



## 진공복층창의 Low-E 코팅 조합에 따른 단위공간 실측 및 중규모 사무용 건물 연간 냉·난방 부하 평가

### Full-Scale Unit-Space Measurements and Annual Heating and Cooling Load Evaluation of a Medium Office Building with Different Low-E Coating Configurations of Vacuum Double Glazing

이준영\* · 김동수\*\* · 윤종호\*\*\*

Jun-Young Lee\* · Dong-Su Kim\*\* · Jong-Ho Yoon\*\*\*

\* Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (john1598@naver.com)

\*\* Coauthor, Associate Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (dongsu.kim@hanbat.ac.kr)

\*\*\* Corresponding author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (jhyoon@hanbat.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** Vacuum glazing offers very low U-values with relatively high solar heat gain, which is beneficial for heating-dominated dwellings but may increase cooling loads in office buildings. This study therefore examines how different Low-E coating configurations of vacuum double glazing affect annual heating and cooling loads in a medium-sized office building. **Method:** A full-scale mock-up with three identical test rooms was built at H-University in Daejeon, and an initial test with identical double glazing was conducted to confirm comparable thermal behavior among the rooms. Three glazing types (a proposed dual-Low-E double vacuum glazing, a dual-Low-E triple glazing, and a commercial single-Low-E double vacuum glazing) were then installed and monitored. U-values and SHGCs derived from WINDOW 7.8 were applied to an EnergyPlus model calibrated to measured indoor air and window surface temperatures in accordance with ASHRAE Guideline 14, and the calibrated glazing models were implemented in the ASHRAE Medium Office prototype (Daejeon TMY3) to evaluate annual loads of the second-floor north and south perimeter zones. **Result:** Compared with conventional double glazing, the high-performance glazing systems achieved approximately 10 to 20% annual load reduction in the north zone and up to about 30% reduction in the south zone, indicating that a balanced design of U-value and SHGC through appropriate Low-E coating configurations is essential when applying vacuum glazing to cooling-sensitive office buildings.

#### KEYWORD

진공 복층창  
Low-E 코팅  
Energyplus 시뮬레이션  
연간 냉난방 부하Vacuum Insulating Glazing  
Low-E Coating Arrangement  
Energyplus Simulation  
Annual Heating and Cooling Loads

#### ACCEPTANCE INFO

Received Nov. 27, 2025

Final revision received Dec. 5, 2025

Accepted Dec. 11, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구 배경

최근 10여 년간 진공유리는 전 세계 건물 외피 기술 분야에서 고단열 창호의 핵심 기술로 주목받고 있으며[1], 특히 한국은 소재 기술 개발, 제조 장비 국산화, 그리고 실증 인프라 구축을 통한 상용화에 중점을 두고 활발한 연구 및 개발을 진행하고 있다[2]. 진공유리는 두 유리 사이의 공간을 진공 상태로 유지하여 전도 및 대류에 의한 열전달을 원천적으로 차단함으로써, 기존 복층유리나 삼중유리에 비해 매우 낮은 열관류율(U-value)을 구현할 수 있다[3]. 또한 진공층을 도입하면 창 전체 두께를 줄이면서 중량을 크게 경감할 수 있어, 구조적 부담이 작고 슬림한 단면 설계가 가능하다는 장점을 가진다[4]. 이와 같은 기술적 특성으로 인해 진공유리는 단열 성능과 구조 효율성을 동시에 확보할 수 있는 차세대 고단열 창호로 평가된다[5,6].

진공유리는 높은 단열 성능을 확보함과 동시에 상대적으로 높은 태양열취득계수(Solar Heat Gain Coefficient, SHGC)를 유지할 수

있다는 점에서도 주목받고 있다. 이는 겨울철 외부 일사에 의한 열 획득을 극대화하여 난방 부하를 줄이는 데 유리하며, 한랭기후권이나 난방 중심형 건물에서 특히 높은 에너지 절감 효과를 나타낸다[7,8]. 이러한 특성 덕분에 국내에서는 고단열 리모델링 공동주택, 패시브하우스, 제로에너지주택(Zero Energy Building, ZEB) 등을 중심으로 진공유리 적용이 확산되고 있으며, 정책 연구 및 민간 프로젝트를 통해 복층 및 삼중유리를 대체하는 고단열 창호로 상용화 단계에 진입하고 있다[9].

이와 같은 기술 확산은 건물 부문의 탄소중립 실현과 에너지 절감형 리모델링 시장의 활성화에도 크게 기여하고 있다. 그러나 이러한 기술적 우수성과 시장 확산에도 불구하고, 진공유리의 응용 범위는 여전히 난방 중심형 건물에 집중되어 있다[10,11]. 그 이유는 진공유리가 기본적으로 열손실 억제에 최적화된 기술이기 때문이다. 즉, 낮은 U-value는 동절기 난방 부하 절감에는 매우 효과적이지만, 높은 SHGC로 인해 여름철 냉방 부하가 증가할 가능성이 존재한다. 특히 외피면적 대비 유리 비율이 높은 상업용-공공건물에서는 내부 발열이 크고 냉방 부하가 지배적이기 때문에, 진공유리의 높은 투광성과 열차단 성능이 하절기 과열 문제를 유발할 수 있다. 이 경우 외피

를 통한 복사열 유입량이 증가하고, 외기와와의 열 교환이 억제되어 결과적으로 냉방 에너지 사용량이 증가하는 역효과가 발생할 수 있다. 이러한 현상은 국내외의 일부 실측 사례에서도 보고되고 있으며, 진공유리의 고단열·고투광 특성이 모든 건물 유형에서 에너지 절감으로 직결되지 않음을 보여준다. 결국 진공유리의 단열성능과 태양열 취득 특성 간의 균형적 제어가 건물 유형 및 기후 조건에 따라 달라져야 하며, 이에 대응할 수 있는 새로운 접근이 필요하다는 인식이 확산되고 있다[12].

선행연구에서도 고성능 외피의 단열 강화가 난방 부하 감소에는 긍정적이지만 냉방 부하를 증가시킬 수 있음이 반복적으로 보고되고 있다. Kim et al.[13]은 건축물 에너지절약설계기준 강화 이력에 따른 업무용 건물의 에너지 성능 변화를 분석한 결과, 외피의 U-value가 낮아질수록 난방 부하는 감소하였으나 냉방 부하가 오히려 증가하여 연간 총 에너지 요구량의 절감 효과가 미미하거나 증가하는 결과를 제시하였다. 이처럼 단열 성능의 강화가 항상 전체 에너지 절감으로 이어지는 않으며, 냉·난방 부하 간의 상충 관계를 고려한 균형적 설계가 필요하다.

그럼에도 불구하고 기존 진공유리 관련 연구들은 주로 단열 성능 향상이나 진공층의 기계적 안정성, Low-E 코팅 재료의 방사율 특성 등 기초 물성 중심의 실험적 연구에 집중되어 있으며, 냉방 지배형 건물에서의 SHGC 조절 전략과 그 영향 분석은 상대적으로 부족하다. 즉, 진공유리의 성능을 겨울철 단열 중심에서 하절기 일사 제어 중심으로 확장하여 검증한 연구는 드물며, 특히 실규모 조건에서 측정 데이터와 시뮬레이션 검증을 연계한 정량적 연구는 매우 제한

적이다. 이러한 한계를 고려할 때, 진공유리의 적용 범위를 난방 중심형 주거용 건물에서 냉방 부하가 큰 상업·공공건물로 확장하기 위해서는, 기존의 우수한 단열 성능은 유지하면서 SHGC를 적정 수준으로 제어할 수 있는 설계 기술이 요구된다. 특히 유리의 구조나 진공층 두께를 변경하지 않고 Low-E 코팅의 수와 배치를 조정하여 태양열 취득을 제어하는 방법은 제조 공정을 크게 변경하지 않으면서도 SHGC를 조절할 수 있는 현실적이고 경제적인 대안으로서 잠재력이 크다.

