



## 통계 데이터 기반 최적화 캘리브레이션을 통한 다세대 주택 표준모델 도출 - 중부지방 중심으로 -

### Derivation of Multi-housing Prototype Model through Statistical Data-based Optimization Calibration - On the Central Region -

김우섭\* · 이건호\*\* · 조동현\*\* · 이병연\*\*\*

Woo-Seob Kim\* · Geon-Ho Lee\*\* · Dong-Hyun Cho\*\* · Byung-Yun Lee\*\*\*

\* Main author, Ph.D Student, Dept. of Architecture, Soongsil Univ., South Korea (dntjq88@soongsil.ac.kr)

\*\* Coauthor, Undergraduate Student, Dept. of Architecture, Soongsil Univ., South Korea (dlrjsgh1207@naver.com, starhyun1996@naver.com)

\*\*\* Corresponding author, Professor, Dept. of Architecture, Soongsil Univ., South Korea (ecoville@ssu.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** The market for low energy remodeling is expected to expand in the future, so a prototype model of buildings are need to provide for sharing energy saving data for participants in the market. In this paper, prototype energy model for multi-housing was derived from monthly energy consumption data through the optimization calibration method. **Method:** In this study, a prototype model of a multi-housing was produced based on the unit house energy consumption data of the Korea Energy Economics Institute. Unit-level statistical data were modified considering the unit size. The HESS(Household Energy Standing Survey) data showed that the cooling energy consumption was smaller than generally expected. In order to reduce the gap, input variables of natural ventilation effect and shadow effect from surrounding buildings were added for the calibration and the four cases were analyzed comparatively and analyzed the effects of natural ventilation and shadow effects. **Result:** Calibration error results showed that the additional natural ventilation and shadow effect resulted in the minimum cv(RMSE) value of 4.16%, and the base case without natural ventilation and shadow effect resulted in a maximum cv(RMSE) value of 8.88%. Therefore, it was confirmed that the natural ventilation effect and the urban shading effect were effective for the calibration of buildings in urban area of Korea.

#### KEYWORD

통계데이터  
캘리브레이션  
다세대주택

Statistical Data  
Calibration  
Multi-housing

#### ACCEPTANCE INFO

Received Jan. 6, 2022

Final revision received Jan. 27, 2022

Accepted Feb. 3, 2022

© 2022. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

탄소 배출량 저감에 있어 건축부분이 차지하는 비율은 증가하고 있다. 신축 건물의 건설보다 리모델링, 리노베이션 등 기존 건축물의 활용이 각광을 받는 사회적 흐름에 따라 기존 건축물의 친환경 리모델링으로 인해 얻을 수 있는 환경적인 이득은 향후 더욱 중요해질 것이다. 건물의 친환경 리모델링 시장이 성장하기 위해서는 리모델링이 주는 혜택이 가시적인 정보로 제시되어 건물주 및 자본의 투자를 이끌어내야 한다. 그러나 대부분의 건물 신축, 리모델링 프로젝트의 경우 환경적 이점을 위한 에너지 시뮬레이션은 실무 단계에서 시간, 인력, 기술의 부족함으로 인해 이루어지지 않는다. 표준 모델의 개발은 작은 규모의 프로젝트에서 건물 에너지 시뮬레이션을 위한 추가적인 자원을 소모하지 않고도 리모델링으로 인한 효과를 확인 할 수 있게끔 하여 투자와 자본을 이끌어 낼 수 있을 것이다.

한국 국토 전역에서 전반적으로 이용할 수 있는 다세대 주택의 표준 모델 개발은 에너지 시뮬레이션을 위한 모델링 정보와 전국 다세대 주택의 전반적인 에너지 이용 현황을 알 수 있는 통계 데이터와의 캘리

레이션을 그 시작으로 한다. 따라서 통계데이터에 대한 건물의 에너지 이용 현황에 대한 분석 작업이 우선하게 되는데, 한국에너지경제연구원(KEEI)에서 실시하는 ‘가구에너지 상설표본조사’(HESS) 데이터의 경우 에너지 해석에 바로 사용할 수 없으므로 캘리브레이션 이전에 데이터 보정 작업을 한다. 분석 결과 한국의 다세대 주택은 냉방에너지가 과도하게 낮음을 알 수 있었고, 기존의 캘리브레이션 매개변수에 추가적인 변수들을 더해 시뮬레이션 결과로서 나타나는 냉방에너지를 낮추는 방법으로 매개변수 품질을 향상시키고자 하였다.

이에 본 연구는 다세대 주택의 건물에너지 통계 데이터를 이용하여 캘리브레이션 작업을 진행해 다세대주택 표준모델을 개발하고, 한국의 에너지 사용량 통계데이터에 부합하도록 캘리브레이션 적합도 향상을 위한 추가적인 매개변수로서 주변 건물로 인한 음영 효과와 자연환기 효과를 추가하였다. 이러한 방법을 통해 표준모델의 오차율을 줄이는 방법을 고안해 내는 것을 목적으로 하였다.

### 1.2. 연구의 방법 및 범위

다세대 주택 캘리브레이션은 디자인빌더(DesignBuilder)-에너지플러스(EnergyPlus)-모드프런티어(ModeFrontier)를 연동한 에너지 시뮬레이션 세트를 사용한다. 디자인빌더에서 만들어낸 모델링 정보를 .idf 파일로 추출하여 에너지플러스와 모드프런티어의

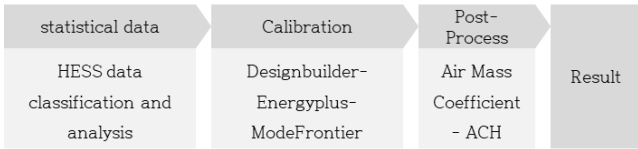


Fig. 1. Research process

Dos-Batch 연동을 통해 최적화 캘리브레이션을 진행하였다. 캘리브레이션에 사용된 에너지 통계 데이터는 2016년의 ‘가구에너지 상설표본조사(HESS)’ 데이터이며, 에너지 시뮬레이션에 이용된 기후 데이터 역시 2016년의 파일을 사용하였다.

