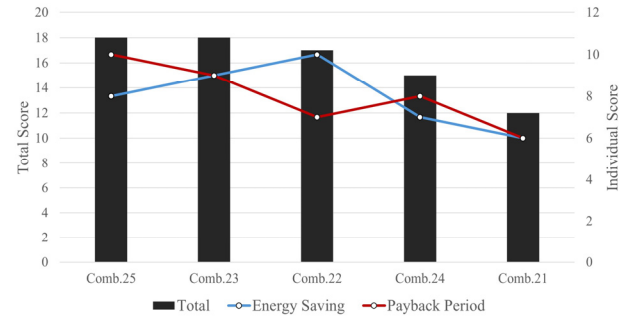


Fig. 3. Performance comparison of four-factor technology combinations

Table 9. Performance evaluation of four-factor technology combinations

Combination	Energy saving (score)	Payback period (score)	Total score
Comb.25	8	10	18
Comb.23	9	9	18
Comb.22	10	7	17
Comb.24	7	8	15
Comb.21	6	6	12

지 요소기술을 모두 포함한 조합은 총 다섯 가지이며, 각 조합의 절감률과 회수기간을 함께 고려하여 통합적으로 평가하였다.

가장 우수한 조합은 단열+창호+공조설비+태양광설비(Comb.23)와 창호+열원설비+공조설비+태양광설비(Comb.25)로 분석되었다. 두 조합 모두 태양광 설비가 포함되어 에너지 절감 효과가 크게 작용하였으며, 공조설비에 의한 열환경 균질화와 외피 성능 향상이 복합적으로 기여한 결과로 해석된다. Comb.23은 단열 보강을 통한 외피 성능 개선으로 높은 절감효과를 확보하였고, Comb.25는 열원 효율 향상과 태양광 적용의 조합으로 투자 대비 경제성이 우수하게 나타났다. 결과적으로 두 조합 모두 기술적 성능과 경제성이 균형을 이루는 효율적인 복합형 조합으로 평가된다.

반면, 단열+창호+열원설비+공조설비(Comb.21)는 태양광이 포함되지 않아 에너지 절감 효과가 상대적으로 낮았으며, 공조설비의 송풍에너지 소비로 인해 절감 효율이 감소하였다. 또한 단열+창호+열원설비+태양광설비(Comb.22)의 경우, 에너지 절감효과는 가장 높았으나, 공사비 상승으로 인해 다른 조합에 비해 회수기간이 길게 나타났다.

3.4. 전체 요소기술 조합 평가 결과

분석 결과, 창호+열원설비+태양광설비(Comb.18)가 전체 조합 중 가장 우수한 점수를 나타냈다. 이 조합은 창호 성능 개선에 따른 냉난방 부하 저감 효과가 열원 효율 향상 및 태양광 전력 대체와 결합되어 높은 절감률을 보였으며, 적용된 요소가 세 가지로 비교적 단순하여 공사비 부담이 낮아 회수기간이 짧게 평가되었다.

창호+공조설비+태양광설비(Comb.19)와 창호+열원설비+공조설비+태양광설비(Comb.25) 역시 높은 수준의 절감효과와 경제성을 동시에 확보한 조합으로 나타났다. 두 조합 모두 패시브·액티브·신재생요소가 조화된 형태로, 기술적 성능과 경제성이 균형을 이루는 구조를 보였다.

반면, 단열+창호+열원설비+태양광설비(Comb.22)는 에너지 절

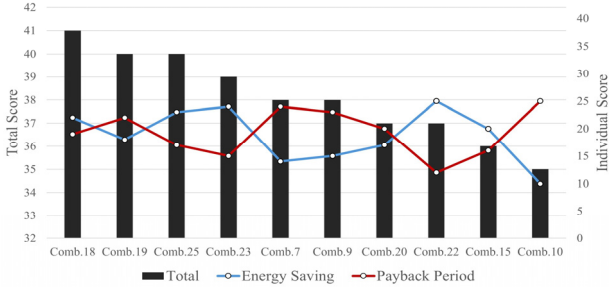


Fig. 4. Integrated evaluation results of the top 10 retrofit measure combinations

