SPECIAL ARTICLES

03

https://doi.org/10.14190/MRCR.2024.19.3.024

Gray Box 기반 열 확산 방정식 · LSTM–Attention mechanism 통합 실내 온도 예측모델 개발

Development of an indoor temperature prediction model integrating Gray Box-based heat diffusion equation and LSTM-Attention mechanism

정용기 Yonggi Jung
중앙대학교 건축학부
박사과정
E-mail : popopop12@cau.ac.kr

문진우 Jinwoo Moon
중앙대학교 건축학부
교수
E-mail : gilerbert73@cau.ac.kr

1. 머리말

최근 탄소배출 증가에 따른 이상기후 현상이 심각해짐에 따라, 세계 각국은 사회, 환경적으로 탄소 배출을 줄이기 위한 노력을 이행하고 있다. 이에 따른 2050 탄소중립 목표 수립과 온실가스 감축안 발표 등 제도를 정립하여 정책적으로 탄소중립 달성을 위해 노력하고 있으며, 전체 탄소배출 중 약 20 %를 차지하고 있는 건물 부문의 탄소배출 저감은 필수적인 상황이다. 특히, 건물 운영단계의 경우 이상기온으로 인한 열쾌적 수요 증가에 따라 냉난방 에너지 사용량이 증가하는 악순환이 반복되고 있어 냉난방분야 에너지 절감을 위한 노력이 중요해진 시점이다.

이러한 건물 냉난방 에너지 절감을 위해 기존 연구는 신재생 에너지, 고효율 냉난방기기 개발 등 연구들이 다수 진행되어 왔다. 신재생 에너지의 경우 건물 에너지 자립도 향상과 탄소 배출 저감에 기여하며, 고효율 냉난방기기는 에너지 효율 증대와 건물 운용 비용 절감효과를 나타내는 것으로 확인되었다. 그러나, 이와 같은 시스템은 기후 조건에 의존하기 때문에 기상 조건에 따른 에너지 수급 불안정과 지속 사용으로 인한 성능저하가 발생하며, 유지보수 비용, 건물 특성에 최적화된 설계에 따른 고정시스템으로 인해 환경, 사용 패턴에 즉각 대응하기 어려워 유연한 대응에 한계를 가진다.

또한, 고효율 기기, 신재생 시스템 적용 시 냉난방 에너지 효율 향상은 가능하지만 사용 패턴, 환경 변화에 따른 최적화에 어려움이 따르며, 기존에 주로 적용되던 Rule-based 기반 On-Off 제어 방식은 다양한 사용 패턴과 급변하는 환경 조건에 유연하게 대응할 수 없기 때문에 시스템이 보유한 잠재적 효율성을 충분히 활용하지 못하고 에너지를 낭비할 수 있다. 따라서, 이와 같은 첨단 설비의 성능을 최대한 발휘하고 에너지 효율을 극대화하기 위해서는 최적제어 시스템으로의 전환이 필수적이며, 최적제어를 도입 시 잠재적 효율성 향상을 통해 에너지 절감 효과를 향상시켜 탄소 배출 절감 효과를 달성할 수 있을 것이다.

이와 같은 목적을 달성하기 위해 인공지능 기반 지능형 최적제어를 활용할 수 있으며, 쾌적한 열환경 제공과 동시에 HVAC 시스템의 에너지 효율적 운영을 위해서는 정확한 실내 온도 예측모델이 필수적이다. 다음 제어상황의 예측된 실내 온도를 바탕으로 냉난

방 시스템을 선제적으로 제어할 경우 실내 온도를 최적으로 유지할 수 있다. 또한, 피크 부하를 예측하고 관리하며 부분부하에 대응 가능하기 때문에 효율적인 운전이 가능하여 전체적인 냉난방 에너지 소비를 줄일 수 있다. 이를 적용할 경우 다양한 운영 조건과 외부 환경 변화에 실시간으로 적응하여 부분부하와 환경 변화에도 대응 가능하기 때문에 에너지 효율 극대화 및 냉난방 시스템 운전 최적화가 가능하다. 따라서, 본 고에서는 열 확산 방정식을 신경망 학습에 통합한 Gray box 기반 실내 온도 예측모델에 관한 연구를 소개하고자 한다.

