

순환신경망 기반 어린이집 에너지 소비량 예측모델 개발 및 SHAP 기반 변수 중요도 분석

Development of a RNN-Based Energy Consumption Prediction Model for Daycare Centers and SHAP-Based Feature Importance Analysis

김혜인* 윤지영** 박보랑*** 문진우****
Kim, Hye-In* Yun, Ji-Young** Park, Bo-Rang*** Moon, Jin-Woo****

Abstract

This study developed an RNN-based energy consumption prediction model for daycare centers using DesignBuilder simulation data. Between the LSTM and GRU models, the GRU achieved the highest accuracy with a CvRMSE of 2.42% and R^2 of 0.9995, and was selected as the final model. The SHAP analysis identified heating setpoint temperature as the most influential factor affecting energy consumption. These results highlight the importance of temperature control for efficient energy management. Future work will involve validation with measured data and application to real-time control to assess model practicality.

키워드 : 에너지 소비량 예측, 딥러닝, 어린이집, SHAP 분석 Keywords : Energy consumption prediction, Deep learning, Daycare center, SHAP analysis

1. 서론

1.1 연구 배경

최근 건물의 에너지 효율화와 실내환경 품질을 동시에 향상시키기 위한 예측 기반 제어 기술이 주목받고 있다. 이러한 기술은 영유아가 장시간 머무는 어린이집과 같이 쾌적한 환경 유지가 중요한 공간에서 필요성이 더욱 크다. 어린이집은 일반 사무공간이나 주거공간과 달리 재실자의 연령과 활동 특성에 따라 실내 열환경 요구조건이 크게 달라, 정밀한 에너지 관리가 요구된다. 기존의 단순 스케줄 제어나 온도 설정 중심의 운영 방식은 시계열적 변화나 변수 간 상관관계를 충분히 고려하기 어려워 에너지 사용 패턴의 복잡성을 반영하는 데 한계가 있다. 이에 따라 어린이집의 운영 특성과 환경적 요구를 반영하면서도 에너지 소비를 효율적으로 예측·관리할 수 있는 데이터 기반 예측모델의 개발이 중요하다.

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 어린이집을 대상으로 시뮬레이션 데이터를 활용한 에너지 소비량 예측모델을 개발하고, 이를 통해 주요 변수를 분석함으로써 향후 실내환경 제어에 활용 가능한 기초자료를 제시하는 것이다. 이를 위해 DesignBuilder 시뮬레이션 데이터를 활용하여 순환신경망(Recurrent neural network, RNN) 기반 예측모델을 개발 및 평가하였다. 또한, SHapley Additive exPlanations (SHAP) 기법을 적용하여 예측모델의 입력변수가 에너지 소비량 예측 과정에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 향후 어린이집의 실내환경 제어에 적용 가능한 효율적이고 쾌적한 유지 방안을 제시하고자 한다.

* 중앙대학교 대학원 석사과정

** 중앙대학교 대학원 박사과정

*** 중앙대학교 건축학과 연구교수, 건축학 박사

**** 중앙대학교 건축학과 교수, 공학박사

(교신저자 : gilerbert73@cau.ac.kr)

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

2. 연구 방법

2.1 대상 건물 모델링

충청북도 청주에 위치한 공공 어린이집을 대상으로 DesignBuilder(v7.0)을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. DesignBuilder는 EnergyPlus 엔진을 기반으로 한 시뮬레이션 도구이다. 시뮬레이션 입력 조건은 표 1과 같으며, 이를 통해 에너지 소비량 예측모델 개발에 필요한 데이터를 취득하였다.

표 1. DesignBuilder 입력 조건

Modeling	Information	
Location	Cheongju, Republic of Korea	
Building Information	Building Type	Facilities for older persons and children
	Building Floor Area	551.12 m ²
	Number of Floors	1F
	Window to Wall Ratio	30 %
Activity	Occupant Schedule	07:30-19:30
	Heating / Cooling set back	12 °C / 28 °C
Construction	External wall	0.210 W/m ² ·K
	Ground floor	0.250 W/m ² ·K
	Roof	0.150 W/m ² ·K
	Airtightness	0.7 ACH
Lighting	Window U-Value	1.400 W/m ² ·K
	Power density	2-15 W/m ²
HVAC System	HVAC template	FCU (4-Pipe), Air-cooled Chiller
	Heating and Cooling fuel	Electricity from grid
	DHW type / CoP / fuel	Instantaneous / 0.85 / Electricity from grid

2.2 에너지 소비량 예측모델 개발

본 연구에서는 어린이집의 에너지 소비량을 예측하기 위한 RNN 기반 모델을 개발하였다. 세부 구조로는 Long Short-Term Memory (LSTM)과 Gated Recurrent Unit (GRU) 두 가지를 적용하였다. LSTM은 장기 의존성(Long-term dependency) 학습에 유리하여 안정적인 예측 성능을 가지며 GRU 모델은 구조가 단순해 학습이 빠르다. 예측모델 개발을 위한 입·출력 데이터는 표 2에 제시하였다. 입력데이터는 DesignBuilder 시뮬레이션 결과로부터 산출된 10개의 항목을 활용하였으며, 출력데이터는 1시간 후 에너지 소비량으로 설정하였다.

