KIEAE Journal, Vol. 21, No. 5, Oct. 2021, pp.39-46.

KIEAE Journal

Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

111

# 공동주택 냉난방부하모델 개발을 위한 해석 및 검증

*Energy Simulation and Verification for Standard Heating and Cooling Load Model of Apartment*

채수원* · 배상무** · 남유진***

Soowon Chae* · Sangmu Bae** · Yujin Nam***

* *Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (cogksmf153@pusan.ac.kr)*

** *Coauthor, Ph.D Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (sangmu_bae@pusan.ac.kr)*

*** *Corresponding author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (namyujin@pusan.ac.kr)*

ABSTRACT

**Purpose:** Recently, most studies in the field of building load simulation programs have only focused on simplifying the building design factors. As a consequence, the error range for the deviation between the energy consumption of measurement and the energy load of simulation in the apartment is considerable. Therefore, this study aims to determine the prototypical heating and cooling load model for energy analysis of the apartment. **Method:** This study analyzed the monthly energy consumption according to the use of residential buildings using the national statistical data and developed a regression equation for the energy consumption of apartment. The regression equation was verified using pearson correlation coefficient, coefficient of variation of the root mean squared error(Cv(RMSE)), and energy simulation values were analyzed with actual measurements. **Result:** The correlation coefficient of total energy consumption was 0.99 compared between the regression equation and the actual data. Comparing the standard of the measured data with the values of this study, the Cv(RMSE) was 31% respectively. As a result of comparing data with previous studies of energy simulation, it was confirmed that the Pearson correlation coefficients was 1.24 times higher, respectively.

ⓒ 2021. KIEAE all rights reserved.

KEYWORD

공동주택
표준 모델
에너지 시뮬레이션
냉난방 부하

Apartment
Standard Model
Energy Simulation
Heating and Cooling Load

ACCEPTANCE INFO

Received Aug. 25, 2021
Final revision received Oct. 19, 2021
Accepted Oct. 22, 2021

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경

정부는 최근 2020년 '제3차 국가기후변화 적응대책'을 수립하고 2050년까지 탄소중립을 달성하고자 하는 비전을 제시하였다. 탄소중립을 위한 다각적인 정책이 시행되고 있는 가운데 실제 국민의 생활과 밀접한 관련이 있는 건축 부문에서의 온실가스 저감 및 에너지 절감 정책이 주목을 받고 있다. 한편, 'IPCC WG3 보고서'에 따르면 온실가스 저감 잠재적 가능성이 가장 큰 분야를 건물로 지정하는 등 국제적으로도 건물에서 발생하는 온실가스 저감에 주목하고 있으며, 건물에너지 저감 및 신재생에너지를 통한 온실가스 저감을 주요 이행 수단으로 제시하고 있다. 이러한 상황에서 건물을 중심으로 한 에너지 생산 및 공급이 중요한 이슈가 되고 있으며 건물에서의 에너지 소요량(필요량)이나 소비량을 정확하게 예측하고 분석하는 연구가 주목을 받고 있다. 특히, 전체 건물에너지 사용의 약 1/3을 차지하는 냉난방에너지는 냉난방 설비의 용량 선정이나 에너지 효율과도 직접적인 관련이 있음으로, 건물의 계획단계에서 건물 조건(용도, 지역, 단열조건 등)에 따른 냉난방 부하해석의 필요성이 강조되고 있다.

일반적으로 냉난방 부하해석에 있어, 대상 건물의 조건들이 반영된 해석모델의 작성 후 ISO13790에 기반한 계산이 이루어지며, TRNSYS, EnergyPlus 등의 범용 해석툴이나 자체 계산법이 이용된다. 하지만, 대상 건물 조건의 설정은 통상적으로 학회나 협회의 기준을 따른다고 하나, 전체 건물의 특수성을 모두 반영하기는 어려우므로 기본적으로는 해석을 수행하는 개인의 능력이나 경험에 의해 결정되며, 해석 결과의 타당성을 명확하게 확인할 수 있는 근거가 부족하다. 또한, 규정이 명확한 단열조건이나 기밀조건 외에 재실 스케줄이나 실내 발열 등은 명확한 기준이 부족하여 해설 결과와 실제 측정치와의 오차가 적지 않다.

따라서 본 연구에서는 냉난방 부하를 위한 해석 모델 및 해석 방법의 표준화를 위해 해석 모델 결정 및 해석 조건 설정 방법을 제시하고 해석 결과를 기존 연구들과 비교 검토하고자 한다. 그중 본 논문에서는 공동주택을 대상으로 한 냉난방 부하 프로파일 결정방법에 대해 서술하였다.

### 1.2. 선행 연구 분석

냉·난방 에너지부하모델에 관한 연구는 설계인자에 따른 에너지 시뮬레이션을 통한 부하량 예측, 공공 데이터 및 연구기관 자료를 활용한 에너지소비패턴 조사, 실제 주거 건물을 대상으로 한 에너지소비량 측정 등으로 구분 지을 수 있다.

에너지경제연구원은 주거건물의 면적을 6개 기준으로 나누어 에너지 종류에 따른 소비량을 산출하였으며, 평균제곱급오차와 상자그림(Box and whisker plot)을 사용하여 단위면적당 에너지소비량

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
https://doi.org/10.12813/kieae.2021.21.5.039

이 극단 값으로 나타난 주거면적을 구분하여 분석하였다[1,2]. 한편, 한국전력공사는 주거건물을 대상으로 지역에 따른 월별 전력에너지 소비량을 계측하였고, 시간별 소비량 데이터를 바탕으로 상대계수를 산출하여 제시하고 있다[3,4]. 또한, 한국도시가스협회는 월별 도시가스 소비량에 대한 가정용, 일반용, 업무용, 산업용 등으로 구분하여 용도별 가스 소비량에 대한 실측자료를 공개하였다[5]. 이러한 자료는 건물 냉난방 에너지 부하 해석의 검증 자료로 활용될 수 있으나 개별 건물 조건을 반영한 결과로 보기는 어렵다.

