# 건물 에너지 절감을 위한 앙상블 학습 기반 에어컨 자율 제어 시스템

김재하, 주영민, 우현, 박승현, 권기웅

한국전자기술연구원

{jaeha8888, yjoo, woohyun94, park.seunghyeon, kiwoong.kwon}@keti.re.kr

# An Ensemble Learning - Based Autonomous Air-Conditioning Control System for Energy Reduction in Buildings

Jaeha Kim, Youngmin Joo, Hyun Woo, Seunghyeon Park, Kiwoong Kwon

Korea Electronics Technology Institute

요 약

본 논문에서는 냉방 에너지 절감을 위해 앙상블 학습 기반의 공간별 쾌적 환경 예측 모델과 이를 활용한 에어컨 자율 제어 알고리즘을 제안한다. 쾌적 환경 예측 모델은 CatBoost와 LightGBM을 결합한 스태킹(Stacking) 앙상블 기법을 적용하여 공간별 선호 PMV(Predicted Mean Vote)를 예측하며, 이를 기반으로 쾌적도 저하를 방지하고 에너지 소비를 최소화하는 에어컨 자율 제어를 수행한다. 실제 연구실 환경에서 6주간의 실증 실험을 수행한 결과, 조정된 기준 전력 소비(Baseline) 대비 약 24.6%의 에너지 절감 효과를 확인하였다. 본 연구는 AI 기반 제어 기술이 실내 쾌적성을 유지하면서도 건물 에너지 효율을 크게 개선할 수 있음을 입증하였다.

## Ⅰ. 서 론

최근 기후 변화 대응과 탄소 중립 실현이 전 지구적 과제로 대두됨에 따라, 건물 부문의 에너지 효율화가 시급한 실정이다. 특히 건물 에너지 관리 시스템(BEMS)에서 냉방 부하는 전체 에너지 소비의 상당 비중을 차지하고 있어, 이에 대한 지능형 제어 기법 연구가 활발히 진행되고 있다.[1]

그러나 기존 현장에서는 단순 ON/OFF 제어나 규칙 기반 제어가 주로 사용되고 있다. 이러한 방식은 실시간으로 변화하는 외기 온도나 건물의 열전달 지연 특성을 즉각적으로 반영하지 못해 에너지 낭비를 초래한다.

또한, 기존 제어 방식은 관리자의 보수적인 운영으로 실제 쾌적 범위보다 낮은 온도로 에어컨을 가동하는 경향이 있다. 이는 재실자에게 오히려 추위를 느끼게 하여 쾌적감을 저하시킬 뿐만 아니라, 불필요한 전력 소비를 낭비시키는 원인이 된다.

이에 본 연구에서는 데이터 기반의 AI 모델을 활용하여 과냉방으로 인해 낭비되는 에너지 소비를 최소화하는 에어컨 자율 제어 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 스태킹 앙상블 학습을 통해 공간별 선호 쾌적도(PMV)를 예측하고, 이를 바탕으로 현재 상태가 학습된 쾌적 범위보다 낮을 경우, 이를 과냉방 상태로 즉각 판단하여 설정 온도를 상향 조정함으로써, 재실자의 쾌적성을 보장함과 동시에 불필요한 에너지 소비를 원천적으로 차단하는 것을 목표로 한다.

## Ⅱ. AI 기반 에어컨 자율 제어 시스템 설계

본 연구에서 제안하는 에어컨 자율 제어 시스템의 핵심은 재실자의 쾌적함을 예측하고 이를 제어에 반영하는 데 있다. 이를 위해 단일 모델의 한계를 극복하고 예측의 일반화 성능을 극대화할 수 있는 스태킹 기반의 앙상블 기법을 도입하였다. 구체적으로는 시계열 데이터 처리와 비선형 패턴 학습에 강점을 지닌 CatBoost[2]와 LightGBM[3]을 기반 모델로 선정하고, 각 모델에 K-Fold 교차 검증을 적용하여 학습 안정성을 확보하였다. 각 기반 모델이 예측한 결과값은 다시 메타 모델의 입력으로 활용되는데, 메타 모델은 개별 모델들의 예측 오차를 상호 보완하고 보정함으로써 최종적으로 해당 공간의 특성과 재실자의 패턴에 최적화된 선호 쾌적도(PMV)를 도출한다.