2. Gray Box 기반 열 확산 방정식 · LSTM–Attention mechanism 통합 실내 온도 예측모델

2.1 연구배경

기존 Black-Box 기반 모델의 경우 데이터에만 의존하여 학습하기 때문에 모델의 정확도가 데이터 품질과 규모에 크게 좌우되기 때문에 충분한 양의 고품질 데이터가 요구된다. 또한, 모델의 추론과정이 불투명 하여 예측이 어떠한 근거로 이루어 졌는지 파악하기 어려워 신뢰성 확보에 한계가 있다. 이는 의사결정이 요구될 때 문제를 야기할 수 있다.

이와 같은 한계를 극복하기 위해 Gray-Box 모델의 경우 물리적 법칙과 데이터 기반 학습을 결합하여 더욱 정확하고 해석 가능한 예측을 제공할 수 있으며, Black-Box 모델의 유연성과 White-Box 모델의 물리적 근거를 동시에 제공할 수 있다. 또한, 비교적 적은 양의 데이터로도 학습 및 성능 확보가 가능하며, 물리적 법칙을 바탕으로 합리적 예측이 가능하다. 따라서, 온도 예측모델과 같이 복잡한 시계열 모델의 데이터 처리 능력과 외삽에서의 예측성능 향상을 위해 편미분 방정식(Partial Differential Equation, PDE) 기반 Gray-Box 모델 및 LSTM-Attention을 결합한 하이브리드 모델을 개발하고자 하였다.

2.2 모델 개발 관련 내용

예측모델 개발을 위한 데이터는 서울시 흑석동에 위치한 A 대학교 리빙랩에서 실험을 통해 취득하였다. 취득된 데이터는 모델 학습에 사용되며, 실내 온도와 상관관계 분석을 통해 상관관계가 높은 실내외 온 · 습도 데이터를 취득하였다. 또한, 전체 데이터셋은 학습 60 %, 검증 20 %, 테스트 20 %로 분할하여 모델의 과적합을 방지하고 객관성을 확보하고자 하였다.

개발된 모델은 입력변수 간 범위 차이로 인해 발생하는 가중치 편향을 최소화하기 위해 데이터 범위를 0-1 값을 가지도록 Min-Max 정규화하여 데이터를 전처리 하였으며, Early stopping을 적용하여 모델의 과적합을 방지하였다. 또한, Bayesian optimization을 통해 모델의 Hyperparameter인 은닉층 수, 은닉층 노드 수, PDE 종류(열 확산, 대류 열전달, 열 복사, 습도 영향, 열 지연)를 최적화였으며, 은닉층 수: 1, 은닉

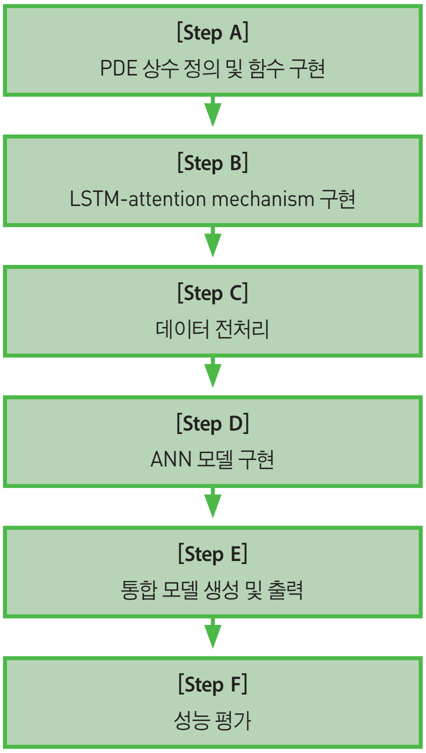


그림 1. 예측모델 Flow chart

층 노드 수: 17, PDE: 열 확산 방정식이 최적 hyperparameter로 선정되었다.

개발된 실내 온도 예측모델은 <그림 1>과 같으며, [PDE 상수 정의 및 함수 구현]-[LSTM-attention mechanism 구현]-[데이터 전처리]-[ANN 모델 구현]-[결합 모델 생성 및 출력]-[성능 평가]로 구성된다. 구현된 모델은 현재 실내 온·습도, 실외 온·습도 총 4개의 입력 변수를 이용하여 물리 정보를 도입한 신경망을 통해 다음 제어스텝의 실내 온도를 예측한다.

