

돈사 환경 인자별 탄소 배출량 실측 및 예측모델 기반 이상탐지 기술 개발

정우혁, 이명훈*

*국립순천대학교

juh0329@naver.com, *leemh777@scnu.ac.kr

Anomaly Detection of Carbon Emissions in Pig Houses Using Predictive Modeling and Environmental Factor Measurements

Jung U Hyeok, Lee Meong Hun*

*Sunchon National Univ.

요약

본 연구에서는 돈사 환경 인자별 탄소 배출량을 실측하고 온도·습도·풍속·환기량·사료 급여·분뇨 처리 등 다양한 환경 데이터를 실시간으로 수집하여 CO₂와 CH₄ 농도를 머신러닝 기반 회귀모델에 적용함으로써 주요 영향 요인을 도출하였다. Gradient Boosting과 Random Forest 알고리즘을 활용하여 환경 인자 간 상관 구조를 반영한 예측모델을 구축하고 변수 중요도 분석을 수행하였으며, 장기 측정 데이터를 기반으로 이상탐지 기법을 적용하여 환기 이상이나 분뇨 처리 시점 등 비정상적 배출 패턴을 조기에 감지할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 본 연구는 축산 시설의 탄소 배출 특성을 정량적으로 규명하고, 지능형 모니터링 및 제어 시스템 개발의 기반 기술을 제시하였으며, 향후 실시간 제어 알고리즘과 연동한 저탄소 축산 운영 모델로의 확장 가능성을 제시하였다.

I. 서론

전 세계적으로 기후변화 대응과 탄소중립 실현은 농업 분야에서도 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히 축산 부문은 전체 농업 부문 온실가스 배출량의 상당 부분을 차지하며 그중에서도 돈사는 메탄, 이산화탄소, 아산화질소 등 다양한 온실가스를 지속적으로 배출하는 주요 시설로 알려져 있다.[1]

이에 따라 축산 시설의 운영 특성과 환경 인자가 탄소 배출량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 이를 기반으로 한 저탄소화 기술 개발이 필수적으로 요구되고 있다.[2]

기존의 돈사 탄소 배출 연구는 주로 가스 포집 장치나 간접 측정 방식을 통해 특정 시간대의 평균 배출량을 산정하는 접근이 일반적이었다.[3] 그러나 이러한 방식은 실시간 변화, 환경 인자의 복합적 영향, 비정상 배출 상황을 반영하기 어렵다는 한계가 있으며 센서 기술의 발전으로 다중 환경 인자를 실시간으로 수집할 수 있게 되었음에도 불구하고 이 데이터를 기반으로 한 지능형 분석 및 예측 기술은 아직 미흡한 수준에 머물러 있어[4] 돈사 내부 환경 인자별 탄소 배출량을 실측하고 이를 바탕으로 머신러닝 기반 예측 모델을 구축함으로써 배출량의 상관 구조를 분석하고자 하며 나아가 측정된 데이터를 이용하여 이상 배출 패턴을 탐지하는 기술을 제안함으로써 축산 시설의 탄소 배출 모니터링 자동화 및 저탄소 관리 체계 구축의 기반을 마련하는 것을 목표로 한다.

본 연구에서는 돈사 내 주요 환경 인자와 탄소 배출량 간의 상관 관계를 실측 데이터 기반으로 분석하고 이를 토대로 예측 모델을 구축하여 탄소 배출에 영향을 미치는 핵심 인자를 도출하며 나아가 정상 및 비정상 배출 패턴을 구분할 수 있는 이상탐지 알고리즘을 적용함으로써 비정상적 탄소 배출 상황을 실시간으로 감지할 수 있는 감시 기술을 개발하고자 한다. 본 연구는 단순히 탄소 배출량을 측정하는 데 그치지 않고, 데이터 기반 예측 및 감시 체계를 구축함으로써 향후 스마트 축사용 탄소 저감 제어 시스템 개발의 기초 자료로 활용될 수 있으며 국제적으로 검증된 온실가

스 분석 기준을 국내 실정에 맞게 확장함으로써 농업 탄소중립 정책 실현에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 재료 및 방법

본 연구는 공주대학교 축산 실증 연구시설 내 육성돈사를 대상으로 수행하였다. 대상 돈사는 자동 환기 및 온·습도 제어 시스템이 갖춰진 폐쇄형 구조로 내부에는 환기팬, 급이기, 분뇨처리 장치 등이 자동적으로 제어된다. 센서는 사육 공간 내 배기구 및 분뇨 배출구 인근에 설치하여 환기 흐름과 열 분포를 고려하였으며 약 4주간의 측정을 통해 데이터를 확보하였다. 탄소 배출량 산정을 위해 CO₂와 CH₄ 농도를 측정하는 가스 센서와 함께 온도, 습도, 환기량, 급여, 분뇨 처리 주기 등 환경 인자 데이터를 동시에 수집하였다. 모든 데이터는 Node-RED 기반 로컬 서버를 통해 1분 간격으로 자동 저장되었으며, MQTT 프로토콜로 통신하였다. 수집된 데이터는 주기적으로 CSV 형식으로 변환·관리되었고 결측치 및 이상치 제거 후 표준화 과정을 거쳐 분석에 활용하였다.

