

A Review and Future Directions Based on Trend Analysis of Smart Broiler House Environmental Monitoring Technologies

Min-Young Hwang*, Jeong-Chan Lee**, Jin-Yeong Lee**, Ryu-Gap Lim***, Cheol-Woo Han****

*Master's course, Dept. of Smart Agricultural Engineering, Suncheon National University, Suncheon, Korea

**Student, Dept. of Convergence Biosystems Engineering, Suncheon National University, Suncheon, Korea

***Professor, Dept. of Convergence Biosystems Engineering, Suncheon National University, Suncheon, Korea

****Professor, Dept. of Agricultural Biosystems Engineering, Korea Polytechnic University,
Jeonbuk Campus, Gimje, Korea

[Abstract]

This study provides a systematic review of research trends in smart broiler house environmental monitoring technologies from the perspectives of sensor- and vision-based environmental sensing, data acquisition and communication architectures, and environmental data processing and utilization techniques. The broiler house environment consists of key factors such as temperature and humidity, ammonia(NH₃), carbon dioxide(CO₂), and particulate matter(PM), which directly affect broiler productivity and animal welfare. Previous studies have demonstrated the potential of multi-point environmental sensing and remote monitoring using low-cost sensors and wireless communication technologies; however, limitations related to sensor durability, insufficient spatial representativeness, and the lack of long-term field validation have been repeatedly reported. In addition, vision-based monitoring and artificial intelligence-based analytical methods have contributed to the quantitative assessment of broiler behavior and physiological states in response to environmental changes, but challenges remain in terms of generalizability and practical applicability under commercial farm conditions. This review suggests that future smart broiler house environmental monitoring systems should evolve toward integrated Precision Livestock Farming(PLF) frameworks that combine edge computing with AI-based data analytics.

▶ **Key words:** Smart broiler house, Environmental monitoring, Precision Livestock Farming(PLF), Sensors, IoT

-
- First Author: Min-Young Hwang, Corresponding Author: Ryu-Gap Lim
 - *Min-Young Hwang (hnyoe@gmail.com), Dept. of Smart Agricultural Engineering, Suncheon National University
 - **Jeong-Chan Lee (aiwi@naver.com), Dept. of Convergence Biosystems Engineering, Suncheon National University
 - **Jin-Yeong Lee (aoxm0708@naver.com), Dept. of Convergence Biosystems Engineering, Suncheon National University
 - ***Ryu-Gap Lim (limrg11@scnu.ac.kr), Dept. of Convergence Biosystems Engineering, Suncheon National University
 - ****Cheol-Woo Han (hcw7@kopo.ac.kr), Dept. of Agricultural Biosystems Engineering, Korea Polytechnic University
 - Received: 2025. 12. 10, Revised: 2025. 12. 30, Accepted: 2026. 01. 02.

[요 약]

본 연구는 스마트 육계사 환경 모니터링 기술의 연구 동향을 센서 및 영상 기반 환경 계측, 데이터 수집·통신 구조, 환경 데이터 처리 및 활용 기술의 관점에서 체계적으로 검토하였다. 육계사는 온·습도, 암모니아(NH₃), 이산화탄소(CO₂), 미세먼지(PM) 등 주요 환경요인으로, 육계의 생산성과 복지에 직접적인 영향을 미친다. 기존 연구는 저비용 센서와 무선 통신을 활용한 다지점 환경 계측과 원격 모니터링의 가능성을 제시하였으나, 센서 내구성, 공간적 대표성 부족, 장기 실증 한계가 반복적으로 지적되었다. 또한 영상 기반 모니터링과 인공지능 기반 분석 기법은 환경 변화에 따른 육계의 행동 및 상태를 정량화하는 데 기여하였으나, 일반화 가능성과 현장 적용성 측면에서 제약이 존재한다. 본 논문은 향후 스마트 육계사 환경 모니터링 기술이 엣지 컴퓨팅과 AI 기반 분석을 결합한 정밀축산(PLF) 중심의 통합 시스템으로 발전할 필요가 있음을 제시한다.

▶ **주제어:** 스마트 육계사, 환경 모니터링, 정밀축산(PLF), 센서, 사물인터넷(IoT)

I. Introduction

1.1. Background

국내 축산물 소비는 일정 수준 이상을 유지하며 안정적인 공급 체계 구축의 중요성이 지속적으로 제기되고 있다 [1]. 특히 육계 산업은 최근 수요 증가에 따라 '23년 287백만 마리에서 '24년 304백만 마리로 5.2% 증가하였으며 [2], 지속 가능한 생산 체계 유지를 위해 개체당 생산성 향상을 통한 효율적 생산 방식의 필요성이 제기되고 있다. 육계의 생산성은 사육환경 조건에 밀접하게 연관되어 있어, 적정 사육환경 조성의 중요성이 더욱 부각되고 있다 [3][4]. 기후변화로 인한 여름철 폭염 강도 증가로 육계는 고온 스트레스에 더욱 취약해지고 있으며[5], 땀샘이 없는 생리적 특성으로 인해 사육환경의 적정 온도 유지 여부가 생산성과 폐사율에 결정적 영향을 미친다[5][6].

육계사 내부의 온도, 습도, 공기질(NH₃·CO₂·PM 등)과 같은 환경요인은 성장률, 사료요구율(Feed Conversion Ratio, FCR), 스트레스 반응, 폐사율 및 동물복지에 직결되는 핵심 요소로 보고된다[6][7]. 일반적으로 축사 내부는 외부보다 온·습도와 NH₃ 농도가 높아 생육환경이 열악하며[8], NH₃ 배출량의 78.7%가 농업 부문에서 발생하고 그 중 91.8%가 축산 분뇨에 기인하는 등 환경 관리 측면에서도 중요한 관리 대상이다[9][10]. 특히 NH₃·CO₂ 농도는 사양관리, 분뇨 분해 과정, 환기량 변화에 따라 시·공간적 변동성이 크며, 실제 농가에서는 CO₂ 기준 3000ppm 이하 유지가 어려운 사례가 다수 보고되었다. 또한 환기량 감소를 통한 겨울철 난방비 절감은 CO₂·NH₃ 농도 초과와 주요 원인으로 지적된다[11].

이처럼 육계사 환경요인은 시·공간적 변동성이 크고 생산성과 폐사율에 직접적으로 연계되므로, 정밀한 환경 계

측 및 관리 기술은 육계 산업의 지속성과 생산성 향상을 위한 필수 요소로 인식되고 있다[3][7][9].

1.2. Problem Statement

기존 육계사 환경 모니터링 방식은 대부분 단일 지점 측정에 의존하고 있어 계사 내부의 공간적 환경 편차를 충분히 반영하지 못하고, 미세한 시간적 변화 또한 포착하는데 한계가 있다. 특히 NH₃, 고습도, 분진 등 오염 요인이 복합적으로 존재하는 계사 내부 환경은 센서 내구성 저하 및 고장률 증가를 유발하는 대표적인 요인이며, 이는 유지보수 비용 증가뿐 아니라 센서 고장 시 환경 제어 장치의 오작동으로 이어져 생산성 저하 및 집단 폐사 가능성을 초래할 수 있다[8].

더불어 농촌 지역의 많은 축사에서는 유선 통신망이나 고성능 네트워크 인프라가 부족하고, 장기간 데이터를 수집을 위한 센서·게이트웨이의 유지보수 인력도 제한적이기 때문에, 환경 모니터링 시스템 설계 단계에서 이러한 제약을 고려한 기술적 대안이 요구된다.

1.3. Scope and Organization of the Review

본 논문은 육계사 환경요인의 시·공간적 변동성과 기존 환경 모니터링 방식의 한계를 바탕으로, 스마트 육계사 환경 모니터링 기술을 센서 기반 환경 계측, 데이터 수집 및 통신 구조, 환경 데이터 분석 및 활용 기술의 관점에서 체계적으로 검토·분류하는 것을 목적으로 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 스마트 육계사 환경 모니터링 분석을 위한 기술적 배경과 주요 개념을 정리하고, 3

장에서는 센서 및 영상 기반 환경 계측 기술, 데이터 수집 및 통신 구조, 환경 데이터 분석 및 활용 기술의 연구 동향을 요소별로 검토한다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

본 논문은 Google Scholar를 주요 학술 검색 데이터베이스로 활용하여 문헌조사를 수행하였다. 검색 키워드는 “smart broiler house”, “Precision Livestock Farming(PLF)”, “environmental monitoring in livestock houses” 등의 영문 키워드와 함께 “스마트 육계사 환경 모니터링”, “축사 환경 모니터링” 등 국문 키워드를 병행하여 설정하였다. 검색 기간에는 별도의 연도 제한을 두지 않았으며, 수집된 문헌 중 학술적 신뢰성이 확보된 학술지 논문을 중심으로 검토하였다. 또한 연구 주제와 직접적인 관련성이 낮거나 중복되는 문헌은 분석 대상에서 제외하였다.

II. Preliminaries

1. Related works

2.1. Environmental Factors

육계 사육환경은 온·습도, 공기질(NH₃, CO₂, PM), 조도 등 다양한 요인으로 구성된다. 이러한 환경요인들은 육계의 성장률, FCR, 행동, 스트레스 반응, 폐사율 등에 직접적인 영향을 미친다. 특히 축사 내부 환경은 외부 기상 조건과 상이하며, 시간적 변동성과 공간적 이질성을 동시에 나타내는 특징을 가진다.