기존 신경망의 경우 학습 데이터만을 사용하여 학습하는 반면, 개발된 모델은 물리 방정식 자체를 손실 함수로 사용하여 데이터가 물리 법칙을 만족하도록 학습을 진행하게 되며, 물리 법칙을 신경망에 학습시킬 수 있다. 또한, LSTM-attention mechanism을 적용하여 시계열 데이터의 가중치를 부여할 수 있으며, 단순히 과거 데이터의 패턴을 학습하는 것을 넘어 예측에 관련성이 높은 과거 정보에 가중치를 부여할 수 있다. 이를 통해 불필요한 정보의 영향을 줄이고 중요한 패턴에 집중할 수 있으며, 관련 높은 데이터에 집중함으로써 예측 정확도 향상이 가능하며 새로운 패턴이나 변화에 빠르게 적응할 수 있어 예측성능을 향상시킬 수 있다.

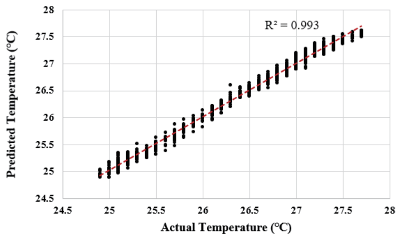
2.3 모델 성능

예측모델 성능 평가를 위한 지표는 예측값과 실측값의 상관관계 평가를 위한 R^2와 MAE (Mean Absolute Error), MSE (Mean Squared Error), RMSE (Root Mean Squared Error), CV(RMSE) (Coefficient of Variation of RMSE)를 채택하였으며, ASHRAE Guideline-14-2014에서는 R^2는 0.8 이상을, CV(RMSE)는 시간 데이터 30 % 이하, 월 데이터 5 % 이하를 적정 기준으로 제시하고 있다.

예측모델 성능은 [표 1]과 같다. R^2는 0.993으로 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났으며, MAE는 0.05 ℃, MSE는 0.004 ℃, RMSE는 0.066 ℃, CV(RMSE)는 0.247 %로 성능 지표 모두 ASHRAE 권장 기준을 상회하는 높은 예측성능을 보여 실내온도 예측모델 성능이 우수함을 확인하였다. 예측값과 실측값 그래프는 <그림2(a)>와 같다. 최대 오차의 경우 <그림2(b)>와 같이 0.3 ℃로 10시 33분경 발생하였으며, 최소 오차는 <그림2(c)>의 0.00002 ℃로 12시 06분경 발생하였다. 최대 오차 발생은 재실자 유동, 유무에 따른 발열량, 문 개폐로 인한 공기유동 및 열손실, HVAC 시스템의 On/Off, 기상 및 일사량 조건 변동과 같이 다양한 외란 요인들로 인한 것으로 판단된다.

이와 같은 요인들은 단순한 물리 법칙으로 구현하기 어려우며, 예측모델로 상호작용을 설명하기 어렵다. 그러나, 복잡한 요인을 고려하여도 최대 오차 범위는 실내온도 26.3 ℃의 약 1 % 수준으로 상당히 낮은 수준이라 판단되며, 추후 예측모델의 입력 변수로 재실자 유무와 HVAC 시스템의 가동을 반영하고 더 많은 학습데이터를 확보하여 모델을 훈련시킨다면 모델의 한계점을 해결하여 예측 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것이라 기대된다.