## 1.2. 선행연구 고찰

Shin et al.[14]은 U-value와 SHGC 변화에 따른 주상복합건물의 냉·난방 에너지 소비 패턴을 분석하였다. 그 결과, 외피 단열 성능을 강화하여 U-value를 감소시킬 경우 상업공간의 난방 에너지는 약 63%, 주거공간은 약 71%까지 감소하는 반면, 냉방 에너지는 상업공간에서 약 30%, 주거공간에서 약 58% 증가하는 것으로 보고하였다. 한편 SHGC를 단계적으로 낮출 경우, 상업공간에서는 난방 에너지가 약 6~18% 증가하고 냉방 에너지는 5~12% 감소하였으며, 주거공간에서는 난방이 9~25% 증가하고 냉방이 약 12~24% 감소하는 것으로 분석하였다. 이 연구는 U-value와 SHGC가 건물 용도에 따라 냉·난방 에너지에 상반된 영향을 미칠 수 있음을 정량적으로 제시한다는 점에서 의의가 있다. Kwak et al.[15]은 창호 성능 요소에 대한 민감도 분석을 통해, 공동주택의 경우 창호 등급(주로 U-value 및 기밀성)에 따른 총 에너지 사용량의 변화가 크게 나타나

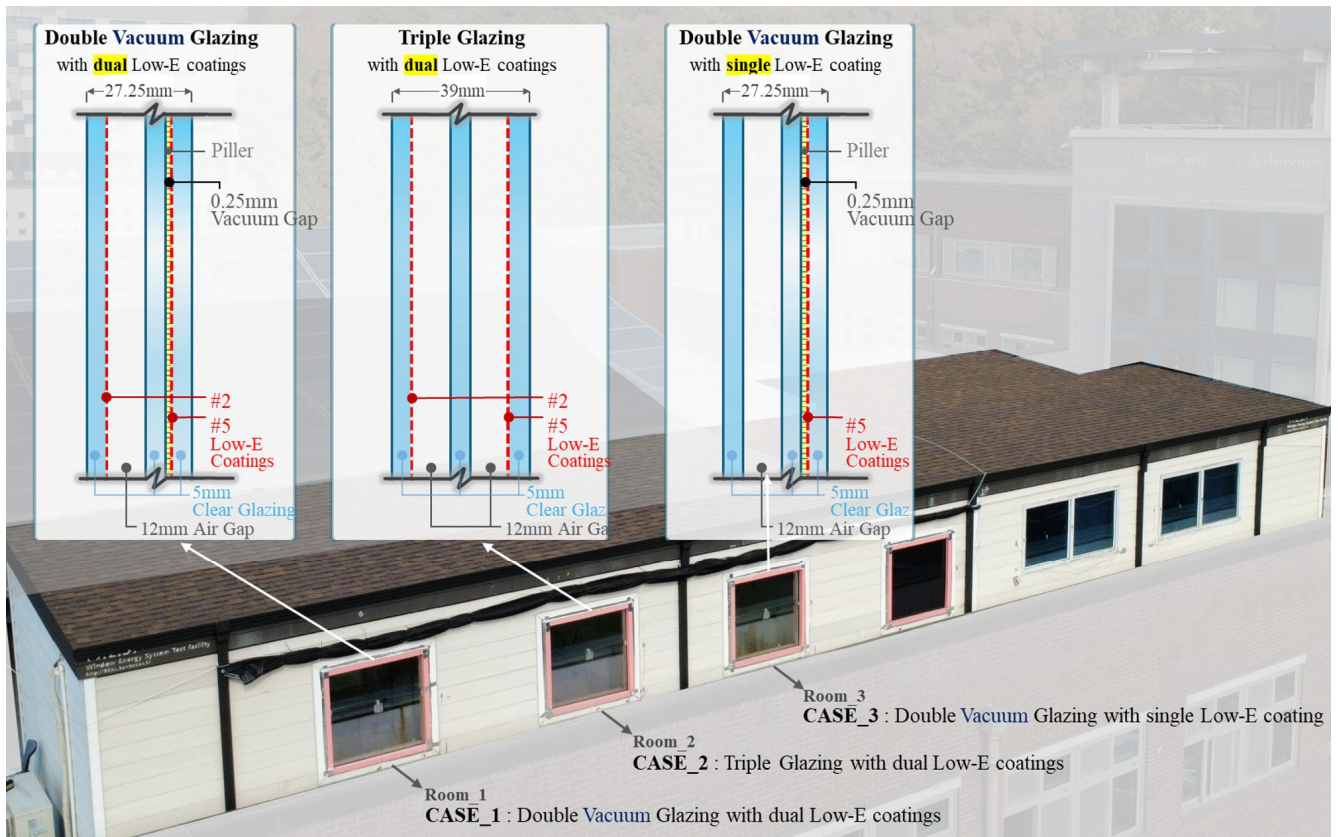


Fig. 1. Glazing configurations and detailed specifications of the three test rooms (case A, B, and C)

는 반면, 업무시설의 경우 SHGC 변화에 대한 민감도가 더 크게 나타난다고 보고하였다. Piccolo and Simone[16]과 Rezaei et al.[17] 역시 지역 기후 특성과 냉·난방 부하 비중에 따라 적정 SHGC 수준이 달라져야 함을 강조하였으며, 특히 냉방 부하가 지배적인 온난 기후에서는 SHGC를 0.4 이하로 낮춘 설계가 필수적이라고 제안하였다. 이러한 선행연구들은 SHGC가 높은 진공유리 창호가 하절기 냉방 측면에서 불리하게 작용할 수 있음을 시사하며, Low-E 코팅 등을 활용한 SHGC 조절 기술의 도입 필요성을 뒷받침한다.

### 1.3. 연구 목적 및 범위

본 연구의 목적은 진공유리의 U-value는 유지하면서, Low-E 코팅 조합을 통해 SHGC를 조절하여, 그에 따른 열적 거동 및 연간 냉·난방 에너지 성능 변화를 정량적으로 규명하는 데 있다. 이를 위해 Low-E 코팅의 수와 배치를 변수로 한 여러 창호 조합을 대상으로, 실규모 단위공간과 중규모 사무용 건물 수준에서 냉·난방 부하를 비교·분석하였다.

연구의 범위는 다음과 같다. 첫째, 대전에 위치한 H-대학교 옥상에 설치된 실규모 단위공간(Unit Space)을 대상으로, 세 가지 창호 조합(기존 고성능 삼중유리, 기존 진공유리, SHGC 조절형 진공유리)을 적용하여 하절기 실내 온도 및 냉방 에너지 특성을 실측하고, 이를 기반으로 EnergyPlus v22.2 모델을 구축·검증한다. 둘째, 실측을 통해 신뢰성이 확보된 창호 성능값(U-value, SHGC)을 ASHRAE 90.1 Medium Office 프로토타입 건물에 적용하여, 대전 지역 기후 조건에서 연간 냉·난방 부하를 시뮬레이션한다. 셋째, 이 과정을 통해 서로 다른 U-value-SHGC 조합을 갖는 창호 사양이 냉방 지배형 사무용 건물에서 어떤 에너지 절감 효과를 가지는지 비교·평가함으로써, 진공유리의 적용 대상을 난방 중심형 주거건물에서 냉방 중심형 상업·공공건물로 확장할 수 있는 가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 연구 개요

### 2.1. 진공창 특성 정보

본 연구에서는 진공창의 U-value는 크게 변화시키지 않으면서, 냉방 측면에서 불리하게 작용하는 높은 SHGC를 저감하기 위해 Low-E 코팅을 추가하는 방식을 적용하였다. 이를 통해, 충전제가 모두 공기로 구성된 기존 양면 Low-E 코팅 삼중창과 현재 상용화된 Low-E 단면 코팅 진공창을 비교 대상으로 설정하고, 제안하는 Low-E 코팅 조합 진공창과의 실측 및 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 각 창호의 상세 레이어 구성 및 설치 전경은 Fig. 1.에 제시하였다.

