KIEAE Journal, Vol. 26, No. 5, Oct. 2026, pp.87-95.

Check for updates

KIEAE Journal

Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

141

공동주택 단위세대의 실측 운영정보 및 침기율 적용에 따른 동절기 난방에너지 분석

Analysis of Winter Heating Energy Simulation in an Apartment Dwelling Unit Considering Measured Operational Information and Infiltration Rate

양승원* · 최슬건** · 박두용***

Seung Won Yang* · Sul-Geon Choi** · Doo Yong Park***

* *Graduate Student, Dept. of Building Equipment System & Fire Protection Engineering, Chungwoon Univ., Incheon, South Korea (emfprhs231@naver.com)*

** *Coauthor, Professor, Dept. of Architecture Design, Ansan Univ., Ansan, South Korea (sulgeon@ansan.ac.kr)*

*** *Corresponding author, Professor, Dept. of Building Equipment System & Fire Protection Engineering, Chungwoon Univ., Incheon, South Korea (pdy0528@chungwoon.ac.kr)*

ABSTRACT

Purpose: This study analyzes the effects of measured operational information and infiltration conditions on simulated winter heating energy in an apartment dwelling unit and evaluates model prediction performance against actual heating energy data. **Method:** A third-floor dwelling unit in a five-story apartment building in Ansan, Korea, was modeled using EnergyPlus Version 8.9. Heating loads were calculated using ZoneHVAC for January, February, November, and December. Simulation cases were developed by applying smart-plug-based equipment-load data, heating-operation conditions derived from actual boiler settings, and infiltration rates of 0.15, 0.50, 0.70, and 1.00 ACH. A combined case applying both measured equipment loads and actual heating operation was also evaluated. Model performance was assessed using MBE and Cv(RMSE). **Result:** Measured equipment-load conditions changed monthly heating energy by only 0.70%~1.26% compared with the base model, whereas actual heating-operation conditions increased heating energy by 11.39%~26.31%. Heating energy increased consistently with infiltration rate in all analyzed months. The combined case yielded an MBE of -0.77% and a Cv(RMSE) of 19.74%. Although overall prediction bias was reduced, monthly discrepancies remained. These results indicate that measured operational information can substantially affect heating-energy predictions, while further refinement of physical and operational input conditions is required to reduce monthly prediction errors.

KEYWORD

공동주택
건물에너지 시뮬레이션
보정
에너지플러스
실측 자료

Apartment Building
Building Energy Simulation
Calibration
EnergyPlus
Measured Data

ACCEPTANCE INFO

Received Sep. 3, 2026
Final revision received Oct. 7, 2026
Accepted Oct. 13, 2026

ⓒ 2026. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

건물에너지 시뮬레이션은 건축물의 설계단계에서 에너지성능을 예측하거나 대안별 성능을 비교하기 위한 방법으로 널리 활용되어 왔다. 최근에는 설계단계뿐만 아니라 실제 운영 중인 건축물의 에너지사용 특성을 분석하고, 운영조건에 따른 에너지성능 차이를 검토하는 데에도 활용되고 있다. 시뮬레이션을 이용하면 건물 외피, 내부발열, 공조 및 난방조건 등 개별 요소가 냉·난방에너지에 미치는 영향을 동일한 조건에서 비교할 수 있다는 장점이 있다.

그러나 실제 운영 중인 건물의 에너지사용량을 재현하는 경우에는 입력자료의 정확성이 중요한 문제로 작용한다. 동일한 건물 형상과 외피조건을 적용하더라도 재실시간, 가전기기 사용, 냉·난방 설정온도와 설비 운전시간 등의 조건에 따라 계산결과가 달라질 수 있기 때문이다. 특히 공동주택은 설계조건이 유사한 세대 사이에서도 거주자의 생활방식과 난방사용 특성이 서로 다를 수 있어 표준화된 운영조건만으로 실제 에너지사용 특성을 표현하는 데 한계가 있다.

실제 건물의 에너지모델을 보정하기 위한 연구에서도 이러한 입력조건의 문제가 지속적으로 다루어져 왔다. Raftery et al.[1]은 모델의 결과를 실제 사용량에 맞추기 위해 입력값을 임의로 조정하기보다 도면, 현장조사 및 계측자료와 같이 확인 가능한 정보를 이용하는 evidence-based calibration 방법을 제안하였다. Coakley et al.[2]은 기존 건물에너지 모델 보정 연구를 검토하여 상세 입력자료의 부족과 입력변수의 불확실성이 모델 보정과정의 주요 문제임을 제시하였다. 또한 여러 입력변수를 동시에 조정할 경우 실측값과 시뮬레이션값의 차이는 감소할 수 있으나, 개별 입력조건이 결과변화에 미치는 영향을 구분하기 어려울 수 있다.

공동주택을 대상으로 실제 난방사용 특성과 시뮬레이션 결과를 비교한 연구도 수행되어 왔다. Kim and Park[3]은 공동주택의 난방에너지 소비특성과 시뮬레이션 결과를 분석하였으며, Lee et al.[4]은 공동주택의 건축적 특성과 에너지사용 특성을 기반으로 에너지모델을 구축하고 보정하였다. Oh et al.[5]은 스마트 온도조절기와 스마트미터에서 확보한 자료를 건물에너지 시뮬레이션에 적용하여 실제 HVAC 운전정보가 모델 결과에 미치는 영향을 검토하였다. 이러한 연구들은 실제 건물의 에너지사용을 모사할 때 건물 자체의 물리적 조건뿐만 아니라 실제 운영정보의 반영이 필요함을 보여준다.

침기조건도 동절기 난방에너지 계산에서 불확실성이 큰 입력요소이다. Yoon et al.[6]은 EnergyPlus 모델에서 침기와 운영스케줄

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2026.26.5.087

등의 부하요소 변화가 건물에너지사용량에 미치는 영향을 분석하였으며, Lozinsky and Touchie[7]는 다세대 주거건물의 기밀성능 측정자료를 이용하여 침기조건을 보정했을 때 모델 성능이 어떻게 변화하는지를 검토하였다. 실제 건물의 침기는 외피의 기밀성능뿐만 아니라 실내외 온도차와 풍압 등의 영향을 받으므로 현장측정자료가 없는 상태에서 하나의 값을 실제 침기율로 확정하기 어렵다.

내부발열 역시 주거건물 에너지모델의 주요 입력요소이다. 가전기기의 전력사용은 실내 열취득으로 작용하기 때문에 기기의 사용량과 시간대별 사용패턴에 따라 난방부하가 달라질 수 있다. Lee et al.[8]은 주거건물의 플러그부하 및 조명조건 변화에 따른 에너지소비 차이를 분석하였다. 본 연구의 선행연구[9]에서는 동일한 대상세대에서 실제 사용 중인 가전기기의 전력사용 특성을 파악하기 위해 스마트플러그 측정을 수행하였다. 총 16종의 가전기기를 대상으로 15일간 1시간 단위로 전력사용량을 측정하였으며, 이를 바탕으로 시간대별 기기부하 프로파일과 기기발열밀도를 산정하였다.

