

Autoencoder 기반 THI 이상탐지와 기자재 제어 연계 프레임워크에 대한 연구

서현무, *이명훈

국립순천대학교

seohm0425@asquare.re.kr, *leemh5544@gmail.com

A Study on the Linkage Framework of THI Abnormal Detection and Equipment Control Based on Autoencoder

Seo Hyun Mu, *Lee Meong Hun

Sunchon National Univ.

요약

본 논문은 시계열 Autoencoder(LSTM-AE)를 활용하여 축사 환경의 THI(Temperature - Humidity Index) 이상을 자동 판별하는 연구를 수행한다. 실내 온도·습도와 기자재 상태(환기팬 뉴터, 히터/쿨링페드 ON·OFF) 데이터를 학습해 정상 패턴을 모델링하고, 재구성 오차를 통해 이상을 감지하며, 탐지 결과를 환기·냉난방 제어 권고로 연계한다. 이 접근은 라벨 의존도를 낮추면서도 열스트레스에 대한 조기 대응과 에너지 효율적 운용을 가능하게 하고, 수집된 데이터와 결과는 현장 의사결정과 유지보수에 실질적 근거를 제공한다. 나아가 본 연구는 축산 환경 관리의 자동화와 디지털 전환을 가속하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

I. 서론

현대 축산 환경에서는 온도·습도 등 환경요인이 가축의 건강과 생산성에 직접적인 영향을 미치며, 열 스트레스의 조기 탐지와 대응이 중요하다[1]. 기존의 임계치 기반 제어는 계절·시간대·축사 구조·축종 차이를 충분히 반영하지 못해 과제(오탑·후탐, 과냉·과열, 에너지 과소비)가 발생한다. 이에 본 연구는 THI(Temperature - Humidity Index) 시계열을 중심으로 Autoencoder(AE) 기반의 비지도 이상탐지를 적용하고, 탐지 신호를 환기·냉난방·쿨링페드 등 기자재 제어로 연계하는 경량 프레임워크를 제안한다[2]. 본 접근은 (1) 정상 패턴만으로 학습이 가능해 라벨 의존도를 낮추고, (2) 일주기 요인과 장비 상태를 함께 고려해 오탑을 줄이며, (3) 간단한 제어 룰과 결합해 현장 적용을 용이하게 한다.

II. 본론

본 논문에서는 Python 기반의 딥러닝 프레임워크를 활용하여 THI(Temperature - Humidity Index) 시계열의 이상 유무를 자동 판별하고, 그 결과를 환기·냉난방·쿨링페드 제어로 연계하여 사용자에게 제시한다. 본 연구에서는 여러 방법 중 Autoencoder(AE)를 이용하여 이상을 판별한다. AE는 비지도 학습 기반의 신경망으로 정상 패턴을 재구성하도록 학습되며, 입력과 재구성값의 차이(재구성 오차)가 커지는 구간을 이상으로 본다[3]. 시계열 특성을 반영하기 위해 LSTM-AE 구조를 사용하여 일정 길이의 창(window) 단위 데이터(예: 60분, 5분 간격 샘플)를 입력받아 시퀀스 형태로 재구성한다[4]. 이를 통해 모델은 일중 주기성과 완만한 계절 변동을 포함한 정상 운전 패턴을 학습할 수 있다.

분석에 사용되는 입력 데이터는 실내 온도와 상대습도(THI 계산), 장비 상태 신호(환기팬 뉴터, 히터 ON/OFF, 쿨링페드 ON/OFF)이며, 선택적으로 외기 온·습도나 CO_2 / NH_3 를 포함할 수 있다. 먼저 타임스탬프 기준으로 결측 보간과 이상치 클리핑을 수행한 뒤, THI 지표를 계산하고 일

주기 임베딩(hour_sin, hour_cos)을 추가하여 주기적 변동 정보를 제공한다. 데이터는 학습용 정상 구간과 평가용 구간으로 나누고, 구역(또는 축사) 단위로 표준화(z-score)를 적용하여 센서 편차를 보정한다.