온도는 육계의 생산성과 성장률에 직접적인 영향을 미치는 대표적인 환경요인이다. 고온 환경에서는 열 스트레스가 발생하며, 이는 사료 섭취량 감소, 생산성 저하 및 폐사율 증가로 이어질 수 있다. 열 스트레스는 체내 산화 스트레스 유도, 장 장벽 손상 및 장 투과성 증가, 면역 기능 저하와 연관되어 있으며, 고밀도 사육 조건은 온도 스트레스의 영향을 증폭시키는 요인으로 작용한다.

NH₃는 육계사 내부 공기질을 저하시키는 주요 가스 성분으로, 가축 생산량 증가에 따라 축사 악취에 대한 민원이 발생하는 주요 원인으로 지적되고 있다[12]. 또한, NH₃는 장내 미생물 군집 구조 변화와 밀접하게 관련이 있는 것으로 보고되고 있다. NH₃ 노출은 미생물 조성의 불균형을 유발하여 잠재적 병원성 미생물의 비율을 증가시키고, 유익균의 감소를 초래할 수 있다. 이는 장 점막 손상과 영양소 흡수 효율 저하로 이어져 성장률에 부정적인 영향을 미친다[13].

육계사 내부는 사료, 분변, 깔짚, 깃털 등으로 인해 다량의 분진이 발생하여, 미세먼지 농도는 외부 대기 대비 매우 높은 수준을 나타낸다. 입자 크기에 따라 PM10은 상부 호흡기, PM2.5는 폐 깊숙한 조직까지 도달할 수 있으며, 이는 호흡기 조직 손상과 염증 반응을 유발하는 주요 환경 위험 요인으로 작용한다[14].

조도는 육계의 생리 및 행동에 영향을 미치는 요인이다. 조도, 광주기, 광원 특성의 조절은 육계의 생산성과 복지 향상에 중요한 변수로 작용한다[15]. 기존 연구에 따르면 조도 수준에 따라 육계의 활동성에 차이가 나타나며, 일반적으로 낮은 조도에서는 활동성이 감소하고 높은 조도에서는 활동 수준이 증가하는 경향이 있다.

2.2. Sensor- and Vision-Based Monitoring

센서 기반 모니터링은 육계사 내부의 환경 및 공기질 상태를 물리·화학 센서를 이용하여 정량적으로 측정하고, 이를 실시간 또는 주기적으로 수집·분석하는 방식이다. 이 방식은 온·습도, NH₃, CO₂와 같은 환경요인을 수치 데이터로 변환함으로써 축사 운영 상태를 객관적으로 평가할 수 있다[16]. 센서 기반 모니터링은 환경 스트레스 요인의 조기 인지와 환기, 냉·난방 제어를 위한 기초 자료로 활용되며, 스마트 축산 및 PLF 시스템의 기반 기술로 활용되고 있다. 특히 NH₃, CO₂ 농도는 육계의 호흡기 건강과 성장률, 면역 반응과 밀접한 관련이 있어 핵심 모니터링 변수로 사용된다.

반면, 센서 기반 모니터링은 측정 지점의 제한성과 센서 설치 위치, 보정 상태, 먼지 및 습도와 같은 환경 조건에 따라 측정 정확도가 영향을 받을 수 있다는 한계를 가진다. 이러한 특성으로 인해 환경 데이터를 개체 수준의 생체 반응이나 행동 변화로 직접 해석하는 데에는 제약이 존재한다.

영상 기반 모니터링은 카메라를 이용해 육계의 행동, 활동량, 공간 분포 및 군집 패턴을 비접촉 방식으로 관찰하고, 영상 처리 및 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 기법을 통해 이를 분석하는 방법이다. 이 방식은 개체 또는 군집의 움직임, 체류 시간, 밀집도, 활동 빈도와 같은 행동 기반 지표를 자동으로 추출할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 최근에는 컴퓨터 비전과 딥러닝 기술을 활용하여 이상 행동, 건강 이상, 열 스트레스 반응 및 성장 상태를 간접적으로 평가하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다[17].

영상 기반 모니터링의 주요 장점은 센서로 직접 측정하기 어려운 행동 및 복지 상태를 연속적이고 비침습적으로 관찰할 수 있다는 점이다. 반면, 조명 조건, 분진, 개체 간 가림 현상, 카메라 설치 각도 등에 따라 분석 정확도가 영

향을 받을 수 있으며, 알고리즘 학습을 위한 데이터 구축이 필요하다는 한계도 존재한다.

종합적으로, 센서 기반 모니터링은 축사 환경을 국소적이고 정량적으로 측정하여 환경 상태를 평가하는 데 중점을 둔다. 반면 영상 기반 모니터링은 비접촉 방식으로 축사 전반의 공간적 분포와 육계의 행동 반응을 관찰함으로써 환경 변화에 따른 개체 반응을 직접적으로 반영하는 특징을 가진다.

2.3. Data Acquisition and Communication

육계사에서의 데이터 수집은 센서 노드의 배치 방식과 데이터 전송-처리 구조에 따라 구분된다. 단일 노드 데이터 수집 구조는 하나의 센서 노드가 특정 위치의 환경 정보를 수집하여 게이트웨이, 서버 또는 클라우드로 직접 전송하는 방식이다. 이 구조는 시스템 구성이 단순하고 설치 및 운영이 용이하다는 특징을 가지며, 소규모 축사, 파일럿 실험에 적합하다. 그러나 단일 노드 구조는 국소적 정보만을 제공하므로, 공간적으로 불균일한 축사 환경을 대표하는 데에는 한계가 존재한다[18].

다지점 노드 데이터 수집 구조는 여러 센서 노드를 축사 내 다양한 위치에 분산 배치하여 환경 정보를 동시에 수집하는 방식이다[19]. 이 구조는 축사 내부 환경 변수의 공간적 분포와 변화를 정밀하게 파악할 수 있다는 점에서 높은 공간적 대표성을 가진다. 이를 통해 환기 불균형, 국소적인 유해가스 축적, 특정 구역의 열 스트레스와 같은 문제를 효과적으로 탐지할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 다지점 노드 구조는 대규모 축사 및 PLF 환경에서 표준적인 데이터 수집 방식으로 활용되고 있다. 반면, 노드 수 증가에 따라 통신 부하와 유지보수 비용이 증가할 수 있으므로, 설계 단계에서 노드 배치 전략이 중요하다.

센서 노드와 데이터 수집 장치 간의 통신은 유선 또는 무선 방식으로 이루어진다. 유선 통신은 안정성이 높은 반면 설치 유연성이 제한되며, 무선 통신은 설치와 확장이 용이하여 다지점 노드 구조에 적합하다. 무선 센서 네트워크는 다수의 센서 노드를 무선으로 연결하여 환경 데이터를 중앙 노드로 전달하는 구조이며[19], 사물인터넷(Internet of Things, IoT)은 이러한 센서 네트워크를 포함하여 물리적 객체를 네트워크로 연결하고 데이터 기반 서비스를 제공하는 인프라로 정의된다.

데이터 처리 구조는 중앙 집중식과 분산 처리식으로 구분된다. 중앙 집중식 구조에서는 데이터 저장과 분석이 중앙 서버에서 일괄적으로 수행되어 시스템 관리가 용이하다. 반면, 분산 처리식 구조에서는 데이터 전처리와 일부 연산

이 현장 인근 장치에서 수행되어 네트워크 부하를 줄이고 실시간성을 향상시킨다. 옛지 컴퓨팅은 이러한 분산 처리 개념을 확장한 형태로, 데이터가 생성되는 지점 또는 그 근처에서 분석과 의사결정을 수행함으로써 지연을 최소화하고 현장 중심의 자율적 시스템 운영을 가능하게 한다.

2.4. Data Processing and Utilization

데이터 처리 및 활용은 센서 및 영상 기반 모니터링을 통해 수집된 원시 데이터를 분석 가능한 정보로 변환하고, 이를 의사결정과 운영 관리에 활용하는 과정을 의미한다. 이 과정에서 AI는 인간의 학습, 추론 및 지각 능력을 인공적으로 구현하는 컴퓨터과학의 한 분야로서, 복잡한 데이터 패턴을 해석하는 핵심기술로 활용된다. 머신러닝(Machine Learning, ML)은 AI의 하위 분야로, 데이터로부터 스스로 학습하여 지능적인 작업을 수행하도록 하는 기술이다.

시계열 예측은 시간의 흐름에 따라 축적된 과거 관측 데이터를 활용하여 향후 값을 추정하는 분석 기법이다. 이 기법은 장기적인 운영계획 수립과 자원 관리, 합리적인 의사결정을 지원하는 데 활용된다. 시계열 예측은 전력 소비, 환경 품질, 기상 조건 등 다양한 분야에서 핵심적인 분석 도구로 활용되었으며, 최근에는 환경 모니터링과 같이 복합적이고 동적인 시스템에서도 그 중요성이 확대되고 있다.

ML 기반 접근법은 전통적인 통계 기법에 비해 데이터 내에 존재하는 복잡한 비선형 관계를 효과적으로 학습이 가능하다. 이러한 특성으로 인해 시계열 예측 문제에서 우수한 성능과 일반화 능력을 보이는 것으로 보고된다. 특히 트리 기반 ML 기법과 딥러닝 모델은 변화가 빈번하고 불확실성이 높은 실제 환경 데이터 분석에 적합한 방법으로 평가되고 있다.