난방운전조건 역시 표준 스케줄과 실제 거주자의 운전방식 사이에 차이가 발생할 수 있다. 공동주택의 개별난방에서는 설정온도뿐만 아니라 예약운전이나 간헐운전 등 거주자의 조작방식에 따라 실제 난방이 이루어지는 시간과 조건이 달라질 수 있다. 따라서 일정한 난방설정온도를 적용하는 것만으로는 실제 세대의 난방운전 특성을 충분히 반영하기 어려울 수 있다.

기존 연구를 종합하면 내부발열, 실제 냉·난방운전 및 침기조건은 실제 건축물의 에너지모델을 구성할 때 중요하게 고려할 필요가 있다. 다만 실제 거주 중인 동일 공동주택 단위세대를 대상으로 하나의 기준모델을 구축한 후 실측 기기발열조건, 실제 난방운전조건 및 침기율을 각각 독립적으로 변화시켜 동절기 월별 난방에너지의 변화를 비교한 연구는 상대적으로 제한적이다.

이에 본 연구에서는 경기도 안산시에 위치한 공동주택 단위세대를 대상으로 EnergyPlus Version 8.9 기반 난방에너지 모델을 구축하였다. 기준 입력조건을 적용한 모델을 바탕으로 스마트플러그 측정자료를 이용한 기기발열조건, 실제 가스보일러 조작상태를 기반으로 구성한 난방운전조건 및 서로 다른 침기율을 각각 적용하여 월별 난방에너지 변화를 분석하였다. 분석기간은 1월, 2월, 11월 및 12월로 설정하였다. 마지막으로 실측 기기발열조건과 실제 난방운전조건을 함께 적용한 모델을 실제 난방에너지 기준값과 비교하고 MBE 및 Cv(RMSE)를 이용하여 모델 예측성능의 변화를 검토하였으며 연구 흐름도는 Fig 1.과 같다.

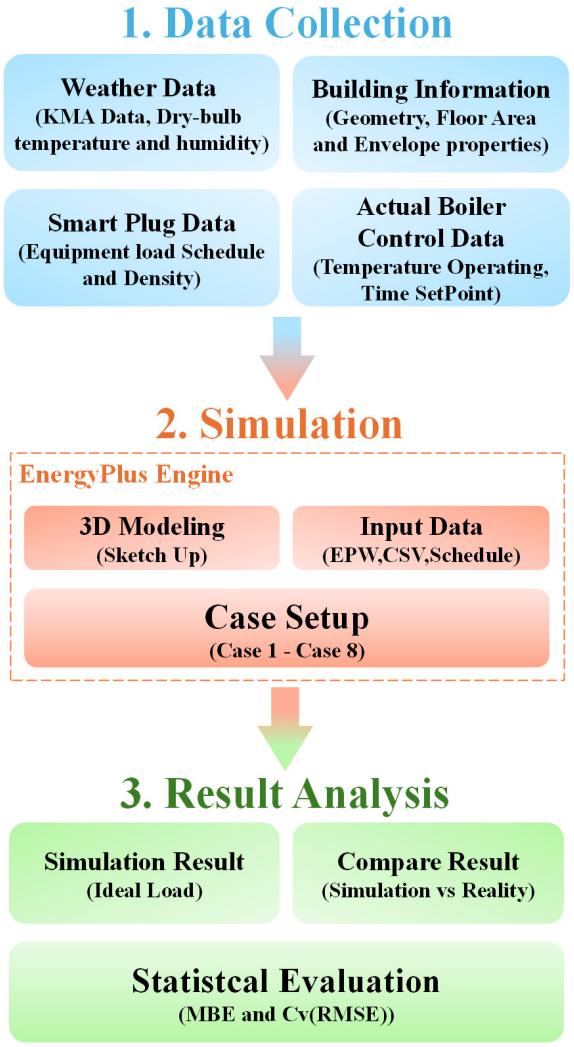


Fig. 1. Research framework of the heating energy simulation and evaluation



Fig. 2. Location of the analyzed dwelling in the apartment building

2. 연구 대상 및 방법론

2.1. 대상건물 및 시뮬레이션 모델링

연구대상은 경기도 안산시에 위치한 철근콘크리트 구조의 공동주택으로 Fig. 2.와 같다. 해당 건물은 2014년에 준공된 지상 5층 규모의 건물로 1층은 필로티, 2~5층은 주거층으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 전체 건물 가운데 3층에 위치한 한 개 단위세대를 분석대상으로 선정하였다. 대상 세대는 Fig. 3.과 같으며 상부와 하부에 각각 다른 주거세대가 위치하는 중간층 세대이다.

대상 세대 면적은 59.95m^{2}이며 시뮬레이션에서 실제 난방대상 공간으로 적용한 면적은 53.12m^{2}이다. 세대 내부는 Fig. 3.과 같이 거실, 주침실, 침실 1, 침실 2, 주방, 욕실 및 발코니로 구성되어 있다. 모델링 과정에서는 실제 난방이 이루어지는 실내공간을 중심으로 열적 공간을 구성하였으며, 외기에 접하는 외벽 및 창호와 상·하부 및 측면의 인접세대에 해당하는 경계조건을 구분하여 적용하였다.

대상 세대의 주요 조건은 Table 1.과 같다.

난방에너지 분석에는 EnergyPlus Version 8.9를 이용하였다. 대상건물의 외피성능은 현장 열관류율 측정자료가 확보되지 않아 준공시점을 고려하여 건축물의 에너지절약설계기준 법령 [12]에 근거한 값을 적용하였다. 외벽의 열관류율은 0.270W/m^2·K, 창호는 1.500W/m^2·K, 바닥은 0.810W/m^2·K로 설정하였다.

이들 값은 실제 준공 이후 대상세대에서 측정한 열관류율이 아니라 설계기준에 근거한 값이다. 따라서 실제 시공상태나 장기간 사용에 따른 단열성능 변화, 국부적인 열교와 같은 요소까지 직접 반영한 것은 아니다. 본 연구에서는 외피성능을 조정하여 실제값에 맞추는 방식보다 동일한 외피조건을 유지한 상태에서 운영 및 침기조건 변화에 따른 결과를 비교하였다.

난방부하는 EnergyPlus의 ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem을 이용하여 계산하였다. Ideal Loads는 설정된 실내조건을 만족시키는 데 필요한 난방 또는 냉방부하를 산정하는 방식으로 실제 보일러 구성요소를 상세하게 모델링하지 않고 공간의 열부하를 비교할 수 있다. 난방설정온도는 ThermostatSetpoint:SingleHeating을 이용하여 제어하였다.

본 연구에서는 실제 보일러의 기계적 동작 자체보다 입력조건 변화에 따른 공간난방에너지의 차이를 우선적으로 비교하기 위해 Ideal Loads 방식을 사용하였다. 이에 실제 보일러에서 발생하는 점화와 정지, 난방수 온도 변화 및 부분부하효율 등은 시뮬레이션에서 직접 계산되지 않는다. 이 부분은 실제 난방운전조건을 모델에 적용하고 결과를 해석할 때 고려하였다.

