

MQTT 기반 스마트축사 반응형 데이터 수집 시스템 개발

(Development of an MQTT-Based Responsive Data Collection System for Smart Livestock Barns)

신헌태, 이명훈, 여현*

(Hyuntae Shin, Lee MyeongHun, Yoe hyun*)

요약

최근 정밀 축산(PLF, Precision Livestock Farming) 시스템의 도입이 가속화되고 있으나, 기존 스마트축사의 데이터 수집 구조는 주기적 폴링(Polling) 방식의 지연과 RS-485 기반 유선 통신의 확장성 한계로 인해 실시간 대응이 어렵다. 이러한 제약은 유해가스 급증이나 환경 급변 등 비정상 상황에서 즉각적인 제어를 어렵게 하여 가축 복지와 생산성 저하로 이어진다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 MQTT 기반 반응형 데이터 수집 시스템을 설계·구현하였다. 제안된 시스템은 표준화된 토픽 구조와 JSON 포맷을 적용해 이종 장비 간 연동하고, QoS 및 E-MQTT 메커니즘을 통해 종단간 신뢰성을 보장한다. 또한 브로커 클러스터링 구조를 도입하여 부하 분산과 확장성을 강화하였으며, Node-RED 기반 대시보드와 외부 연계 기능을 통해 데이터를 실시간으로 처리하고 시각화할 수 있도록 구성하였다. 실험 결과, 반응형 수집 방식은 기존 폴링 방식 대비 평균 지연을 70~85% 단축하였으며, 브로커 클러스터링은 처리율을 73~92% 향상, QoS2+E-MQTT 적용은 손실률을 약 10배 감소시켰다. 특히 네트워크 품질이 저하된 환경에서도 안정적인 반응성과 데이터 연속성을 유지하였다. 결과적으로 제안된 시스템은 지연 최소화와 신뢰성 향상을 동시에 달성하여 기존 유선 중심 구조의 한계를 극복하였다. 또한 표준화된 메시지 구조와 확장 가능한 브로커 기반을 통해 실시간 제어, 이상 감지 등 다양한 응용 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

■ 중심어 : 스마트축사 ; MQTT 반응형 수집 ; 표준 토픽/JSON

Abstract

The adoption of Precision Livestock Farming (PLF) systems has been accelerating in recent years; however, existing smart livestock farms still face difficulties in achieving real-time responsiveness due to latency in periodic polling-based data collection and the limited scalability of RS-485 wired communication. These constraints hinder immediate control during abnormal situations such as sudden environmental changes or gas concentration spikes, leading to decreased animal welfare and productivity. To address these challenges, this study designed and implemented a reactive data collection system based on the MQTT protocol. The proposed system integrates heterogeneous devices using standardized topic structures and JSON formats, ensures end-to-end reliability through QoS and E-MQTT mechanisms, and enhances scalability through a broker clustering structure. In addition, real-time data processing and visualization were achieved using a Node-RED-based dashboard and external linkage functions. Experimental results showed that the reactive collection method reduced average latency by 70~85% compared to the conventional polling method, while broker clustering improved throughput by 73~92%, and the QoS2 + E-MQTT configuration decreased data loss by approximately tenfold. The system also maintained stable responsiveness and data continuity under degraded network conditions. Consequently, the proposed system achieves both low latency and high reliability, effectively overcoming the limitations of conventional wired communication. Furthermore, its standardized message structure and scalable broker-based architecture provide a solid technical foundation for real-time control, anomaly detection, and AI or cloud-based data analysis in smart livestock environments.