최근에는 실시간 대응 요구가 증가함에 따라, ML 기반 데이터 처리 기능을 중앙 서버가 아닌 엣지 환경으로 이동시키는 흐름이 나타나고 있다[20]. 이러한 구조는 데이터 처리 지연을 최소화하고, 현장 상황에 대한 즉각적인 대응을 가능하게 한다는 점에서 데이터 활용 측면의 중요한 특징으로 인식되고 있다.

2.5. Precision Livestock Farming, PLF

정밀축산(Precision Livestock Farming, PLF)은 정보통신기술(Information and Communication, ICT), IoT, 센서 네트워크 및 데이터 분석을 기반으로 가축의 생육 상태와 사육환경을 실시간으로 모니터링하고, 이를 자동 제어 및 의사결정 과정에 적용함으로써 생산성 향상과 동물

복지 개선을 동시에 도모하는 기술 체계로 정의된다[1]. PLF 시스템에서 환경 데이터는 냉·난방, 환기, 사양관리 등 주요 운영 제어를 위한 핵심 입력 요소로 기능한다.

최근 연구에서는 외기 조건, 환기량, 일사량과 같은 외부 요인과 육계의 성장 단계 정보를 입력 변수로 활용하여, 순환신경망(Recurrent Neural Network, RNN) 기반 시계열 예측 모델을 적용함으로써 육계사 미기후를 정밀하게 예측하는 접근이 제시되었다[21]. 이러한 연구는 환경 변화를 사전에 예측하고 이에 대응하는 선제적 관리 전략의 가능성을 보여준다.

또한 엣지 컴퓨팅, AI, IoT 기술을 결합한 환경 모니터링 시스템에서는 유해가스 농도, 온·습도, 스트레스 지표 등을 현장에서 실시간으로 분석함으로써 데이터 처리 지연을 줄이고 자율적인 환경 관리 가능성을 확대하고 있다 [22]. 이러한 구조는 빠르게 변동하는 사육환경에 대한 즉각적인 대응을 가능하게 한다는 점에서 PLF 구현의 중요한 기술적 특징으로 평가된다.

국내에서도 스마트 축사 기술의 보급이 점차 확대되고 있으며, 환경 계측 센서, 통신 인프라, 데이터 분석 플랫폼을 통합한 시스템 구축이 추진되고 있다[23][24]. 이러한 시스템은 노동력 절감과 생산성 향상을 주요 목표로 한다. 특히 육계사는 성장 속도가 빠르고 환경 변화에 민감한 특성을 가지므로, PLF 기반 환경 모니터링 및 제어 기술의 적용 효과가 클 것으로 기대된다.

종합하면, PLF는 환경 데이터를 기반으로 환기, 냉·난방, 조명, 사료 공급과 같은 실시간 제어를 수행하는 기술 체계로 발전하고 있으며, 최근에는 장단기 기억 신경망(Long Short-Term Memory, LSTM) 기반 시계열 예측과 Edge-AI를 활용한 선제적 제어 전략이 도입되고 있다 [21][22]. 이러한 기술적 배경은 이후 논의될 센서 및 영상 기반 모니터링, 데이터 수집 및 AI 기반 분석 기법의 중요성을 뒷받침한다.

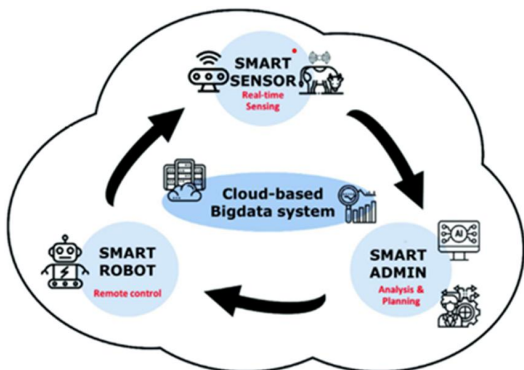


Fig. 1. Overview of smart livestock technology. Adapted from [1].

III. Review of Smart Broiler Houses Monitoring Technologies

본 장에서는 제2장에서 정의한 요소별 분류 체계를 기반으로, 스마트 육계사 환경 모니터링 기술의 연구 동향을 센서 및 영상 기반 계측, 데이터 수집 및 통신 구조, 데이터 처리 및 활용 기법으로 구분하여 분석한다. 특히 각 기술 요소가 적용된 사육환경 조건과 운용 목적을 중심으로, 적용 적합성과 기술적 한계를 종합적으로 검토한다.

3.1. Sensor- and Vision-Based Monitoring

Table 1은 본 절에서 이후에 제시되는 스마트 육계사 환경 모니터링의 센서 기반 및 영상 기반 접근 방식을 측정 대상, 공간적 적용 범위, 주요 기술 요소, 장점 및 한계의 관점에서 비교·정리한 것이다.

3.1.1 Measurement Requirements

기존 연구에서는 육계사 환경의 시·공간적 변동성을 반영하기 위해 단일 지점 측정이 아닌 다지점·다변량 환경 계측이 필요하다고 보고하고 있다. 특히 온·습도, NH₃, CO₂, PM 등 주요 환경요인의 동시 측정과 함께[4][25], 사육 공간 내 위치에 따른 환경 편차를 고려할 수 있는 측정 구조의 중요성이 반복적으로 제시되었다.

3.1.2 Sensor-Based Monitoring Technologies

Lashari et al.(2018)은 라즈베리파이 기반 온·습도, NH₃, CO₂, O₂ 등 다종 환경 변수를 계측하는 IoT 기반 원격 환경 모니터링 시스템을 설계하였다. 해당 시스템은 2G/3G 이동통신망을 통해 중앙 서버로 데이터를 실시간 전송하는 구조로 실제 축산시설에 시범 구축하여 원격 환경 관리 가능성을 검증하였다. Mazunga et al.(2023)은 DHT22(온·습도), MQ-135(CO₂), MQ-137(NH₃), DS200(먼지) 등 저비용 센서를 활용한 센서 노드를 구축하고, NB-IoT, LoRa, GSM 통신 방식을 적용하여 실시간 환경 모니터링 시스템을 구현하였다. Singh et al.(2024)은 DHT11(온·습도), MQ-137(NH₃), MQ-135(CO₂), LDR(조도) 센서를 결합한 저비용 IoT 모듈과 LoRaWAN 기반 통신 구조를 제안하였다. 다만 해당 연구는 피어리뷰를 거치지 않은 프리프린트 단계의 연구로, 제한된 실증기간과 공식성 측면에서 신중한 해석이 요구된다.

Han et al.(2017)은 IoT 센서로 수집된 온도, NH₃, CO₂ 데이터를 기반으로 회귀분석 및 나이브 베이스 알고리즘을 적용하여 육계 사육환경과 생육 상태 간의 관계를 분석

하는 플랫폼을 제안하였다. Hwang(2022)은 Arduino 기반 멀티 센서 모듈과 RS485(Modbus) 통신을 활용한 웹 기반 실시간 환경 모니터링 시스템을 구축하였으며, CFD 분석을 통해 센서 배치의 타당성을 검증하였다.

Salleh et al.(2024)은 LoRaWAN 기반 온-습도 센서, RFID, CCTV를 통합한 멀티 센서 시스템을 구축하여 육계사 환경 데이터를 실시간으로 수집 및 저장하였다. 또한, 회귀분석을 통해 환경 변화와 생산성 간의 관계를 분석하였다. Qi et al.(2023)은 WSN 기반 다지점 환경 데이터 수집 구조를 제안하고, 공간적 환경 분포 분석 유효성을 보고하였다.

Abbas et al.(2025)은 NH₃, CO₂, 황화수소(H₂S), 아산화질소(N₂O), 메탄(CH₄) 등의 가스를 대상으로 금속산화반도체(MOS) 센서 기반 가스 감지 기술과 IoT 적용 사례를 종합적으로 분석하였다. Kang et al.(2022)은 사육 공간 및 분뇨 구역을 고려한 가스 센서의 적정 측정 범위를 제시하고 전기화학식 센서의 유효성을 검증하였다.

이러한 센서 기반 환경 모니터링 연구는 온-습도, NH₃, CO₂ 등 주요 환경 변수를 저비용 센서와 무선통신 기술을 활용하여 다지점으로 계측하고, 원격에서 사육환경 상태를 파악할 수 있다는 점에서 실용성이 높다. 특히 기존 측사에 적용 가능한 구조와 IoT, WSN, LoRaWAN 기반 통신을 통한 확장성이 장점으로 제시된다.

반면, 다수의 연구가 환경 변수의 측정·전송·시각화에 초점을 두고 있어 장기간 데이터 축적을 기반으로 한 예측, 이상 탐지, 자율 제어 기능은 제한적으로 구현되었다. 또한, 센서 드리프트, 온-습도 변화에 따른 측정 오차, 가혹한 측사 환경에서의 장기 내구성 문제, 단일 센서의 공간적 대표성 부족과 같은 한계가 반복적으로 보고되고 있다. 일부 연구는 제한된 실증기간이나 소규모 표본에 기반하여 수행되어, 사계절 및 다양한 사육 조건에 대한 일반화 가능성 검증이 충분하지 않다는 점도 지적된다.