Table 10. Integrated performance evaluation of all technology combinations

Combination	Energy saving	Payback period	Total score
Comb.18	22	19	41
Comb.19	18	22	40
Comb.25	23	17	40
Comb.23	24	15	39
Comb.7	14	24	38
Comb.9	15	23	38
Comb.20	17	20	37
Comb.22	25	12	37
Comb.15	20	16	36
Comb.10	10	25	35
Comb.4	13	21	34
Comb.16	16	18	34
Comb.24	21	13	34
Comb.13	19	14	33
Comb.17	8	10	18
Comb.5	7	9	16
Comb.11	11	4	15
Comb.12	9	6	15
Comb.6	3	11	14
Comb.21	12	1	13
Comb.2	4	7	11
Comb.8	1	8	9
Comb.1	5	3	8
Comb.14	6	2	8
Comb.3	2	5	7

감효과는 가장 높았으나, 공사비 증가로 인해 회수기간이 상대적으로 길게 분석되었다. 이는 절감효과가 크더라도 초기 투자비가 과다할 경우 경제성 측면에서는 효율이 낮아질 수 있음을 보여준다. 상위권 조합 대부분은 태양광 설비를 포함하고 있었으며, 이는 태양광의 직접적인 에너지 절감 효과가 전체 성능 향상에 크게 기여했음을 의미한다.

한편, 요소기술이 추가될수록 절감효과는 Table 11.과 같이 비선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 투자비 증가에 따라 에너지 절감 폭이 점차 줄어드는 경향이 확인되었다. 모든 조합에서 첫 번째 요소기술에 두 번째 요소기술이 추가될 때 가장 큰 절감폭이 나타났으며, 이후 기술이 점차 늘어날수록 절감률 증가폭은 7~6% 수준으로 완만하게 감소하였다. 따라서 공공건축물의 그린리모델링 설계에서는 모든 기술을 단순히 동시에 적용하기보다, 절감효과와 회수기간 간의 균형을 고려한 단계적 확장 전략이 필요하다. 이러한 접근은 설계 및 사업 초기 단계에서 에너지 절감과 투자비 회수의 균형을 동시

Table 11. Sequential addition of technologies and non-linear trend in energy reduction

Starting technology	Applied stage	Technology combination	Δ Energy reduction (%)	Cumulative reduction (%)
Window-based sequence	Step 1	Window only	-	-8.2
	Step 2	+ Photovoltaic (PV)	18.2	-26.4
	Step 3	+ Heat source system	7.8	-34.2
	Step 4	+ Insulation	5.7	-39.9
PV-based sequence	Step 1	Photovoltaic (PV) only	-	-18.1
	Step 2	+ Window	8.3	-26.4
	Step 3	+ Heat source system	7.8	-34.2
	Step 4	+ Insulation	5.7	-39.9
Heat-source-based sequence	Step 1	Heat source only	-	-9.3
	Step 2	+ Photovoltaic (PV)	18.1	-27.4
	Step 3	+ Window	6.8	-34.2
	Step 4	+ Insulation	5.7	-39.9
Insulation	Step 1	Insulation only	-	-17.2

에 확보할 수 있는 실질적이고 합리적인 설계 방향으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 공공보건소를 대상으로 패시브, 액티브, 신재생 요소기술의 조합 단위에서 에너지 절감률과 단순회수기간을 통합적으로 평가하여, 설계 초기 단계에서 활용 가능한 우선 적용 조합을 제시하고자 하였다. 이를 위해 사업이 수행된 51개소의 데이터를 기반으로 대표 모델을 구성하고, ECO2-OD 시뮬레이션을 통해 총 25개 요소기술 조합의 절감률과 공사비 기준 회수기간을 산정하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 창호+열원설비+태양광설비 조합(Comb.18)이 전체 조합 중 가장 우수한 성능을 보였다. 이 조합은 창호 성능 개선으로 인한 냉난방 부하 저감 효과가 열원 효율 향상과 태양광 전력 대체 효과와 결합되어 높은 절감효율을 나타냈다. 또한 세 가지 요소만을 포함하여 공사비 부담이 낮고 회수기간이 짧은, 효율적이고 실용적인 조합으로 평가되었다.
- 2) 창호+공조설비+태양광설비 조합(Comb.19)과 창호+열원설비+공조설비+태양광설비 조합(Comb.25) 역시 절감효과와 경제성을 동시에 확보한 조합으로 나타났다. 반면, 단열+창호+열원설비+태양광설비 조합(Comb.22)은 에너지 절감효과는 가장 높았으나, 공사비가 상대적으로 높아 회수기간이 길게 평가되었다.
- 3) 상위권 조합 대부분은 태양광 설비를 포함하고 있었으며, 공조설비 중심의 단순 조합은 송풍에너지 소비 증가로 인해 절감률은 낮았지만 회수기간은 상대적으로 낮게 나타났다.
- 4) 요소기술이 복합화될수록 에너지 절감효과는 증가하였으나, 공사비 상승으로 인한 회수기간 단축 폭은 점차 감소하는 비선형적 관계가 확인되었다.