개별 건물 단위의 연구로는 Hwang(2009)이 부산 영도구에 위치한 100세대 이상인 22개 아파트 단지를 대상으로 기간별, 기능별 전력소비량을 실측하였으며, 표본 22개 단지 중 N type 단지 하나를 제외한 나머지 21개 단지의 전력소비량을 조사를 수행하였다[6]. 또한, Kim&Im(2011)은 대전지역 20개 단지의 공동주택을 선정하여 월별, 시간별 전력소비패턴을 분석하였으며 난방방식과 준공연도에 따른 상호관계를 비교 수행하였다[7]. Lee&Dong(2019)은 2011년부터 2018년까지의 부산지역 임대 아파트를 대상으로 난방방식 및 복도유형에 따른 가스에너지 소비량을 분석하였으며, 난방기간이 아닌 기간에도 가스에너지 소비량이 높게 나옴을 확인하였다[8]. Jung&Heo(2017)은 서울지역에 한정하여 국민주택 규모(주거면적 85m$^2$, 층고 2.8m)를 기준으로 기계 및 전기 설비의 표준운전조건을 정하였고, 에너지원별 연간 에너지소비 총량을 제시하였다[9]. 한편, Kim(2015)는 친환경적인 아파트 건설을 위하여 국내 건축물에너지효율등급인증 평가에 이용되고 있는 ECO2 프로그램을 사용하여 단위세대 전면 폭 증가 및 발코니 창의 여부에 따른 에너지 성능을 평가하였다[10]. 특히, Lee&Do(2017)는 주거용 공동주택의 에너지 소비량 해석 시, 동적열부하 해석 프로그램의 활용성 향상을 위하여 입력파일의 생성을 용이하게 수행할 수 있는 해석 모델 간략화 방법을 설정하였다[11].

이처럼 선행 연구에서는 건물 에너지 소비량이나 소비 패턴에 대한 정량적 조사 결과는 제시되고 있으나, 건물의 용도별 표준에 가까운 부하 데이터 정립에는 이르지 못하였으며, 특히, 건물에너지해석 결과와의 비교 검토 연구는 드물다. 본 연구에서는 공동주택 냉난방 부하모델의 에너지부하 계산 결과와 공공 기관의 실제 측정 데이터를 비교 검토함으로써 표준모델정립을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

### 1.3. 연구의 목적 및 방법

본 연구에서는 건물 냉난방 부하 표준모델 정립을 위해 건물모델의 선정, 해석조건 설정, 해석결과 분석 및 비교 검증의 일련의 과정을 최신 조사 자료와 정량적 근거에 기반하여 단계적으로 수행하였다. 구체적으로는 표준부하모델 선정을 위한 지역별 대상건물의 선정 방법 및 재실자, 내부 발열 조건 설정 방법을 제시하였으며, 해석 결과 검증을 위한 냉난방 에너지 소비량 비교 분석 방법을 제시하였다. 또한, Fig. 1.은 본 연구의 수행 프로세스를 나타내며, 공동주택 냉난방 부하모델 결정에 사용된 기준 및 자료를 제시하였다. 냉난방 부하에 대한 해석 방법이나 조건 설정은 기존 연구에서 다양하게 제시되었으나 검증 단계를 충분히 고려한 자료는 부족하다. 본 연구는 냉난방 부하 해석 결과 및 비교 검증의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

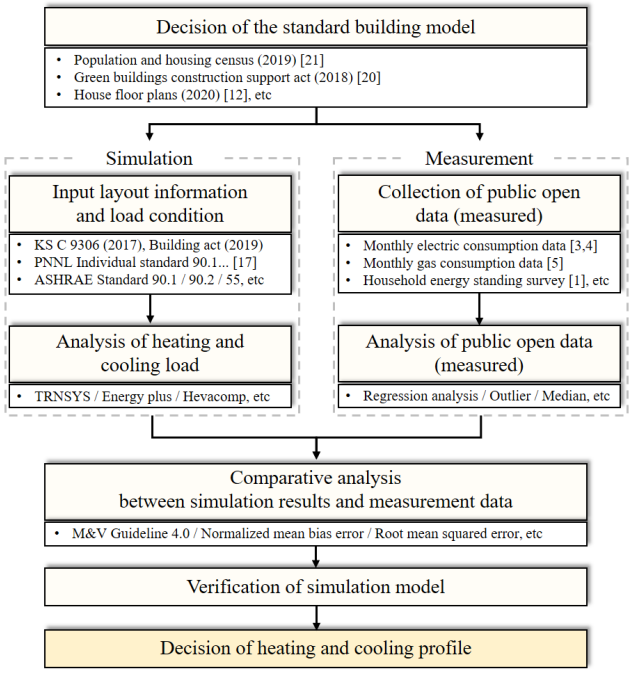


*Fig. 1. Research framework of this study*

## 2. 공동주택 부하모델 선정 및 조건 설정

공동주택모델은 한국토지주택공사의 평면도현황[12]을 참고하여 Fig. 6.과 같이 설정하였다. 아파트의 세대별 면적 가중평균 치를 고려하여 전용면적 84.95m$^2$, 층고 2.4m, 남향으로 설정하였으며, 건물 내부 레이아웃은 Fig. 5.에 나타내었다. 건물 내부 구획 설정은 층별로 공조구역 8개, 비공조 7개의 15개 구역으로 설정하였으며 중간층의 계산 결과 확보를 위해 4개층 구조로 하여 계산하였다. 한편, 공조구역 사용 용도와 창 면적비는 설계도면과 방위별 창면적를 제안한 한국토지주택공사의 주력 평면개발도면 내용을 참고하여 설정하였다.

Table 1.은 공동주택 부하모델의 설정조건을 종합하여 나타낸다. 외피 단열조건은 건축물에너지절약설계기준 중부2 지역의 단열기준을 따랐으며, 부위별 기준에 근거하여 설정하였다. 환기의 경우, KS B 6879(2020)과 기계환기설비의 설치기준(2020)에서 제시한 법적 환기량을 기준으로 설정하였고, 운전모드는 구역별 재실여부에 따라 작동하도록 설정하였다.

한편, 건물 내부발열(Internal heat gain, IHG) 중 전기기기와 재실자에 대한 발열량은 국내 공인된 문헌에는 상세하게 정립되어 있지 않아, ASHRAE 90.1-2019와 ASHRAE 55-2020를 참고하여 산정하였으며, 인체발열의 경우 현열 70W/person, 잠열의 경우에는 58.2W/person, 장비발열은 5.4W/m$^2$로 설정하였다[13][14]. 또한 공동주택의 조명설비는 고효율 LED로 교체되고 있는 것을 감안하여 국내 제로에너지 건축물인증 기술요소 참고서(2020)을 참고하여, 5.5W/m$^2$로 산정하였다[15].

재실자 스케쥴은 전용면적 85m$^2$에 거주하는 재실자의 시간별 행동과 장비사용률, 공조 및 비공조구역 등을 고려하여 시간별 스케줄로 설정하였으며, 토지주택연구원의 실제 주거형태를 고려한 주택

의 종합적 에너지성능평가 검증연구를 참고하였다[16]. 한편, 주말 및 공휴일은 국내 자료가 부족하여 PNNL의 Indiviual standard 90.1 prototype building models의 High rise apartment를 참고하여, 구역을 따로 나누지 않고 설정하였다[17].