다세대 주택 표준모델의 형상정보는 건축물 대장을 기반으로 지역에 따라 중부(서울), 남부(대구), 제주로 나누어 각각 서울, 대구, 제주의 기후데이터를 사용하였다. 또한 건물 규모에 따라 소규모, 중규모, 대규모로 분류하였으며, 시공 연도를 기준으로 2000년대 이전, 2000년대, 2010년대로 나누었다. 본 연구에서는 중부지방의 중규모 다세대주택 캘리브레이션을 진행하였고 시뮬레이션 결과를 정리하였다.

## 2. 재료와 방법

### 2.1. 선행연구 고찰

#### 1) 통계데이터 캘리브레이션

캘리브레이션은 건물의 실제 에너지 사용량을 토대로 모델링을 통한 에너지 시뮬레이션 결과를 보정하는 것으로, 에너지 관리 단계에서 주로 사용된 방법이다. 그러나 건물에너지 저감이 주요 이슈가 된 지금, 캘리브레이션은 건물에너지 저감을 위하여 발전되고 있다.

캘리브레이션은 실측데이터를 이용한 방법과 통계데이터를 이용한 방법이 있다. 통계데이터를 이용한 에너지 사용량 추정 방법은 하나의 건물 보다는 주로 대규모의 건물 그룹 에너지 사용량을 측정하는데 사용이 된다. Lukas G. Swan 외(2009)은 통계데이터 기반 에너지 모델 분석을 top-down 방식과 bottom-up 방식으로 분류하였다[1]. Top-down 방식은 거시 경제 지표, 기후, 인구통계 등 거시적 지표와 결합된 에너지 사용 데이터를 주요 소스로 한다. Bottom-up 방식은 건물의 그룹을 설정하여 프로토타입으로 정의되는 building stock을 바탕으로 실제 건물에 초점을 맞춰 재건하는 전략이다. 통계데이터를 이용한 캘리브레이션 결과값에 대한 적합도 판단은 통계적 지수를 이용하고 있다. 통계적 지수를 이용한 기준은 미국 냉난방 공조 협회(ASHRAE), 국제 성능 측정 및 검증 프로토콜(IPMVP, International performance measurement and verification protocol), 미국 연방 에너지 관리 프로그램(FEMP, Federal Energy Management Program) 세 국제기구에서 권장하고 있다. 이러한 방식은 크게 두 가지로 나뉘며 첫째, 물리법칙을 기반으로 하는 실측데이터를 이용한 방법, 둘째, 인공신경망(ANN), 회귀 기반 접근 방식 등의 통계데이터를 이용한 방법이다. Soto 외(2016)는 주거 부분 에너지 모델의 정확도를 평가하였는데, bottom-up 방식의 경우 정확도 측면에서 봤을때 통계 모델과 물리적 모델간의 유의미한 차이는 없다고 분석하였다[2]. 따라서 본 연구에서도 모든 건물을 대상으로 실측데이터 수집이 불가능한 현실을 감안하여 통계데이터를 사용한 다세대주택 캘리브레이션을 진행하였다.

#### 2) 다세대주택 캘리브레이션

다세대주택의 표준모델을 개발하기 위한 연구는 다수 진행 중에 있다. 김경수 외(2020)의 연구는 저층 주거건물의 에너지 소요량 예측을 위하여 시뮬레이션 인자를 설정하고, 연구를 통한 시뮬레이션 결과와 국가 에너지 사용량 통계 결과를 비교하였다[3]. 그 후속 연구인 유동철 외(2021)의 연구는 기준 면적으로 평가한 이전 연구에서 나아가 기계학습을 이용하여 다양한 주거면적에 대응할 수 있도록 하였다[4]. 또한 에너지 절감기술과 그에 따른 에너지소요량을 예측하였다. 위의 연구들은 공공기관에서 조사된 통계데이터인 에너지경제연구원의 ‘주거용 건물에너지 소비 요인 분석을 통한 건물에너지 정책 방안 연구(2017)1’ 데이터와 산업통상자원부의 ‘에너지 총 조사보고서(2017)2’의 데이터를 이용하여 프로토타입 모델을 정의하는 bottom-up 방식의 캘리브레이션 전략임을 알 수 있다. 본 연구도 통계데이터를 이용한 bottom-up 방식임은 유사하지만, 기후에 의해 달라지는 월별 에너지 사용량을 평가하여 추가적인 입력변수로 한국 기후에 맞춘 자연환기효과와 도심의 주변 건물로 인한 음영효과를 포함한 에너지 사용량 기반 캘리브레이션 평가 방법을 제안하고 평가하여 추가적인 캘리브레이션을 진행하는 것으로 차별성이 있다고 판단하였다.

### 2.2. 방법론

#### 1) 통계데이터 분류

다세대 표준모델 캘리브레이션에 세대단위를 분석한 통계데이터인 HESS 데이터를 사용하기 위해서 세대단위의 데이터를 조합하여 건물 단위로 재구성하여야 한다. 다세대 건물의 형상정보는 건축물 대장의 다가구 및 다세대 형상정보를 바탕으로 하였다.

HESS 데이터를 건물단위로 분류하기 위해서 건축물대장을 이용하여 건물 별 세대 구성 정보를 정리하였다. (Table 1.) 각 세대는 면적별로 극소형(32m<sup>2</sup>), 소형(64m<sup>2</sup>), 중형(96m<sup>2</sup>)으로 분류하였다.