모델 구축 과정은 다음과 같다. (1) LSTM 인코더 - 디코더로 구성된 AE를 정의하고, 정상 구간의 창 단위 시퀀스를 이용해 입력=출력이 되도록 학습한다. (2) 학습 종료 후 평가 구간의 각 창에 대해 재구성 오차를 산출하고, 정상 학습 오차 분포의 상위 백분위(예: 99.5%)를 임계값으로 설정한다[5]. (3) 단발성 스파이크에 의한 오탑을 줄이기 위해 연속 k개 창(예: k=3) 초과 시에만 이상으로 판정한다. (4) 이상 판정 시, THI 목표 범위 대비 초과/미달 방향과 장비 상태를 함께 고려하여 환기 단계 상향, 쿨링 페드 ON, 히터 단계 조정 등 간단한 제어 규칙을 적용한다[6][7].

실험은 시뮬레이션 환경에서 수행하였다. 환기팬·히터·쿨링페드의 용량과 응답을 반영한 간이 열·수분 모델로 실내 THI를 생성하고, 환기팬 성능 저하, 히터 고착 ON/OFF, 센서 드리프트 등 이상 시나리오를 주입하여 평가 데이터를 구성하였다. 구체적으로, S1(환기팬 성능 저하)은 정격 풍량의 40%를 10분에 걸쳐 단계 감쇠시키고 6시간 유지 후 복원하는 이벤트로 정의하였다. S2(히터 고착)은 야간에는 히터 ON 고착(3시간), 주간에는 OFF 고착(2시간)을 부여하여 과열·과냉 양 방향의 교란을 포함했다. S3(센서 드리프트)은 온도 채널에 $+1.5^{\circ}\text{C}/\text{일}$, 상대습도에 $+2\%\text{dp}/\text{일}$ 의 선형 편향을 누적 적용하였다. 추가로 S4(흡·배기 부분 막힘)은 유효 풍량 20% 감소와 시스템 시간상수 2배 증가(응답 지연)를 동시에 적용하여 일교차 전이 시 과도응답을 증폭시켰다. 모든 시나리오는 정상 운전 24시간 이후 시작되며 이벤트 간 최소 6시간의 세척 구간을 두어 중첩을 방지하였다. 이상 구간의 ‘정답 레이블’은 이벤트 시작 5분 후부터 종료 10분 후까지로 정의하여 제어 지연과 잔류 효과를 반영하였다. 또한 현장성을 위해 센서 노이즈(정규, $\sigma_T=0.2^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{RH}=1.0\%$)와 1% 이하 랜덤 결측을 주입하고, 외기 경계조건은 일주기 신호에 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 백색잡음을 합성하여 생성하였

다.[8]. 비교 기준으로 이동평균+임계치 기반 방법을 사용하였다.

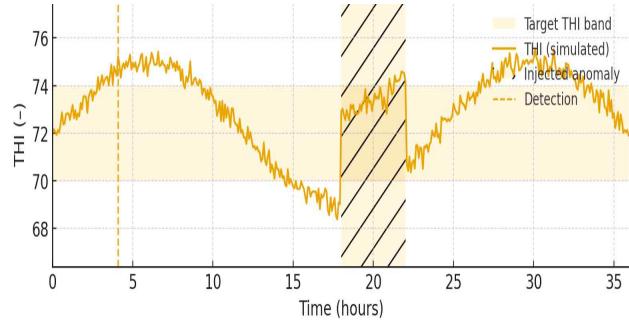


그림. 1. 시뮬레이션된 THI 시계열: 목표 대역, 이상 구간, 탐지 시점
Fig. 1. Simulated THI time series with target band, injected anomaly, and detection time

그 결과, 제안한 LSTM-AE는 통합 시나리오에서 AUROC 0.92, AUPRC 0.86을 보였으며, 재현율 95% 이상 조건에서 F1 0.80을 달성하였다. 또한 하루 평균 오탐(경보) 횟수 0.6회로 감소했고, 이상 발생부터 경보까지의 중앙 탐지 소요 시간은 12분으로, 이동평균 기반 대비 조기 탐지 성능을 확인하였다. 추가로, 일주기 임베딩과 장비 상태 신호를 제거하는 소거(Ablation) 실험에서 성능이 유의하게 저하되어(오탐 증가, 탐지 지연) 해당 특징이 모델의 안정적 동작에 기여함을 확인하였다.