연간 냉난방부하 시뮬레이션은 TRNSYS 18의 TRNBuild 모델을 이용하였으며 국내 주요 도시별 기상데이터를 제시하고 있는 한국패시브건축협회에서 제작한 표준기상데이터 자료[18]를 이용하여 계산을 수행하였다.

한편, 냉난방부하 계산 결과를 에너지 소비량으로 환산 시 필요한 보일러의 난방효율과 냉방기기의 성능계수(Coefficient of performance, COP)는 에너지이용 합리화법의 효율관리기자재운용규정[19]을 참고하여, 보일러 효율 88%, 냉방기기 COP 3.3으로 설정하였다.

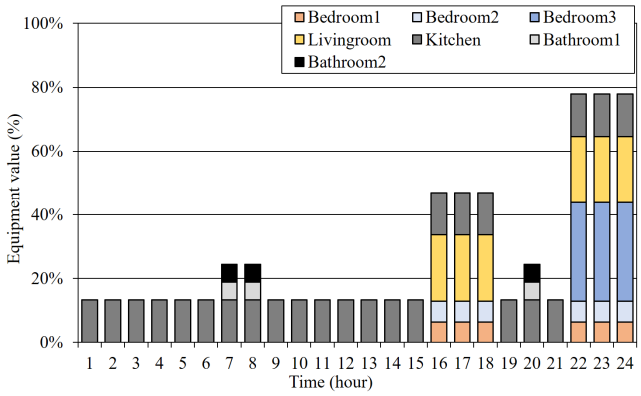


*Fig. 2. Equipment's week day schedule in this simulation*

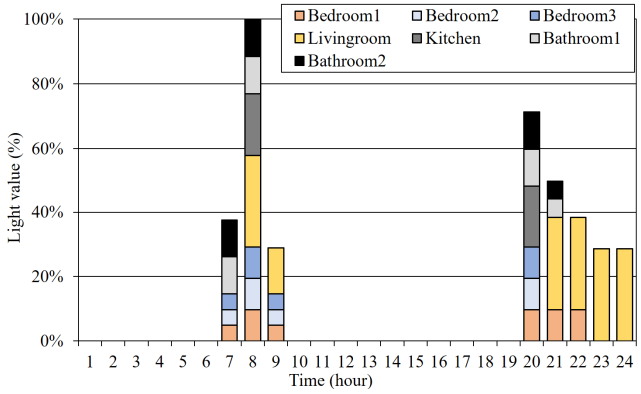


*Fig. 3. Lighting's week day schedule in this simulation*

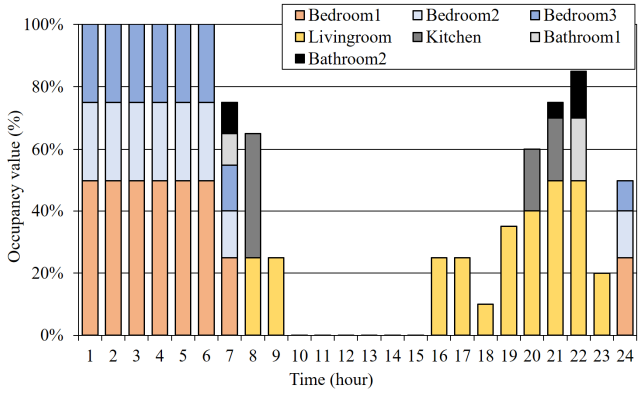


*Fig. 4. Occupant's week day schedule in this simulation*

*Table 1. Simulation condition of the suggested standard building*

| Parameter | | Input Value | References |
|---|---|---|---|
| Building type | Location | Central region 2 | Green buildings construction support act (2018) |
| | Direction | Southward | |
| | Weather data | Seoul (TMY) | Passive house institute Korea |
| | Floor area | 84.95m$^2$/household | Population and housing census (2019) |
| | Floor to ceiling height | 2.40m/stories | Housing act (2018) |
| | Number of floors | 4$^{th}$ floor | - |
| Building material (U-value) | Roof | 0.150/m$^2$·K | Green buildings construction support act (2018) |
| | Exterior wall | 0.17W/m$^2$·K | |
| | Interfloor | 0.81W/m$^2$·K | |
| | Bottom Floor | 0.24W/m$^2$·K | |
| Window | North | 4.15m$^2$/household | Zero energy building_Technology & component (2020) |
| | South | 19.32m$^2$/household | |
| Infiltration flow(ACH) | | 0.15 1/h | Building act (2019) |
| ERV | Supply air flow rate(ACH) | 0.5 1/h | KS C 9306 (2017) |
| | Total heating effectiveness | 70% | KS B 6879 (2020) |
| | Total cooling effectiveness | 45% | |
| Setpoint temperature | Heating | 20°C | KS C 9306 (2017) |
| | Cooling | 27°C | |
| Number of household | | 3.1 people/ household | Population and housing census (2019) |
| People | Sensible heat gain | 70.0W/person | ASHRAE 55 (2020) |
| | Latent heat gain | 58.2W/person | |
| Load density | Lighting | 5.5W/m$^2$ | Zero energy building_technology & component (2020) |
| | Equipment | 5.4W/m$^2$ | ASHRAE 90.1 (2019) |

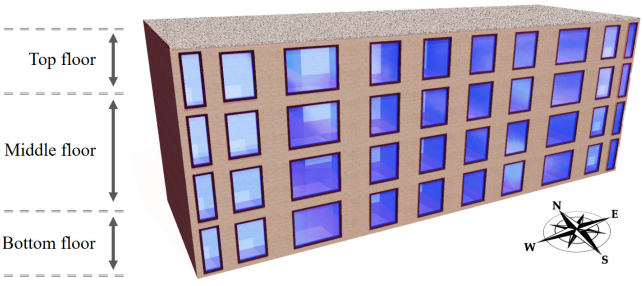


*Fig. 5. 3D model of the suggested standard building*

ⓒ 2021. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved. 

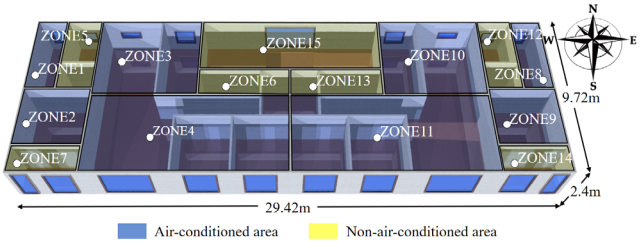


*Fig. 6. Layout of the suggested standard building*

## 3. 검증용 냉난방 에너지 소비량 추정 방법

### 3.1. 공동주택 에너지 소비량 산출

본 연구에서는 냉난방부하 해석 결과의 검증을 위해 실제 측정된 에너지 소비량 데이터로부터 냉난방 에너지 소비량을 추정하는 방법으로 검증데이터를 확보하였다. 이를 위해 중부2 지역 8개의 주요 도시(서울, 인천, 대전, 부천, 수원, 성남, 강릉, 구미)를 중심으로 주거 건물의 에너지소비량을 데이터를 수집하였다.