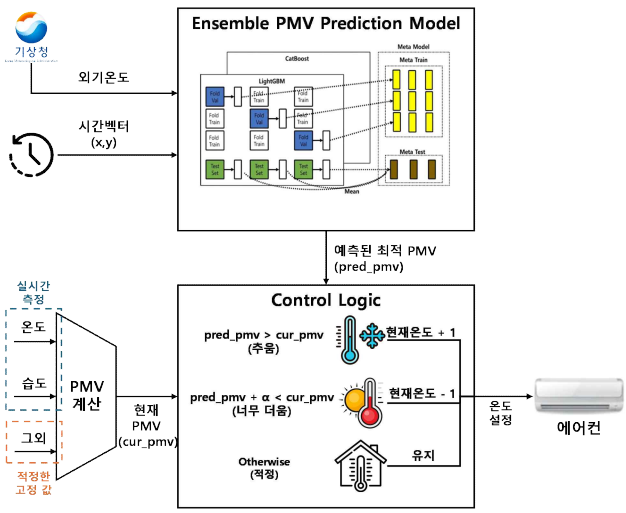


그림 1. 앙상블 PMV 예측 및 에어컨 자율 제어 시스템 흐름도

그림 1은 앞서 기술한 앙상블 모델이 실제 제어 시스템 내에서 어떻게 작동하는지를 보여주는 전체 흐름도이다. 시스템은 외기 온도와 시간 벡터 정보를 입력받아 학습된 앙상블 모델을 통해 해당 시점의 공간별 선호 쾌적도를 예측한다. 이와 함께, 현재 시점의 실내 쾌적도를 산출하기 위해 PMV 계산에 필요한 입력 변수 중 실내 온도와 습도는 센서를 통해 실시간으로 수집하고, 그 외의 변수들은 합리적인 고정값을 적용하여 현재 환경의 쾌적도를 계산한다. 자율 제어 로직은 인공지능 모델이 예측한 선호 쾌적도와 센서 기반의 현재 실내 쾌적도를 상호 비교 분석하여 에어컨의 가동 상태를 결정한다.

구체적인 제어 동작은 현재 상태가 예측된 선호 범위 대비 어느 수준인지에 따라 결정된다. 만약 현재 쾌적도가 예측된 선호 수준보다 낮아 재실자가 추위를 느낄 것으로 판단되는 과냉방 상태라면, 시스템은 에어컨의 설정 온도를 상향 조정하고 풍량을 조절하여 불필요한 에너지 낭비를 막는다. 반대로 현재 쾌적도가 선호 수준보다 높아 덥다고 판단된다면, 설정 온도를 하향 조정하여 쾌적 범위로 유도한다. 마지막으로 현재 상태가 예측된 선호 범위 내에 머무르는 적절한 상태라면, 현재의 설정 온도와 풍량을 그대로 유지함으로써 시스템의 잦은 변동을 방지하고 안정적인 에너지 효율을 도모한다.

## Ⅲ. 성능평가

본 연구에서 제안하는 에너지 최적 제어 모델의 유효성을 검증하기 위해, 시뮬레이션 환경이 아닌 실제 운영 중인 연구실을 대상으로 실증 실험을 수행하였다. 실험 기간은 2025년 8월 4일부터 9월 12일까지 총 6주간 진행되었으며, 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 재실자가 없는 주말은 분석 대상에서 제외하였다. 이에 따라 분석은 실질적인 냉방 부하가 집중되는 평일 11:00부터 17:00까지의 시간대를 대상으로 이루어졌다.

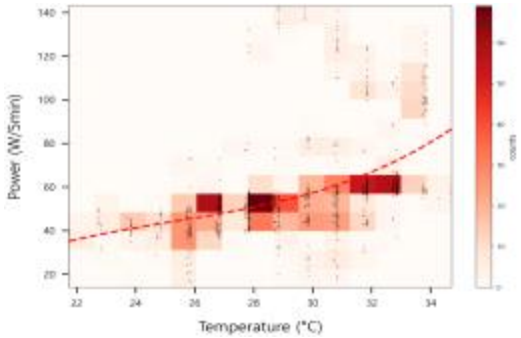


그림 2. 외기 온도 대비 전력 사용량 산점도와 3차 다항식 추세선

객관적인 성능 평가를 위해 제어 알고리즘을 적용하지 않은 2, 4, 6주차 데이터를 기반으로 기준을 수립하였다. 그림 2는 미제어 기간의 외기 온도 대비 전력 사용량 분포를 나타낸다. 미제어 기간의 데이터를 분석하여 외기 온도 대비 전력 사용량의 변화 추이를 나타내는 참조 회귀 모델을 3차 다항식으로 구축하였다. 확립된 참조 모델에 제어 기간인 1, 3, 5주차의 실제 외기 온도를 대입하여, 제어를 수행하지 않았을 경우의 예상 전력 사용량, 즉 조정 베이스라인을 산출하였다. 이와 같은 비교 방식은 외기 조건의 차이를 보정한 상태에서 제어 알고리즘의 순수한 에너지 절감 효과를 정량화하는데 기여한다.