(Table 1.)에서 정리한 세대 구성 정보를 바탕으로 HESS 데이터와 연계하여 건물 단위의 데이터로 가공해야 하는데, 건물 세대 면적

Table 1. Classification of multi-housing based on a registered building records

Region	Building Scale	Completion	Tiny Unit	Small Unit	Medium Unit
Central	Small Scale	Before 2000	1	3	0
		2000's	1	3	0
		After 2010	2	2	0
	Medium Scale	Before 2000	1	5	0
		2000's	1	6	0
		After 2010	3	5	0
	Large Scale	Before 2000	3	7	0
		2000's	3	7	0
		After 2010	11	3	0

별 HESS 데이터의 표본이 부족한 세대가 있음을 확인하였다. HESS 데이터 표본의 개수는 캘리브레이션, 즉 에너지 시뮬레이션 보정의 품질과 연관이 되므로 본 연구에서는 일정 수 이상의 표본을 확보 할 수 있는 중부지방의 중규모 건축물을 대상으로 캘리브레이션을 진행하였다.

2) 다세대주택 월간 에너지 소비 통계

캘리브레이션에 사용하는 통계데이터는 에너지 시뮬레이션 결과를 보정하는 값이기에 사전 특이사항을 확인하고, 분석하여 사용자 패턴을 미리 확인한다면 에너지 시뮬레이션 정확도를 향상시킬 수 있다. (Table 2.)는 HESS데이터 기준 중부와 남부지방의 중규모 건물의 월간 연료소비량과 전력소비량이다. 주로 난방에 사용되는 연료소비량의 경우 겨울철에 사용량이 집중된 것에 비해 전력소비량은 월간 편차가 크지 않음을 확인 할 수 있다. 이는 여름철에도 냉방에너지를 과도하게 사용하지 않음을 도출 할 수 있고, 에너지 시뮬레이션 단계에서 냉방에너지 오차 저감을 위한 방안을 마련해야함을 알 수 있다[5].

3) 캘리브레이션 타겟

본 연구에서는 Cv(RMSE) 값을 평가한다. RMSE(Root Mean Squared Error)는 측정된 값(본 연구에서는 통계 데이터)과 모델에서 예측한 값(건물 에너지 시뮬레이션 데이터) 간의 차이에 대한 표본 편차 측정값이다. Cv(RMSE)는 측정된 데이터와 시뮬레이션 한 데이터 간의 변동성에 대한 측도이자 에너지 시뮬레이션 모델의 적합도를 판단하는 측도이다[6-7].

$$Cv(RMSE_{Period}) = \frac{RMSE_{Period}}{A_{Period}} \times 100 \quad (Eq. 1)$$

$$RMSE_{Period} = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{interval}^2}{N_{interval}}} \quad (Eq. 2)$$

- $N_{interval}$  the number of time intervals in the monitoring period
- $M$  the measured kilowatt-hours or fuel consumption during the time interval
- $S$  the simulated kilowatt-hours or fuel consumption during the same time interval

$$Cv = \sqrt{\frac{(HESS\ 1월\ 가스사용량 - MF\ 1월\ 가스사용량)^2 + \dots + (HESS\ 12월\ 가스사용량 - MF\ 12월\ 가스사용량)^2 + (HESS\ 1월\ 전기사용량 - MF\ 1월\ 전기사용량)^2 + \dots + (HESS\ 12월\ 전기사용량 - MF\ 12월\ 전기사용량)^2}{12}} \times 100 / \frac{(\sum(\text{연간\ 가스사용량}) + \sum(\text{연간\ 전기사용량}))}{12} \quad (Eq. 3)$$

통계적 지수를 이용하여 각 시뮬레이션마다 cv(RMSE) 산식을 작성하였다. 다음 산식은 캘리브레이션 시뮬레이션 과정 중 모드프론티어 Workflow의 Calculator 노드에 입력하는 기본 산식이다. (Eq. 3) HESS의 에너지 사용량은 통계데이터의 사용량을, MF의 에너지 사용량은 시뮬레이션 결과인 에너지 사용량을 의미한다.

FEMP는 월간 캘리브레이션의 경우, Cv(RMSE) 값 15%를 기준으로 하고 있다.

3. 캘리브레이션

3.1. 시뮬레이션 프로세스

이번 연구의 캘리브레이션 시뮬레이션 프로세스는 디자인빌더, 에너지플러스, 모드프론티어를 연동한 에너지 시뮬레이션 세트를 사용한다. 디자인빌더에서 기본적인 모델링을 하여 .idf 파일로 추출 후 에너지플러스와 모드프론티어를 Dos-Batch 연동하여 캘리브레이션 시뮬레이션을 진행한다. 입력변수 중 기밀도는 에너지플러스에서 건물의 총 기밀도를 구할 수 없으므로, 후처리 단계를 통하여 건물의 기밀도를 구하여 보완하였다.

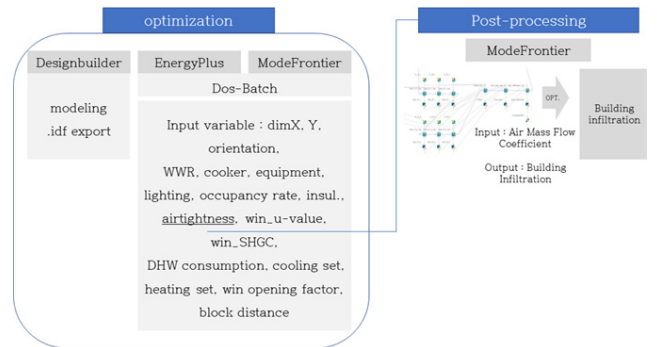


Fig. 2. Calibration process

Table 2. Monthly energy consumption by building in central region based on HESS data

Energy	Completion	Energy consumption (kWh/m <sup>2</sup> )											
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Natural gas	Before 2000	182.82	144.37	113.07	57.97	35.19	22.02	20.91	19.52	29.47	46.17	107.76	151.09
	2000's	194.21	154.33	121.87	64.69	41.00	26.50	26.75	23.26	36.98	52.43	116.37	161.30
	After 2010	237.57	185.90	143.85	69.94	39.53	21.89	19.56	23.51	28.55	54.16	136.73	194.92
Electricity	Before 2000	36.05	25.22	24.55	23.36	22.61	24.38	26.57	29.66	23.84	23.11	24.44	25.37
	2000's	25.80	25.18	24.68	23.80	23.24	24.88	26.92	29.80	24.38	23.61	24.60	25.29
	After 2010	28.46	27.88	27.42	26.60	26.08	27.93	30.21	33.44	27.36	26.42	27.34	27.98

1) 기본모델 모델링

세대별 면적 규모를 바탕으로 극소형, 소형, 중형으로 분류한 세대를 건축물대장의 층별 바닥면적을 바탕으로 기본모델을 모델링하였다. 모델링은 디자인빌더(DesignBuilder) 프로그램을 이용하여 에너지플러스 input 파일로 추출할 수 있도록 하였다.