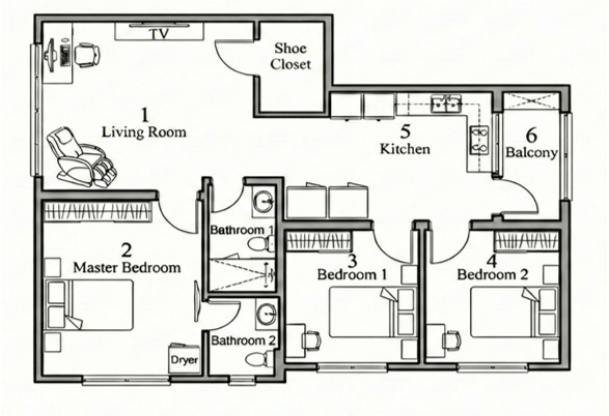


Fig. 3. Floor plan of the analyzed dwelling

Table 1. eneral characteristics of the analyzed dwelling

Item	Description
Location	Ansan-si, Gyeonggi-do
Completion year	2014
Building structure	Reinforced concrete
Building scale	5 floors
Analyzed dwelling	3rd floor
Exclusive floor area	59.95m^2
Heating analysis area	53.12m^2
Ceiling height	2.3m
Heating system	Individual gas boiler

Table 2. Major simulation input conditions

Item	Input condition
Simulation engine	EnergyPlusVersion 8.9
Heating system model	ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem
Thermostat type	Single Heating
Exterior wall U-value	0.270W/m^2·K
Window U-value	1.500W/m^2·K
Floor U-value	0.810W/m^2·K
Heating analysis area	53.12m^2
Reference infiltration	1.00 ACH
Boiler efficiency	92%
Analysis months	Jan, Feb, Nov, Dec

2.2. 시뮬레이션 주요 입력조건

기준모델에서는 공동주택의 재실, 조명 및 기기사용 특성을 표현하기 위해 ASHRAE 90.1 Appendix Schedule D의 Multifamily 스케줄을 적용하였다[11]. 대상세대는 실제 거주 중인 세대로 총 4인이 거주하고 있으나, 스마트플러그 측정기간 동안의 시간대별 재실여부는 별도로 계측하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 재실조건에 따른 영향을 추가적으로 포함하지 않기 위해 Case 간 재실스케줄을 동일하게 유지하였으며, 기기발열조건의 비교에서는 스마트플러그로 측정한 가전기기 전력사용 특성만을 변경하였다. 여기서 침기율은 0.15, 0.50, 0.70 및 1.00 ACH로 설정하여 입력조건 변화에 따른 동절기 난방에너지의 차이를 분석하였다. 선행연구에서는 침기율이 건물에너지 시뮬레이션의 난방에너지 결과에 영향을 미치는 주요 입력요소이며, 실제 공동주택의 침기율은 건물의 기밀성능과 누기경로 등에 따라 불확실성이 큰 것으로 보고되고 있다. 이에 본 연구에서는 대상세대의 침기율을 특정 실제값으로 가정하기보다 침기조건의 변화범위를 설정하여 비교하였으며, 1.00 ACH를 기준모델의 침기조건이자 비교범위의 상한값으로 설정하고 0.15, 0.50 및 0.70 ACH를 추가 비교조건으로 구성하였다.

기기발열조건은 동일한 대상세대에서 수행한 스마트플러그 측정자료를 이용하였다. 측정에는 AI 스마트플러그 16A (PM-B540-W)를 사용하였으며 Fig. 4.와 같다, 정격입력전압은 220V, 최대 허용전류는 16A, 최대 허용용량은 3,520W이다. 실제 사용 중인 냉장고, TV, PC, 통신기기 및 주방가전 등 총 16종의 가전기기를 대상으로 15일 동안 전력사용량을 측정하였으며, 측정자료는 1시간 단위로 정리하였다. Fig. 5.와 같이 실제 사용 중인 냉장고, TV, PC, 통신기기 및 주방가전 등 총 16종의 가전기기를 대상으로 15일 동안 1시간 단위로 전력사용량을 측정하였다. 스마트플러그 측정은 총 15일 동안 수행하였으며, 측정자료를 이용하여 대상세대의 시간대별 기기부하 프로파일을 구성하였다. 측정기간에 따른 부하패턴의 변화를 확인하기 위해 초기 5일 자료와 15일 전체 자료를 비교한 결과, 시간대별 전력사용 패턴에서 유사한 경향이 나타났다. 이에 본 연구에서는 15일 전체 측정자료에서 산정한 기기부하 프로파일을 대상세대의 대표적인 기기사용 패턴으로 가정하여 분석기간에 동일하게 적용하였다. 각 시간대의 가전기기 전력사용량을 합산하여 시간별 부하 프로파일을 구성하고, 최대 전력에 대한 비율로 변환하여 EnergyPlus에서 사용할 Fraction schedule을 작성하였다. 측정기간

ⓒ 2026. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.



Fig. 4. Smart plug used for power measurement (PM-B540-W)



Fig. 5. Representative home appliances measured using smart plugs in the analyzed dwelling

평균전력은 417.65W였으며, 59.95m^{2}를 기준으로 산정한 기기발열밀도는 6.97W/m^{2}이다. 해당 기기발열밀도와 Fraction schedule은 별도의 추가적인 조정 없이 시뮬레이션에 적용하였다.

기기발열은 단순히 최대 부하밀도만으로 결정되는 것이 아니라 하루 중 실제로 기기를 사용하는 시간에 따라 실내로 유입되는 열의 분포가 달라진다. 이에 본 연구에서는 기기발열밀도와 함께 시간대별 Fraction을 적용하였다. Fig. 6.에는 기준모델의 ASHRAE Schedule D와 스마트플러그 측정자료에서 산정한 시간별 Fraction을 비교하여 나타냈다.

실제 난방운전조건은 대상 세대에 설치된 가스보일러 조작패널의 설정상태를 직접 확인하여 구성하였다. 확인 당시 실내 난방설정온도는 26℃이며, 약 2시간 30분 간격으로 30분간 난방이 수행되는 예약운전 기능을 사용하고 있었다. EnergyPlus의 ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem은 실제 가스보일러의 점화 및 정지, 난방수온도 및 부분부하 특성과 같은 동적 거동을 직접적으로 모사하지 않

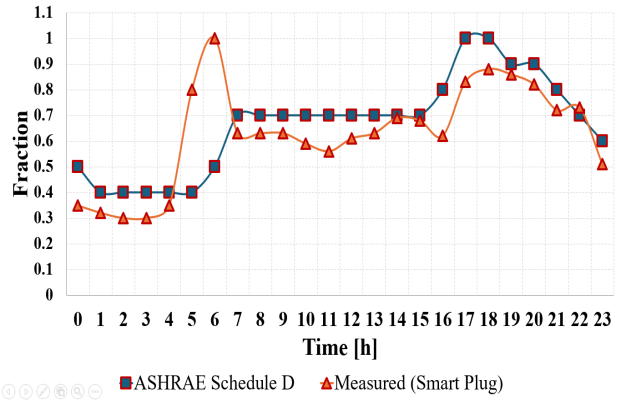


Fig. 6. Comparison of ASHRAE Schedule D and measured equipment-load schedules

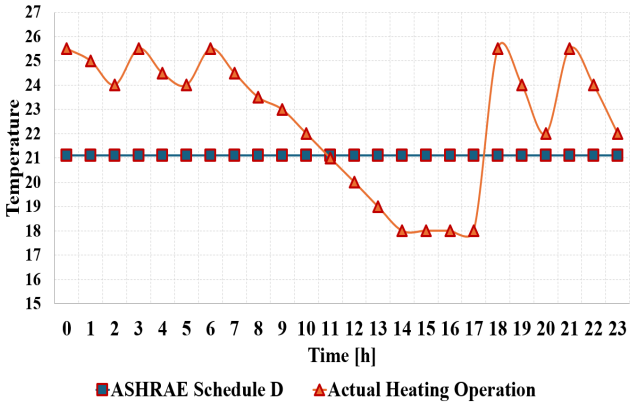


Fig. 7. Comparison of reference and actual heating-operation schedules

으므로, 본 연구에서는 확인된 예약운전조건을 실내 난방설정온도 스케줄로 변환하여 Fig. 7.과 같이 적용하였다.