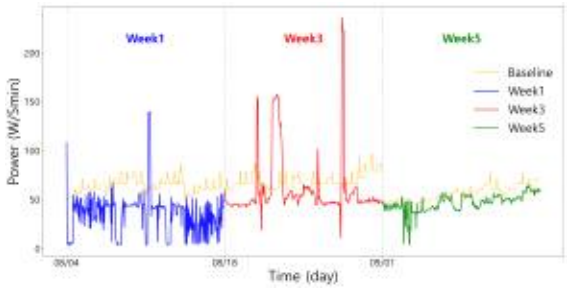


그림 3. 시간에 따른 전력 사용량과 베이스라인 비교

그림 3은 제어 기간의 실제 전력 사용량과 조정된 기준 전력 소비(Baseline)를 비교하여, 알고리즘 적용에 따른 에너지 절감 효과를 시각적으로 나타낸다. 주차별 에너지 절감 성과는 표 1과 같다. 1주차에 베이스라인 대비 43.9%의 가장 높은 개선율을 기록하였으며, 3주차(12.8%)와 5주차(17.2%)에도 안정적인 절감 효과를 보였다. 주차별 절감률에 다소 변동이 발생한 원인은 실험 기간 중의 급격한 외기 변화나 재실 인원의 활동 빈도 차이, 그리고 예측 범위를 벗어난 사용자의 임의적인 냉방기 수동 조작 등 통제하기 어려운 외부 변수들이 복합적으로 작용한 결과로 분석된다. 그러나 이러한 다양한 변수에도 불구하고, 전체 실험 기간에 걸쳐 베이스라인 대비 일관된 에너지 소비 감소 패턴을 보였다는 점은 본 시스템이 변화하는 환경 속에서도 안정적인 제어 성능을 발휘함을 시사한다.

표 1. 주차별 및 전체 에너지 절감 성능 분석

| Division | Baseline (kWh) | Actual (kWh) | Savings (kWh) | Improvement (%) |
|---|---|---|---|---|
| Week1 | 1.54 | 0.86 | 0.67 | 43.9 |
| Week3 | 1.66 | 1.45 | 0.21 | 12.8 |
| Week5 | 1.36 | 1.13 | 0.23 | 17.2 |
| Total | 4.56 | 3.44 | 1.12 | 24.6 |

종합적인 성능 분석 결과, 총 6주의 실험 기간 동안 베이스라인 예측 사용량 대비 총 1.12kWh의 전력을 절감하였으며, 이는 평균 24.6%의 에너지 효율 개선에 해당한다. 이는 제안하는 AI 제어 시스템이 실내 쾌적성을 저해하지 않으면서도 냉방 에너지를 효과적으로 절감할 수 있음을 시사한다.

## Ⅳ. 결론

본 연구에서는 건물 에너지 효율 향상과 탄소 중립 실현을 목표로, 앙상블 학습 기반의 쾌적 환경 예측 모델과 이를 활용한 에어컨 자율 제어 알고리즘을 제안하였다. 시계열 및 비선형 데이터 특성 학습에 강점을 지닌 CatBoost와 LightGBM을 결합한 스태킹 앙상블 기법을 적용함으로써, 단일 모델 대비 예측 신뢰도를 향상시켰다. 또한 예측된 쾌적도가 재실자의 선호 수준보다 낮을 경우 설정 온도를 상향 조정하는 제어 전략을 통해, 과냉방으로 인한 쾌적감 저하와 불필요한 에너지 소비를 동시에 방지하도록 설계하였다.

실제 연구실 환경에서 6주간 수행한 실증 실험 결과, 제안 시스템은 기준 전력 소비 대비 약 24.6%의 에너지 절감 효과를 달성하였다. 이러한 결과는 AI 기반 자율 제어 기술이 BEMS의 운영 효율을 실질적으로 향상시키고, 장기적으로 건물 부문의 탄소 중립 실현에 기여할 수 있음을 시사한다. 향후 연구에서는 하절기 냉방 제어에 한정된 본 연구의 범위를 확장하여, 동절기 난방 제어 알고리즘을 포함한 사계절 통합 제어 시스템으로 발전시킬 예정이다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 424C5151)

## 참 고 문 헌

[1] Wang, R., Lu, S., & Feng, W, “A novel improved model for building energy consumption prediction based on model integration,” in Applied Energy, vol. 262, p. 114561, 2020.

[2] L. Prokhorenkova, et al., "CatBoost: unbiased boosting with categorical features," in NIPS, vol. 31, pp. 6638-6648, 2018.

[3] G. Ke et al., "LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree," in NIPS, vol. 30, pp. 3146-3154, 2017.