모델링은 최적화 시뮬레이션의 매개변수 설정을 위하여 몇 가지 가정을 하였다.

- 같은 면적의 세대는 동일한 형상을 갖는다.
- 계단실과 복도 등 공용공간은 생략한다.
- 여러 세대가 나란히 붙어있는 판상형 건물이다.
- 각 세대는 원룸형 세대로 가정한다.

같은 면적의 세대가 동일한 형상인 이유는 기본모델의 기준이 되는 정보인 건축물대장에서 건물의 세대수와 세대 면적을 확인할 수 있으나, 바닥면의 길이 등과 같은 형상정보가 없기에, 형상정보가 캘리브레이션의 매개변수에 포함되어야 하기 때문이다. 공용공간의 경우 열손실과 침기가 일어나는 공간이지만, 정확한 위치를 확인할 수 없으며, 캘리브레이션 결과값에서 다른 매개변수에 종속되어 확인할 수 있기에 생략하였다.

2) 매개변수 (Input variable) 설정

매개변수는 최적화 시뮬레이션의 입력변수로서 그 값의 변화가

목표 결과인 통계데이터가 근접할 수 있도록 하는 매개변수이다. 다세대 주택 캘리브레이션의 경우 앞서 진행한 통계데이터 분석을 통하여 냉방에너지를 저감할 방법을 모색해야함을 확인하였고, 따라서 추가적인 매개변수로서 주변 건물로 인한 음영효과와 자연환기 효과를 추가하기로 결정하였다. 아래의 표는 캘리브레이션에 사용되는 입력변수들로서 건물의 형상에 영향을 미치는 입력변수(A). 본 연구에서는 최적화 시뮬레이션에서 냉방에너지 사용을 억제할 수 있는 추가적인 매개변수로서 주변 건물로 인한 음영효과와 자연환기 효과를 추가하였다. 자연환기 관련 변수(B), 주변 건물 간격으로 음영효과에 영향을 미치는 변수(C)이다. 분석대상인 3개 유형(2000년 이전, 2000년대, 2010년 이후)는 모두 극소형 보다 소형 주거유닛으로 구성되어 있으며, 변수는 주거유닛을 기반으로 정하였다.

세대유닛의 형상을 이루는 정보 중 X변의 길이와 Y변의 길이는 한 변이 다른 변의 최대 1.5배를 넘지 않게 설정하였다. 또한 창-면적비(WWR)의 경우 북측을 제외한 향의 창-면적비는 0.2-0.5, 북측 창-면적비는 최솟값과 최댓값을 다른 향들보다 낮은 값인 0.1-0.3으로 설정하였다. 조리기구로 인한 에너지 사용은 크게 화구의 개수에 따라 달라질 것으로 예상하여 화구의 개수가 1개부터 최대 4개까지로 설정하였다. 따라서 입력 범위는 10-40W/m<sup>2</sup>로 설정하였다. 실제 발열 기기의 설정 범위는 1-8W/m<sup>2</sup>, 조명으로 인한 에너지 사용 범위는 2-5W/m<sup>2</sup>로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 재실자 밀도의 경우 1인 세대와 2인 세대가 주를 이루는 다세대주택에서 크게 벗어나지 않도록 0.03-0.048(person/m<sup>2</sup>)의 범위를 설정하였다.

Table 3. Calibration input variable

			Dimension	Lower	Upper	
(A)	Geometry	dim. X Y	m	6.32	10.12	
		orientation	°	-45	45	
		WWR north		0.1	0.3	
		WWR east		0.2	0.5	
		WWR south		0.2	0.5	
		WWR west		0.2	0.5	
	Internal gain	cooker	W/m <sup>2</sup>	10	40	
		equipment	W/m <sup>2</sup>	1	8	
		lighting	W/m <sup>2</sup>	2	5	
		occupancy rate		0.03	0.048	
	Envelope performance	floor insul. (cent.)	Before 2000	mm	10	50
			2000's		10	125
			After 2010		10	205
		roof insul. (cent.)	Before 2000	mm	10	80
			2000's		10	190
			After 2010		10	260
		wall insul. (cent.)	Before 2000	mm	10	50
			2000's		10	100
			After 2010		10	180
		airtightness	ACH	0.04	0.6	
	win. U-value	W/m <sup>2</sup> K	2.4	6		
win. SHGC		0.3	0.7			
DHW consumption	l/h(unit)	19.56	78.23			
cooling set.	°C	24	32			
heating set.	°C	18	24			
(B)		win. opening factor		0.2	0.5	
(C)		block distance	m	4	12	