침기조건은 0.15, 0.50, 0.70 및 1.00 ACH로 설정하여 침기율 변화에 따른 동절기 난방에너지를 분석하였다. KIAEBS C-1:2013에서는 건물의 기밀성능을 50 Pa 압력차 조건에서 ACH50으로 평가하고 있으며, 모든 건물은 5.0 ACH50 이하, 에너지절약건물은 3.0 ACH50 이하의 기밀성능 수준을 제시하고 있다[10].

시뮬레이션에는 2025년 안산지역의 기상조건을 적용하였다. 건구온도, 상대습도, 기압, 풍향 및 풍속은 안산지역 관측자료를 활용하였으며, 일사와 같이 관측자료에서 확보하지 못한 변수는 기존 자료 기반의 EPW 값을 이용하였다. 입력조건 변화에 따른 영향을 동일한 기상조건에서 비교하기 위하여 모든 Case에 동일한 기상자료를 적용하였다.

2.3. Case 구성

기기발열, 난방운전 및 침기율의 영향을 구분하여 살펴보기 위해 Table 3.과 같이 총 7개의 Case를 구성하였다.

Case 1은 다른 Case와 비교하기 위한 기준모델이다. Case 2와 Case 3은 Case 1의 다른 입력조건을 그대로 유지한 상태에서 각각 기기발열과 난방운전조건만 변경하였다.

Table 3. Definition of simulation cases

Case	Equipment load	Heating operation	Infiltration
Case 1	ASHRAE Schedule D	ASHRAE Schedule D	1.0 ACH
Case 2	Measured smart-plug condition	ASHRAE Schedule D	1.0 ACH
Case 3	ASHRAE Schedule D	Actual heating operation	1.0 ACH
Case 4	ASHRAE Schedule D	ASHRAE Schedule D	0.15 ACH
Case 5	ASHRAE Schedule D	ASHRAE Schedule D	0.5 ACH
Case 6	ASHRAE Schedule D	ASHRAE Schedule D	0.7 ACH
Case 7	Measured smart-plug condition	Actual heating operation	1.0 ACH

Table 4. Actual heating energy used for model evaluation

Month	Actual heating energy (kWh/m^2)
Jan	35.0
Feb	48.6
Nov	32.2
Dec	45.7

Case 2에는 스마트플러그로 측정한 기기발열밀도 및 시간별 Fraction을 적용하였다. Case 3에는 기준 기기발열조건을 그대로 유지하고 실제 가스보일러 조작상태를 바탕으로 구성한 난방설정온도 스케줄을 적용하였다.

Case 4~Case 6에서는 기기발열조건과 난방운전조건을 기준모델과 동일하게 유지하고 침기율만 변경하였다. 적용값은 각각 0.15, 0.50, 0.70이다.

Case 7은 실측자료 적용에 따른 최종적인 예측성능 변화를 확인하기 위한 모델로 스마트플러그 기반 기기발열조건과 실제 난방운전조건을 함께 적용하였다. 침기율은 기준값인 1.00 ACH를 유지하였다.

본 연구에서 Case 2, Case 3 및 Case 4~Case 6은 Case 1의 다른 입력조건을 동일하게 유지한 상태에서 하나의 조건만 변경하도록 구성하였다. 이를 통해 기기발열, 난방운전 및 침기율 변화에 따른 월별 난방에너지의 차이를 독립적으로 비교하였다.

2.4. 난방에너지 산정 및 모델 평가방법

우선, 분석기간은 1월, 2월, 11월 및 12월의 동절기 4개월로 설정하였다. EnergyPlus의 ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem에서 산출되는 난방에너지는 공간에 공급되어야 하는 난방부하를 의미한다. 이에 대상 세대에 설치된 가스보일러의 제품 표시효율 92%를 적용하여 식 (1)과 같이 난방에너지를 환산하였다.

$$E_{heating} = \frac{E_{IdealLoads}}{\eta_{boiler}} \quad (1)$$

이때,

$E_{heating}$: 보일러 효율을 고려한 난방에너지 [kWh]

$E_{IdealLoads}$: Ideal Loads 난방에너지 [kWh]

η_{boiler}: 보일러 효율 [–]

본 연구에서는 η_{boiler}=0.92

환산된 월별 난방에너지는 식 (2)와 같이 난방분석면적 53.12m^{2}로 나누어 단위면적당 난방에너지(kWh/m^2)로 산정하였다.

$$E_{heating,A} = \frac{E_{heating}}{A_{heating}} \quad (2)$$

이때,

$E_{heating,A}$: 단위면적당 난방에너지 [kWh/m^2]

$E_{heating}$: 보일러 효율을 고려한 난방에너지 [kWh]

$A_{heating}$: 난방전용면적 [m^2]

본 연구에서는 $A_{heating}$=53.12m^2

각 Case에서 산출된 난방에너지 결과는 대상세대의 실제 난방에너지 기준값과 비교하였다. 분석에 사용한 실제 난방에너지는 1월 35.0, 2월 48.6, 11월 32.2 및 12월 45.7kWh/m^{2}이다.

실제 난방에너지와 시뮬레이션 결과의 차이를 정량적으로 평가하기 위하여 식 (3), 식 (4)의 Mean Bias Error (MBE)와 Coefficient of Variation of Root Mean Square Error (Cv(RMSE))를 이용하였다.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - A_i)}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \times 100 \quad (3)$$

$$Cv(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - A_i)^2}}{\overline{A}} \times 100 \quad (4)$$

본 연구에서는 월별 건물에너지 모델 평가에서 활용되는 |MBE| ≤5% 및 Cv(RMSE)≤15%를 참고기준으로 사용하였다[13]. 다만 본 연구는 연간 12개월 자료가 아닌 동절기 4개월을 대상으로 하므로 해당 기준의 만족 여부를 연간 모델의 완전한 검증으로 해석하지 않고 분석기간 내 Case별 예측성능을 비교하기 위한 참고기준으로 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기기발열조건에 따른 난방에너지 변화

기준모델인 Case 1과 스마트플러그 기반 기기발열조건을 적용한 Case 2를 비교하여 기기발열 입력조건에 따른 월별 난방에너지 변화를 분석하였으며 Fig. 8., Table 5.와 같다.