본 연구는 공공보건소를 대상으로 요소기술의 조합 단위에서 에너지 절감률과 단순회수기간을 통합적으로 평가하여, 실제 초기 단계에서 활용 가능한 우선 적용 조합을 제시하였다. 다만 ECO2-OD의 정적 계산 방식에 기반하므로 열용량 지연효과 등을 충분히 반영하지 못하였다. 경제성 평가는 단순회수기간에 한정되어 할인을, 유지관리비, 수명 차이 등의 장기 요인을 포함하지 않았고, 기후나 요금체계 변화에 따른 변동성에 대한 보완이 필요하다.

향후 연구에서는 실제 운영 데이터를 활용해 시뮬레이션 결과를 검증하고, 생애주기비용(LCC)과 순현재가치(NPV)를 포함한 종합 경제성 평가등을 수행할 예정이다. 또한, 지역·용도·규모별 세분화 모델 구축과 민감도 분석을 통해 변수 변동성이 결과에 미치는 영향을 검증하고, 노후도별 성능 차이를 반영한 시나리오 기반 평가도 진행할 계획이다.

그럼에도 본 연구는 공공건축물의 실증 데이터를 기반으로 패시브·액티브·신재생 기술을 조합 단위에서 통합 분석하였다는 점에서 의의가 있다. 특히 에너지 절감효과와 경제성을 함께 고려해 조합별 우선순위를 제시함으로써, 실제 초기 단계에서 효율적 투자 판단을 지원할 수 있는 근거를 마련하였다. 제안된 결과는 사업 예산과 투자회수 측면에서 실무적 의사결정 기준으로 활용될 수 있으며, 향후 공공건축물의 그린리모델링 정책 및 기술 선택에 기초자료로 기여할 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00217322).

References

[1] B. Magi, Climate Change and Debate, <https://pages.charlotte.edu/brian-magi/2015/01/15/climate-change-and-debate/>, 2025.10.25.

[2] 기획재정부, 시사경제용어사전, <https://www.moef.go.kr/sisa/main/main>, 2025.10.25. // (Ministry of Economy and Finance, Dictionary of Current Economic Terms, <https://www.moef.go.kr/sisa/main/main>, 2025.10.25.)

[3] Federal Ministry for Economics and Technology, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Energy concept for an environmentally sound, reliable and affordable energy supply (1st ed.), Berlin: The Federal Ministry of Economics and Technology, 2010.

[4] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety, Climate action plan 2050: Principles and goals of the German government's climate policy (1st ed.), Berlin: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety, 2016.

[5] C. Sebi et al., Policy strategies for achieving large long-term savings from retrofitting existing buildings, Energy Efficiency, 12(1), 2019, pp.89-105.

[6] 오진규, 주요국의 2030 온실가스 감축목표에 대한 비교분석과 시사점, 한국기후변화학회지, 제9권 제4호, 2018, pp.357-368. // (J.G. Oh, Comparative analysis of the 2030 GHG reduction target for eleven major countries and its implications, Journal of Climate Change Research, 9(4), 2018, pp.357-368.)

[7] 관계부처 합동, 탄소중립녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획 요약, <https://nsp.nanet.go.kr/plan/subject/detail.do?nationalPlanControlNo=PLAN0000037588>, 2023.04.12. // (Jointly with Relevant Ministries, Summary of Carbon Neutrality/Green Growth National Strategy and 1st

National Basic Plan, <https://nsp.nanet.go.kr/plan/subject/detail.do?nationalPlanControlNo=PLAN0000037588>, 2023.04.12.)