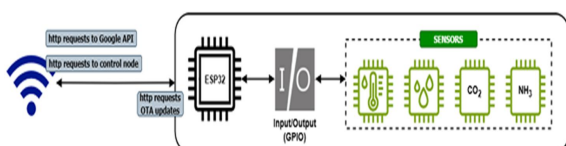


Fig. 2. Architecture of the Measurement nodes.
Adapted from [16].

3.1.3 Vision-Based Monitoring

Lee et al.(2019)은 단일 카메라로 촬영한 육계사 영상에서 HSV 기반 영상 처리를 통해 육계 군집 영역을 검출하였다. 또한, 카메라-월드 좌표계 변환을 적용하여 지면 투영 면적을 산출하고, 이를 기반으로 군집 밀도를 정량 평가하였다.

Kim et al.(2020)은 탑뷰(top-view) 카메라와 OpenCV 기반 물체 추적 기법을 활용하여 육계 개체의 이동 경로를 추적하였다. 급이·급수 및 휴식공간 영역별 머무는 빈도를 정량화함으로써, 사육 밀도에 따른 육계의 공간 이용 행동을 영상 기반으로 분석하였다. Song(2024)은 광각 카메라 영상에 YOLOv5 알고리즘을 적용하여 병아리 개체를 인식하였다. 개체 중심 좌표로부터 분포 중심과 2차 모멘트 지표를 산출하여, 열 스트레스 조건에 따른 계사 내 분포 변화를 정량적으로 분석하였다. Lee et al.(2021)은 실험 팬 상부에 설치한 탑뷰(top-view) 카메라를 활용하여 육계의 사료섭취, 음수, 앉기 및 날개 펼침 행동을 영상으로 기록·분석하였다. 이를 통해 열 스트레스 환경에서 나타나는 행동 변화를 비교하였다.

Guo et al.(2022)은 전 일령 육계를 대상으로 급이, 급수, 서기, 휴식 행동을 자동 인식하기 위한 CNN 기반 이미지 분류모델을 개발하였다. 다양한 CNN 구조의 성능을 비교한 결과, DenseNet-264를 육계 행동 인식을 위한 기준 성능 모델로 제시하였다. Nasiri et al.(2024)은 상용 육계사 환경에서 깃고르기와 기지개와 같은 행동을 복지 지표로 설정하였다. 탑뷰(top-view) 영상을 이용해 육계 개체를 분리·추적하고, 해당 행동을 자동으로 판별 및 계수하는 행동 모니터링 시스템을 제안하였다.

이러한 영상 기반 모니터링 연구는 카메라를 활용하여 육계의 행동, 이동, 분포 및 자세 변화를 비접촉·비침습적으로 관찰할 수 있다는 공통적인 특성을 보인다. 또한 행동 빈도, 공간 점유, 분포 지표 또는 딥러닝 기반 행동 분류 결과를 정량화하는 접근이 확대되고 있다.

반면, 다수의 연구가 단일 또는 제한된 시야의 탑뷰(top-view) 카메라에 의존하고 있어 가림과 중첩에 따른 인식 오류 문제가 반복적으로 보고되고 있다. 고해상도 영상과 복잡한 딥러닝 모델의 적용은 연산 자원 및 네트워크 인프라 요구를 증가시켜, 일반 농가 적용 시 비용과 운영 부담을 높이는 제약 요인이 된다. 또한, 제한된 사육 조건에서 구축된 데이터셋을 기반으로 한 모델의 일반화 가능성에 대한 검증이 충분하지 않다는 한계도 지적된다.

Table 1. Sensor- and Vision-based monitoring approaches

Category	Sensor	Vision
Monitoring target	Temperature, humidity, NH ₃ , CO ₂ , PM	Broiler behavior patterns and spatial distribution
Spatial coverage	Point-based	Area-based
Key technologies	IoT, WSN, LoRa	CNN-based vision
Strengths	Quantitative, continuous	Non-contact
Limitations	Drift, durability	Occlusion, computation

3.2. Data Acquisition and Communication

Table 2는 본 절에서 이후에 제시되는 스마트 육계사 환경 모니터링 시스템의 중앙 집중식과 분산·엣지 기반 데이터 수집 구조를 처리 위치, 네트워크 의존성, 지연 특성, 장점 및 한계 측면에서 비교한 것이다.

3.2.1 Centralized Architectures

Pereira et al.(2020)은 저가형 센서와 Wi-Fi 통신을 활용한 IoT 기반 환경 모니터링 장치를 설계하여 육계 농장의 온·습도, NH₃ 및 조도를 중앙 시스템에서 통합적으로 관리하는 구조를 제안하였다. 센서 노드는 환경 변수를 측정해 중앙 CPU로 전송하며, 데이터 저장과 시각화는 중앙 서버에서 수행된다.

Godinho et al.(2025)은 유선 기반 계사 환경 관리 시스템의 배선 비용과 신뢰도 문제를 지적하고, 무선 측정 노드와 중앙 제어 노드로 구성된 중앙 집중식 IoT 아키텍처를 제안하였다. 계사 내 여러 지점에서 수집된 환경 데이터는 중앙 노드로 전송되며, 중앙 노드는 이를 저장·분석하고 환기팬, 가열기 및 분무기 등의 액추에이터를 통합적으로 제어한다.

Zheng et al.(2021)은 센서 네트워크를 통해 수집된 계사 환경 및 사육 데이터를 계사 서버에서 집계한 후 클라우드 데이터베이스로 전송하는 중앙 집중식 가금 정보 관리 시스템을 제안하였다. 중앙 플랫폼은 환경 모니터링과 개체관리 기능을 통합적으로 제공한다. Bumanis et al.(2022)은 스마트 양계장 관리를 위한 사이버-물리 시스템 데이터 모델을 제시하고, 다수 계사에서 수집된 환경 데이터를 단일 데이터 센터에서 처리하는 중앙 집중식 구조를 채택하였다. 센서 데이터는 중앙 클라우드 데이터베이스로 전송되며, 데이터 저장과 처리는 중앙 시스템에서 수행된다. Liu et al.(2024)은 클라우드 데이터베이스를 핵심 허브로 하는 IoT 기반 지능형 계사 서비스 플랫폼을 개

발하였다. 환경 및 생산 정보는 수집 후 중앙 플랫폼에 저장되며, 중앙 시스템에서 통합 관리한다. Nalendra and Waspada(2025)는 센서 노드에서 수집된 환경 및 사육 데이터를 클라우드 서버에 중앙 저장하고, 이를 모바일 애플리케이션을 통해 조회·관리하는 중앙 집중식 IoT 기반 육계 농장 관리 시스템을 제안하였다. 데이터 이력 관리와 경보 알림 기능은 중앙 플랫폼에서 수행된다.

이러한 중앙 집중식 구조 연구는 센서 노드에서 측정된 데이터를 중앙 서버 또는 클라우드로 집약하여 저장·분석·시각화하는 공통적인 특징을 보인다. 센서 노드의 기능을 측정과 전송으로 단순화함으로써 유지보수가 용이하고, 다변수 환경 데이터를 단일 플랫폼에서 통합적으로 관리할 수 있다는 장점이 있다.

반면, 중앙 서버 또는 클라우드에 대한 의존도가 높아 장애 발생 시 시스템 전체의 신뢰성이 저하될 수 있다. Wi-Fi 기반 통신 환경에서는 노드 수 증가에 따른 네트워크 부하와 지연 문제가 발생할 가능성이 있다. 또한, 다수의 연구가 단기 또는 제한된 환경에서 검증되어, 장기간 운용과 다양한 사육 조건에서의 일반화 가능성에 대한 검증이 충분하지 않다는 한계도 지적된다.

3.2.2 Distributed and Edge Architectures

Lashari et al.(2023)은 LoRa 기반 센서 노드-게이트웨이-클라우드 구성된 분산형 IoT 환경 모니터링 시스템을 제안하였다. 각 센서 노드는 온·습도, NH₃, CO₂, CO, O₂를 측정하고, 게이트웨이에서 데이터를 집계 및 전처리 후 클라우드로 전송함으로써 데이터 수집과 1차 처리를 현장 수준에서 분산시키는 구조를 구현하였다.

So-In et al.(2014)은 WSN 기반 센서 노드, 모바일 장치, 클라우드 서비스를 결합한 하이브리드 분산 아키텍처를 제안하였다. 센서 노드는 계사 내 여러 지점에서 환경 데이터를 수집하고, 베이스 스테이션과 모바일 단말을 거쳐 클라우드로 데이터를 오프로딩하는 계층적 구조를 갖는다. 이를 통해 데이터 수집과 일부 처리가 현장과 모바일 계층에 분산되는 구조를 제시하였다.

일부 연구에서는 데이터 처리와 분석을 중앙 서버가 아닌 엣지 노드(edge node)에서 수행하는 구조가 제안되었다. Debauche et al.(2020)은 무선 센서 네트워크와 엣지 컴퓨팅을 결합한 엣지-클라우드 아키텍처를 제시하고, 엣지 노드에서 환경 데이터 전처리와 시계열 예측 및 이상 탐지를 수행하였다. Yang et al.(2019)은 엣지 노드에서 환경 데이터를 분석하고 팬과 조명 제어 판단을 수행하는 구조를 제안하여, 지연에 민감한 제어 의사결정을 현장에

서 수행할 수 있음을 보고하였다. 또한, Goyal et al.(2021)과 Goyal et al.(2024)은 각각 열화상 영상 기반 온도 이상 탐지와 환경 데이터 기반 이상 탐지를 엷지 노드에서 수행하는 구조를 제안하여, 엷지 단에서의 실시간 분석 가능성을 제시하였다.