환경 인자별 탄소 배출량을 예측하기 위해 트리 기반 회귀 알고리즘인 Random Forest와 Gradient Boosting을 적용하였다. Random Forest는 변수 중요도 분석을 통한 영향 인자 해석에 Gradient Boosting은 예측 정밀도 향상에 중점을 두었다. 전체 데이터의 80%를 학습용, 20%를 검증용으로 사용하였으며 성능 평가는 결정계수, 평균제곱근오차, 평균절대오차를 기준으로 수행하였다.

예측 결과를 기반으로 잔차 분포 분석과 Isolation Forest 알고리즘을 이용하여 이상 배출 구간을 탐지하였다. 이를 통해 환기 이상, 급여 직후, 분뇨 처리 시점 등 비정상적 배출 패턴을 자동 식별하였으며 실제 제어 로그와 비교하여 탐지 정확도를 검증하였다.

III. 결론

1. 실험 대상 및 측정 환경

온도 상승 구간에서는 대사 활동과 분뇨 발효가 촉진되어 CO_2 농도가 증가하는 경향을 보였으며 반대로 환기량이 증가할수록 내부 공기 중 CO_2 농도는 낮아지는 희석 효과가 관찰되었고 분뇨 처리 직후에는 CH_4 농도가 단기간 급상승하였고 사료 급여 후에는 일시적인 CO_2 농도 피크가 형성되었으며 특히 야간 환기량이 낮은 시간대에는 두 가스 모두 농도가 높게 유지되고 이는 내부 온습도 상승과 상관관계를 보였다.

이러한 결과는 돈사 내 탄소 배출이 단일 인자보다 복합적 환경 요인에 의해 좌우되며 특히 환기 제어가 배출 농도 조절의 핵심 변수로 작용함을 보여준다.

2. 실험 대상 및 측정 환경

측된 다변량 데이터를 기반으로 환경 인자별 탄소 배출량을 정량적으로 분석하기 위해 트리 기반 회귀 알고리즘인 Random Forest와 Gradient Boosting을 병행 적용하였다.

Random Forest는 변수 중요도 분석을 통해 각 인자의 영향도를 해석하는 데 활용하였으며 Gradient Boosting은 비선형 관계를 반영하여 예측 정밀도를 높이는 데 중점을 두었다. 이러한 병행 적용을 통해 모델의 해석력과 예측 정확도를 동시에 확보하여 데이터 기반 탄소 배출 분석 체계의 신뢰성을 강화하였다.

Gradient Boosting은 잔차 기반 순차 학습을 통해 비선형적 상호작용을 효과적으로 반영하였고 Random Forest는 다수 트리의 평균화로 과적합을 억제하였다. 학습 결과 Gradient Boosting은 R^2 0.92, RMSE 0.037로 Random Forest는 R^2 0.89, RMSE 0.045로 나타나 두 모델 모두 높은 예측 일치도를 보였다.(그림 1.)

변수 중요도 분석 결과 환기량이 탄소 농도 변화에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 인자로 확인되었으며, 온도, 분뇨 처리 주기, 습도, 급여 순으로 기여도가 나타났다. 이는 환기 제어가 배출 저감에 직접적으로 작용함을 시사하며 향후 실시간 제어 기반 저탄소 축산 시스템 설계의 기초 자료로 활용될 수 있다.

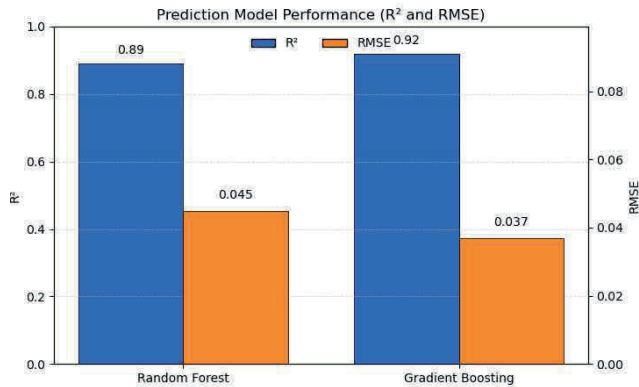


그림 1. 예측모델의 결정계수 및 평균제곱근오차 비교
Figure 1. Comparison of R^2 and RMSE between Prediction Models