Case 1의 난방에너지는 1월 42.68kWh/m^2, 2월 35.65kWh/m^2, 11월 21.51kWh/m^2, 12월 39.32kWh/m^{2}로 나타났다. Case 2에서는 각각 42.98kWh/m^2, 35.91kWh/m^2, 21.78kWh/m^2 및 39.62kWh/m^2

ⓒ 2026. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

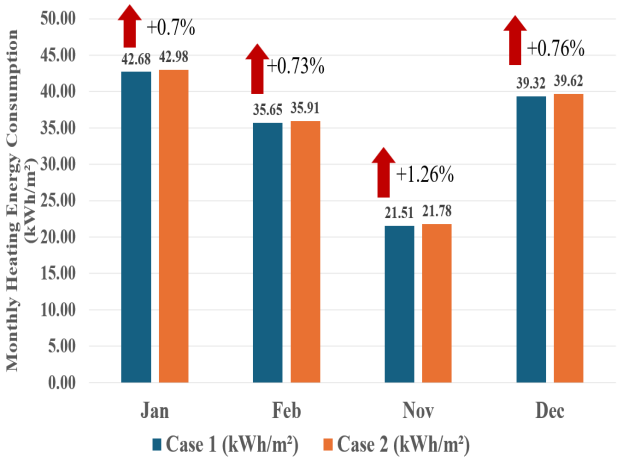


Fig. 8. Comparison of monthly heating energy between Case 1 and Case 2

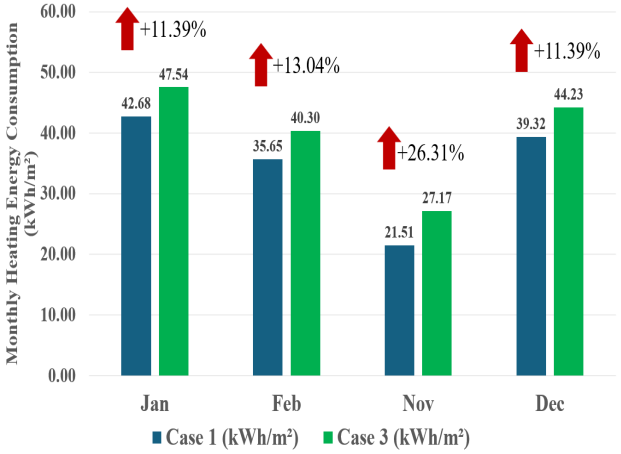


Fig. 9. Comparison of monthly heating energy between Case 1 and Case 3

Table 5. Comparison of monthly heating energy between Case 1and Case 2

Month	Case 1 (kWh/m²)	Case 2 (kWh/m²)	Difference (kWh/m²)	Change (%)
Jan	42.68	42.98	+0.30	+0.70
Feb	35.65	35.91	+0.26	+0.73
Nov	21.51	21.78	+0.27	+1.26
Dec	39.32	39.62	+0.30	+0.76

Table 6. Comparison of monthly heating energy between Case 1 and Case 3

Month	Case 1 (kWh/m²)	Case 3 (kWh/m²)	Difference (kWh/m²)	Change (%)
Jan.	42.68	47.54	+4.86	+11.39
Feb	35.65	40.30	+4.65	+13.04
Nov	21.51	27.17	+5.66	+26.31
Dec	39.32	44.23	+4.91	+12.49

로 나타났다. Case 1에 대한 Case 2의 변화율은 1월 0.70%, 2월 0.73%, 11월 1.26%, 12월 0.76%였다. 절대적인 차이 역시 각 월에서 약 0.26kWh/m^2~0.30kWh/m^2 수준으로 크지 않았다.

실측조건의 기기발열밀도는 6.97W/m^{2}로 기준조건인 6.67W/m^{2}보다 다소 높지만, Case 2의 난방에너지는 오히려 소폭 증가하였다. 이러한 결과는 기기발열밀도뿐만 아니라 시간대별 Fraction schedule이 함께 변경된 점과 관련된 것으로 판단된다. 난방에 필요한 시간대와 가전기기의 실제 사용시간이 일치하는 정도에 따라 내부발열이 난방부하를 상쇄하는 효과가 달라질 수 있으므로 두 발열밀도의 크기만으로 난방에너지의 증가 또는 감소를 설명하기는 어렵다. 또한 ASHRAE 90.1의 기기발열 밀도와 실측 기기발열밀도의 차이가 약 0.30W/m^{2}로 비교적 작다는 점도 결과를 해석할 때 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 Case 2의 결과변화가 작게 나타났다고 해서 주거건물의 기기발열이 일반적으로 난방에너지에 미치는 영향이 작다고 볼 수는 없다. 이는 본 연구에서 비교한 두 기기발열조건 사이의 차이가 제한적인 상황에서 얻어진 결과이다.

3.2. 실제 난방운전조건에 따른 난방에너지 변화

Case 1과 Case 3의 비교를 통해 실제 난방운전조건을 적용했을 때 월별 난방에너지가 어떻게 변화하는지 분석하였으며 Fig. 9., Table 6.과 같다.

Case 3의 난방에너지는 1월 47.54kWh/m^2, 2월 40.3kWh/m^2, 11월 27.17kWh/m^2, 12월 44.23kWh/m^{2}로 나타났다. Case 1과 비교하면 각각 4.86kWh/m^2, 4.65kWh/m^2, 5.66kWh/m^2 및 4.91kWh/m^2 증가한 결과이다.

이를 변화율로 비교하면 1월 11.39%, 2월 13.04%, 11월 26.31%, 12월 12.49% 증가하였다. Case 2의 변화율이 약 1% 내외였던 것과 비교하면 실제 난방운전조건 적용에 따른 월별 변화가 상대적으로 크게 나타났다.

Case 3에서는 대상세대에서 확인한 실내 설정온도와 예약운전 특성을 반영하였다. 기준 난방조건과 비교하여 난방요구가 발생하는 시간과 설정조건이 달라졌으며, 이러한 차이가 난방부하 계산에 직접 반영된 것으로 판단된다. 주거용 건물 모델에서 단순한 설정온도뿐만 아니라 실제 운전시간을 함께 고려할 필요가 있음을 보여주는 결과이다.

11월의 변화율은 26.31%로 나머지 3개월보다 크게 나타났다. 그러나 절대 증가량을 보면 11월은 약 5.66kWh/m^{2}로 1월 4.86kWh/m^2, 2월 4.65kWh/m^2 및 12월 4.91kWh/m^{2}와 크게 벗어나지 않는다. 11월에는 Case 1의 난방에너지 자체가 21.51kWh/m^{2}로 상대적으로 작기 때문에 비슷한 크기의 절대 차이가 발생하더라도 변화율이 크게 계산된 측면이 있다. 따라서 11월 결과를 실제 난방운전조건이 다른 월보다 두 배 이상 큰 영향을 미쳤다고 단순하게 해석하는 것은 적절하지 않다.

3.3. 침기율에 따른 난방에너지 변화

침기율에 따른 난방에너지 변화는 Case 1, Case 4~Case 6을 이용하여 분석하였다. 네 Case는 기기발열과 난방운전조건을 동일하게 유지하고 침기율만 0.15, 0.50, 0.70 및 1.00 ACH로 변경하였으며 결과는 Fig. 10., Table 7.과 같다.