전체 데이터는 8,760개의 샘플로 구성하였으며, 이 중 80%를 학습(Train), 10%를 검증(Validation), 10% 테스트(Test)에 사용하였다. LSTM과 GRU 모델은 모두 입력층(10개 노드), 3개의 순환층 및 출력층(1개 노드)으로 구성하였다. 각 순환층의 뉴런 수는 LSTM의 경우 256 - 64 - 128, GRU의 경우 64 - 192 - 32로 설정하였다. LSTM 모델은 손실함수로 MSE를 사용했으며 조기 종료 및 학습률 감소 기법을 적용하여 과적합을 방지하였다. 반면, GRU 모델은 Huber Loss를 사용하여 이상치에 대한 민감도를 완화하고 안정적인 학습을 수행하였다.

표 2. 에너지 소비량 예측모델 학습 개요

Input data	Indoor and outdoor temperature [°C], Indoor and outdoor humidity [%], Cooling and heating setpoint [°C], Cooling and heating load [W], Equipment heat gain [W/m²], Air flow rate [m³/s]
Output data	Energy consumption (t+1) [kWh]

3. 결과 분석

3.1 에너지 소비량 예측모델 정확도

개발된 LSTM과 GRU 모델의 에너지 소비량 예측성능을 비교·평가하였다. 성능 평가지표로는 CvRMSE와 R^2 를 사용하였으며, CvRMSE는 0에 가까울수록, R^2 는 1에 가까울수록 모델의 예측 성능이 우수한 것을 의미한다.

성능 평가 결과, GRU 모델은 CvRMSE 2.42%, R^2 0.9995를 기록하여 상대적으로 높은 정확도를 보였다. 이에 따라 GRU 모델을 최종 예측모델로 선정하고, 해당 결과를 기반으로 SHAP 분석을 수행하였다.

표 3. 에너지 예측모델 정확도

구분	CvRMSE	R^2
LSTM	3.19%	0.9991
GRU	2.42%	0.9995

3.2 SHAP 분석

SHAP은 머신러닝 및 딥러닝 모델의 예측 결과를 해석하기 위한 설명 가능한 인공지능(Explainable AI)의 기법 중 하나이다. 본 연구에서는 SHAP를 활용하여 에너지 소비량에 영향을 미치는 주요 변수의 기여도를 분석하였다. SHAP 값이 높을수록 해당 변수가 예측 결과에 미치

는 영향력이 크다는 것을 의미하며, 반대로 값이 낮을수록 영향력이 작음을 나타낸다.

분석 결과는 Feature Importance 지표를 통해 시각화하였으며, 각 입력변수의 상대적 중요도를 평가하였다. 그림 1에 따르면, Heating setpoint가 SHAP 값 0.4232로 가장 높은 중요도를 보여 에너지 소비량 변화에 직접적으로 영향을 미치는 핵심 변수로 확인되었다. 다음으로 Equipment heat gain이 SHAP 값 0.2187의 중요도를 보여, 내부 발열이 전체 에너지 소비량에 유의미하게 작용함을 시사하였다. 반면, Air flow rate, Cooling setpoint, Outdoor temperature, Heating load, Cooling load 등은 모두 SHAP 값 0.1 이하로 상대적으로 낮은 중요도를 나타냈다. 이러한 결과는 Heating setpoint와 Equipment heat gain이 에너지 소비량 예측에 주요한 영향을 미치는 핵심 요인임을 보였다.

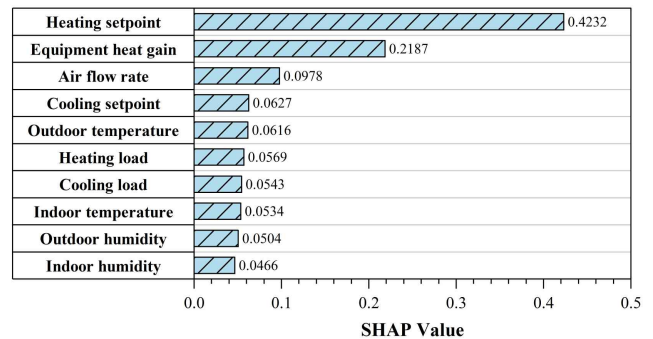


그림 1. SHAP 분석을 통한 예측모델 변수 중요도 결과

4. 결 론

본 연구는 DesignBuilder 시뮬레이션 데이터를 활용하여 어린이집의 에너지 소비량을 예측하는 RNN 기반 모델을 개발하였다. 모델 구조로는 GRU를 적용하였으며, 성능 평가 결과 CvRMSE 2.42%, R^2 0.9995의 높은 예측 정확도를 나타냈다. 또한 SHAP 기법을 통해 입력변수의 중요도를 분석한 결과, 난방 설정온도가 에너지 소비량에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 나타났다. 이는 적정 온도 제어가 에너지 절감 및 쾌적한 실내환경 유지에 중요함을 시사하며, 향후 실측 데이터 연계 및 제어 시스템 적용을 통해 예측모델의 실용성을 검증할 예정이다.

참고문헌

- 배강우, 성재호, 김해인, 문진우, 머신러닝기반 비접촉식 실내 미세먼지 농도 추정 모델 개발, 대한건축학회 논문집, 2025.04
- 전수정, 패트릭, 윤근영, 머신러닝 기법을 이용한 서울지역 어린이집 실내공기질 예측, 한국생태환경건축학회 논문집, 2020
- 윤지영, 정용기, 배강우, 임세현, 정민희, 문진우, 제로에너지 건축물 설계를 위한 업무시설 창면적비 변화에 따른 전주기 에너지 소비량 및 탄소배출량 분석, 한국생태환경건축학회 논문집, 2023.04