[8] 관계부처 합동, 2030 국가 온실가스 감축 목표(NDC) 상향안, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=100&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=12>, 2021.10.18. // (Jointly with Relevant Ministries, 2030 National Return Goal (NDC) Return-Final, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=100&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=12>, 2021.10.18.)

[9] 국토교통부, 23일부터 공공건축물 그린리모델링 지원사업 공모, <https://www.greenremodeling.or.kr/n1/board/boardView.asp?bid=news&nSeq=2621&page=1&search=sTitle&searchString=&sType=#content>, 2025.10.24. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Call for Applications for the Green Remodeling Support Project for Public Buildings from the 23rd, <https://www.greenremodeling.or.kr/n1/board/boardView.asp?bid=news&nSeq=2621&page=1&search=sTitle&searchString=&sType=#content>, 2025.10.24.)

[10] 국토교통부, 그린리모델링 지원사업 운영 등에 관한 고시 제2조 제1항, <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000225858>, 2025.10.24. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Notice on Operation of Green Remodeling Support Project, Article 2, Paragraph 1, <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000225858>, 2025.10.24.)

[11] 국토교통부, 건축법 제2조, <https://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsId=001823&ancYnChk=0#0000>, 2025.10.24. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, The Building Act, Article 2, <https://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsId=001823&ancYnChk=0#0000>, 2025.10.24.)

[12] 국토교통부, 녹색건축물 조성지원법 제27조, <https://law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsId=011557&ancYnChk=0#0000>, 2025.10.24. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, The Green Building Promotion Act, Article 27, <https://law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsId=011557&ancYnChk=0#0000>, 2025.10.24.)

[13] 정수빈, 김진희, 김준태, 그린리모델링 기술요소 적용에 따른 단독 및 공동주택의 에너지 저감 효과 분석, 한국태양에너지학회 논문집, 제44권 제5호, 2024, pp.83-97. // (S.B. Jeong, J.H. Kim, J.T. Kim, Analysis of energy-saving effects according to green-remodeling technology elements in apartment and single-family houses, Journal of the Korean Solar Energy Society, 44(5), 2024, pp.83-97.)

[14] 한동익, 윤성환, 그린리모델링을 통한 노후 단독주택 에너지 절감 효과 분석: 부산광역시 남구를 대상으로, 대한건축학회 논문집, 제237권, 2021, pp.145-154. // (D.I. Han, S.H. Yoon, An analysis of energy saving effect of deteriorated detached house through green remodeling - Focusing on Nam-gu, Busan, Journal of the Architectural Institute of Korea, 237, 2021, pp.145-154.)

[15] 허선영 외 4인, 패시브 및 액티브 요소 기술의 동적 교호작용을 고려한 그린리모델링 의사결정, 대한건축학회 논문집, 제39권 제8호, 2023, pp.187-194. // (S.Y. Heo et al., Green remodeling decision-making considering dynamic interactions of passive and active retrofit variables, Journal of the Architectural Institute of Korea, 39(8), 2023, pp.187-194.)

[16] 이창재, 안용한, 국내 그린리모델링 프로젝트 저해요인에 대한 연구, 한국: 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제36권 제1호, 2016, pp.443-444. // (C.J. Lee, Y.H. Ahn, A study on barriers of the green remodeling project, Korea: Spring Conference of the Architectural Institute of Korea, 36(1), 2016, pp.443-444.)

[17] J. Huang et al., Thermal properties optimization of envelope in energy-saving renovation of existing public buildings, Energy and Buildings, 75, 2014, pp.504-510.

[18] E. Asadi et al., Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application, Energy and Buildings, 44, 2012, pp.81-87.

[19] 신혜리 외 4인, 제로에너지수준의 그린리모델링을 위한 단열공사의 공사비 예측모델 개발, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제15권 제6호, 2021, pp.794-805. // (H.R. Shin et al., Development of a construction cost prediction model for retrofit of net-zero energy building at the insulation work phase, Journal of KIAEBS, 15(6), 2021, pp.794-805.)