[표 1] 예측모델 성능

성능 평가 지표	성능
R^2	
MAE	0.05 ℃
MSE	0.004 ℃
RMSE	0.066 ℃
CV(RMSE)	0.247 %

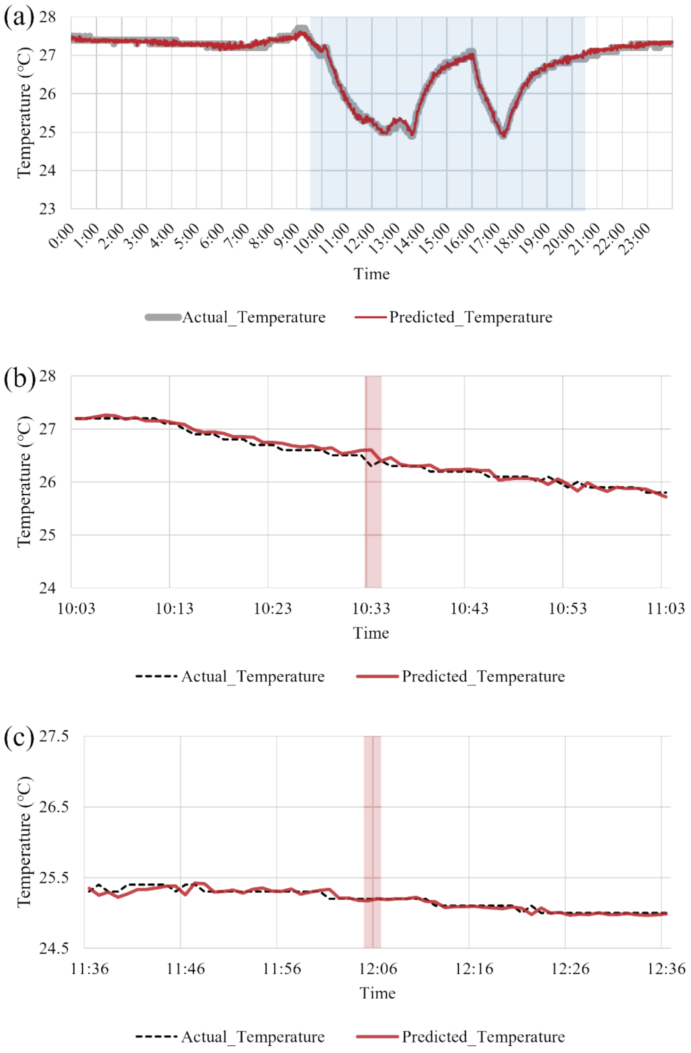


그림 2. (a) 실측 및 예측 온도 전체 그래프, (b) 최대 오차 범위 그래프, (c) 최소 오차 범위 그래프

3. 맺음말

본고에서는 건물 냉난방에너지 절감을 통한 탄소중립을 위해 인공지능 기반 최적제어의 기반이 되는 Gray Box 기반 열 확산 방정식 · LSTM-Attention mechanism 통합 실내 온도 예측모델을 소개하였다. 개발된 모델은 기존 Black-Box 기반 모델의 고품질 데이터 요구와 신뢰성 확보에 대한 한계를 극복하여 비교적 적은 양의 데이터로 학습하여도 물리 법칙에 기반한 학습을 통해 성능 확보가 가능하며, 물리법칙을 바탕으로 합리적 예측이 가능하다. 또한, 외삽에서의 예측성능 확보가 가능하였다. 예측모델의 성능은 R^2, MAE, MSE, RMSE, CV(RMSE)로 성능을 평가하였으며, ASHRAE 권장 기준을 상회하는 높은 예측성능을 나타냈다. 개발된 모델을 HVAC 시스템 제어에 적용한다면 열쾌적성 확보와 동시에 다양한 사

용패턴, 환경 조건에 유연하게 대응하며 냉난방 시스템의 성능을 최대한 발휘하여 에너지 효율을 극대화하여 건물부문 탄소중립 실현을 위한 최적제어 기술 개발에도 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00217322)

참고문헌

1. L Chen, G Msigwa, M Yang, AI Osman, S Fawzy, DW Rooney, PS Yap. (2022). Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. Environmental Chemistry Letters, 20, 2277–2310
2. Global Status Report for Buildings and Construction. (2021). Global Alliandce for Buildings and Construction.
3. Energy Technology Perspective. (2017). IEA.
4. E. Bisengimana, J. Zhou, M. Binama, K. Zhao, S. Abbas, Y. Yuan. (2022). The frosting and soil imbalance performance issues of building heat pumps: An overview, Energy and Buildings, Volume 273, 112387.

담당 편집위원 : 박성우(중앙대학교)

학회지 광고 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학회, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다.
저렴한 가격과 가장 효과적인 방법으로 귀사를 홍보할 수 있는 한국건설순환자원학회지 광고의 많은 이용 부탁드립니다.

– 아 래 –

1. 광고 게재면

게재면	광고 협찬금	게재면	광고 협찬금
표지 2	80만원	간지	70만원
표지 3	70만원	내지(전면)	50만원
표지 4	100만원	박스 광고	30만원

2. 할인혜택

본 학회의 특별회원사가 게재하는 광고 또는 연2회 이상 광고 게재 시 상기 광고 게재료의 10 %를 할인해 드립니다.

3. 문의

한국건설순환자원학회 사무국(E–mail : rcr@rcr.or.kr, Tel. : 02–552–4728)