0.15 ACH인 Case 4의 난방에너지는 1월 25.14kWh/m^2, 2월

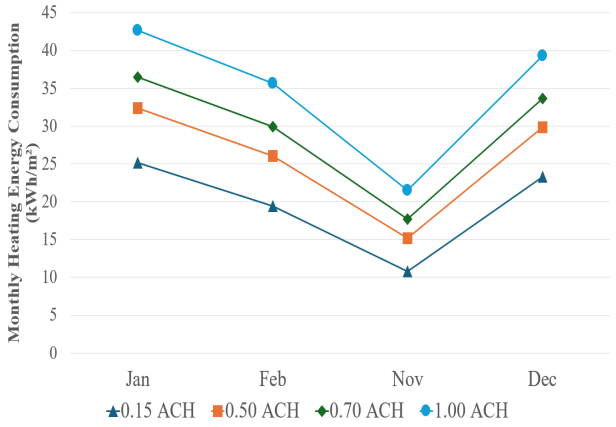


Fig. 10. Monthly heating energy according to infiltration rate

Table 7. Monthly heating energy according to infiltration rate

Case	Infiltration	Jan	Feb	Nov	Dec
Case 1	1.00 ACH	42.68	35.65	21.51	39.32
Case 5	0.50 ACH	32.35	26.06	15.16	29.85
Case 6	0.70 ACH	36.48	29.89	17.69	33.64
Case 4	0.15 ACH	25.14	19.42	10.79	23.26

19.42kWh/m^2, 11월 10.79kWh/m^2, 12월 23.26kWh/m^{2}로 나타났다. 침기율을 0.50 ACH로 설정한 Case 5에서는 각각 32.35, 26.06kWh/m^2, 15.16kWh/m^2 및 29.85kWh/m^{2}로 증가하였다.

0.70 ACH를 적용한 Case 6에서는 1월 36.48kWh/m^2, 2월 29.89kWh/m^2, 11월 17.69kWh/m^2, 12월 33.64kWh/m^{2}로 나타났으며 1.00 ACH를 적용한 Case 1의 난방에너지는 1월 42.68kWh/m^2, 2월 35.65kWh/m^2, 11월 21.51kWh/m^2, 12월 39.32kWh/m^{2}로 나타났다.

Fig. 9.에서와 같이 침기율이 증가함에 따라 난방에너지가 순차적으로 증가하였다. 0.15 ACH와 1.00 ACH 조건의 차이는 1월 17.54kWh/m^2, 2월 16.23kWh/m^2, 11월 10.72kWh/m^2, 12월 16.06kWh/m^{2}로 나타났다.

침기율이 증가하면 난방기간 동안 외부의 차가운 공기가 실내로 유입되는 양이 증가하고, 이를 설정온도까지 가열하기 위한 부하가 추가되므로 난방에너지가 증가한다. 본 연구에서도 이러한 경향이 모든 분석월에서 동일하게 나타났다.

다만 이 결과에서 각 침기율은 대상세대에서 직접 측정한 값이 아니다. 따라서 0.15 ACH 또는 1.00 ACH 중 특정 조건이 대상세대의 실제 기밀성능을 나타낸다고 해석할 수 없다. 본 연구에서 침기율 분석의 목적은 현장측정값을 찾는 것이 아니라 입력값 변화에 따른 난방에너지의 변화 정도를 확인하는 데 있다

3.4. 실제 난방에너지와 모델 예측성능 비교

실제 난방에너지와 시뮬레이션 결과를 비교하기 위해 기준모델인 Case 1과 실측 기기발열조건 및 실제 난방운전조건을 함께 적용한 Case 7의 월별 난방에너지를 분석하였다. Case 1은 표준 입력조건을 적용한 기준모델이며, Case 7은 스마트플러그 측정자료를 기반으로 구성한 기기발열조건과 대상세대에서 확인한 실제 난방운전

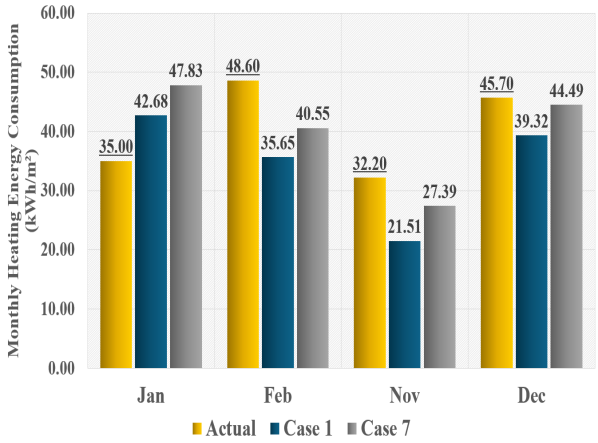


Fig. 11. Comparison of actual heating energy with Case 1 and Case 7

Table 8. Comparison of actual and simulated monthly heating energy

Month	Actual (kWh/m^2)	Case 1 (kWh/m^2)	Case 7 (kWh/m^2)
Jan	35.00	42.68	47.83
Feb	48.60	35.65	40.55
Nov	32.20	21.51	27.39
Dec	45.70	39.32	44.49

조건을 동시에 적용한 모델이다. 따라서 본 절에서는 기준조건을 적용한 모델과 실제 운영정보를 종합적으로 반영한 모델이 실제 난방에너지와 어느 정도 차이를 보이는지 비교하였으며 결과는 Fig. 11., Table 8.과 같다.

실제 난방에너지는 1월 35.00kWh/m^2, 2월 48.60kWh/m^2, 11월 32.20kWh/m^2, 12월 45.70kWh/m^{2}로 나타났다. 기준모델인 Case 1은 각각 42.68kWh/m^2, 35.65kWh/m^2, 21.51kWh/m^2 및 39.32kWh/m^{2}로 나타났으며, 1월에는 실제값보다 높게 예측된 반면 2월, 11월 및 12월에는 실제값보다 낮게 예측되었다. 즉 기준모델에서는 분석월에 따라 과대예측과 과소예측이 서로 다른 방향으로 나타났다.

실측 기기발열조건과 실제 난방운전조건을 함께 적용한 Case 7에서는 1월 47.83kWh/m^2, 2월 40.55kWh/m^2, 11월 27.39kWh/m^2, 12월 44.49kWh/m^{2}로 나타났다. 실제 난방에너지와의 차이는 각각 +12.83kWh/m^2, −8.05kWh/m^2, −4.81kWh/m^2 및 −1.21kWh/m^{2}였다. Case 1과 비교하면 2월, 11월 및 12월에서는 실제값과의 차이가 감소하였으며, 특히 12월은 실제값 45.70kWh/m^{2}에 대해 Case 7이 44.49kWh/m^{2}로 비교적 유사하게 나타났다. 반면 1월에서는 Case 1보다 난방에너지가 증가하면서 실제값과의 차이가 오히려 커졌다. 따라서 실제 운영정보를 적용하더라도 모든 분석월의 오차가 동일한 방향으로 감소하는 것은 아닌 것으로 나타났다.