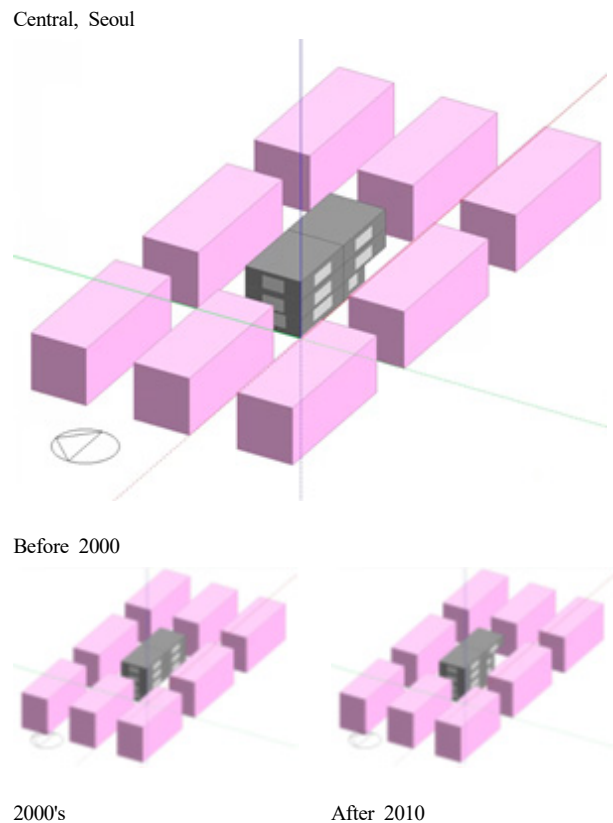


Fig. 3. Basic model of multi-housing modeled with shape information

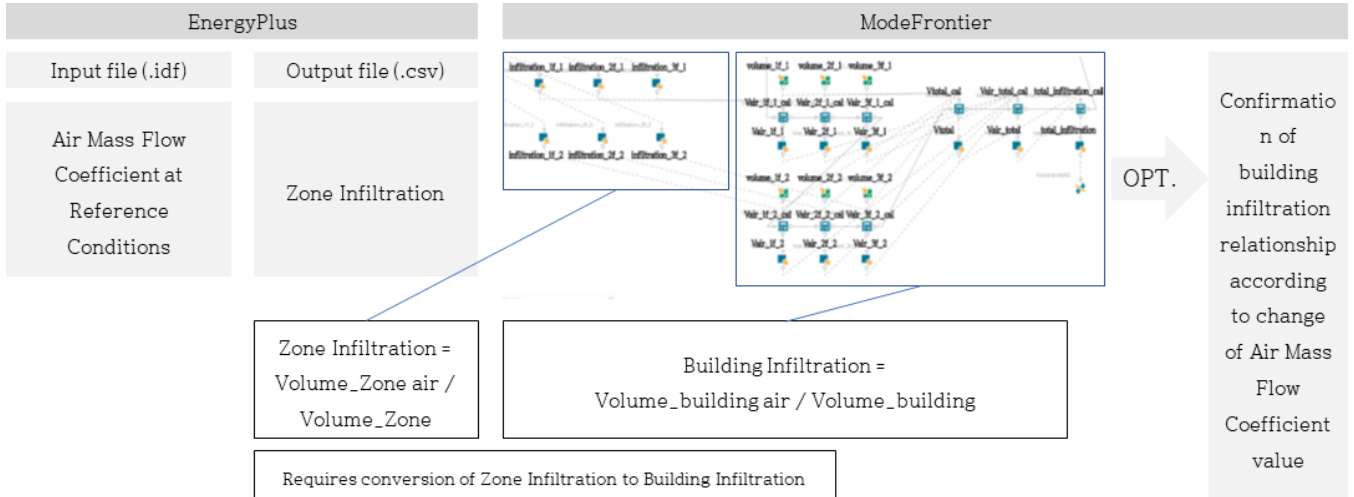


Fig. 4. Flow of converting Air Mass Flow Coefficient to ACH

Table 4. The standard of insulation (mm)

Reference year	Standard of insulation	Region	Ext-wall	Floor	Roof
1992	Regulations on facility standards, etc. for buildings (Ministry of Construction Ordinance No. 506)	Central	50	50	80
2010	Energy-saving design standards for buildings (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Notification No. 2010-371)	Central	100	125	190
2015	Energy-saving design standards for buildings (Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notification No. 2015-1108)	Central	180	205	260

건물의 단열재 두께는 지역과 건물의 준공시기에 따라 다르게 설정하였다. 다세대주택을 준공시기 별로 2000년 이전, 2000년대, 2010년대로 분류하였으며, 각 시기별 단열기준을 바탕으로 입력변수 범위의 최댓값을 설정하였다(Table 4).

본 연구 중 에너지플러스(EnergyPlus)에는 자연환기를 포함한 AFN(Airflow Network) 에너지플러스 에너지 해석 방식의 경우 시간대별 개구부의 압력 차이와 이를 통한 기류량을 계산한다. 통상적으로 시간당 환기회수(ACH)로 표기되는 환기량으로 환산하여 이해를 도울 수 있도록 후처리 작업을 진행하였다. 따라서 일반적으로 사용하는 기밀도를 캘리브레이션의 입력변수로 사용하기 위하여, 그리고 건물의 전체 침기량으로 치환하기 위하여 idf 파일의 'Air Mass Flow Coefficient at Reference Conditions' 값을 변환하는 과정을 거치며 그 과정은 다음과 같다(Fig. 4).

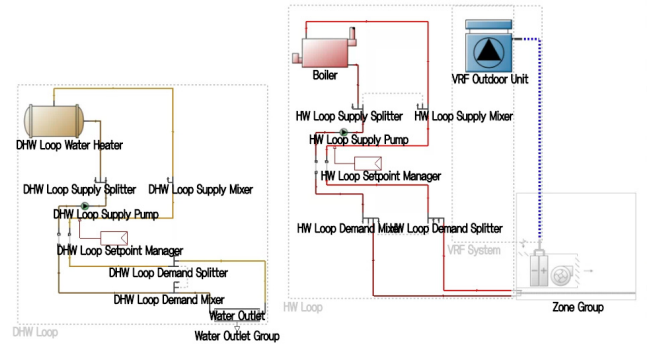


Fig. 5. DesingBuilder HVAC setting

기준모델의 HVAC 시스템 모델링은 디자인빌더에서 진행하였다. 디자인빌더 HVAC-Detailed 설정 중 DHW Loop Water Heater에서 각 세대로 온수를 공급할 수 있게 하였다. 난방은 보일러를 통한 바닥난방으로, 냉방은 VRF 시스템 냉방으로 설정하였다(Fig. 5.).