특히, 전력소비량 데이터는 2014년 1월부터 2019년 12월까지 4년을 기준으로, 한국전력공사의 전력통계속보[3]의 자료를 사용하였고, 2020년 전력소비행태분석[4]의 전력소비자의 시간별 소비량 데이터를 참고하였다. 또한, 가스소비량 데이터는 2020년 1월부터 2020년 12월까지 1년을 기준으로, 한국도시가스협회의 도시가스사업통계월보 자료[5]를 사용하였다.

또한, 정부통계자료를 바탕으로, 공동주택 평균 가구원수 및 주거면적, 에너지원별 월별 및 시간별 소비량에 대한 기초자료를 수집하였다.

중부2 지역의 각각 도시별 공동주택 건물 형태의 세대별 가중평균 가구원 수는 세대별 평균 가구원 수에 공동주택 건물 형태별 가구원수비를 곱하여 (Eq. 1)과 같이 산출하며, 전체 건물 형태의 세대별 가중평균 가구원 수는 (Eq. 1) 결과에 도시별 가구원수비를 곱하여 (Eq. 2)와 같이 산출한다.

세대별 평균 주거면적은 1인당 가구면적[21]에 연구대상지역의 세대별 가구원 수인 (Eq. 1) 또는 (Eq. 2) 결과를 곱하여 산출한다.

공동주택 건물 형태 및 에너지 종류에 따른 단위면적당 월별 에너지소비량에 대한 추정은 전력 및 가스소비량 통계 데이터 합에 (Eq. 3) 결과를 나누어 산출한다.

$$N_{mean,k}=\sum_{j=1}^{n}\left\{\left(\sum_{i=1}^{n} i_j \times P_{i,j}\right)\times P_j\right\} \quad \text{(Eq. 1)}$$

$$N_{mean}=\sum_{k=1}^{n}\left(N_{mean,k}\times P_k\right) \quad \text{(Eq. 2)}$$

$$A_{ave,j,k}=N_{mean}\times A_{j,k} \quad \text{(Eq. 3)}$$

$$E_{j,k,\tau}=\frac{\sum_{\tau=1}^{n}\left(E_{elec,j,k,\tau}+E_{gas,j,k,\tau}\right)}{A_{ave,j,k}}\ \mathrm{S} \quad \text{(Eq. 4)}$$

*Table 2. Survey results of apartment*

| Division | Value | Reference |
|---|---|---|
| Region | Central region 2 | [20] |
| People (person/household) | 3.1 | [21] |
| Floor area ($m^2$/household) | 81.5 | |
| Electricity consumption (kWh/$m^2$year) | 34.9 | [3,4] |
| Gas consumption (kWh/$m^2$year) | 16.5 | [5] |

여기서, $N_{mean}$는 가중평균 가구원수, $k$는 중부2 지역의 8개 도시, $i$는 재실인원수를 나누는 척도, $j$는 주거 형태, $\tau$는 시간, $P$는 가구별 인원수비, $A_{j,k}$는 1인당 가구면적, $A_{ave}$는 주거형태별 가중평균 가구면적, $E_{elec,j,k,\tau}$와 $E_{gas,j,k,\tau}$는 지역 및 용도에 따른 시간별 에너지소비량을 나타낸다.

Table 2.는 중부2 지역 공동주택 건물 형태의 평균 면적 및 가구원수, 에너지소비량을 산출한 결과이며, 이는 각 건물 형태의 에너지 부하모델 해석을 위한 기준값을 나타낸다.

Table 3.은 (Eq. 1)~(Eq.4)와 인구주택총조사[21]의 자료를 활용하여 아파트 형태의 단위면적당 에너지원별 소비량을 산출한 결과이다. 여기서, $Plug_{elec}$는 일반전력, $Heating_{elec}$는 난방전력, $Cooling_{elec}$는 냉방전력, $Heating_{gas}$는 난방가스, $Cooking_{gas}$는 취사가스, $DHW_{gas}$는 급탕가스를 의미한다.

Table 4.는 단독주택 및 공동주택 건물 형태별 월평균 에너지소비량과 가구면적의 산출 결과이다. 여기서, 공동주택(Apartment)은 한 건물안에서 여러 가구가 독립된 형태로 생활할 수 있는 주거건물을 가르키며, 아파트(Large apartment)는 5개 층 이상의 건물을 여러 구획으로 나누어 독립된 가구가 생활할 수 있도록 만든 공동주택 형태의 건물을 의미한다. 또한, 4개 층 이하인 공동주택 형태의 건물은 연립 및 다세대 주택(Small apartment)으로 정리하였다.

### 3.2. 공동주택 냉난방 에너지 소비량 추정

본 연구에서는 냉난방 부하모델로 계산된 해석 결과의 검증을 위해 실제 측정된 냉난방 에너지 소비량과의 비교 검토를 실시하고자 하였다. 하지만, 냉난방 에너지만을 연간으로 측정한 데이터가 부족하여, 본 논문에서는 전체 에너지 소비량에서 냉난방 에너지 소비량을 추출하여 비교검토하는 방식으로 검증을 수행하였다.

실측 데이터 분석에 있어 월별 에너지소비량 표본의 이상치(Outlier)를 구분하기 위해 John W.Tukey의 Box and Whisker Plot을 참고하였다. 2014년~2019년 사이의 에너지 종류에 따른 연도별 월별 소비량을 크기순으로 나열하여, 실측값에 대한 편차가 50% 범위의 3배를 초과할 경우 극단 값으로 처리하였으며, 자료가 없거나 극단 값으로 나온 경우는 회귀방정식을 사용하여 추정하였다. Table 5.는 데이터 분석을 통해 도출한 에너지 소비 용도별 회귀방정식을 나타내며 Fig. 7.은 회귀방정식을 통해 산출한 에너지소비량을 월별로 구분하여 나타낸 결과이다.