이러한 실제 난방에너지와 시뮬레이션 결과의 월별 차이는 기기발열조건과 난방운전조건만으로 설명하기 어렵다. 특히 1월에는 대상세대 거주자의 비정기적인 장기 부재로 인해 실제 난방이 충분히 이루어지지 않은 기간이 있었으며, 이로 인해 실제 난방에너지 사용량이 감소했을 가능성이 있다. 한편 본 연구에서 적용한 외피 열관류

ⓒ 2026. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

Table 9. Model evaluation results using MBE and Cv(RMSE)

Case	MBE (%)	Cv(RMSE) (%)
Case 1	-13.83	24.20
Case 2	-13.13	23.83
Case 3	-1.40	19.72
Case 7	-0.77	19.74
Reference criterion (%)	±5	15

율은 현장 측정값이 아닌 준공시기의 설계기준에 근거한 값이며, 침기율 역시 대상세대의 실제 기밀성능을 측정하여 적용한 값이 아니라 시나리오 조건으로 설정하였다. 또한 Ideal Loads 방식을 적용하였기 때문에 실제 가스보일러의 점화 및 정지, 난방수 온도 변화, 열적 관성 및 부분부하 운전에 따른 효율변화는 직접적으로 모사되지 않았다. 따라서 본 연구의 결과는 대상세대의 모든 물리적·설비적 특성을 완전히 재현한 결과라기보다, 확보된 운영정보와 설정한 입력조건의 변화에 따라 월별 난방에너지와 모델 예측성능이 어떻게 변화하는지를 비교한 결과로 해석할 필요가 있다.

또한 본 연구의 난방운전조건은 대상세대의 보일러 조작패널에서 확인한 설정상태를 바탕으로 구성한 것으로, 분석기간 전체의 실제 보일러 가동상태를 연속적으로 측정한 자료는 아니다. 따라서 실제 거주자의 월별 난방운전 변화가 시뮬레이션 스케줄에 모두 반영되었다고 보기는 어렵다.

월별 난방에너지 비교와 함께 각 Case의 예측성능 변화를 정량적으로 검토하기 위해 Case 1, Case 2, Case 3 및 Case 7의 MBE와 Cv(RMSE)를 산정하였으며, 결과를 Table 9.에 나타냈다.

기준모델인 Case 1의 MBE는 −13.83%, Cv(RMSE)는 24.20%로 나타났다. 스마트플러그 기반 기기발열조건만 적용한 Case 2에서는 MBE가 −13.13%, Cv(RMSE)가 23.83%로 나타나 Case 1과 비교하여 두 지표 모두 큰 변화가 없었다. 이는 3.1절에서 확인한 바와 같이 본 연구에서 적용한 기준 기기발열조건과 실측 기기발열조건 사이의 차이가 제한적이었으며, 이에 따라 월별 난방에너지 변화 역시 약 1% 내외로 작게 나타난 결과와 연결된다.

실제 난방운전조건을 적용한 Case 3에서는 MBE가 −1.40%, Cv(RMSE)가 19.72%로 나타났다. Case 1과 비교하면 MBE와 Cv(RMSE)가 모두 감소하였으며, 특히 MBE의 변화가 크게 나타났다. 이는 본 연구의 분석조건에서 기준 난방조건을 실제 난방운전조건으로 변경했을 때 분석기간 전체의 평균적인 편향이 감소하였음을 의미한다. 다만 Cv(RMSE)는 19.72%로 참고기준인 15%를 초과하였으므로, 실제 난방운전조건을 반영한 것만으로 월별 오차가 충분히 감소하였다고 판단하기는 어렵다.

Case 7에서는 MBE가 −0.77%로 Case 3보다 추가적으로 감소한 반면, Cv(RMSE)는 19.74%로 Case 3의 19.72%와 거의 동일하게 나타났다. 이는 실제 난방운전조건을 적용한 상태에서 실측 기기발열조건을 추가로 반영함에 따라 분석기간 전체의 평균적인 편향에는 소폭의 변화가 있었지만, 월별 오차의 크기에는 뚜렷한 변화가 나타나지 않았음을 의미한다. Case 7의 월별 오차를 살펴보면 1월에는 실제값보다 높게 예측된 반면 2월, 11월 및 12월에는 실제값보다 낮게 예측되었다. MBE에서는 서로 다른 방향의 오차가 계산과정에서 일부 상쇄될 수 있기 때문에 −0.77%의 비교적 작은 값이 나타난 반면, Cv(RMSE)는 각 월에서 발생한 오차의 크기를 반영하므로 19.74%로 나타났다.

따라서 Case 7의 MBE가 참고기준인 ±5% 범위에 포함된다는 사실만으로 해당 모델이 충분히 보정되었다고 판단하기는 어렵다. Cv(RMSE)는 참고기준인 15%를 초과하고 있으며, 1월과 2월을 중심으로 실제 난방에너지와의 차이도 여전히 남아 있다. 본 연구에서는 Case 7을 최종적으로 검증된 모델로 규정하기보다, 대상세대에서 확보할 수 있었던 실제 기기발열 및 난방운전정보를 반영함에 따라 기준모델의 월별 난방에너지와 예측성능이 어떻게 변화하는지를 확인한 모델로 해석하였다. 따라서 본 연구에서 산정한 예측오차는 기기발열 및 난방운전조건뿐만 아니라 실측되지 않은 외피성능과 침기조건, 실제 보일러의 동적 운전특성 및 거주자의 월별 생활패턴 등이 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다. 본 연구는 이러한 모든 불확실성을 제거한 완전한 보정모델을 구축하기보다, 확보 가능한 운영정보를 적용했을 때 월별 난방에너지 예측결과가 어떻게 변화하는지를 분석하는 데 목적이 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 거주 중인 공동주택 단위세대를 대상으로 EnergyPlus Version 8.9 기반 난방에너지 모델을 구축하고 기기발열조건, 난방운전조건 및 침기율 변화에 따른 1월, 2월, 11월 및 12월의 월별 난방에너지를 분석하였다. 기기발열과 난방운전은 대상세대에서 확보한 실제 정보를 활용하였으며, 직접 측정자료가 없는 침기율은 시나리오 조건으로 구분하여 분석하였다. 이후 실측 기기발열조건과 실제 난방운전조건을 함께 적용한 Case 7을 실제 난방에너지 기준값과 비교하고 MBE와 Cv(RMSE)를 이용하여 예측성능을 평가하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 스마트플러그 기반 기기발열조건을 적용한 Case 2는 기준모델인 Case 1에 비해 월별 난방에너지가 1월 0.70%, 2월 0.73%, 11월 1.26%, 12월 0.76% 증가하였다. 모든 분석월에서 차이가 약 1% 내외로 나타났으며, 본 연구에서 비교한 기기발열조건의 범위에서는 난방에너지 결과의 변화가 크지 않았다. 다만 ASHRAE 90.1의 표준과 실측조건 사이의 기기발열밀도 차이가 크지 않고 시간별 사용패턴까지 함께 변경되었으므로 이 결과를 기기발열 자체의 일반적인 영향으로 확대하여 해석하기는 어렵다.

둘째, 실제 난방운전조건을 적용한 Case 3에서는 Case 1과 비교하여 1월 11.39%, 2월 13.04%, 11월 26.31%, 12월 12.49%의 난방에너지 증가가 나타났다. MBE는 −13.83%에서 −1.40%로, Cv(RMSE)는 24.20%에서 19.72%로 감소하였다. 본 대상세대와 분석조건에서는 실제 난방운전정보를 반영했을 때 기기발열조건만 변경한 경우보다 월별 난방에너지와 모델 평가지표가 크게 변화하였다.