온수소비량인 DHW consumption의 입력변수 범위는 idf 입력값 중 'Peak Flow Rate'를 0.5배에서 2배로 설정한 것으로, 표의 단위는 idf 기준의 유닛 당 m<sup>3</sup>/s단위를 L/h로 변환한 것이다.

이번 연구에는 자연환기 효과가 추가됨으로, 자연환기 설정을 추가로 진행하였다. 자연환기는 외부 온도가 최소 12도일 때, 내외부 온도차(deltaT)가 10도일 때 작동하도록 설정하였다. Wind factor는 1로 설정하였고, 하이브리드 환기 옵션을 추가하였다.

### 3) 최적화 시뮬레이션 설정

이번 캘리브레이션을 위한 최적화 시뮬레이션은 에너지플러스(EnergyPlus)와 모드프론티어(ModeFrontier)를 Dos-Batch로 연동한 시뮬레이션 세트를 이용하였다. 사용한 최적화 알고리즘은 다전략 알고리즘인 MOGA-II (Multi-Objective Evolutionary Algorithm-II)를 활용하였다. MOGA-II는 무작위 검색 방법을 사용하며 조기에 최적 지점으로 수렴하지 않는 특징을 가지고 있어 솔루션 공간, 즉 다양한 output 영역을 탐색할 수 있다.

중부지방 중규모 2000년 이전 시뮬레이션의 경우, 추가적인 매개

Table 5. Additional input variables for comparative model

Simulation model number	Shading effect from surrounding buildings	Natural ventilation
model1	O	O
model2	O	X
model3	X	O
model4	X	X

변수로 인한 에너지 시뮬레이션의 냉방에너지 저감 효과를 비교 분석하기 위하여 주변 건물로 인한 차양 효과와 자연환기 효과에 대한 추가적인 비교 시뮬레이션을 진행하였다.

### 4. 시뮬레이션 결과

#### 4.1. 추가적 매개변수 자연환기효과 및 음영효과 결과

에너지 시뮬레이션의 냉방에너지를 낮추기 위하여 추가한 매개변수인 주변 건물로 인한 차양효과와 자연환기로 인한 효과를 추가하였다. 추가된 매개변수들의 효과를 확인하고 그 정도를 파악하여 다세대주택 캘리브레이션 시뮬레이션의 매개변수로서의 성능 뿐만 아니라 향후 한국의 주거 건물 캘리브레이션에 사용할 수 있는 매개변수로서의 효과를 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

자연환기 및 도심의 주변 건물로 인한 음영효과 매개변수 비교를 위한 캘리브레이션들의 결과 비교를 정리하였다(Table 6.). 주변 음영효과와 자연환기를 하는 model1의 경우, 가장 낮은 cv(RMSE) 값인 4.16%로 가장 높은 적합도를 나타냈다. 자연환기 없이 주변 음영효과만 있는 model2의 경우 7.24%의 cv(RMSE)값을, 반대로 주변 음영효과 없이 자연환기 효과만 있는 model3은 6.02% cv(RMSE)값을 나타냈다. 이는 캘리브레이션 시뮬레이션 상태에서는 자연환기로 인한 냉방에너지 저감 효과가 주변 건물로 인한 음영효과보다 뛰어나다는 것을 알 수 있다.

추가적인 입력변수의 에너지 사용량을 그래프로 비교해 본다면 다음과 같다. 월별 가스 사용량의 경우, 자연환기 효과와 주변 건물로 인한 음영효과를 다 받는 model1 뿐만 아니라 모든 모델들이 에너지 사용량 경향이 HESS 데이터와 비슷한 경향을 나타냈다. 그러나 월별 전기 사용량의 경우, 각 모델들이 HESS 데이터와는 다른 추세를 보였으며, 특히 냉방에너지를 가장 많이 사용하는 여름철의 경우가 두드러졌다. Model4의 경우 기존의 HESS 데이터와는 가장 차이나는 월별 사용량을 보였다. 캘리브레이션 시뮬레이션의 목적 함수가 월간 cv(RMSE) 값을 기준으로 하였는데, 이는 비정상적인 결과로 판단된다. 이러한 결과가 나온 것이 표본 수가 적었던 것인지, 다른 이유가 있는 것인지는 알 수 없으며, 이에 대한 연구는 추가적으로 진행할 예정이다.

통계데이터를 사용한 다가구주택 캘리브레이션에서 주변 건물로 인한 음영효과와 자연환기는 추가적인 매개변수로서 냉방에너지 저감에 도움이 되는 것을 확인하였고, 향후 한국의 주거건물 캘리브레이션에도 사용할 수 있는 매개변수라고 판단하였다.

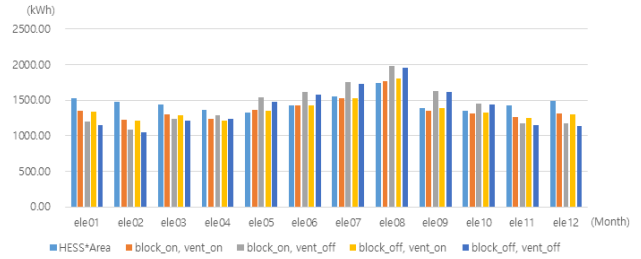


Fig. 6. Monthly electricity consumption calibration result

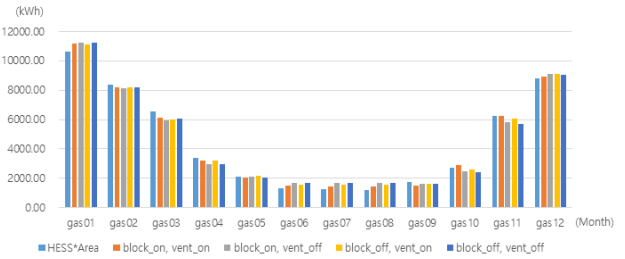


Fig. 7. Monthly gas consumption calibration result

Table 6. Additional calibration results

	model1		model2	
	block on, vent on	bock on, vent off		
cv (RMSE) history				
min cv (RMSE) (%)	4.16	7.24		
	model3		model4	
	block off, vent on	block off, vent off		
cv (RMSE) history				
min cv (RMSE) (%)	6.02	8.88		

#### 4.2. 캘리브레이션 결과

중부지방 3개의 캘리브레이션 결과는 다음과 같다.