[20] 엄해정 외 3인, 공공건축물 그린리모델링 현황과 에너지 절감 효과 향상 방안, 한국: 2022 대한건축학회 동계학술발표대회 논문집, 2022, pp.337-340. // (H.J. Eom et al., Analysis of current state of building retrofit projects in Korea and strategies to improve energy saving effect, Korea: 2022 Winter Conference of the Korean Society of

- Air-Conditioning Engineers, 2022, pp.337-340.)
- [21] 김성민, 기존 건축물 그린리모델링 적용 요소기술 및 에너지절감효과 분석, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제11권 제3호, 2017, pp.238-245. // (S.M. Kim, Analysis on application of green remodeling technology and energy saving effect for existing buildings, Journal of KIAEBS, 11(3), 2017, pp.238-245.)
- [22] 김용인, 신경희, 이찬식, 노후 공공건축물의 리모델링 우선순위 결정 절차 및 방법, 대한건축학회 논문집, 제19권 제3호, 2023, pp.107-114. // (Y.I. Kim, K.H. Shin, C.S. Lee, Decision making of remodeling priority for aged public buildings, Journal of the Architectural Institute of Korea, 19(3), 2023, pp.107-114.)
- [23] 심형보, 노후건축물 리모델링에서의 우선순위 결정방법에 관한 연구, 연세대학교 공학대학원 석사학위논문, 2008. // (H.B. Sim, A study on decision making upon the priority in remodeling of old buildings – Focused on public buildings, (Master's thesis), Korea: Yonsei University, 2008.)
- [24] 엄미현 외 3인, 에너지 성능, 경제성, 사용자 선호도를 고려한 그린리모델링의 우선 적용 기술 도출 방안에 관한 연구: 국공립어린이집을 대상으로, 대한설비공학회 논문집, 제36권 제3호, 2024, pp.137-149. // (M.H. Eom et al., A study on the method of priority application technology of green remodeling considering energy performance, economics, and user preference in public daycare centers, Journal of the Korean Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers, 36(3), 2024, pp.137-149.)
- [25] 정승욱, 기숙사 건축물의 그린리모델링을 통한 에너지 성능 개선효과 및 경제성 검토, 연세대학교 공학대학원 석사학위논문, 2015. // (S.W. Chung, Energy performance improvements and economic analysis through retrofit of dormitory buildings, (Master's thesis), Korea: Yonsei University 2015.)
- [26] 김석현 외 4인, 노후대학건물의 에너지 성능 향상을 위한 리모델링 우선순위 도출 방안 연구, 한국건축친환경설비학회논문집, 제14권 제6호, 2020, pp.626-638. // (S.H. Kim et al., Research on remodeling priority derivation method for the energy performance improvement of aged campus building, Journal of KIAEBS, 14(6), 2020, pp.626-638.)
- [27] 김재문, 이정혁, 이두환, 공공건축물의 그린리모델링 수준별 LCC (Life Cycle Cost) 분석을 통한 경제성 비교, 한국건설관리학회 논문집, 제19권 제2호, 2018, pp.38-49. // (J.M. Kim, J.H. Lee, D.H. Lee, Economic comparison through LCC analysis on each graded alternative for green remodeling of public buildings, Journal of the Korea Institute of Construction Engineering and Management, 19(2), 2018, pp.38-49.)
- [28] LH 도시건축사업단 그린리모델링센터, 그린리모델링 시공 가이드라인 (초판), 한국: 한국토지주택공사, 2020, pp.11-121. // (LH Urban Architecture Business Division, Green Remodeling Center, Green remodeling construction guidelines (1st ed.), Korea: Korea Land and Housing Corporation, 2020, pp.11-121.)
- [29] 이성호, 이재수, 생애주기를 고려한 오피스 건물의 리모델링과 그린리모델링의 경제성 평가 연구, 대한건축학회 논문집 - 계획계, 제34권 제3호, 2018, pp.23-34. // (S.H. Lee, J.S. Lee, An economic evaluation study of office remodeling and green-remodeling projects: A simulation approach to a rental office in GBD, Journal of the Architectural Institute of Korea - Planning & Design, 34(3), 2018, pp.23-34.)
- [30] International Organization for Standardization, ISO 13790:2008 Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling, International Organization for Standardization, 2008.
- [31] Deutsches Institut für Normung, DIN V 18599-2: Energy efficiency of buildings – Part 2: Energy needs for heating and cooling of building zones, Deutsches Institut für Normung, 2007.