진공창은 진공층을 통해 전도 및 대류에 의한 열전달을 차단하여 U-value를 크게 낮출 수 있으며, Low-E 코팅의 수와 배치에 따라 방사율과 SHGC를 조절할 수 있는 특성을 가진다. 이러한 열·광학적 물성의 변화는 건물 용도, 입지, 기후 조건에 따라 연간 냉·난방 부하에 큰 영향을 미치므로, 설계 단계에서 U-value와 SHGC 조합에 따른 열거동 특성을 명확히 파악하는 것이 실제 건물 적용 시 에너지 절감 효과를 예측하기 위한 기초 단계라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 실험에 적용된 세 가지 창호 조합과

Table 1. Comparison of thermal and optical properties of window systems by room

Window	U-value [W/m <sup>2</sup> ·K]	SC	SHGC	Rel. Ht. Gain [W/m <sup>2</sup> ]	Tvis	Keff [W/m·K]
1	0.515	0.400	0.348	257	0.551	0.0154
2	0.939	0.421	0.366	273	0.551	0.0438
3	0.590	0.488	0.425	313	0.625	0.0178
Ref.	2.716	0.827	0.720	544	0.79	0.1098

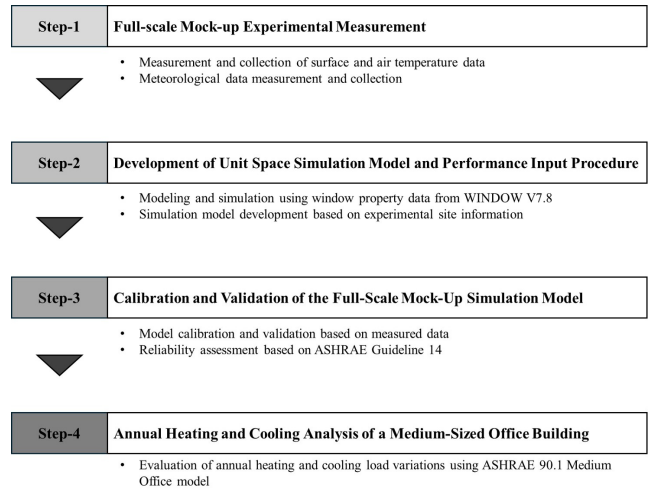


Fig. 2. Flowchart of the research procedure

Reference창으로 설정한 Low-E 코팅이 없는 복층창(5mm CL+12mm Air+5mm CL)에 대해 LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)에서 개발한 창호 열·광 성능 해석 프로그램인 WINDOW 7.8을 활용하여 사전 시뮬레이션을 수행하였다. 도출된 U-value, SHGC 등의 성능 지표는 Table 1.에 정리하였으며, 이후 하절기 실내 열거동 실측 및 냉난방 부하 비교 시뮬레이션 분석의 입력값 및 기준값으로 활용하였다.

### 2.2. 연구 방법

본 연구는 실규모 단위공간에서 획득한 실험 데이터를 활용하여 시뮬레이션 모델의 신뢰성을 확보한 뒤, 이를 중규모 사무용 건물 규모로 확장하여 연간 냉·난방 부하 변화를 평가하는 단계적 방법론으로 수행하였다.

연구의 전체 절차는 Fig. 2.에 제시된 바와 같이 1) 단위공간 실측, 2) 단위공간 시뮬레이션 모델 구축, 3) 실측 기반 시뮬레이션 보정 및 검증, 4) 중규모 사무용 건물 시뮬레이션의 네 단계로 구성된다. 이후 각 단계에서 창호 조합별 열거동 특성과 에너지 성능을 순차적으로 분석함으로써, 진공창의 U-value·SHGC 조합이 건물 규모에서의 에너지 성능에 미치는 영향을 검토하였다.

#### 1) 단위공간 실측

본 실험은 대한민국 대전광역시에 위치한 H-대학교(위도 36.35°, 경도 127.30°) 옥상 창호 실험시설에서 수행되었다. 실험시설의 개

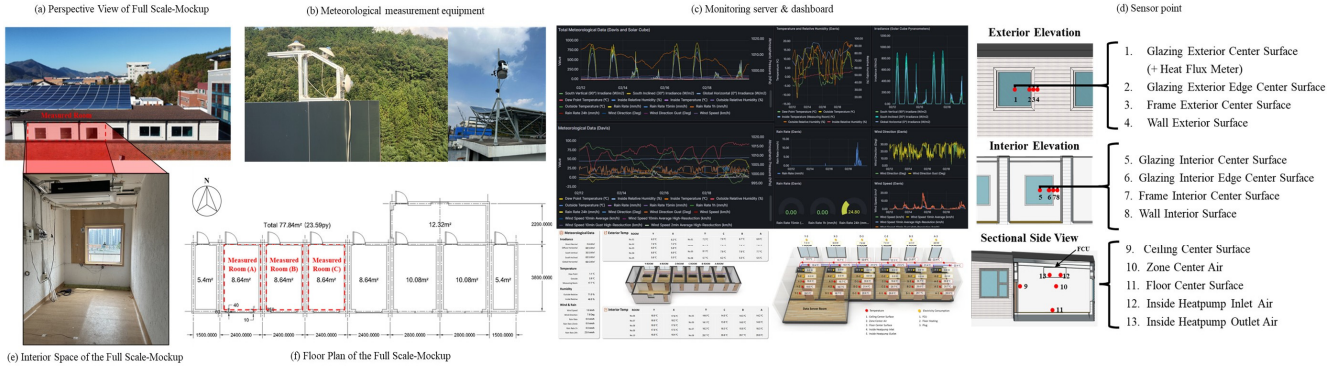


Fig. 3. Full-scale mock-up facility, monitoring system, and sensor layout

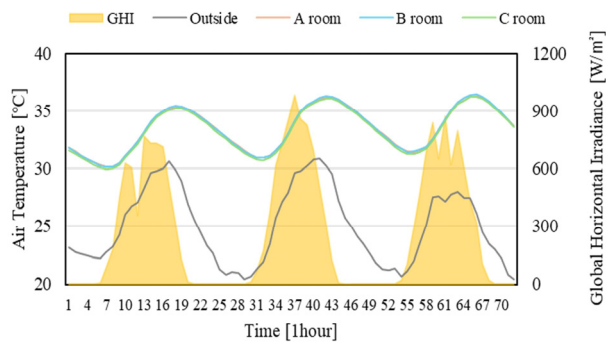


Fig. 4. Hourly indoor air temperature of each chamber (initial condition - thermal environment)

략도는 Fig. 3.에 제시된다. 본 실험시설의 내부 크기는 5.5m × 2.4m × 2.3m (길이 × 너비 × 높이)이며, 실의 남측에 바닥으로부터 0.8m 높이에 1.0m × 1.0m 크기의 창이 설치되어 있다. 외피는 220mm 두께의 SIP (Structural Insulated Panel)로 구성되어 있어, 벽체의 단열 성능이 우수하게 확보된 상태에서 창호 성능 차이를 정량적으로 분석할 수 있는 조건을 확보하였다.