이러한 분산 및 엷지 기반 아키텍처 연구들은 데이터 수집, 전처리 및 분석 기능을 센서 노드, 게이트웨이, 모바일 단말 또는 엷지 서버에 분산 배치함으로써, 중앙 집중식 구조에서 발생하는 통신 병목과 처리 지연 문제를 완화하려는 공통적인 특징을 보인다. 특히, 장거리 통신 기반 분산 수집, 계층적 데이터 오프로딩, 그리고 엷지 노드에서의 실시간 분석은 실제 양계장 환경에서 네트워크 제약과 실시간성 요구를 동시에 고려한 설계로 평가된다.

반면, 현재까지 제안된 다수의 분산형 구조는 데이터 수집과 모니터링 기능에 초점을 두고 있어, 고도화된 AI 기반이나 이상 탐지는 여전히 클라우드 또는 중앙 서버에 의존하는 경향을 보인다. 엷지 단에서 수행되는 분석 기법의 성능을 정량적으로 비교·검증한 사례는 제한적이며, 단기 실험이나 특정 농장 조건에 기반한 결과가 많아 다양한 계절 조건과 사육 밀도에서의 일반화 가능성에 대한 검증은 충분하지 않다. 또한, 엷지-클라우드 간 기능 분담, 연산 자원 제약, 시스템 신뢰성 및 가용성에 대한 체계적인 설계 기준도 추가적인 연구가 요구된다.

따라서 향후 PLF 기반 스마트 육계사에서는 분산 처리 구조를 유지하면서도, 환경 데이터 분석, 이상 탐지 및 예측제어와 같은 지능형 의사결정을 엷지 노드에서 수행할 수 있는 엷지 컴퓨팅 아키텍처로의 확장이 필요하다. 이는 통신 부하를 최소화하면서도 실시간성과 신뢰성을 동시에 확보하기 위한 핵심기술 방향으로 제시될 수 있다.

Table 2. Centralized and Distributed data acquisition architectures

Category	Centralized	Distributed/ Edge
Processing location	Central server, Cloud	Gateway, Edge node
Network dependency	High	Lower
Latency	Higher	Low
Strengths	Simple architecture, easy management	Improved real-time performance, reduced network load
Limitations	Communication bottlenecks, failure-prone	Design complexity, limited resources

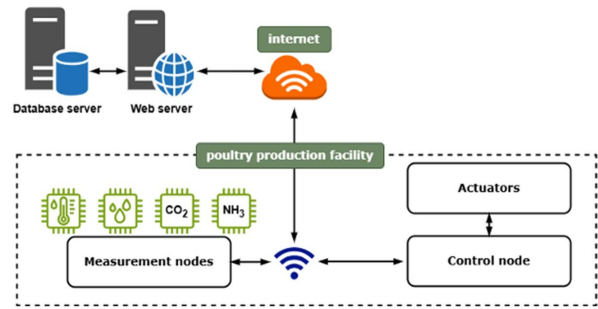


Fig. 3. Architecture of the WiMoCoSPH. Adapted from [16].

3.3. Data Processing and Utilization

Table 3은 본 절에서 이후에 제시되는 스마트 육계사 환경 데이터 처리 및 활용 기술을 전처리, AI/ML 기반 분석, 그리고 강화학습 기반 제어 단계를 주요 목적, 대표적 기법, 산출 결과의 관점에서 구조적으로 정리한 것이다.

3.3.1 Preprocessing and Outlier Detection

Selle et al.(2023)은 천장 부착형 로봇 모니터링 시스템을 활용하여 대규모 육계사에서 장기간 환경 데이터를 수집하고, 결측치·중복치·좌표 오류·시간 불일치 등을 제거하는 다단계 전처리 파이프라인을 적용하였다. 해당 연구는 실제 축사 환경에서 초기 시스템의 40-50%에 달하는 데이터가 제거 대상이 되었음을 보고하여, 센서 데이터 품질 관리의 중요성을 정량적으로 제시하였다.

Ahmed et al.(2024)은 IoT 기반 행동 데이터를 대상으로 null 값·영값·중복값 제거와 feature selection을 수행하고, 불균형 데이터 문제를 해결하기 위해 최적화된 SMOTE 기법을 적용하였다. 이러한 전처리와 데이터 균형화 과정을 통해 Random Forest 기반 행동 분류 정확도를 98-99% 수준으로 향상시켰다.

Xu et al.(2024)은 환경 시계열 데이터 전처리를 위해 3σ 기반 이상치 제거와 STL 분해를 적용하여 노이즈를 완화하고, 잔차 기반 동적 임계값을 통해 시간에 따라 변화하는 이상 패턴을 탐지하였다. 이와 같은 구조적 전처리는 후속 예측 모델의 성능 향상에 기여하였다.

영상 및 음향 데이터의 경우, Kim et al.(2020)은 기계적 소음을 제거한 후 활동 에너지 기반 시계열 분석을 통해 이상 행동을 탐지하였다. Lee et al.(2023)은 Optical flow 기반 활동성 정량화와 밝기·배경 변화 제거를 통해 동적 임계값 기반 이상 탐지 기법을 제안하였다. Jang et al.(2022)은 초분광 영상에서 스펙트럼 전처리 기법을 적용하여 센서 노이즈를 제거하고, 바닥재 수분 함량과 관련된 유효 파장 대역을 도출하였다.

Kim and Park(2019)는 환경 센서, 음향, 행동 데이터를 통합 수집하고 설비 운전 이벤트를 별도로 라벨링하여 유효 데이터셋을 구축하였다. Ko and Lee(2024)와 RDA(2020)는 결측치 보정과 통계적·기계학습 기반 이상치 탐지를 결합하여 환경 시계열 데이터의 이상 패턴을 탐지하였다.

이러한 선행 연구는 센서, 행동, 영상, 음향 데이터 전반에서 전처리와 이상치 탐지가 데이터 분석 성능과 신뢰성 확보를 위한 필수 단계임을 공통적으로 보여준다. 특히 실제 육계사 환경에서는 먼지, 습기, 전자기 간섭, 통신 불안정 등으로 인해 결측치와 이상값이 빈번하게 발생하므로, 단순 데이터 수집 및 저장만으로는 PLF 시스템의 안정적 운영이 어렵다.

반면, 다수의 연구가 단일 농장이나 제한된 기간의 데이터에 기반하고 있어 다양한 지역, 계절, 사육 밀도 및 축종에 대한 일반화 검증은 충분하지 않다. 또한, 전처리 및 이상 탐지 기법의 성능을 체계적으로 비교·평가한 연구는 제한적이며, 복잡한 알고리즘의 경우 현장 배포 시 계산 비용과 에너지 소비에 대한 실증적 검토가 부족하다. 따라서 향후에는 현장 환경을 고려한 자동 전처리, 실시간 이상 탐지, 그리고 엣지 컴퓨팅 기반의 데이터 품질 관리 기법을 통합한 연구가 요구된다.

3.3.2 AI/ML-Based Analysis

Ali et al.(2024)은 IoT 센서 네트워크와 ML을 결합한 지능형 환경 제어 시스템을 제안하였다. 온·습도, 조도, 유해가스 등 환경 데이터와 팬, 히터, 조명, 급수 장치의 데이터셋을 구축하고, Decision Tree, Random Forest, k-NN, SVM, Naive Bayes 등 지도학습 분류 모델을 학습시켰다. 그 결과 Decision Tree와 Random Forest가 환경 조건에 따른 제어 명령을 높은 정확도로 예측하였으며, Decision Tree는 실제 테스트베드에서 자동 환경 제어에 적용되었다.

Birzniece et al.(2022)는 환경 데이터와 생산 지표를 통합한 LSTM 기반 시계열 모델을 이용해 육계 체중을 예측하였다. 간헐적으로 측정된 체중 데이터를 Gompertz 성장곡선으로 일일 단위 보간하고, 환경 조건이 권장 범위를 벗어난 시간 비율을 특징 변수로 구성하였다. 이를 통해 LSTM 모델은 평균제곱근오차(RMSE) 약 0.295의 예측 성능을 달성하였다.

Kucuktopku et al.(2024)은 암모니아 시계열 데이터를 Wavelet Transform으로 분해한 뒤 Random Forest, SVR, XGBoost, ANN과 결합한 WT-ML 기반 예측 모델을

제안하였다. 해당 접근은 비정상성과 노이즈가 포함된 NH₃ 데이터의 예측 성능을 향상시키는 데 기여하였다.

Zhang et al.(2024)은 온·습도, NH₃ 농도 및 외기 기후 데이터를 통합한 다중 입력·출력 구조의 Multif-LSTM 모델을 제안하였다. 제안된 모델은 온·습도, NH₃를 동시에 예측하고, 이를 환기·난방·제습 장치 제어와 연계하여 단일 LSTM이나 RNN 대비 예측 정확도를 향상시켰다.

이러한 연구는 AI/ML 기법이 환경 데이터 해석, 생산 지표 예측, 그리고 환경 제어 자동화에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다. 특히 지도학습 기반 분류 모델은 운영자의 경험적 제어 패턴을 학습하는 데 활용되었으며, LSTM 계열 모델은 환경 변화와 생산성 간의 시계열적 관계를 분석하는 데 강점을 보였다.