3. 실험 대상 및 측정 환경

예측모델의 잔차 분포를 활용하여 이상탐지 기법을 적용한 결과 정상 상태 대비 급격한 배출 변화가 나타난 시점은 총 11회로 분석되었고 이상의 대부분은 실제 환기 제어 이상, 분뇨 처리 직후, 급여 후 환기 지연 등 환경 변화가 급격하게 발생한 시점과 일치하는 것으로 확인되었다. 특히 Isolation Forest를 이용한 탐지는 단순 임계값 기반 방법보다 더 높은 정확도와 안정성을 보였으며 CO_2 농도의 급상승이나 CH_4 배출의 비정상적 변동을 실시간으로 식별하는 데 효과적이었다.(그림 2.)

탐지 결과의 시각화에서는 잔차가 급증하거나 급감하는 구간이 명확히 구분되어 이상이 발생한 시간대가 한눈에 파악되었고 이러한 이상 구간은 대부분 환기 제어의 지연이나 갑작스러운 내부 온도 상승 구간과 대응하였다.

이는 예측모델과 이상탐지 알고리즘의 결합을 통해 축사 내 비정상적 운영 상태를 조기에 감지하고 탄소 배출을 능동적으로 제어할 수 있는 실질적인 기술적 기반을 확보할 수 있음을 보여준다.

또한 이러한 접근은 향후 실시간 환기 제어 시스템과 연계될 경우 탄소 배출 관리 자동화 수준을 한층 향상시킬 수 있는 가능성을 제시한다.

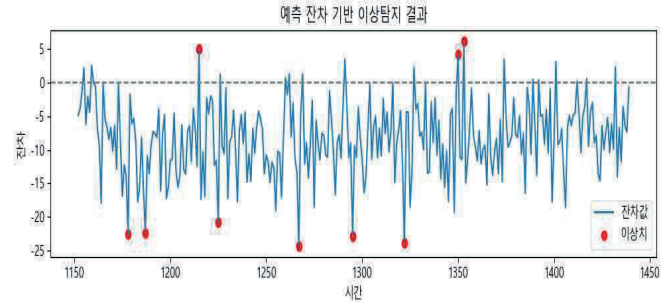


그림 1. 예측 잔차 기반 이상탐지 결과
Figure 1. Results of anomaly detection based on prediction residuals

IV. 결론

본 연구에서는 축사 실측 데이터를 기반으로 환경 인자별 탄소 배출 특성을 분석하고 머신러닝 예측모델과 이상탐지 기법을 적용하여 데이터 기반 저탄소 관리 기술의 가능성을 검증하였다. 실측 결과, 환기량이 내부 가스 농도의 주요 결정 인자로 확인되었으며 온도, 습도, 분뇨 처리 주기 등이 복합적으로 작용하였다. Random Forest와 Gradient Boosting을 병행 적용한 결과 두 모델 모두 높은 예측 정확도를 보였고 환기량, 온도, 분뇨 처리 주기가 주요 영향 요인으로 도출되었다. 또한 예측 잔차 기반 이상탐지 결과 환기 이상 및 급여·분뇨 처리 시점에서 발생하는 비정상적 배출 변동을 효과적으로 감지할 수 있었다. 본 연구는 단순 측정을 넘어 예측과 감시를 결합한 지능형 탄소 관리 체계를 제시하였으며 향후 실시간 제어 시스템 연동을 통해 저탄소 축산으로의 확장이 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 전라남도 재원으로 전남인재평생교육진흥원 지원을 받아 수행됨

참 고 문 헌

- [1] 신우영, 박창대, and 정민우, "출연 연 탄소중립 분야 연구 성과 현황 및 시사점," 한국과학기술기획평가원, 2025.
- [2] 유재일, "여름철 돈사시설(환경) 및 기구관리," 양돈, vol. 10, no. 6, pp. 62-68, 1988.
- [3] 감동환, 박규현, 최동윤, 정만순, 민병로, 이대원, and 김진경, "축산 돈사에서 온실가스 측정 방법에 대한 연구," 축산시설환경학회지, vol. 17, no. 3, pp. 155-162, 2011.
- [4] 이성원, "스마트축사 동적환경제어를 위한 물리 기반 제어알고리즘 및 시스템 개발," 박사학위논문, 전북대학교, 전북특별자치도, 2024.
- [5] 이성원, "스마트축사 동적환경제어를 위한 물리 기반 제어알고리즘 및 시스템 개발," 박사학위논문, 전북대학교, 전북특별자치도, 2024.