*Table 3. Energy consumption of the large apartment by regions*

| month | $Plug_{elec}$ (kWh/m$^2$) | $Cooling_{elec}$ (kWh/m$^2$) | $Heating_{elec}$ (kWh/m$^2$) | $Heating_{gas}$ (kWh/m$^2$) | $Cooking_{gas}$ (kWh/m$^2$) | $DHW_{gas}$ (kWh/m$^2$) | $E_{total}$ (kWh/m$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Seoul | | | | | | | |
| Jan. | 0.8 | 0.1 | 2.5 | 3.2 | 1.0 | 5.2 | 22.7 |
| Feb. | 1.1 | 0.1 | 2.1 | 12.4 | 1.1 | 4.9 | 21.8 |
| Mar. | 2.0 | 0.0 | 0.9 | 9.2 | 1.1 | 3.8 | 17.0 |
| Apr. | 2.7 | 0.1 | 0.3 | 6.6 | 1.1 | 2.8 | 13.5 |
| May. | 2.6 | 0.1 | 0.1 | 3.5 | 1.0 | 1.6 | 9.0 |
| Jun. | 2.6 | 0.3 | 0.0 | 1.4 | 1.0 | 0.9 | 6.2 |
| Jul. | 1.7 | 1.6 | 0.0 | 0.7 | 1.0 | 0.6 | 5.6 |
| Aug. | 2.1 | 1.9 | 0.0 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 6.2 |
| Sep. | 2.7 | 0.6 | 0.1 | 0.9 | 0.8 | 0.6 | 5.7 |
| Oct. | 2.4 | 0.1 | 0.3 | 2.8 | 1.2 | 1.4 | 8.2 |
| Nov. | 1.8 | 0.1 | 1.2 | 6.3 | 1.1 | 2.7 | 13.1 |
| Dec. | 0.7 | 0.1 | 2.4 | 12.3 | 1.2 | 4.9 | 21.4 |
| Total | 23.3 | 4.8 | 9.8 | 70.1 | 12.3 | 30.0 | 150.4 |
| Incheon | | | | | | | |
| Jan. | 0.8 | 0.1 | 2.4 | 12.9 | 1.0 | 5.1 | 22.5 |
| Feb. | 1.1 | 0.1 | 2.1 | 12.2 | 1.0 | 4.8 | 21.6 |
| Mar. | 2.0 | 0.0 | 0.9 | 9.0 | 1.1 | 3.7 | 16.8 |
| Apr. | 2.7 | 0.1 | 0.3 | 6.5 | 1.1 | 2.7 | 13.4 |
| May. | 2.6 | 0.1 | 0.1 | 3.4 | 1.0 | 1.6 | 8.8 |
| Jun. | 2.6 | 0.3 | 0.0 | 1.4 | 1.0 | 0.8 | 5.9 |
| Jul. | 1.6 | 1.6 | 0.0 | 0.7 | 1.0 | 0.6 | 5.2 |
| Aug. | 2.1 | 1.8 | 0.0 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 5.8 |
| Sep. | 2.6 | 0.6 | 0.1 | 0.9 | 0.8 | 0.6 | 5.4 |
| Oct. | 2.4 | 0.1 | 0.3 | 2.7 | 1.2 | 1.4 | 8.0 |
| Nov. | 1.7 | 0.1 | 1.1 | 6.2 | 1.1 | 2.6 | 12.9 |
| Dec. | 0.7 | 0.1 | 2.3 | 12.0 | 1.1 | 4.8 | 21.2 |
| Total | 22.9 | 4.8 | 9.6 | 68.7 | 12.1 | 29.4 | 147.5 |
| Daejeon | | | | | | | |
| Jan. | 0.7 | 0.1 | 2.1 | 11.2 | 0.9 | 4.4 | 19.5 |
| Feb. | 1.0 | 0.0 | 1.8 | 10.6 | 0.9 | 4.2 | 18.9 |
| Mar. | 1.7 | 0.0 | 0.8 | 7.9 | 0.9 | 3.2 | 14.6 |
| Apr. | 2.3 | 0.0 | 0.2 | 5.6 | 0.9 | 2.4 | 11.7 |
| May. | 2.3 | 0.1 | 0.1 | 3.0 | 0.9 | 1.4 | 7.6 |
| Jun. | 2.2 | 0.3 | 0.0 | 1.2 | 0.8 | 0.7 | 5.6 |
| Jul. | 1.4 | 1.4 | 0.0 | 0.6 | 0.9 | 0.5 | 4.5 |
| Aug. | 1.8 | 1.6 | 0.0 | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 5.0 |
| Sep. | 2.3 | 0.5 | 0.0 | 0.8 | 0.7 | 0.5 | 4.7 |
| Oct. | 2.1 | 0.1 | 0.3 | 2.4 | 1.0 | 1.2 | 6.9 |
| Nov. | 1.5 | 0.0 | 1.0 | 5.4 | 0.9 | 2.3 | 11.2 |
| Dec. | 0.6 | 0.0 | 2.0 | 10.5 | 1.0 | 4.2 | 18.3 |
| Total | 19.9 | 4.1 | 8.4 | 59.8 | 10.5 | 25.6 | 128.4 |
| Central region 2 | | | | | | | |
| Jan. | 0.8 | 0.1 | 2.5 | 13.2 | 1.0 | 5.2 | 22.8 |
| Feb. | 1.1 | 0.1 | 2.1 | 12.5 | 1.1 | 4.9 | 21.9 |
| Mar. | 2.0 | 0.0 | 0.9 | 9.2 | 1.1 | 3.8 | 17.1 |
| Apr. | 2.7 | 0.1 | 0.3 | 6.6 | 1.1 | 2.8 | 13.6 |
| May. | 2.6 | 0.1 | 0.1 | 3.5 | 1.0 | 1.6 | 9.0 |
| Jun. | 2.6 | 0.3 | 0.0 | 1.4 | 1.0 | 0.9 | 6.2 |
| Jul. | 1.7 | 1.6 | 0.0 | 0.7 | 1.0 | 0.6 | 5.5 |
| Aug. | 2.1 | 1.9 | 0.0 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 6.1 |
| Sep. | 2.7 | 0.6 | 0.1 | 0.9 | 0.8 | 0.6 | 5.6 |
| Oct. | 2.4 | 0.1 | 0.3 | 2.8 | 1.2 | 1.4 | 8.2 |
| Nov. | 1.8 | 0.1 | 1.2 | 6.3 | 1.1 | 2.7 | 13.2 |
| Dec. | 0.7 | 0.1 | 2.4 | 12.3 | 1.2 | 4.9 | 21.5 |
| Total | 23.3 | 4.8 | 9.8 | 70.1 | 12.4 | 30.0 | 150.5 |

ⓒ 2021. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved. 