반면, 다수의 AI/ML 기반 연구는 특정 농장이나 제한된 환경 조건에서 구축된 데이터셋에 기반하고 있어 일반화 가능성에 대한 검증이 충분하지 않다. 또한 모델 간 성능 비교가 제한적이거나, 복잡한 딥러닝 모델의 계산 비용과 현장 배포 가능성에 대한 실증적 검토가 부족하다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 농장 조건을 반영한 일반화 검증, 모델 경량화, 그리고 예측 결과를 실제 제어 전략과 연계하는 통합적 AI 기반 운영 프레임워크에 대한 연구가 요구된다.

3.3.3 Reinforcement Learning-Based Control

Zhang et al.(2024)은 NB-IoT 기반 환경 데이터 수집 시스템을 구축하고, Q-Learning 기반 환경 제어 모델을 적용하였다. 해당 연구에서는 제안된 제어 모델이 기존의 임계값 기반 제어 방식과 비교하여 안정적인 환경 제어 성능을 확보할 수 있음을 보고하였다.

Johansen et al.(2021)은 육계 사육 공정을 대상으로 반복 학습 기반 최적 제어 전략을 제안하였다. 해당 연구는 브로일러 성장과 환경 조건 간의 관계를 동적 신경망(DNN)으로 모델링하고, Norm-Optimal Terminal Iterative Learning Control(NOTILC)을 적용하여 사육 주기별 온도 제어 경로를 반복적으로 개선하는 구조를 제시하였다. 시뮬레이션과 상업용 육계사 실험 결과, 제안된 제어 전략은 기존 운전 방식 대비 도축 시점의 FCR을 감소시킬 수 있는 가능성을 보였다.

한편, Kim et al.(2024)은 LSTM 기반 시계열 예측 모델과 DQN 기반 제어 알고리즘을 결합한 HVAC 제어 시스템을 제안하였으나, 해당 연구는 육계사가 아닌 일반 건물의 실내 환경 제어를 대상으로 수행되었다. 따라서 본 절에서는 육계사 환경 제어를 직접적으로 다룬 강화학습 기

반 연구로는 포함하지 않는다.

이러한 연구들은 학습 기반 제어 기법이 기존의 규칙 기반 또는 임계값 기반 제어 방식과 구별되는 접근으로 육계사 환경 제어 및 생산성 관리에 적용될 수 있음을 보여준다. 특히 사육 주기별 제어 전략을 반복적으로 개선하거나, 데이터 기반 제어 모델을 적용한 사례가 보고되고 있다.

반면, 육계사를 대상으로 한 강화학습 및 반복 학습 기반 제어 연구는 아직 사례 수가 제한적이다. 또한 실제 상업용 육계사 환경에서 장기간 적용했을 때의 안정성, 다양한 사육 조건에서의 일반화 가능성에 대한 검증은 충분히 이루어지지 않았다. 이에 따라 향후 연구에서는 육계사 환경을 대상으로 한 학습 기반 제어 기법의 실증 사례 확대와 장기 운용 관점에서의 성능 검증이 요구된다.

Table 3. Data processing and Control techniques

Category	Preproc.	AI/ML Analysis	RL-Based Control
Primary purpose	Data quality and anomalies	Analysis and prediction	Optimization and control
Techniques	Outlier removal, 3σ rule, STL	DT, RF, SVM, LSTM	Q-Learning, ILC, DNN
Output	Clean data and anomalies	Prediction results	Optimal control signals

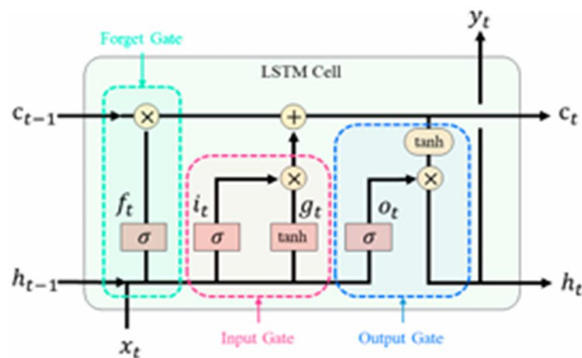


Fig. 4. Basic Architecture of LSTM models. Adapted from [17].

IV. Conclusions

본 논문에서는 육계사 환경요인의 시·공간적 변동성과 기존 환경 모니터링 방식의 구조적 한계를 바탕으로, 스마트 육계사 환경 모니터링 기술의 연구 동향을 체계적으로 분석하였다. 이를 위해 환경요인, 센서 및 영상 기반 모니터링, 데이터 수집 및 통신 구조, 데이터 처리 및 활용 기

술, 그리고 PLF 관점에서의 통합적 기술 흐름을 중심으로 기존 연구를 검토하였다. 육계사 환경은 온·습도, NH_3 , CO_2 , PM 등 다양한 요인으로 구성되며, 이들 요인은 성장률, FCR, 스트레스 반응 및 폐사율과 직접적으로 연계되는 핵심 관리 대상임을 확인하였다.

센서 기반 모니터링 기술은 저비용 센서와 무선통신 기술을 활용하여 다지점 환경 계측과 원격 모니터링을 가능하게 하였으며, 실제 측사 적용 가능성이 높은 기술로 평가된다. 반면, 센서 드리프트, 가혹한 측사 환경에서의 내구성 문제, 그리고 단일 센서의 공간적 대표성 부족과 같은 한계가 반복적으로 보고되었다. 이러한 한계를 완화하기 위해서는 다지점 센서 배치 전략의 표준화, 주기적 교정 및 상태 진단을 포함한 센서 유지관리 체계의 도입, 그리고 환경 조건에 따른 센서 성능 변화를 고려한 데이터 품질 관리 기법이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

영상 기반 모니터링 기술은 비접촉·비침습 방식으로 육계의 행동과 분포를 관찰할 수 있다는 장점을 가지나, 가림 현상, 연산 자원 요구 증가, 일반화 가능성 부족 등의 제약이 존재한다. 이에 따라 향후 연구에서는 다중 시점 관측 구조의 적용 가능성, 경량화된 분석 모델의 활용, 그리고 센서 데이터와 영상 데이터를 상호 보완적으로 활용하는 융합 분석 구조에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

데이터 수집 및 통신 구조 측면에서는 중앙 집중식 구조가 관리 용이성과 구조적 단순성을 제공하는 반면, 통신 병목과 장애 취약성이 문제로 지적되었다. 이러한 한계를 보완하기 위해 최근 연구에서는 분산 처리 및 엣지 컴퓨팅 기반 구조가 제안되고 있으며, 이는 네트워크 제약과 실시간성 요구를 동시에 고려한 대안으로 평가된다. 특히 환경 데이터의 전처리, 이상 탐지 및 단기 예측을 엣지 단에서 수행함으로써 통신 부하를 줄이고 현장 대응성을 향상시키는 방향은 향후 시스템 설계에서 중요한 기준으로 고려될 수 있다.

데이터 처리 및 활용 측면에서는 전처리, 이상치 탐지, 시계열 예측 및 기계학습 기반 분석 기법이 환경 데이터 해석과 자동 제어에 효과적으로 활용되고 있음을 확인하였다. 다만, 다수의 연구가 단일 농장 또는 제한된 실증기간에 기반하고 있어 다양한 사육 조건과 장기 운용 환경에서의 일반화 검증은 여전히 부족하다. 이에 따라 장기간 실증 데이터 확보, 모델 간 성능 비교 기준의 정립, 그리고 예측 결과를 실제 환경 제어 전략과 연계하는 통합적 운영 프레임워크에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

향후 스마트 육계사 환경 모니터링 기술은 다지점·다변량 환경 계측을 기반으로, 엣지 컴퓨팅과 AI 분석을 결합

한 통합적 PLF 시스템으로 발전할 필요가 있다. 특히, 실시간성, 신뢰성, 유지보수성을 동시에 고려한 시스템 설계와 함께, 실제 상업용 육계사 환경에서의 장기 실증을 통한 기술 검증이 향후 연구의 핵심 과제로 제시된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through the Smart Farm Innovation Technology Development Program, funded by the Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (No. RS-2025-02316456)