표면 및 공기 온도를 측정하고 열 환경을 평가하기 위해, Fig. 3. d)와 같이 각 실마다 13개에 T-type 열전대(Thermocouple Wire)를 설치하였다. 또한 외부 기상조건을 Fig. 3. b)와 같은 장비를 통해 수집하여 Fig. 3. c)와 같이 실시간으로 중앙 모니터링 서버에 1초 간격으로 자동 저장되었다. 수집된 데이터는 서버에서 시각화 및 전처리 과정을 거쳐 1시간 단위 평균 데이터셋으로 변환한 뒤 열 환경 분

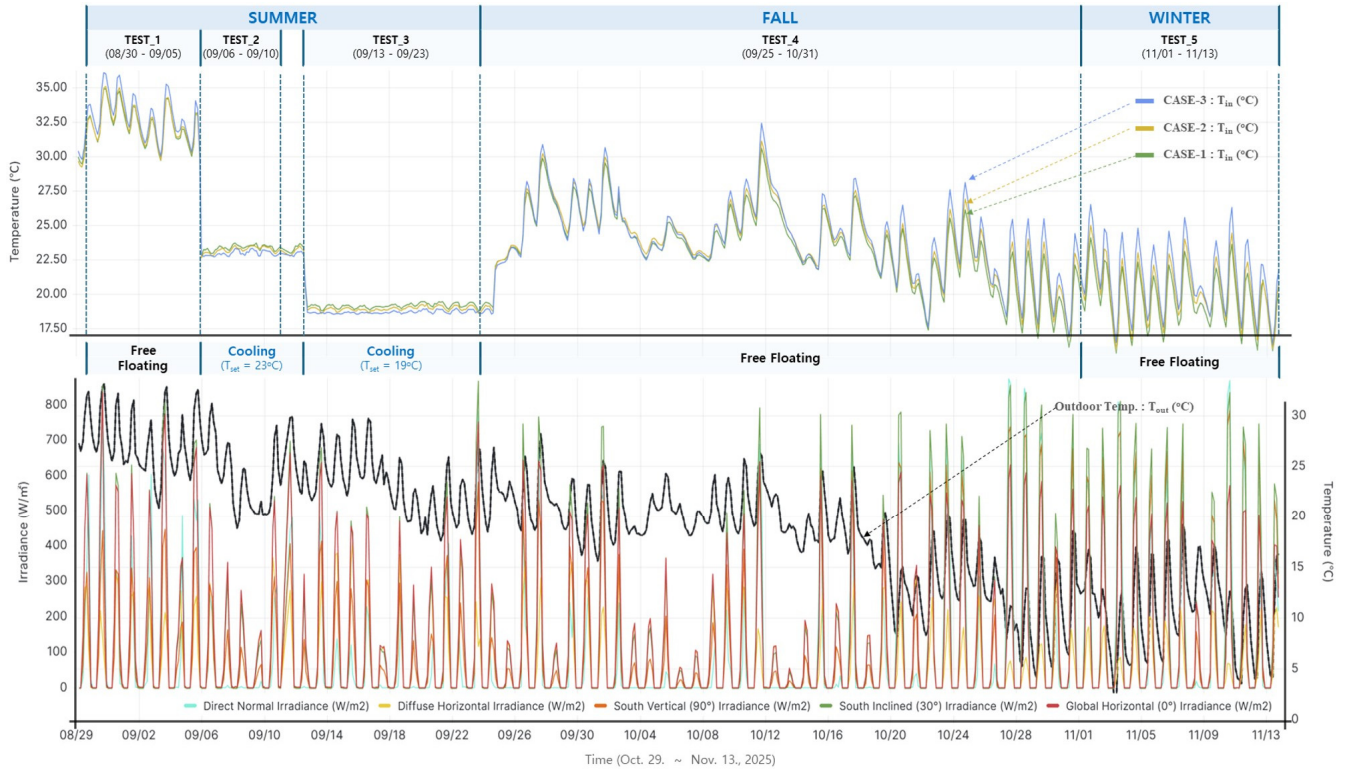


Fig. 5. Seasonal variation of outdoor and room air temperatures during the measurement period

석에 활용되었다.

본격적인 창호 비교 실험에 앞서, 세 실험실 간 열적 동일성을 검증하기 위해 세 실 모두에 동일한 일반 복층창을 설치한 상태에서 초기조건 실험을 수행하였다. Fig. 4.는 3일간의 초기조건 실험 동안 측정된 각 실의 실내 공기온도 변화를 보여주며, 세 실의 최대 온도 차이는 약 0.23℃ 이내로 나타나 열응답 특성이 거의 동일함을 확인하였다. 이를 통해 세 실험실이 창호 종류를 제외하고는 동등한 열적 조건을 갖는 것으로 판단하였으며, 이후 창호 교체에 따른 열 환경을 비교·해석하는 데 있어 실험의 신뢰성을 확보하였다. 실험 기간은 2025년 8월 29일부터 11월 13일까지 총 76일이며, 이 기간을 5개의 기간으로 분류하고 본 연구에서는 냉방을 작동시키지 않은 Test 1, 4, 5를 통해 온열 환경 분석을 수행하였다. 각 기간의 구분 기준과 해당 기간의 기상조건은 Fig. 5.에 제시된다.

2) 단위공간 시뮬레이션 모델 구축 및 성능입력 절차

본 실험시설의 기하학적 형상과 구성 자재의 물성값은 실제 도면을 기반으로 정리하였으며, 이를 바탕으로 건물 에너지 동적해석 프로그램인 EnergyPlus v22.2를 이용해 단위공간 모델을 구축하였다. 모델은 실험실의 실제 치수(5.5m×2.4m×2.3m)와 창문 위치, 외피 재료 구성, 방위조건 등을 동일하게 반영하여, 실험환경의 열적 거동을 재현할 수 있도록 구현하였다. 그러나 EnergyPlus는 진공층 내의 전도 및 대류의 억제와 같은 열전달을 직접적으로 모사할 수 없다는 한계가 존재한다. 이에 위에 2.1장에서 WINDOW를 통해 도출된 각 창호의 성능값을 EnergyPlus의 Window Material: Simple Glazing System으로 모델링하여 건물의 냉·난방 부하를 정량적으로 해석하였다. 이러한 접근법은 진공유리의 열전달 메커니즘을 직접 계산하기보다는 성능값을 활용하여 냉·난방 부하 변화를 분석하는데 초점을 둔다. 이를 통해 창호 구성별 열적 특성이 실제 건물 부하에 미치는 영향을 정량적으로 비교할 수 있도록 하였다.

3) 실측 기반 시뮬레이션 보정 및 검증

단위 공간의 시뮬레이션 모델은 실측 데이터를 기반으로 보정 및 신뢰성 검증을 수행하였다. 검증 과정에서는 EnergyPlus 예측값과 실측값 간의 오차를 정량적으로 평가하기 위해, ASHRAE Guideline

14에서 제시하는 두 가지 통계적 지표인 CV (RMSE)(Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error)와 NMBE (Normalized Mean Bias Error)를 적용하였다. 두 지표는 각각 평균 편향 오차와 평균 제곱근 오차의 변동 계수를 의미하며, 아래의 (Eq. 1), (Eq. 2)에 의해 산출된다.

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-p)}}{\bar{y}} \tag{Eq. 1}$$

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{(n-p) \times \bar{y}} \tag{Eq. 2}$$

여기서,  $y_i$ 는 실측 값,  $\hat{y}_i$  시뮬레이션 값,  $\bar{y}$  실측값의 평균,  $n$  데이터 개수,  $p$  자유도 또는 회귀변수 개수를 말한다.

시뮬레이션 모델이 시간 단위 데이터에 대해 NMBE ±10%, CV(RMSE) ±30% 이하일 경우 신뢰할 수 있는 수준으로 판단한다. 이를 통해 진공창의 시뮬레이션 모델의 신뢰성을 확보하였다.