*Table 4. Energy consumption measured by residential building types*

| Division | $E_{monthly}$ (kWh/m$^2$) | $A_{ave}$ (m$^2$) |
|---|---|---|
| 1. Detached house | 11.7 | 76.1 |
| 2. Apartment | 11.8 | 81.5 |
| - Large apartment | 12.5 | 88.3 |
| - Small apartment | 10.1 | 62.3 |
| - Officetel | 11.6 | 54.5 |

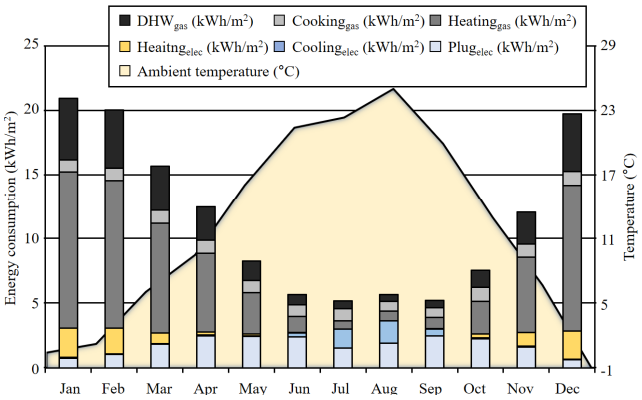


*Fig. 7. Monthly energy consumption calculated by regression equation*

*Table 5. Regression analysis of energy consumption(kWh/m2)*

| Parameter | Equation | $r_\tau$ | $r_\tau^2$ |
|---|---|---|---|
| Plug$_{elec}$ | $0.0003\tau^3-0.0561\tau^2+0.706\tau+0.1466$ | 0.82 | 0.68 |
| Cooling$_{elec}$ | $-0.0071\tau^3+0.1084\tau^2-0.3328\tau-0.2501$ | 0.68 | 0.47 |
| Heating$_{elec}$ | $0.0025\tau^3+0.0297\tau^2-0.8141\tau+3.1627$ | 0.97 | 0.95 |
| Heating$_{gas}$ | $0.0392\tau^3-0.3993\tau^2-1.0959\tau+14.375$ | 0.99 | 0.99 |
| Cooking$_{gas}$ | $0.0054\tau^2-0.0687\tau+1.1247$ | 0.52 | 0.27 |
| DHW$_{gas}$ | $0.0149\tau^3-0.1549\tau^2-0.3609\tau+5.5572$ | 0.99 | 0.99 |
| E$_{total}$ | $0.0523\tau^3-0.5119\tau^2-1.7575\tau+24.427$ | 0.99 | 0.98 |

* When 8,760 hours are applied, it can be used τ*n/8760

한편, 회귀방정식의 결과와 실제 소비량 측정치 사이의 정량적 상관관계를 파악하기 위하여, 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient) (Eq. 5)을 이용한 검증을 실시하였다. 피어슨 상관계수는 −1부터 1 범위의 실수로 결과로 산출되며 상관계수가 1에 접근할수록 모집단과 표본의 중심값에 대한 편차의 크기가 작음을 의미하며, 상관관계의 정도가 크다는 것을 알 수 있다.

$$r_{j,k,\tau}=\frac{\sum_{\tau=1}^{n}\left(E_{j,k,s,\tau}-\overline{E}_{j,k,s}\right)\left(E_{j,k,e,\tau}-\overline{E}_{j,k,a}\right)}{\sqrt{\sum_{\tau=1}^{n}\left(E_{j,k,s,\tau}-\overline{E}_{j,k,s}\right)^2}\sqrt{\sum_{\tau=1}^{n}\left(E_{j,k,e,\tau}-\overline{E}_{j,k,a}\right)^2}} \quad \text{(Eq. 5)}$$

여기서, $r_{j,k,\tau}$는 지역 및 시간에 따른 단위면적당 에너지소비량의 편차에 따른 피어슨 상관계수, n은 시간에 종속된 독립변수를 의미한다. $E_{j,k,s,\tau}$는 조사대상 표본의 에너지소비량, $E_{j,k,e,\tau}$는 비교 대상의 모집단의 에너지소비량, $\overline{E}$는 단위 시간당 모집단과 표본의 평균 에너지소비량을 의미한다.

중부2 지역의 전력 및 가스에 대한 실측자료와 회귀방정식 간의 에너지 종류별 소비량의 상관계수를 도출하였고, 이중 취사에 사용된 가스의 사용량의 상관계수는 0.52로 상관 정도가 낮았다. 하지만, 총 에너지소비량에 대한 상관계수는 0.99로 두 에너지 집단에 대한 상관 정도가 매우 높음을 확인하였다.

## 4. 공동주택 냉난방 부하모델 검증

### 4.1. 냉난방 부하 및 에너지 소비량 산출 결과

Fig. 8.는 본 연구에서 제시한 공동주택 모델의 연간 냉난방 부하계산 결과를 나타낸다. 냉난방 부하계산 결과를 바탕으로 공동주택의 용도별 단위면적당 에너지 소비량에 대한 추정한 결과를 Fig. 9.에 나타냈다. 그 결과, 연간 총 에너지 소비량은 150.0kWh/m$^2$로 나타났으며, 플러그 전력은 22.9kWh/m$^2$, 냉방전력은 6.0kWh/m$^2$, 난방전력은 11.6kWh/m$^2$, 난방가스는 67.9kWh/m$^2$, 취사가스는 12.2kWh/m$^2$, 급탕가스는 30.2kWh/m$^2$로 산출되었다.

### 4.2. 에너지소비량 실측 및 해석자료와의 비교검증

본 연구에서는 제안된 공동주택 냉난방 부하계산 결과의 검증을

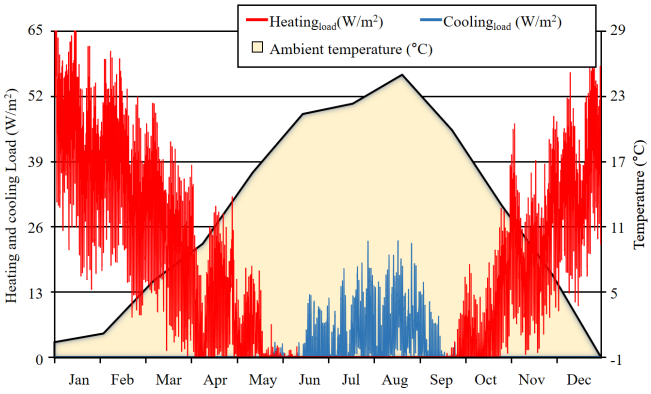


*Fig. 8. Simulation result (hourly energy demand)*

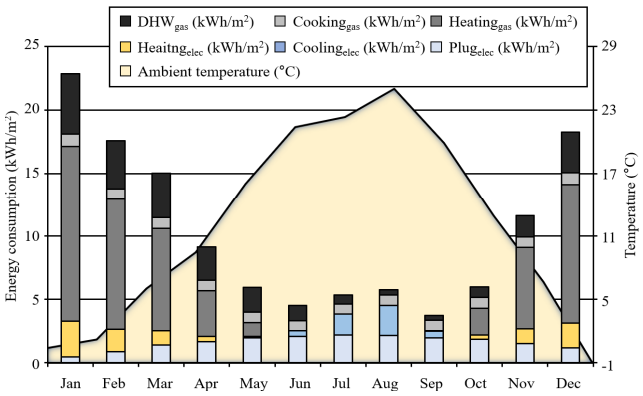


*Fig. 9. Monthly energy consumption calculated by regression equation and simulation*

위해 선행 실측 및 해석 연구결과와의 비교 분석을 실시하였다. 표준 부하모델을 적용한 시뮬레이션의 시간별 냉난방 부하는 냉난방 기기의 효율을 종합 반영하여, 에너지 소비량의 형태로 산출하였으며, 기존 연구에서의 에너지 소비량도 냉난방 부분만 추출되어 비교하였다.