REFERENCES

- [1] S.-W. Seo, "Precision specifications, precision livestock farming, smart livestock farming: Is this our future?", *Animal Industry and Technology*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-19, January 2025. DOI: 10.5187/ait.2025.12.1.1
- [2] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, "Korean chicken consumption statistics," Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, <https://www.mafra.go.kr/>
- [3] D.-H. Lee, A.-K. Kim, C.-H. Choi, and Y.-J. Kim, "Study on image-based flock density evaluation of broiler chicks," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 373-379, August 2019. DOI: 10.17661/jkiict.2019.12.4.373
- [4] W.-J. Choi, "Development and evaluation of integrated sensor module for smart broiler house," Seoul National University, 2023.
- [5] H.-R. Kim, S.-H. Park, J.-S. Wi, S.-S. Lee, S.-D. Lee, H.-K. Kang, and C.-H. Ryu, "Effects of pad cooling systems in tunnel-ventilated broiler house on reducing indoor temperature and level of temperature-humidity index during summer," *Korean Journal of Poultry Science*, Vol. 51, No. 2, pp. 57-63, April 2024. DOI: 10.5536/KJPS.2024.51.2.57
- [6] T.-W. Wi and J.-M. Jeon, "Development of a boiler production system utilizing plastic-film housing," GN Co., Suncheon National University, and Yeosu Agricultural Technology Center.
- [7] J. Hwangbo, E.-C. Hong, B.-S. Lee, H.-D. Bae, S.-J. Lee, S.-B. Cho, H.-K. Kim, J.-H. Kim, B.-S. Park, and J.-I. Song, "Effects of ventilating system on the performance of broiler chicks in an environmental controlled cage house," *Korean Journal of Poultry Science*, Vol. 33, No. 1, pp. 57-63, 2006.
- [8] J.-H. Kim, M.-H. Lee, and H. Yoe, "Deep learning-based sensor data anomaly detection and feedback system," *Journal of the Korea Information and Communications Society*, 2023.
- [9] J.-Y. Rho, S.-M. Kang, G.-E. Kim, and E.-C. Jeon, "Method and characterization of ammonia emission estimation in open houses," *Journal of Climate Change Research*, Vol. 12, No. 5-1, pp. 505-513, 2021. DOI: 10.15531/KSCCR.2021.12.5.505
- [10] D.-H. Jang, K.-S. Kwon, J.-B. Kim, J.-K. Kim, K.-Y. Yang, S.-M. Choi, and Y.-N. Jang, "Investigation and analysis of particulate matters and ammonia concentrations in mechanically ventilated broiler house according to seasonal change, measurement locations and age of broilers," *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 63, No. 1, pp. 75-87, 2021. DOI: 10.5389/KSAE.2021.63.1.075
- [11] C. Gerard, S. Ward, C. Kenny, and P. Hemmingway, "Monitoring environmental parameters in poultry production facilities," Institute for Process and Particle Engineering, Graz University of Technology, Austria, April 2013.
- [12] D.-I. Yang, "Performance of a wet scrubber and its effect on temperature and humidity in a closed smart broiler house," Master's thesis, Dept. of Biosystems Engineering, Seoul National University, 2022.
- [13] H. Han, Y. Zhou, Q. Liu, G. Wang, J. Feng, and M. Zhang, "Effects of ammonia on gut microbiota and growth performance of broiler chickens," *Animals*, vol. 11, no. 6, p. 1716, Jun. 2021, DOI: 10.3390/ani11061716
- [14] K. Wang, D. Shen, P. Dai, and C. Li, "Particulate matter in poultry house on poultry respiratory disease: A systematic review," *Poultry Science*, vol. 102, 102556, Apr. 2023, DOI: 10.1016/j.psj.2023.102556.
- [15] H.-J. Kim, J.-S. Son, H.-S. Kim, E.-C. Hong, and J.-H. Kim, "Effects of light intensity on growth performance, blood components, carcass characteristics, and welfare of broilers," *Journal of Animal Science and Technology*, Vol. 64, No. 5, pp. 985-996, 2022. DOI: 10.5187/jast.2022.e47
- [16] A. Godinho, R. Vicente, S. Silva, and P. J. Coelho, "Wireless environmental monitoring and control in poultry houses: A conceptual study," *IoT*, vol. 6, no. 2, p. 32, Jun. 2025, DOI: 10.3390/iot6020032.
- [17] Y. Guo, S. E. Aggrey, P. Wang, A. Oladeinde, and L. Chai, "Monitoring behaviors of broiler chickens at different ages with deep learning," *Animals*, vol. 12, no. 23, p. 3390, Dec. 2022, DOI: 10.3390/ani12233390.
- [18] F. Tossa, Y. Faga, W. Abdou, E. C. Ezin, and P. Gouton, "Wireless sensor network deployment: Architecture, objectives, and methodologies," *Sensors*, vol. 25, no. 11, p. 3442, May 2025, DOI: 10.3390/s25113442.
- [19] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," *Computer Networks*, vol.

- 38, no. 4, pp. 393-422, Mar. 2002, DOI: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [20] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge computing: Vision and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637-646, Oct. 2016, DOI: 10.1109/JIOT.2016.2579198.
- [21] S.-Y. Lee, I.-B. Lee, U.-H. Yeo, J.-G. Kim, and R.-W. Kim, "Machine learning approach to predict air temperature and relative humidity inside mechanically and naturally ventilated duck houses: Application of recurrent neural network," *Agriculture*, Vol. 12, Article 318, 2022. DOI: 10.3390/agriculture12030318
- [22] H. Jebari, M.-H. Mechkouri, S. Rekiek, and K. Reklouai, "Poultry-Edge-AI-IoT system for real-time monitoring and predicting by using artificial intelligence," *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, Vol. 17, No. 12, pp. 149-170, 2023. DOI: 10.3991/ijim.v17i12.38095
- [23] Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET), Industrial and technological policy trends in livestock smart farms, Report No. 2023-01, 2023.
- [24] S. Kim and M. Jung, "Analysis of key factors for the diffusion of smart livestock houses using the analytic hierarchy process (AHP)," *Journal of Korea Innovation Society*, Vol. 15, No. 4, pp. 211-238, 2020. DOI: 10.46251/INNOS.2020.11.15.4.211
- [25] S.-J. Park, "Basic factors of environmental management affecting broiler productivity," *Monthly Poultry*, pp. 93-97, June 2001.
- [26] M.-H. Lashari, A.-A. Memon, S.-A.-A. Shah, K. Nennwani, and F. Shafiqat, "IoT-based poultry environment monitoring system," *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTals)*, pp. 1-5, Bali, Indonesia, November 2018.
- [27] F. Mazunga, T. Mzikamwi, G. Mazunga, M. Mashasha, and V. Mazheke, "IoT-based remote poultry monitoring systems for improving food security and nutrition: Recent trends and issues," *Journal of Agriculture, Science and Technology (JAGST)*, Vol. 22, No. 2, pp. 4-21, 2023. DOI: 10.4314/jagst.v22i2.2
- [28] H. Singh and A.-K. Kajla, "Optimizing ammonia concentration in poultry houses through Random Forest prediction and LoRaWAN monitoring & controlling system," *Preprints*, Article 2024090042, 2024. DOI: 10.20944/preprints202409.0042.v1
- [29] J.-S. Han, D.-H. Ahn, S.-E. Hong, D.-S. Park, and H.-J. Kim, "A study on optimal poultry farm environment utilizing data analysis," *Proceedings of the 2017 Summer Conference of the Korean Institute of Communications and Information Sciences (KICS)*, pp. 1471-1472, Jeju, Korea, June 2017.
- [30] I.-H. Hwang, "Development of multi-sensor module for broiler and data application," *Master's thesis*, Dept. of Biosystems Engineering, Seoul National University, 2022.
- [31] S. Salleh, K. Juani, R.-M.-A. Lee, F.-H.-A. Jaid, and N.-R.-A. Burhani, "Regression analysis of humidity and temperature on chicken lifespan," *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Agrosystem Engineering, Technology & Applications (AGRETA)*, pp. 79-84, 2024. DOI: 10.1109/AGRETA61912.2024.10948893
- [32] F. Qi, X. Zhao, Z. Shi, H. Li, and W. Zhao, "Environmental factor detection and analysis technologies in livestock and poultry houses: A review," *Agriculture*, Vol. 13, Article 1489, 2023. DOI: 10.3390/agriculture13081489
- [33] I.-E. Abbas and E. Comin, "Gas sensing for poultry farm air quality monitoring to enhance welfare and sustainability," *Chemosensors*, Vol. 13, Article 347, 2025. DOI: 10.3390/chemosensors13090347
- [34] J.-A. Kang, J.-Y. Bae, Y.-H. Kwak, H.-J. Shin, S.-H. Mun, and J.-H. Huh, "Suggestion of sensor specifications and maintenance standards for effective ammonia monitoring in smart livestock facilities," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 42, No. 6, pp. 65-74, 2022. DOI: 10.7836/kses.2022.42.6.065
- [35] H.-S. Kim, H.-K. Kang, B.-S. Kang, and C.-H. Kim, "Analysis of Behavioral Characteristics of Broilers by Feeding, Drinking, and Resting Spaces according to Stocking Density using Image Analysis Technique," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 21, No. 12, pp. 558-569, December 2020. DOI: 10.5762/KAIS.2020.21.12.558
- [36] J.-S. Song, "Effect of Thermal Stress on the Distribution of Chicks in Poultry House and Development of Distribution Indicators," *Seoul National University, Department of Biosystems Engineering, Master's Thesis*, 2024.
- [37] D.-H. Lee, D.-H. Jang, K.-S. Kwon, T. Ha, J.-B. Kim, J.-Y. Lee, and K.-Y. Yang, "Analysis of Behavioral Changes in Broilers in a Heat Stressed Environment," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 22, No. 12, pp. 292-298, December 2021. DOI: 10.5762/KAIS.2021.22.12.292
- [38] Y. Guo, S. E. Aggrey, P. Wang, A. Oladeinde, and L. Chai, "Monitoring behaviors of broiler chickens at different ages with deep learning," *Animals*, Vol. 12, No. 23, p. 3390, December 2022. DOI: 10.3390/ani12233390
- [39] A. Nasiri, Y. Zhao, and H. Gan, "Automated detection and counting of broiler behaviors using a video recognition system," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 221, p. 108930, April 2024. DOI: 10.1016/j.compag.2024.108930
- [40] W.-F. Pereira, L. da S. Fonseca, F.-F. Putti, B.-C. Góes, and L. de P. Naves, "Environmental monitoring in a poultry farm using an instrument developed with the Internet of Things concept," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 170, Article 105257, 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105257
- [41] H. Zheng, T. Zhang, C. Fang, J. Zeng, and X. Yang, "Design and Implementation of Poultry Farming Information Management