4) 중규모 사무용 건물 시뮬레이션

단위공간에서 실측 기반 보정을 통해 신뢰성을 확보한 창호 성능값은 중규모 사무용 건물의 에너지 성능 평가에 확장 적용하였다. 이를 위해 ASHRAE에서 제시하는 표준 프로토타입 건물인 Medium-sized Office 모델을 분석 대상으로 선정하고, EnergyPlus v22.2를 이용해 연간 냉·난방 부하 해석을 수행하였다. 건물의 기본 구성은 ASHRAE 90.1 Prototype 설정을 따르되, 본 연구에서는 Fig. 6.과 같이 일사의 영향을 크게 받는 남측과 상대적으로 작은 북측의 2층 Zone을 구분하여 결과를 분석하였다. 이를 통해 서로 다른 U-value 및 SHGC 조합을 갖는 각 창호 사례가 대표적인 사무용 건물의 연간 냉·난방 부하에 미치는 상대적 영향을 평가하고, 특히 일반 복층창 대비 고성능 삼중창 및 진공창의 에너지 절감 잠재력을 정량적으로 비교·검토하였다.

외피 조건은 벽체와 지붕의 단열 성능을 Medium Office 기준과

Table 2. Building model parameters for the medium office simulation

Building model parameter		Characteristics	
Building	Envelope	Building type	Commercial
		Zone conditioned floor area	207.34m <sup>2</sup>
		Floor-to-ceiling height	2.8m
		Location	Daejeon, South Korea
		Window-to-wall ratio (WWR)	33%
	U-value	Roof	2.03W/m <sup>2</sup> ·K
		Exterior wall	0.31W/m <sup>2</sup> ·K
		Reference exterior window	2.70W/m <sup>2</sup> ·K (SHGC:0.72)
		Floor	1.89W/m <sup>2</sup> ·K
		Zone thermostat setpoint temperature	Cooling: 26°C Heating: 20°C Period: Annual
	Internal gains	People density	18.58 persons
		Light	6.89W/m <sup>2</sup>
Electric equipment		8.07W/m <sup>2</sup>	

동일하게 유지하고, 외부창만 본 연구에서 산출한 네 가지 창호 조합 (일반 복층창, 양면 Low-E 삼중창, 기존 단면 Low-E 진공복층창, 제안형 Low-E 추가 코팅 진공복층창)으로 교체하였다. 시뮬레이션은 대전 지역의 표준 기상 데이터인 TMY3 (Typical Meteorological Year)을 사용하여 수행하였으며, 각 창호 조합에 따른 연간 냉·난방 부하 변화를 비교·평가하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1. 단위공간 실측 결과

세 챔버가 동일한 열적 조건을 만족하는지를 검증하기 위해 먼저 3일간 초기조건 실험을 수행하였다. 이때는 모든 챔버에 동일한 기존 복층창을 설치한 상태에서 운전하였으며, Fig. 6.은 실험 기간 동안의 외기 온도와 수평면 일사량(Global Horizontal Irradiance, GHI)에 따른 각 챔버 실내 공기온도의 변화를 1시간 간격으로 나타낸 것이다. 실험 결과, 세 챔버의 온도 응답은 시간에 따라 거의 동일한 경향을 보였고, 챔버 간 온도 차이는 T-type 열전대의 허용 오차 범위( $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 이내에서 수렴하여 단위공간 간 열적 조건이 균일하게 형성되었음을 확인하였다.

초기조건 실험을 통해 각 챔버의 열적 특성이 동등함을 확인한 이후, 세 챔버의 기존 복층창을 탈거하고 Fig. 1.에 제시된 서로 다른 삼중창 조합을 각각 설치하였다. 이후 Fig. 3.에서 제시된 대표적인 세 구간(Test 1, Test 4, Test 5)에 대한 실내 공기온도 분포를 Box-plot으로 정리한 결과가 Fig. 7.에 제시되어 있다. 실험 결과, Test 1의 경

우 세 챔버의 공기온도는 A room, B room, C room 순으로 온도가 증가하는 경향이 나타났다. Test 4와 Test 5에서도 동일한 순서가 유지되며, 각 시험 구간마다 A room과 C room 간 평균값 차이는 대략  $1^{\circ}\text{C}$  정도로 유지되어 창호 조합에 따른 열취득 정도의 차이가 일정하게 반복되는 것을 확인할 수 있다.

또한 외기 온도의 박스플롯의 폭이 실내에 비해 상대적으로 크게 나타나는 반면, 각 챔버의 온도 분포는 보다 좁은 범위에 집중되어 있어, 외부 기상 변화에 비해 실내 온도는 완충된 거동을 보인다. 그럼에도 불구하고 챔버 C는 세 시험 구간 모두에서 가장 높은 중앙값과 상한값을 나타내어 태양열 취득량이 가장 큰 조합으로, 반대로 챔버 A와 B는 가장 낮은 온도 분포를 보여 상대적으로 일사 유입이 억제된 조합임을 시사한다.

종합하면, 초기조건 실험을 통해 세 챔버의 열적 조건이 동등함을 확인한 뒤, 서로 다른 창호 조합 적용 시 실내 온도 수준과 분포에 일관된 차이가 발생함을 확인하였다. 이는 단위공간 실험이 창호별 태양열 취득 특성 및 냉방 부하 차이를 비교하기에 적절한 시험 환경을 제공하며, 이후 시뮬레이션 모델 보정 및 건물 규모 에너지 해석에 사용될 수 있는 유의미한 실측 데이터임을 보여준다.

#### 3.2. 시뮬레이션 결과

EnergyPlus v22.2를 이용해 구축한 단위공간 시뮬레이션 모델과 진공창 성능의 신뢰성을 검증하기 위해, 실내 공기온도와 창 내측 표면온도를 ASHRAE Guideline 14에서 제시하는 통계 지표인 CV (RMSE)와 NMBE를 기준으로 평가하였다. 검증 구간은 ① 모든실에 동일한 일반 복층창을 설치한 초기조건(Initial Condition), ② 하절기 실험 구간인 Test 1, ③ 중간기 및 동절기 조건으로 분류되는 Test 4·5의 세 단계로 구분하였다. 각 구간에 대한 검증 결과는 Table 3.에 제시된다.

초기조건 구간의 경우, 세 개의 실의 공기온도와 표면온도에 대한 CV (RMSE)는 약 2.8~4.4%, NMBE는  $-0.4\sim 4.0\%$  범위로 나타나, 실험 챔버 간 열적 조건이 균일하게 형성되었을 뿐 아니라 시뮬레이션 모델이 초기 상태의 열거동을 안정적으로 재현하고 있음을 보여준다. 진공창과 삼중창을 적용한 하절기 조건에 해당하는 Test 1에서는 공기온도 기준 CV (RMSE)가 약 4.6~7.7%, 표면온도가

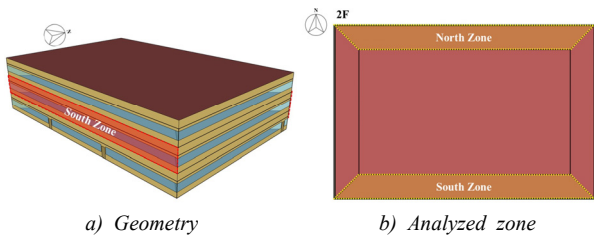


Fig. 6. Geometry and analyzed north/south zones

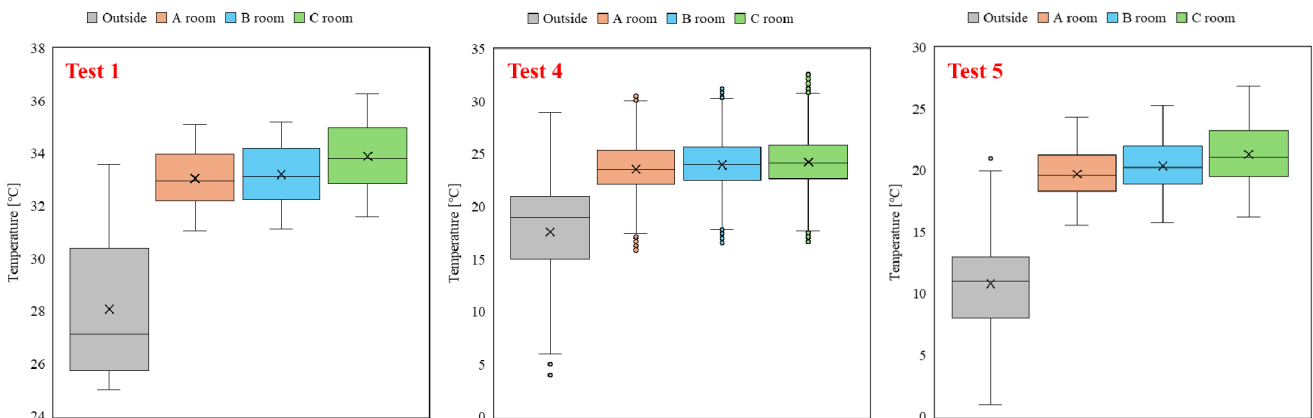


Fig. 7. Box plots of outdoor and room air temperatures for outdoor experimental Test 1, Test 4, and Test 5