표 1. 시뮬레이션 결과

Table 1. Simulation results

Model	AUROC	AUPRC	F1@R \geq 0.95	False Alarms/Day	TTD (Min)
Moving average + threshold	0.74	0.52	0.52	2.3	30
LSTM-AE	0.92	0.86	0.80	0.6	12

최종적으로, 이렇게 학습된 모델에 실시간 THI 시계열을 입력하면 이상 여부와 방향(과열/과냉)을 자동으로 판별하고, 환기·냉난방·쿨링패드 제어 신호를 함께 산출하여 사용자에게 제공할 수 있다. 이는 라벨 수집이 어려운 현장에서도 정상 데이터만으로 운용 가능한 경량 이상탐지 - 제어 파이프라인을 구현할 수 있음을 시사한다.

III. 결론

본 논문에서는 시계열 Autoencoder(LSTM-AE)를 활용하여 축사 환경의 THI(Temperature - Humidity Index) 이상을 자동으로 판별하고, 그 결과를 환기·냉난방·쿨링패드 제어에 연계하는 효율적인 방법을 제시하였다. 제안한 모델은 정상 운전 패턴을 학습한 뒤 제구성 오차를 통해 이상 구간을 탐지하도록 설계되었으며, 일주기 정보와 장비 상태 신호를 함께 반영함으로써 현장의 계절·시간대 변동과 설비 동작 특성을 보다 정교하게 다룰 수 있었다. 이를 통해 기존 임계치 기반 방식이 갖는 오탐·후탐 문제를 완화하고, 이상 징후 발생 시 빠르게 경보와 제어 신호를 제공하는 경량 파이프라인의 가능성을 확인하였다.

향후 연구에서는 $\text{CO}_2 \cdot \text{NH}_3$ 등 공기질 센서와 금이·급수량 데이터를 추가하여 다변량 학습을 확대하고, 계절·축종·구역 차이를 자동 보정하는 임계값 캘리브레이션(EVT, 베이지안 기법 등)을 도입할 계획이다. 아울러

설명가능성(XAI)을 적용해 이상 탐지의 원인 단서를 시각적으로 제공하고, 실시간 모니터링·알림 시스템과 연동하여 자동 제어까지 끊김 없이 동작하는 통합 운영 체계를 구현하고자 한다. 최종적으로는 엣지 디바이스에 경량 배포해 현장 적용성을 높이고, 표준 운영 절차와 대시보드를 마련함으로써 축산 환경 관리의 자동화·디지털화를 한층 가속하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업임 (IITP-2025-RS-2020-II201489)

참 고 문 헌

- [1] 박근우, Mohammad Ataallahi, 함선용, 오세종, 김기연, 박규현 (2022). 한국 낙농 농가에서 열스트레스가 산유량과 온실가스 배출에 미치는 영향. 한국축산학회지(JAST), 64(4), 770 - 781.
- [2] 하주완, 장홍희, 차광준, 송영학 (2020). 실측 및 모델 기반 시뮬레이션을 통한 계사의 온열환경 검증과 THI 예측식. 한국건축친환경설비학회 논문집, 14(2), 208 - 219.
- [3] 이정호, 임동혁, 김태현, 김만중, 박성진, 양오석, 백정현 (2023). LSTM Autoencoder를 활용한 스마트 온실 데이터 이상 탐지 구현. 한국지식정보학회 논문지, 18(3), 587 - 596.
- [4] 황상범, 김덕근, 정승철 (2021). 확장된 LSTM 오토인코더 기반 이상 시퀀스 탐지 기법. Journal of the Society of e-Business Studies (JSEBS), 21(2), 197 - 209.
- [5] 전승현 (2023). LSTM 오토인코더를 이용한 이상 탐지의 임계치 결정 방법. 한국지식정보학회논문지, 21(4), 21 - 30.
- [6] 문준, 박용주, 김영한, 안현석, 신동희, 임용석 (2023). 스마트 축사 환경을 위한 IoT 기반 원치 커튼 자동 제어 시스템 설계에 관한 연구. 한국산학기술학회논문지, 24(10), 734 - 739.
- [7] 국립축산과학원(2023). 가축사육기상정보시스템(축사로): THI 모형 및 문턱값 안내. 웹자료. (접속: 2025-10-01).
- [8] 김혜란, 박설화, 위치수, 이성신, 이성대, 강환구, 류채화 (2024). 국내 터널식환기 무창 육계사에서 여름철 쿨링패드 사용에 따른 계사 내부 온도 저감 효과 및 더위지수(THI)에 미치는 영향. 한국가금학회지, 51(2), 57 - 63. doi:10.5536/KJPS.2024.51.2.57.