- System Based on Cloud Database,” *Animals*, Vol. 11, p. 900, March 2021. DOI: 10.3390/ani11030900
- [42] N. Bumanis, I. Arhipova, L. Paura, G. Vitols, and L. Jankovska, “Data Conceptual Model for Smart Poultry Farm Management System,” *Procedia Computer Science*, Vol. 200, pp. 517–526, 3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, Italy, March 2022. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.249
- [43] M. Liu, H. Chen, Z. Zhou, X. Du, Y. Zhao, H. Ji, and G. Teng, “Development of an Intelligent Service Platform for a Poultry House Facility Environment Based on the Internet of Things,” *Agriculture*, Vol. 14, No. 8, p. 1277, August 2024. DOI: 10.3390/agriculture14081277
- [44] A.-K. Nalendra and H.-P. Waspada, “Smart Poultry Farming: A Mobile-Based IoT System for Real-Time Broiler Monitoring and Management,” *International Journal of Electronics and Communications System*, Vol. 5, No. 1, pp. 81–91, March 2025. DOI: 10.24042/ijecs.v5i1.27622
- [45] K. Olejnik, E. Popiela, and S. Opaliński, “Emerging precision management methods in poultry sector,” *Agriculture*, Vol. 12, Article 718, 2022. DOI: 10.3390/agriculture12050718
- [46] J. Astill, R.-A. Dara, E.-D.-G. Fraser, B. Roberts, and S. Sharif, “Smart poultry management: Smart sensors, big data, and the internet of things,” *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 170, Article 105291, 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105291
- [47] M.-H. Lashari, S. Karim, M. Alhussein, A.-A. Hoshu, K. Aurangzeb, and M.-S. Anwar, “Internet of things-based sustainable environment for poultry farm,” *Proceedings of the International Conference on Computing, Engineering and Wireless Systems*, 2023.
- [48] C. So-In, S. Poolsanguan, and K. Rujirakul, “A hybrid mobile environmental and population density management system for smart poultry farms,” *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 109, pp. 287–301, November 2014.
- [49] O. Debauche, S. Mahmoudi, S.-A. Mahmoudi, P. Manneback, J. Bindelle, and F. Lebeau, “Edge computing and artificial intelligence for real-time poultry monitoring,” *Procedia Computer Science*, Vol. 175, pp. 534–541, 2020. DOI: 10.1016/j.procs.2020.07.076
- [50] X. Yang, F. Zhang, T. Jiang, and D. Yang, “Environmental Monitoring of Chicken House Based on Edge Computing in Internet of Things,” *Proceedings of the 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC 2019)*, pp. 617–620, Chengdu, China, 2019.
- [51] V. Goyal, A. Yadav, and R. Mukherjee, “Thermo graphic Camera-Based E-IoT Enabled Architecture for Smart Poultry Farm,” *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICECCOT 2021)*, pp. 772–775, Greater Noida, India, December 2021.
- [52] L. Zhang, J. Ma, and A. Khadka, “Adaptive environmental control system for large-scale poultry houses based on MultiF-LSTM,” *Journal of IntelligentV. Goyal, A. Yadav, S. Kumar, and R. Mukherjee, “Lightweight LAE for Anomaly Detection With Sound-Based Architecture in Smart Poultry Farm,” IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 11, No. 5, pp. 8199–8209, March 2024.
- [53] M. Selle, F. Spieß, C. Visscher, S. Rautenschlein, A. Jung, M. Auerbach, J. Hartung, C. Sürle, and O. Distl, “Real-time monitoring of animals and environment in broiler precision farming—How robust is the data quality?”, *Sustainability*, Vol. 15, Article 15527, 2023. DOI: 10.3390/su152115527
- [54] M.-M. Ahmed, E.-E. Hassanien, and A.-E. Hassanien, “A smart IoT-based monitoring system in poultry farms using chicken behavioural analysis,” *Internet of Things*, Vol. 25, Article 101010, 2024. DOI: 10.1016/j.iot.2023.101010
- [55] Y. Xu, G. Teng, and Z. Zhou, “Short-term prediction method for gas concentration in poultry houses under different feeding patterns,” *Agriculture*, Vol. 14, Article 1891, 2024. DOI: 10.3390/agriculture14111891
- [56] S.-Y. Kim, H.-W. Kim, H.-M. Lee, and C.-W. Park, “A study of activity energy analysis based on poultry physiology-behavior sound data,” *Proceedings of the 2020 Summer Conference of the Institute of Electronics and Information Engineers*, pp. 1283–1285, 2020.
- [57] D.-K. Lee, B.-K. Lee, J.-Y. Jung, J.-S. Eun, and D.-H. Kim, “Detection of livestock abnormalities using real-time video processing technology,” *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 24, No. 10, pp. 2579–2584, 2023. DOI: 10.9728/dcs.2023.24.10.2579
- [58] D.-H. Jang, K.-S. Kwon, B.-J. Yang, and J.-B. Kim, “Analysis of spectral characteristics of broiler litter according to moisture content,” *Journal of Animal Environmental Science and Technology*, Vol. 24, No. 2, pp. 72–78, 2022. DOI: 10.11109/JAES.2022.24.2.072
- [59] H.-W. Kim and C.-W. Park, “A study on the development of abnormal information collection and monitoring system technology for early detection of avian infectious diseases,” *Proceedings of the 2019 Summer Conference of the Korean Institute of Communications and Information Sciences (KICS)*, pp. 661–662, 2019.
- [60] K.-I. Ko and M.-H. Lee, “Application of anomaly detection algorithms to secure reliability of livestock environment data,” *Proceedings of the 2024 Fall Conference of the Korean Institute of Communications and Information Sciences (KICS)*, pp. 379–380, 2024.

- [61] Rural Development Administration, Development of real-time biological and behavior measurement and unmanned management technology for broiler, Final Research Report, Project No. PJ013858, National Institute of Animal Science, pp. 36-43, 2020.
- [62] M. Ali, M. Imran, M.-S. Baig, A. Shah, S.-S. Ullah, R. Alrobaea, and J. Iqbal, "Intelligent control shed poultry farm system incorporating with machine learning," *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 58168-58179, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3391822
- [63] I. Birzniece, S. Balina, I. Andersone, A. Kikans, and A. Nikitenko, "Time series forecast model application for broiler weight prediction using environmental factors," *Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, Maldives, 2022, pp. 1-7. DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988243
- [64] E. Küçüktopcu, B. Cemek, and H. Simsek, "Machine learning and wavelet transform: A hybrid approach to predicting ammonia levels in poultry farms," *Animals*, Vol. 14, Article 2951, 2024. DOI: 10.3390/ani14202951
- [65] L. Zhang, J. Ma, and A. Khadka, "Adaptive environmental control system for large-scale poultry houses based on MultiF-LSTM," *Journal of Intelligent Systems and Control*, Vol. 3, No. 3, pp. 174-185, 2024. DOI: 10.56578/jisc030304
- [66] W. Zhang, L. Wu, P. Zheng, and C. Chen, "Research on reinforcement learning-based modeling of environmental control in confined broiler houses," *Proceedings of the 2024 5th International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA)*, pp. 1034-1038, 2024. DOI: 10.1109/AIEA62095.2024.10692493
- [67] H.-K. Kim, K.-D. Lee, J.-G. Ki, and H.-M. Cho, "Implementation of an indoor temperature control system for AI-based power optimization algorithm research," *Proceedings of the 2024 Fall Conference of the Institute of Electronics and Information Engineers (IEIE)*, pp. 1270-1273, 2024.
- [68] S.-V. Johansen, M.-R. Jensen, B. Chu, J.-D. Bendtsen, J. Mogensen, and E. Rogers, "Broiler FCR optimization using norm-optimal terminal iterative learning control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 580-592, 2021.

Authors



Min-Young Hwang received the B.S. degree in Fusion Biosystems Mechanical Engineering from Suncheon National University, Korea, in 2025. She is currently pursuing the M.S. degree in Smart Agricultural Engineering at

Suncheon National University in Suncheon, South Korea.



Jeong-Chan Lee is currently pursuing a B.S. in Fusion Biosystems Mechanical Engineering at Suncheon National University in Suncheon, South Korea.



Jin-Yeong Lee is currently pursuing a B.S. in Fusion Biosystems Mechanical Engineering at Suncheon National University in Suncheon, South Korea.



Ryu-Gap Lim received the Ph.D. degrees in Agriculture machinery engineering from Chungnam National University, Korea, in 2022. He is a professor in the Dept. of Convergence Biosystems Engineering at

Suncheon National University in Suncheon, South Korea. He is interested in Autonomous tractor, digital twin, agriculture robot and artificial intelligence.



Cheol-Woo Han received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Bio-Industrial Machinery Engineering from Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea, in 2012, 2014 and 2019, respectively.

He joined the faculty of Korea Polytechnic University, Jeonbuk Campus, Gimje, Republic of Korea. He is currently an Assistant Professor at Korea Polytechnic University, Jeonbuk Campus. He is interested in smart farms, smart agriculture, automation, and bio-industrial machinery.