Table 3. CV (RMSE) and NMBE of indoor air and surface temperatures for model calibration

	Room	Parameter	CV (RMSE)	NMBE
Initial condition	A	Air	3.02%	1.13%
		Surface	3.41%	0.94%
	B	Air	4.41%	4.02%
		Surface	3.14%	1.90%
	C	Air	2.81%	0.40%
		Surface	4.30%	1.19%
Test 1	A	Air	7.29%	-4.93%
		Surface	6.60%	-2.81%
	B	Air	5.19%	-1.62%
		Surface	6.53%	0.24%
	C	Air	7.68%	-5.42%
		Surface	6.53%	-1.39%
Test 4,5	A	Air	0.11%	-0.06%
		Surface	10.84%	3.24%
	B	Air	0.09%	-0.01%
		Surface	11.09%	-2.36%
	C	Air	13.18%	-7.97%
		Surface	13.62%	1.82%

(RMSE)가 각각  $\pm 10\%$ ,  $30\%$  이하로 유지되어 ASHRAE Guideline 14에서 제시하는 신뢰성 기준을 만족하였다. 따라서 본 연구에서 구축한 단위공간 시뮬레이션 모델과 창호 물성치는 실측 데이터를 정량적으로 재현할 수 있는 수준의 신뢰성을 확보한 것으로 판단되며, 이후 단위공간 부하 분석 및 중규모 사무용 건물 시뮬레이션에 적용 가능한 검증된 입력값으로 활용하였다.

### 3.3. 중규모 사무용 건물 시뮬레이션 결과

#### 1) 북측 Zone 냉·난방 부하 특성 결과

Fig. 8.은 Table 1.에서 제시한 네 가지 창호 조건을 Medium Office 적용하고, 연간 냉·난방 부하 시뮬레이션을 수행한 결과를 보여준다. 북측 Zone은 일사 유입이 상대적으로 작은 방향으로, 네 가지 창호 조합 모두에서 냉방 부하가 지배적으로 분석되었다. 일반 복층창(Reference)을 적용한 경우 연간 냉방 부하는 9,772kWh, 난방 부하는 1,441kWh로 총 11,213kWh의 부하가 발생하였다. 이에 비해 Window 1~3을 적용할 경우, 연간 총 부하는 각각 9,376kWh (Window 1), 8,937kWh (Window 2), 10,005kWh (Window 3)로 감소하여, Reference 대비 각각 약 16.4%, 20.3%, 10.8%의 저감 효과를 보였다.

창호 교체에 따른 난방 부하는 1,441kWh에서 69~252kWh 수준으로 최대 95% 이상 크게 감소한 반면, 냉방 부하는 Reference 대비 Window 1과 2에서는 각각 약 4.8%, 11.1% 감소한 반면, Window 3에서는 약 2% 증가하는 경향을 보였다. 북측과 같이 일사 유입이 제한적인 방향에서는 전반적으로 SHGC 변화에 따른 냉방 부하 차이가 크지 않고, U-value 개선에 따른 난방 부하 감소가 연간 부하 저감의 주된 요인으로 작용한다. 다만 Window 1은 U-value를 개선하면서 SHGC도 함께 낮춘 조합으로, 난방 부하는 크게 줄이면서 냉방 부하 역시 소폭 감소시켜 단열과 일사취득의 균형 측면에서 가장 안정적인 성능을 보였다. 반대로 Window 3는 U-value는 낮지만 SHGC가 상대적으로 높아, 주간에 유입된 일사와 내부 발열이 외피를 통해 충분히 방출되지 못하고 실내에 축열되는 경향이 커지며, 이로 인해 냉방 기간 동안 냉방 부하가 오히려 약간 증가한 것으로 해석할 수 있다.

#### 2) 남측 Zone 냉·난방 부하 특성 결과

남측 Zone은 일사가 집중되는 방향으로, 창호의 SHGC 조합 차이가 냉방 부하에 직접적으로 반영된다. Reference 창호 적용 시 연간 냉방 부하는 22,469kWh, 난방 부하는 1,038kWh로 총 23,507kWh의 부하가 발생하였으며, 북측에 비해 냉방 부하 비중이 매우 큰 전형적인 냉방 지배형 패턴을 보였다. 고성능 창호 적용 시 연간 총 부하는 Window 1에서 16,340kWh, Window 2에서 15,816 kWh, Window 3에서 18,449kWh로 감소하여, Reference 대비 각각 약 30.5%, 32.7%, 21.5%의 저감 효과를 나타냈다. 남측에서도 난방 부하는 세 창호 모두에서 40~163kWh 수준으로 줄어들어 Reference 대비 84~96%의 높은 저감률을 보였으나, 절대값이 매우 작기 때문에 연간 총 부하 변화에 미치는 영향은 제한적이다. 반면 냉방 부하는 Reference 대비 Window 1과 Window 2에서 각

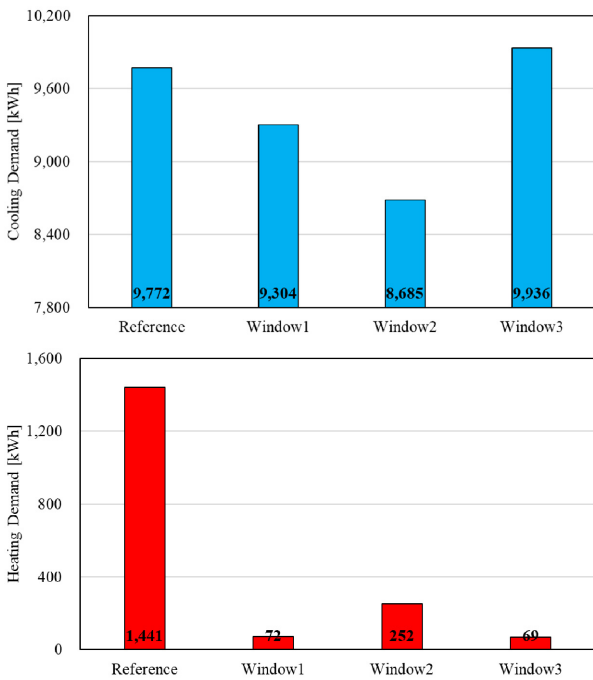


Fig. 8. Comparison of annual heating and cooling thermal loads in the north zone for different window types

약 6.5~7.7% 수준으로 증가하였으나, NMBE는  $-5.4\sim 2.0\%$  범위에 머물러 시간별 편차는 다소 존재하더라도 전체적인 평균 편향은 작게 유지되는 것으로 나타났다. 중간기·동절기 조건(Test 4·5)의 공기온도 CV (RMSE)는 최대 약 13% 수준, 표면온도는 약 11~14% 범위로 평가되었으며, NMBE는  $-8.0\sim 3.2\%$ 로 모두  $\pm 10\%$  이내에 수렴하였다. 즉, 첫 검증 구간에서 챔버의 신뢰성을 확보하고 두 번째 세 번째 구간에서 창의 시뮬레이션 물성치에 대한 신뢰성을 확보하였다. 모든 구간에서 시간 단위 데이터에 대한 NMBE와 CV