- [32] M.H. Chung et al., Strategies for improving impact of energy renovation: A case study on Korean daycare centers, Energy and Buildings, 284, 2023, 12844.
- [33] 국토교통부, 건축물의 에너지 절약설계기준 제22조, <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulId=2002794&efYd=0>, 2025.10.24. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, The Energy Conservation Design Standards for Buildings, Article 22, <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulId=2002794&efYd=0>, 2025.10.24.)
- [34] 오세민, 박철수, ISO 13790의 Monthly Calculation Method와 동적 에너지 해석 프로그램 비교, 한국: 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회 논문집, 2011, pp.139-142. // (S.M. Oh, C.S. Park, Comparison of ISO 13790 Monthly Calculation Method with dynamic energy simulation, Korea: Fall Conference of the Korean Society of Environmentally Friendly Buildings, 2011, pp.139-142.)
- [35] 윤성환, 박철수, 기존 건축물을 위한 x-Ray 개념의 에너지 모델 작성과 평가, 대한건축학회 논문집 - 계획계, 제30권 제1호, 2014, pp.235-244. // (S.H. Yoon, C.S. Park, x-Ray approach to develop energy model for existing buildings, Journal of the Architectural Institute of Korea - Planning & Design, 30(1), 2014, pp.235-244.)
- [36] 신수영 외 3인, 공공건축물 그린리모델링 사업에 의한 열성능 및 실내온열환경 개선 효과 분석, 대한건축학회 논문집, 제40권 제1호, 2024, pp.201-212. // (S.Y. Shin et al., Improvement effect analysis of thermal performance and indoor thermal environment by green remodeling project of public buildings, Journal of the Architectural Institute of Korea, 40(1), 2024, pp.201-212.)
- [37] 국토교통부, 건축물 에너지 성능의 정량적 평가방법 표준화를 위한 연구 (초판), 한국: 국토교통부, 2014, pp.9-18. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Study on standardization of quantitative evaluation methods for building energy performance (1st ed.), Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014, pp.9-18.)
- [38] 국토교통부, 건축물의 에너지 절약설계기준, <https://www.law.go.kr/ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99%EA%B1%B4%EC%B6%95%EB%AC%BC%EC%9D%98%EC%97%90%EB%84%88%EC%A7%80%EC%A0%88%EC%95%BD%EC%84%A4%EA%B3%84%EA%B8%B0%EC%A4%80>, 2025.10.25. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Building Energy Conservation Design Standards, <https://www.law.go.kr/ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99%EA%B1%B4%EC%B6%95%EB%AC%BC%EC%9D%98%EC%97%90%EB%84%88%EC%A7%80%EC%A0%88%EC%95%BD%EC%84%A4%EA%B3%84%EA%B8%B0%EC%A4%80>, 2025.10.25.)
- [39] 산업통상자원부, 공공기관 에너지이용 합리화 추진에 관한 규정 제11조 제2항, <https://www.law.go.kr/LSW//admRulLsInfoP.do?admRulId=38850&efYd=0>, 2025.10.24. // (Ministry of Trade, Industry and Energy, Regulations on the Promotion of Rationalization of Energy Use in Public Institutions, Article 11, Paragraph 2, <https://www.law.go.kr/LSW//admRulLsInfoP.do?admRulId=38850&efYd=0>, 2025.10.24.)
- [40] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook: Fundamentals 2017. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.
- [41] 한국에너지공단, 건축물 에너지효율등급 인증제도, <https://www.energy.or.kr/front/conts/105002002002000.do>, 2025.10.24. // (Korea Energy Agency, Building Energy Efficiency Rating Certification System., <https://www.energy.or.kr/front/conts/105002002002000.do>, 2025.10.24.)
- [42] 국토교통부, 제로에너지건축물 등급 산정 기준(ZEB 등급별 에너지자립률), https://zeb.energy.or.kr/BC/BC03/BC03_05_002.do, 2025.10.25. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Zero Energy Building Certification Criteria (Energy Autonomy Rates by ZEB Grade), https://zeb.energy.or.kr/BC/BC03/BC03_05_002.do, 2025.10.25.)