셋째, 침기율을 0.15, 0.50, 0.70 및 1.00 ACH로 설정한 결과 모든 분석월에서 침기율 증가에 따라 난방에너지가 순차적으로 증가하였다. 1월에는 25.14kWh/m^2~42.68kWh/m^2, 2월에는 19.42kWh/m^2~35.65kWh/m^2, 11월에는 10.79kWh/m^2~21.51kWh/m^2, 12월에는 23.26kWh/m^2~39.32kWh/m^2 범위로 나타났다. 다만 각 침기율

은 대상세대의 현장 기밀측정 결과가 아닌 시나리오 값이므로 해당 범위 내에서 발생한 난방에너지 변화로 한정하여 해석할 필요가 있다.

넷째, 실측 기기발열조건과 실제 난방운전조건을 동시에 적용한 Case 7의 MBE는 -0.77%로 기준모델보다 낮아졌다. 반면 Cv(RMSE)는 19.74%로 참고기준인 15%를 초과하였다. Case 7은 1월에 실제값보다 높고 2월, 11월 및 12월에는 낮게 나타났으며, 서로 다른 방향의 월별 오차가 MBE에서 일부 상쇄된 것으로 나타났다. 따라서 전체 편향의 감소와 개별 월의 예측오차를 구분하여 평가할 필요가 있다.

이상의 결과를 통해 공동주택 단위세대의 난방에너지 시뮬레이션에서는 표준 입력자료를 일률적으로 사용하는 것보다 대상세대에서 확인할 수 있는 실제 운영정보를 모델에 반영할 필요가 있음을 확인하였다. 특히 난방운전조건은 설정온도와 운전시간이 실제 난방부하와 직접 연결되기 때문에 대상세대의 운전상태를 확인하지 않은 상태에서 표준조건만을 적용할 경우 실제 난방에너지와의 차이가 발생할 수 있다.

침기조건 역시 0.15~1 ACH의 조건 차이로 인해 결과에 적지 않은 차이를 발생시켰으나, 실제 기밀측정이 이루어지지 않은 상태에서 특정 침기율을 대상세대의 실제값으로 선정하는 것은 신중할 필요가 있다. 이에 현장자료가 없는 경우에는 단일 입력값에 의존하기보다 가능한 범위를 설정하여 결과변화를 확인하고, 향후 측정자료가 확보되었을 때 해당 범위를 좁혀가는 방식이 적절할 것으로 판단된다.

본 연구에는 몇 가지 한계가 있다. 첫째, 경기도 안산시에 위치한 한 개의 공동주택 단위세대와 1월, 2월, 11월 및 12월의 동절기 4개월만을 대상으로 분석하였기 때문에, 본 연구에서 확인된 입력조건별 영향 및 모델 예측성능을 다른 지역, 공동주택 유형 또는 전체 난방기간에 직접 일반화하는 데에는 한계가 있다. 둘째, 외피 열관류율은 현장 측정값이 아닌 준공시기의 설계기준에 근거한 값을 적용하였으며, 침기율 역시 대상세대의 실제 기밀성능 측정자료가 아닌 시나리오 값으로 설정하였다. 따라서 실제 시공상태, 경년변화에 따른 외피성능 저하 및 대상세대의 실제 기밀성능이 모델에 충분히 반영되지 못하였다. 셋째, 본 연구에서는 ZoneHVAC을 사용하였기 때문에 실제 가스보일러의 점화 및 정지, 난방수 온도 변화, 열적 관성 및 부분부하 운전에 따른 효율 변화 등 실제 열원시스템의 동적 거동을 직접적으로 모사하지 못하였다.

향후 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 대상세대의 외피 열관류율 및 기밀성능을 현장에서 직접 측정하고, 시간별 실내온도, 실제 보일러 가동상태 및 연료사용량을 연속적으로 계측하여 모델 입력자료로 활용할 필요가 있다. 또한 실제 보일러의 용량, 난방수 온도, 점화·정지 특성 및 부분부하 효율 등을 반영한 상세 열원시스템 모델을 구축하여 실측 연료사용량과 비교함으로써 모델의 물리적 재현성과 예측 정확도를 향상시킬 필요가 있다. 이후 분석기간을 전체 난방기간으로 확대하고, 서로 다른 지역 및 건축적 특성을 가진 복수의 공동주택 단위세대를 대상으로 동일한 분석을 수행한다면 본 연구에서 확인된 입력조건별 영향과 실측 운영정보 기반 보정방법의 적용범위를 보다 일반적으로 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원으로 이루어졌습니다(RS-2025-24533343).

References

[1] P. Raftery, M. Keane, J. O'Donnell, Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology, Energy and Buildings, 43(9), 2011, pp.2356-2364.

[2] D. Coakley, P. Raftery, M. Keane, A review of methods to match building energy simulation models to measured data, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37, 2014, pp.123-141.

[3] S.J. Kim, D.Y. Park, Study on the variation in heating energy based on energy consumption from the district heating system, simulations and pattern analysis, Energies, 15(11), 2022, 3909.

[4] R. Lee et al., Development and calibration of apartment building energy model based on architectural and energy consumption characteristics, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 206, 2024, 114874.

[5] S. Oh, J.C. Baltazar, J.S. Haberl, Assessment of the impact of using a smart thermostat and smart meter data on a whole-building energy simulation, Sustainability, 14(10), 2022, 6299.

[6] 윤갑천, 전종욱, 김강수, 에너지시뮬레이션에서의 부하요소가 건물에너지사용량에 미치는 영향 분석, KIEAE Journal, 제11권 제4호, 2011, pp.71-78. // (K.C. Yoon, J.W. Jeon, K.S. Kim, Analysis on the impact of load factors in building energy simulation affecting building energy consumption, KIEAE Journal, 11(4), 2011, pp.71-78.)

[7] C.H. Lozinsky, M.F. Touchie, Improving energy model calibration of multi-unit residential buildings through component air infiltration testing, Building and Environment, 134, 2018, pp.218-229.

[8] R. Lee et al., Impacts of lighting and plug load variations on residential building energy consumption targeting zero energy building goals, Journal of Building Engineering, 75, 2023, 106962.

[9] 양승원 외 3인, 스마트플러그를 활용한 주거용 건물 기기발열 측정 방법론 제안, 2026년도 한국생태환경건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 제26권 제1호, 2026, pp.134-135. // (S.W. Yang et al., A methodology for measuring the heating of residential building devices using smart plug, Proceedings of the KIEAE Spring Conference, 26(1), 2026, pp.134-135.)

[10] 한국건축친환경설비학회, KIAEBS C-1:2013 건축물의 기밀성능 기준, 2013. // (Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, KIAEBS C-1:2013 Building Airtightness Criteria, 2013.)

[11] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, Normative Appendix C, Building Envelope Trade-Off Schedules and Loads, Schedule D, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016, Atlanta, GA, 2016.

[12] 국토교통부, 건축물의 에너지절약설계기준, 국토교통부고시 제2014-520호, 2014.09.01. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Design standards for energy-saving buildings, Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notification No. 2014-520, 2014.09.01.)

[13] U.S. Department of Energy, M&V guidelines: Measurement and verification for federal energy projects, Version 3.0, 2008.

ⓒ 2026. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.