실제 측정값 및 해석 값의 비교검증으로 많이 사용되는 Root Mean Squared Error(Cv(RMSE))는 M&V Guideline 4.0[22]를 참고하여, (Eq. 6)와 같이 정리하였다. 또한, Cv(RMSE)값은 0%에 가까울수록 비교값이 정확하다는 것을 나타낸다.

$$Cv(RMSE)_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum_{\tau=1}^{n}(E_{s,\tau}-E_{a,\tau})^2}{n}} \Big/ \frac{\sum_{\tau=1}^{n}E_{a,\tau}}{n} \times 100 \quad \text{(Eq. 6)}$$

여기서, s는 시뮬레이션 값(simulation data), a는 실측값(actual data)을 의미하며, 지역과 주거형태, 에너지 소비 형태를 고려하여 값을 적용하고, $E_{a,\tau}$는 가구당 시간별 에너지소비량을 나타낸다.

Table 6.은 비교 및 검증을 위한 선행연구자료들을 포함하며, 공동주택 에너지소비량에 대한 실측자료와 부하모델 해석자료로 나뉜다. 검증에 대한 기준은 정부통계자료 Ref. 1을 기준으로 에너지소비량에 대한 비교를 실시하였다.

*Table 6. Comparison result between previous study and this study*

| Division | Analysis method | Location | $E_{cooling}$ (kWh/m$^2$) | $E_{heating}$ (kWh/m$^2$) | Cv(RMSE) (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Ref. 1 [Measurement] | Data collecting | Central 2 | 4.8 | 79.9 | - |
| Ref. 2 [Measurement] | Data collecting | Busan | 5.2 | 85.1 | 22 |
| Ref. 3 [Measurement] | Data collecting | Daejeon | 5.2 | 85.2 | 23 |
| Ref. 4 [Measurement] | Data collecting | Busan | 5.3 | 87.3 | 32 |
| Ref. 5 [Simulation] | ECO2 | Seoul | 6.9 | 114.2 | 148 |
| Ref. 6 [Simulation] | ECO2 | Southern | 2.9 | 48.5 | 136 |
| Ref. 7 [Simulation] | Energy Plus | Seoul | 19.5 | 109.4 | 180 |
| This study [Simulation] | TRNSYS | Central 2 | 4.8 | 72.3 | 31 |

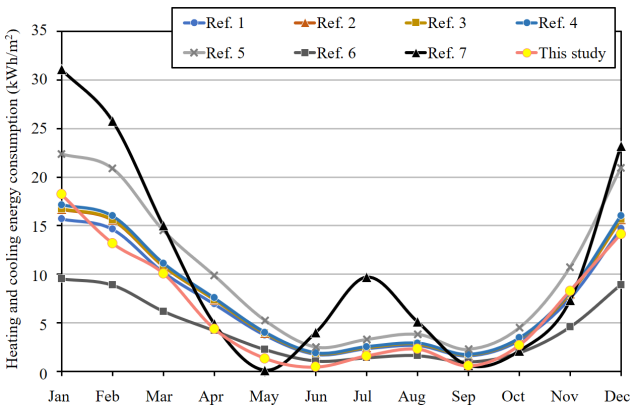


*Fig. 10. Comparison result of heating and cooling energy consumption*

하지만, 건물의 냉난방 부하는 그 자체를 실측하기도 어렵고, 실측결과 또한 벽체나 창호 등 특정 부위에 국한되어 전체 냉난방 부하의 실측결과를 구하기는 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 해석결과와 실측결과를 냉난방 에너지 소비량의 형태로 산출하여 비교검토를 실시하였다. 여기서, 해석 결과인 냉난방 부하량은 냉난방 기기 성능(보일러 88%, EHP COP 3.3)을 고려하여 냉난방 에너지 소비량으로 환산되었다.

기준값인 Ref. 1의 전력소비량은 중부2 지역 8개 도시의 8,098,530세대를 대상으로한, 한국전력 전력통계속보 및 전력소비행태분석[3, 4]의 실측 통계자료로 산출되었다. 자료 수집이 가능한 8,098,530세대를 대상으로 하였다. 가스소비량은 도시가스사업통계월보[5]의 실측자료를 기준으로, 자료 수집한 3,280,105세대를 대상으로 자료를 수집하였다.

Ref. 2[6]의 부산지역의 공동주택 14,113세대, Ref. 3[7]은 대전지역의 공동주택 13,955세대를 대상으로 에너지소비량을 분석하였다. 하지만, Ref. 3[7], Ref. 4[8], Ref. 5[9], Ref. 6[10], Ref. 7[11]의 연구자료 경우, 연구 대상의 지역 및 건물의 특성을 자세하게 묘사하고 조사하였지만, 조사대상의 세대수는 따로 정리되어 있지 않음을 확인하였다.

특히, 실측자료인 Ref. 2~Ref. 4와 기준값의 냉난방 에너지소비량의 Cv(RMSE) 값은 평균 25.7%로 상관관계가 높게 나타났으며, 해석자료인 Ref. 5~Ref. 7과의 Cv(RMSE) 값은 평균 154.7%로 상관관계가 부족하게 나타났다. 본 연구의 냉난방 에너지소비량에 대한 Cv(RMSE) 값은 31%로 해석자료 중 가장 높게 나타내었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 공동주택의 냉난방 부하 모델 개발을 위해 건물모델의 선정, 해석조건 설정, 해석결과 비교 분석의 프로세스를 제시하였다. 또한, 실측 데이터 및 선행 해석 연구결과와의 비교 분석을 실시하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 공동주택 냉난방 부하 모델과 에너지 추정 식을 통해 도출한 연간 총 에너지 소비량은 150.0kWh/m$^2$로 나타났으며, 플러그 전력, 냉방전력, 난방전력, 난방가스, 취사가스, 급탕가스 에너지소비량은 각각 22.9kWh/m$^2$, 6.0kWh/m$^2$, 11.6kWh/m$^2$, 67.9kWh/m$^2$, 12.2kWh/m$^2$, 30.2kWh/m$^2$로 산출되었다.