각 약 27~30%, Window 3에서도 약 18% 감소하여, 남측과 같이 고일사 방향에서는 SHGC 저감에 따른 일사취득 감소가 냉방 부하 및 연간 총 부하 저감의 결정적인 요인으로 작용함을 확인할 수 있다. 특히 Window 1은 진공복층 구조를 유지하면서 SHGC를 효과적으로 낮춘 조합으로, 냉방 지배적인 남측에서도 일반 복층창 대비 큰 폭의 냉방 부하 저감 효과를 보였다. 종합하면, 북측과 같이 일사 영향이 작은 방향에서는 U-value 개선에 따른 난방 부하 저감 효과가 우세한 반면, 남측과 같이 고일사 방향에서는 SHGC 수준이 냉방 부하를 좌우하는 핵심 설계 변수로 작용한다. 따라서 진공복층창과 고성능 삼중창의 U-value와 SHGC 조합을 방향별로 적절히 설계할

경우, 일반 복층창 대비 연간 냉·난방 부하는 북측에서 약 10~20%, 남측에서 약 20~33%까지 저감될 수 있다. 특히 Window 1과 같이 SHGC를 조정된 진공복층창은, 냉방 지배형 사무용 건물에서도 충분히 유의미한 에너지 절감 잠재력을 가지는 창호 대안임을 시뮬레이션을 통해 정량적으로 확인하였다.

3) 창 표면을 통한 주·야간 열 유입 및 손실 특성 분석

본 시뮬레이션은 진공복층창의 U-value와 SHGC 조합이 냉난방 부하에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다. 특히 북측 Zone에서 Window 3을 적용한 경우, 고성능 창호임에도 불구하고 Reference 창 대비 연간 냉방 부하가 약 164kWh 증가하는 결과가 나타났다. 이 현상을 보다 정량적으로 해석하기 위해, 창호를 통한 열류를 외기온도와 실내온도의 관계에 따라  $T_{out} > T_{in}$ ,  $T_{out} < T_{in}$ 으로 구분하고, 다시 주간(09:00-18:00)과 야간(20:00-05:00)으로 세분하여 각 창호의 열 유입(Heat gain)과 열 손실(Heat loss)을 분석하였으며, 결과는 Table 4.에 제시된다.

북측 Zone의 분석 결과, 먼저  $T_{out} > T_{in}$ 인 주간에는 네 가지 창호 모두에서 일사 및 열전달에 의한 열 유입이 발생하나, Window 1과 2는 Reference 대비 열 유입량을 크게 줄이는 반면, Window 3는 그 중간 수준에 머무르는 것으로 나타났다. 반대로  $T_{out} < T_{in}$ 인 주간-야간 구간에서는 Reference 창은 상당한 열 손실이 발생하여 실내에서 외부로 열이 적극적으로 방출되는 데 비해, 고단열 특성을 가진 Window 1·2·3에서는 열 손실량이 Reference의 일부 수준으로 크게 감소하였다. 특히 몇 구간에서는 Window 3의 야간 열 손실이 가장 낮아, 낮 동안 유입된 일사 및 내부 발열이 외기 온도가 낮은 시간대에도 창을 통해 충분히 방출되지 못하고 실내에 잔류하는 경향이 두드러졌다. 이러한 열류 특성은 북측 Zone에서 Window 3의 연간 냉방 부하가 Reference 창보다 소폭 증가한 결과를 뒷받침한다.

남측 Zone에서는 일사의 영향이 더욱 크게 나타난다.  $T_{out} > T_{in}$ 인 주간에 Reference 창은 북측 대비 훨씬 큰 열 유입을 보였으며, Window 1과 2는 이를 거의 절반 수준까지 강하게 억제하는 반면, Window 3는 여전히 비교적 큰 열 유입을 유지하였다.  $T_{out} <$

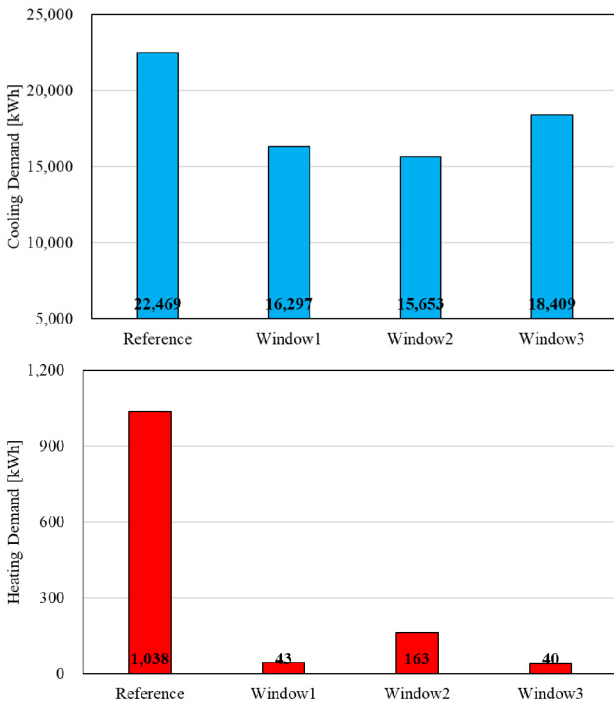


Fig. 9. Comparison of annual heating and cooling thermal loads in the south zone for different window types

Table 4. Heat gain and loss through windows in north and south zones by  $T_{out}-T_{in}$  and time of day

		North															
		$T_{out} > T_{in}$								$T_{out} < T_{in}$							
		Day				Night				Day				Night			
Heat (kWh)	Window	Window				Window				Window				Window			
		Ref	1	2	3	Ref	1	2	3	Ref	1	2	3	Ref	1	2	3
Gain		4070.73	2048.40	2148.58	2494.47	1.91	1.45	1.37	1.33	6634.34	4594.05	4017.50	5670.84	18.64	13.20	11.34	16.37
Loss		0.00	0.00	0.00	0.00	23.16	2.49	6.65	3.31	2001.63	254.63	662.80	28.83	7446.08	1756.32	3083.06	2013.91
		South															
		$T_{out} > T_{in}$								$T_{out} < T_{in}$							
		Day				Night				Day				Night			
Heat (kWh)	Window	Window				Window				Window				Window			
		Ref	1	2	3	Ref	1	2	3	Ref	1	2	3	Ref	1	2	3
Gain		6466.16	3223.60	3386.52	3937.60	10.55	7.6	6.94	7.81	3031.285	1655.225	1643.185	2040.856	0.00	0.00	0.00	0.00
Loss		0.00	0.00	0.00	0.00	26.56	2.64	7.33	3.59	1218.70	168.02	404.48	190.49	6825.37	1620.63	2835.91	1858.53

T<sub>in</sub> 구간에서는 북측과 마찬가지로 고단열 창호의 열 손실이 Reference에 비해 크게 감소하지만, 남측 Zone은 전체적으로 냉방 지배형이므로 야간 열 손실 감소에 따른 난방 이득보다는 주간 열 유입 감소에 따른 냉방 절감 효과가 연간 부하를 좌우한다. 따라서 남측에서는 Reference대비 Window3이 냉방부하를 효과적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 실규모 단위공간 실측과 WINDOW - EnergyPlus 연계 해석을 통해, 진공복층창의 Low-E 코팅 조합에 따른 U-value와 SHGC 변화가 냉방 지배형 사무용 건물의 연간 냉·난방 부하에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 단위공간 모형은 ASHRAE Guideline 14의 NMBE·CV (RMSE) 기준을 만족하도록 보정되었으며, 서로 다른 SHGC 조합에 따라 실내 온도 수준과 일변화 패턴이 일관되게 달라지는 것을 통해 창호 모델의 신뢰성을 확보하였다.