(Table 7.)은 중부지방 2000년 이전 캘리브레이션 시뮬레이션 중 가장 낮은 cv(RMSE)값을 가진 최적 디자인의 세부 결과이다. 앞서 비교 캘리브레이션의 model1 캘리브레이션이며, 결과는 cv(RMSE)값 4.16%을 나타냈다. 세대 당 7.32m X 8.74m의 평면을 갖는 것으로, 모든 단열재의 두께는 시뮬레이션 범위 중 최댓값을 가지고 있다. WWR은 동측 0.4, 서측 0.22, 남측 0.2, 북측 0.3 값을 기록했다. Internal gain 중 가스를 사용하는 cooker는 최솟값인 10을, 반대로 전기를 사용하는 equipment와 lighting은 범위의 최댓값으로 나타났다.

(Table 8.)은 중부지방 2000년대 캘리브레이션 시뮬레이션의 최

Table 7. Calibration result (Central-Medium size- before 2000)

		Dimension	Lower	Upper	Result
Geometry	dim. X Y	m	6.32	10.12	7.32/8.74
	orientation	°	-45	45	45
	WWR north		0.1	0.3	0.3
	WWR east		0.2	0.5	0.4
	WWR south		0.2	0.5	0.2
	WWR west		0.2	0.5	0.22
Internal gain	cooker	W/m <sup>2</sup>	10	40	10
	equipment	W/m <sup>2</sup>	1	8	8
	lighting	W/m <sup>2</sup>	2	5	5
	occupancy rate		0.03	0.048	0.03
Envelope performance	floor insul.	mm	10	50	10
	roof insul.	mm	10	80	80
	wall insul.	mm	10	50	50
	airtightness	ACH	0.04	0.6	0.11
	win. U-value	W/m <sup>2</sup> K	2.4	6	2.4
	win SHGC		0.3	0.7	0.3
	DHW consumption	l/h(unit)	19.56	78.23	58.67
	cooling set.	°C	24	32	32
	heating set.	°C	18	24	18
win. opening factor		0.2	0.5	0.5	
block distance	m	4	12	4	

Table 8. Calibration result (Central-Medium size- 2000's)

		Dimension	Lower	Upper	Result
Geometry	dim. X Y	m	6.32	10.12	6.32/10.12
	orientation	°	-45	45	45
	WWR north		0.1	0.3	0.1
	WWR east		0.2	0.5	0.5
	WWR south		0.2	0.5	0.2
	WWR west		0.2	0.5	0.42
Internal gain	cooker	W/m <sup>2</sup>	10	40	10
	equipment	W/m <sup>2</sup>	1	8	7
	lighting	W/m <sup>2</sup>	2	5	4.25
	occupancy rate		0.03	0.048	0.03
Envelope performance	floor insul.	mm	10	125	50
	roof insul.	mm	10	190	190
	wall insul.	mm	10	100	100
	airtightness	ACH	0.07	0.89	0.28
	win. U-value	W/m <sup>2</sup> K	2.4	6	2.4
	win SHGC		0.3	0.7	0.3
	DHW consumption	l/h(unit)	19.56	78.23	74.32
	cooling set.	°C	24	32	32
	heating set.	°C	18	24	22.6
win. opening factor		0.2	0.5	0.5	
block distance	m	4	12	4	

적 디자인의 결과이다. cv(RMSE)값 6.06%을 기록하였다. 표준 세대는 6.32m X 10.12m의 길이의 평면을 갖는 세대로, WWR은 북측

Table 9. Calibration result (Central-Medium size- after 2010)

		Dimension	Lower	Upper	Result
Geometry	dim. X Y	m	6.32	10.12	6.72/9.52
	orientation	°	-45	45	30
	WWR north		0.1	0.3	0.3
	WWR east		0.2	0.5	0.5
	WWR south		0.2	0.5	0.2
	WWR west		0.2	0.5	0.2
Internal gain	cooker	W/m <sup>2</sup>	10	40	10
	equipment	W/m <sup>2</sup>	1	8	6.8
	lighting	W/m <sup>2</sup>	2	5	5
	occupancy rate		0.03	0.048	0.03
Envelope performance	floor insul.	mm	10	205	25
	roof insul.	mm	10	260	260
	wall insul.	mm	10	180	120
	airtightness	ACH	0.92	1.61	0.94
	win. U-value	W/m <sup>2</sup> K	2.4	6	5.4
	win SHGC		0.3	0.7	0.3
	DHW consumption	l/h(unit)	19.56	78.23	39.12
	cooling set.	°C	24	32	32
	heating set.	°C	18	24	18
win. opening factor		0.2	0.5	0.5	
block distance	m	4	12	4	

의 경우 최솟값인 0.1을 기록하였다. 동측 WWR은 최댓값인 0.5, 서측 0.42, 남측 0.2의 결과를 나타내었다. Internal gain은 경향이 비슷하였는데, 가스를 사용하는 cooker는 최소인 10, 전기를 사용하는 equipment와 lighting은 최댓값은 아니지만, 각각 7과 4.25를 기록하였다. 단열재의 경우 바닥 단열재 두께를 제외한 지붕과 벽체 단열재는 최댓값을 나타냈다.