(2) 본 논문의 공동주택 냉난방 부하모델의 계산 결과와 실측 데이터와의 비교 검토 결과, Cv(RMSE)는 31%로 높은 정확도로 부합하는 것을 확인했다. 이것은 선행 해석 연구결과 대비 Cv(RMSE) 기준 상관관계가 123.7% 높음을 나타내었다.

(3) 공동주택 에너지 소비 용도별 소비량 추정 모델을 도출하여 냉난방 에너지 소비량을 비롯한 급탕, 조명, 가스 등의 에너지 소비량을 추정하였다. 또한, 추정 모델과 실제 측정 데이터와의 피어슨 상관계수 값은 0.86으로 상관관계가 높음을 확인하였다.

ⓒ 2021. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved. 

본 논문의 결과는 중부2 지역에 위치한 8개 도시의 공동주택에 국한되며, 표준화를 위해서는 기상모델, 기기 효율 변화, 재실자 행동 패턴 등 다양한 관점에서의 추가 검증이 필요하다는 한계도 있다. 향후, 상업 시설이나 업무시설, 병원 등과 같은 다양한 용도의 부하모델 개발과 함께 표준화 연구를 추진할 계획이다.

## Acknowledgement

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1A2C2014259). 또한, 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수열 활용확대 기술 및 환경적합성 기술 개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RE202007044).

## Reference

[1] 한국에너지경제연구원, 가구에너지소비실태조사, 2018.12. // (Korea Energy Economics Institute, Household Energy Standing Survey, 2018.12.)
[2] B. O'Leary et al., Identification and influence of spatio-temporal outliers in urban air quality measurements, Netherlands: Science of the Total Environment, 573, 2016.12, pp.55-56.
[3] 한국전력공사, 전력통계속보, 2020.12. // (Koera Electric Power Corporation, The Monthly Report on Major Electric Power Statistics, 2020.12.)
[4] 한국전력공사, 전력소비행태분석, 2020.04. // (Korea Electric Power Corporation, Analysis of Electricity Consumption Behavior, 2020.04.)
[5] 한국도시가스협회, 도시가스사업통계월보, 2020.12. // (Korea City Gas Association, The Monthly Report on Major Gas Power Statistics, 2020.12.)
[6] 황광일, 연안지역 아파트의 전력소비량 실태조사, 한국: 한국항해항만학회 논문집, 제33권 제3호, 2009.04, pp.241-245. // (K.I. Hwang, A Survey on the Electric Power Consumptions of Apartments located at Coastal Area : Yeongdo-gu, Busan, Korea, Korea: Journal of Navigation and Port Research, 33(3), 2009.04, pp.241-245.)
[7] 김강식 외 3인, 대전지역 공동주택의 전력소비 실태 및 패턴 분석 연구, 한국: 한국생태환경건축학회 논문집, 제11권 제5호, 2011.10, pp.91-96. // (K.S. Kim et al, An Analysis of Electricity Consumption Profile based on Measurement Data in Apartment Complex in Daejeon, Korea: Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, 11(5), 2011.10, pp.91-96.)
[8] 이준기 외 4인, 부산 임대 아파트의 난방에너지 소비량 검토에 관한 연구, 한국: 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2019.6, pp.724-727. // (J.G. Lee et al, A Study on the Evaluation of heating Energy Consumption of Busan Rental Apartment Houses, Korea: The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, 2019.6, pp.724-727.)
[9] 정해권, 정영선, 허정호, 공동주택의 표준건물 설정에 따른 에너지소비량 산정 및 특성분석, 한국: 대한건축학회 논문집, 제33권 제9호, 2017.9, pp.45-52. // (H.K. Jung, Y.S. Jeong, J.H. Huh, A study on the Establishment of Refernce Buildings of Apartments and Estimation of Energy Consumption, Korea: ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA, 33(9), 2017.9, pp.45-52.)
[10] 김창성, ECO2 프로그램을 이용한 공동주택의 단위세대 평면 형태에 따른 에너지 효율 평가, 한국: 한국생태환경건축학회 논문집, 제15권 제5호, 2015.10, pp.89-94. // (C.S. Kim, The influence of Unit Plan Shapes to the Energy Efficiency of Collective Housing Simulated by ECO2 Software, Korea: KIEAE Journal, 15(5), 2015.10, pp.89-94.)
[11] 이용준, 도신영, 오은주, 공동주택 에너지 해석 모델의 입력 파일 생성 자동화를 위한 세대 평면 간략화 방법에 대한 연구 – Energyplus program을 중심으로, 한국: 한국생태환경건축학회 논문집, 제17권 제6호, 2017.12, pp.239-244. // (Y.J. Lee, S.Y. Do, E.J. Oh, The Simplification Method of Shape of Unit Residence Plan for Automatic Generation of Input File of Apartment House Energy Analysis Model – Focused on Energyplus program, Korea: KIEAE Journal, 17(6), 2017,12. pp.239-244.)
[12] 한국토지주택공사, 한국토지주택공사 주택 평면도 현황, 2020. // (Korea Land and Housing Corporation, House floor plans, 2020.)
[13] ASHRAE, ASHRAE Standard 90.1-2019, Energy standard for buildings except low-rise residential buildings, 2019.
[14] ASHRAE, ASHRAE Standard 55-2020, Thermal environmental conditions for human occupancy, 2020.
[15] 한국에너지공단, 제로에너지건축물 인증 기술요소 참고서, 2020. // (Korea Energy Agency, Zero energy building _ Technology & Componetn, 2020.)
[16] 한국토지주택공사, 실제 거주형태를 고려한 주택의 종합적 에너지 성능평가 검증연구, 2016. // (Korea Land and Housing Corporation, A Comprehensive Validation for Energy Performance of Houses through the Occupant Behavior, 2016.)
[17] PNNL, Individual standard 90.1 prototype building models, 2018.10
[18] (사)한국패시브건축협회, 표준기상데이터, 2013. // (Passive House Institute Korea, Climate data, 2013.)
[19] 산업통상자원부, 에너지이용 합리화법, 효율관리 기자재 운용 규정, 2021. // (Ministry of trade, industry and energy, Energy use rationalization act, Designation of efficiency management machinery, equipment, or materials, 2021.)
[20] 국토교통부, 녹색건축물 조성 지원법, 2018. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Green buildings construction support act, 2018.)
[21] 통계청, 인구주택총조사, 2020. // (Commissioner of Statistics Korea, Population and Housing Census, 2020.)
[22] M&V Guidelines, Measurement and verification for federal energy projects version 4.0, USA: US Deparment of Energy, 2015.