ASHRAE Medium Office 2층 북측·남측 Zone에 네 가지 창호 조합을 적용한 결과, 일반 복층창 대비 고성능 삼중창과 진공복층창 모두에서 연간 냉·난방 부하가 감소하였다. 북측과 같이 일사 영향이 작은 방향에서는 U-value 개선에 따른 난방 부하 감소가 지배적이어서, 고성능 삼중창과 진공복층창의 연간 총 부하는 복층창 대비 약 10~20% 감소하였다. 추가로 창호를 통한 주·야간 열 유입·손실을 분석한 결과, 특히 Window 3의 경우 높은 단열성능으로 야간 열 손실이 크게 억제되면서 낮 동안 유입된 일사가 실내에 축열되어, 북측에서 냉방 부하가 소폭 증가하는 현상을 확인하였다. 이에 비해 남측과 같이 고일사 방향에서는 SHGC가 냉방 부하를 좌우하는 주요 인자로 작용하여, Low-E 코팅을 추가 적용해 SHGC를 더 낮춘 Window 1과 Window 2가 연간 총 부하를 약 20~30% 수준까지 저감하였으며, 특히 Window 1은 기존 단일 Low-E 진공복층창(Window 3)보다 냉방 에너지 측면에서 더 우수한 성능을 보였다.

종합하면, 진공복층창은 Low-E 코팅 수와 배치를 적절히 조합하여 SHGC를 제어할 경우, 냉방 지배형 사무용 건물에서도 고성능 삼중창과 유사한 수준의 연간 냉·난방 부하를 달성할 수 있으며, 그중에서도 제안형 진공복층창(Window 1)은 에너지 성능을 유지하면서도 진공층을 활용한 슬림한 단면과 경량화라는 장점을 동시에 확보하는 실용적인 대안임을 확인하였다. 다만 본 연구는 하나의 기준 건물(ASHRAE Medium Office)을 대상으로 한 결론론적 시뮬레이션에 기반하고 있어, 실증평가와 달리 오차·이상값을 충분히 통계적으로 검증하지 못한 한계가 있다. 또한 본 연구의 결과 해석은 주간 태양열 취득과 실내·외 온도 차에 따른 열관류 손실 변화를 중심으로 제시되어 해당 메커니즘이 실제 실규모 조건에서도 동일하게 재현되는지에 대한 실험적 규명이 필요하다. 향후 연구에서는 기후·건물 유형·장면적비를 확장한 다중 시나리오 및 민감도 분석과 함께, 창 표면 온도 및 열류 계측 기반의 실규모 실증을 병행하여 제안형 진공복층창의 적용 범위와 설계 한계를 보다 체계적으로 규명할 필요가 있다.

#### Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “월드클래스 플러스(R&D, P0024373)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00266248, 건물형 태양광산업 생태계 대응 전문 인력 양성).

#### References

- [1] E. Cuce, P.M. Cuce, Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 2016, pp.1345-1357.
- [2] 이보경, 백선욱, 이연수, KCC, ‘2022년 반딧불 하우스’ 업무 협약 체결 / 이진창호, 고성능 ‘SUPER 진공유리’ 제안 / 시그니파이코리아, 스마트 조명 ‘위즈’ 출시, *The Living*, 2022. p.127. // (B.G. Lee, S.U. Baek, Y.S. Lee, KCC signs an MOU for ‘2022 Firefly House’ / Eagon Window proposes high-performance ‘SUPER vacuum glass’ / Signify Korea launches smart lighting ‘WiZ’, *The Living*, 2022, p.127.)
- [3] J. Peng et al., Excellent insulation vacuum glazing for low-carbon buildings: fabrication, modeling, and evaluation, *Engineering*, 53, 2024, pp.18-39.
- [4] R.E. Collins, T.M. Simko, Current status of the science and technology of vacuum glazing, *Solar Energy* 62(3), 1998, pp.189-213.
- [5] Y. Lyu et al., Experimental and numerical performance investigation of a water-flow window with vacuum-glazing insulation, *Solar Energy*, 233 2022, pp.259-270.
- [6] A. Ghosh, B. Norton, A. Duffy, Measured thermal & daylight performance of an evacuated glazing using an outdoor test cell, *Applied energy*, 177, 2016, pp.196-203.
- [7] X. Li, Y. Wu, A review of complex window-glazing systems for building energy saving and daylight comfort: Glazing technologies and their building performance prediction, *Journal of Building Physics*, 48(4), 2025, pp.496-540.
- [8] Y. Lyu, J. Xiang, H. Samuelson, Carbon reductions through optimized solar heat gain glass properties considering future climate and grid emissions: Case study of Chicago’s residential buildings, *Energy and Buildings*, 327, 2025, 115080.
- [9] 김선근, 권순옥, 기축건물의 제로 에너지 하우스 구축을 통한 설계 및 운영 최적 방안에 관한 연구, 신·재생에너지, 제11권 제1호, 2015, pp. 49-59. <http://doi.org/10.7849/ksnr.2015.03.1.049> // (S.G. Kim, S.W. Kwon, The study of optimum method about the design and operating through a zero-energy house built in the existing building, *New & Renewable Energy*, 11(1), 2015, pp.49-59. <http://doi.org/10.7849/ksnr.2015.03.1.049>)
- [10] 장철용, 김치훈, 이나은, 초단열 진공창의 공동주택 건물에너지효율등급 적용 연구, 한국태양에너지학회 학술대회논문집, 2010, pp.96-101. // (C.Y. Jang, C.H. Kim, N.E. Lee, A study on the vacuum glazing applied to the building energy efficiency rating of apartment, Korea: *Conference Journal of KSES*, 2010, pp.96-101.)
- [11] 조수 외 5인, 진공창호 융복합 외피 시스템의 난방성능 분석, 한국: 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2010, pp.192-197. // (S. Cho et al., Heating performance analysis of convergent system of vacuum window envelopes, Korea: *Conference Journal of SAREK*, 2010, pp.192-197.)
- [12] Y. Tan et al., Numerical heat transfer modeling and climate adaptation analysis of vacuum-photovoltaic glazing, *Applied Energy*, 312, 2022, 118747.
- [13] 김지혜 외 4인, 건축물의 에너지절약설계기준 강화에 따른 업무용 건물의 에너지성능 개선 효과, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제14권 제1호, 2020, pp.101-111. // (J.H. Kim et al., Improvement in energy performance of office buildings according to the evolution of building energy code, *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 14(1), 2020, pp.101-111.)
- [14] 신재규 외 3인, SHGC와 U-Value의 상관관계에 따른 주상복합건물의 에너지 소비 패턴에 관한 연구, 한국: 대한설비공학회

- 학술발표대회논문집, 2011, pp.695-698. // (J.G. Shin et al., A study on the energy consumption patterns according to correlation of SHGC and U-value in commercial-residential buildings, Korea: Conference Journal of SAREK, 2011, pp.695-698.)
- [15] 광희정 외 4인, 창호 에너지 소비 효율 등급제와 건물 에너지 소비의 상관관계 분석, 설비공학논문집, 제25권 제6호, 2013, pp.338-345. // (H.J. Kwak et al., Correlation analysis between fenestration energy consumption efficiency rating system and building energy consumption, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 25(6), 2013, pp.338-345.)
- [16] A. Piccolo, F. Simone, Performance requirements for electrochromic smart window, Journal of Building Engineering, 3, 2015, pp.94-103. <https://doi.org/10.1016/j.job.2015.07.002>
- [17] S.D. Rezaei, S. Shannigrahi, S. Ramakrishna, A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment, Solar Energy Materials and Solar Cells, 159, 2017, pp.26-51. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026>