(Table 9.)은 중부지방 2010년 이후 시뮬레이션의 최소 cv(RMSE) 값을 기록한 디자인의 결과이다. cv(RMSE)값 4.11%로 모든 캘리브레이션 중 가장 낮은 cv(RMSE)값을 기록했다. 단위세대는 6.72m X 9.52m의 평면을 가지며, 북측 WWR은 2000년대 이전과 비슷하게 최댓값인 0.3, 동측 WWR은 앞의 시뮬레이션과 비슷한 경향인 0.5, 남측 0.2, 서측 0.2를 나타내었다. 내부발열 역시 가스사용은 최소로, 전기 사용은 최대로 하는 비슷한 경향을 보였으며, cooker 10, equipment 6.8, lighting 5를 기록했다.

중부지방의 3가지 캘리브레이션 시뮬레이션 결과 자연환기에 영향을 미치는 창의 개폐 계수는 최댓값인 0.5로, 주변 건물로 인한 음영효과에 영향을 미치는 주변 건물과의 거리는 최솟값인 4로 동일하였다.

## 5. 결론

이번 연구는 국가에서 제공하는 데이터인 세대 당 에너지 사용량 데이터를 기반으로한 통계데이터 기반 캘리브레이션이었다. 통계 데이터인 HESS데이터를 바탕으로 준공 시대별, 지역별, 규모별로

구분하였고, 디자인빌터-에너지플러스-모드프론티어로 이어지는 최적화 에너지 시뮬레이션 세트를 활용한 이번 캘리브레이션은 프로그램 상에서 직접적으로 확인할 수 없는 기밀도를 측정하기 위해 기밀도 측정 후처리 작업을 시뮬레이션세트에 추가하였다.

HESS데이터 분석 결과 시뮬레이션 상에서 냉방에너지를 저감해야 할 필요성을 느껴 캘리브레이션 입력변수 중 추가적인 요소로 자연환기 효과와 주변 건물로 인한 차양효과를 추가하였다. 본 캘리브레이션 전에 추가적인 입력변수의 효과를 확인하기 위하여 사전 비교 캘리브레이션을 진행하였고, 그 결과 두 가지 입력변수 모두 시뮬레이션 냉방에너지 오차 저감에 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

본 캘리브레이션 시뮬레이션 결과 2000년 이전 캘리브레이션 cv(RMSE)값 4.16%, 2000년대 cv(RMSE)값 6.06%, 2010년 이후 cv(RMSE)값 4.11%로 모든 캘리브레이션이 낮은 cv(RMSE)값을 나타내었다. 이는 캘리브레이션의 기준이 되는 통계데이터를 바탕으로 모델링과 시뮬레이션 과정설계 단계에서 조정하여 캘리브레이션을 진행하였기에 캘리브레이션 판단 기준인 15%보다 낮은 cv(RMSE)값을 기록한 것으로 판단하였다.

본 연구의 결과는 다세대 주택의 표준모델로 활용하여 향후 에너지 저감을 위한 리모델링 단계에서 유효하게 사용할 수 있을 것이다. 그러나 다세대주택이 다양한 형태와 평면을 가지고 있는 것에 비해 연구에서 사용한 기준 모델은 정보의 부재와 기술의 부재로 인하여 판상형의 동일한 형태의 모델이라는 한계를 가지게 되었다.

### Acknowledgement

본 연구는 한국생태환경건축학회 2021년도 추계학술대회 발표 논문을 확장한 것으로 2021년 국토교통과학기술진흥원 지원으로 이루어졌습니다(과제번호:21AUDP-B151639-03).

### Reference

[1] L.G. Swan, V.I. Ugursal, Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques, *Renewable and sustainable energy reviews*, 13.8(2009), 2009.10, pp.1819-1835.

[2] A.M. Soto, M.F. Jentsch, Comparison of prediction models for determining energy demand in the residential sector of a country, *Energy and Buildings*, 128(2016), 2016.09, pp.38-55.

[3] 김경수 외 3인, 저층 주거건물의 에너지 소요량 예측을 위한 에너지인자 정의 및 참조모델 개발, 한국: 대한건축학회논문집, 제36권 제12호. 2020.12, pp.199-208. // (K.S. KIM et al., Development of Energy Variable Definition and Reference Model for Predicting Energy Consumption of Low-rise Residential Buildings, Korea: Journal of the Architectural Institute of Korea, 36(12), 2020.12, pp.199-208.)

[4] 유동철 외 4인, 머신러닝기반 저층 주거 건물 에너지소요량 예측 모델 개발-단독주택, 다세대, 연립주택을 대상으로, 한국: 한국건축환경설비학회 논문집, 제15권 제2호, 2021.04, pp.152-165. // (D.C. Yoo et al., Development of a Machine Learning-based Low-rise Residential Building Energy Consumption Prediction Model, Korea: Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 15(2), 2021.04, pp.152-165.)

[5] 이나현, 김해진, 서동현, 가구에너지상설표본조사 결과를 활용한 지역, 주거유형, 전용면적, 준공연도별 주거에너지 소비특성 분석, 한국: 한국건축환경설비학회 논문집, 제13권 제6호, 2019.12, pp.545-558. // (N.H. Lee, H.J. Kim, D.H. Seo, Analysis of Residential Energy Use

Features with Respect to Location, Housing Type, Gross Area and Construction Year from Household Energy Standing Survey, Korea: Korea Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 13(6), 2019.12, pp.545-558.)

[6] US Department of Energy Federal Energy Management Program, M&v guidelines: Measurement and verification for performance-based contracts version 4.0. Technical report, 2015.

[7] ASHARAE, ASHRAE Guideline 14 Measurement of Energy, Demand and Water Savings, 2002.

1) 에너지경제연구원, 주거용 건물에너지 소비 요인 분석을 통한 건물에너지 정책방안 연구, 에너지경제연구원 기본연구보고서 17-10, 2017.

2) 에너지경제연구원, 한국에너지공단, 2017년도 에너지총조사보고서.