■ keywords : Smart Barn ; MQTT Reactive Collection ; Standard Topic/JSON

I. 서론

1. 연구 배경 및 필요성

최근 사물인터넷(IoT) 기술 발전과 함께 축산 분야는 식량 수요와 가축 전염병 리스크에 대응하기 위해 생산성 향상과 동물복지 제고를 목표로 정밀 축산(Precision

준회원, 국립순천대학교 스마트농업공학과

정회원, 국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과

* 정회원, 국립순천대학교 인공지능공학부

"이 논문은 2025학년도 국립순천대학교 글로벌대학 사업비의 지원을 받아 연구되었음"

접수일자 : 2025년 10월 17일

게재확정일 : 2025년 11월 17일

교신저자 : 여 현 e-mail : yhyun@snu.ac.kr

Livestock Farming, PLF) 또는 스마트축산(Smart Livestock Farm, SLF) 시스템 도입이 가속화되고 있다[1][2]. 이러한 축산 시스템은 센서를 통해 수집된 온·습도, 유해가스(NH_3 , H_2S), 사료 섭취량 등 다양한 환경 및 생체 데이터를 기반으로 자동화된 사양 관리를 가능하게 한다.

특히 스마트측사 환경은 밀폐 구조와 밀집 사육 특성으로 환경 변수가 급변할 수 있어 실시간 데이터 신뢰성과 지연 없는 대응이 가축의 스트레스와 질병 발생 억제에 직결된다 [11]. 이를 위해서는 실시간 응답의 부족(Lack of Real-time Response)문제를 해소할 수 있는 통신 인프라가 구축되어야 한다. 본 연구에서는 경량성과 비동기 메시지를 제공하는 MQTT(Message Queuing Telemetry Transport) 프로토콜 기반의 시스템 구축을 통해 이러한 문제를 해결해 보고자 한다.

2. 기존 시스템의 한계 및 연구 목적

스마트측사 시스템을 고도화하는 데 있어 해결해야 할 주요 문제점들 중 하나는 이기종 장비 연동 및 상호운용성 부족문제이다. 측사 환경에는 다양한 제조사의 이기종 장비들이 혼합되어 운영되고 있다. 기존의 RS-485와 같은 유선 통신 방식은 장비별 개별 배선 및 시공이 복잡하며 통신 프로토콜의 일관성이 부족하여 데이터 연동 및 통합 제어 시스템 구축에 있어 어려움이 있다[4][5]. 이와 달리 MQTT 프로토콜은 다양한 제조사 및 플랫폼의 장비 간 통신을 표준화된 메시지 구조로 통합할 수 있어 이기종 장비 간 상호운용성 확보에 유리하다.

또한 스마트측사 시스템은 데이터의 신뢰성 및 연속성 부분에서도 취약한 점이 있다. 측사 데이터는 사양 관리 및 질병 진단 알고리즘의 핵심 기반이므로 수집 과정에서 오류나 누락·중복은 시스템 판단에 있어 오류

로 직결된다[9]. 기존 유선 통신 방식은 신호 손실(Loss of Signal, LOS) 발생 시 복구 로직이나 단절 감지 기능이 미흡하여 데이터의 연속적인 신뢰도를 보장하기 어렵다 [5]. 반면 MQTT 프로토콜은 브로커 기반 구조를 통해 네트워크 단절이나 패킷 손실 발생 시에도 재전송 메커니즘을 지원하여 데이터의 연속성과 신뢰성을 유지할 수 있다.

마지막 한계점은 고도화 시스템 연계를 위한 확장성이 부족하다는 것이다. 스마트측사 기술은 AI 기반 예측, 디지털 트윈, 클라우드 기반 빅데이터 분석 등 고도화된 지능형 운영체제로 진입하고 있다[10]. 기존의 유선 중심 통신 구조는 물리적 확장성 및 운용 효율성 측면에 한계가 명확하여 네트워크 확장 및 AI/클라우드 연계에 적합한 경량 메시지 기반의 통신 인프라가 요구되고 있다[6][7].

본 연구는 위와 같은 문제들을 해결하기 위해 MQTT 프로토콜을 기반으로 하는 실시간 반응형 데이터 수집 시스템을 제안한다[6].

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 스마트축사 IoT 기술 동향과 주요 통신 프로토콜 비교를 통해 기존 연구의 한계와 본 연구의 차별성을 정리한다. III장에서는 제안하는 MQTT 기반 반응형 수집 시스템의 아키텍처와 핵심 메커니즘을 설명하고, 이벤트 트리거 기반 수집, QoS/E-MQTT에 의한 종단 간 신뢰성, 브로커 클러스터링, 표준화된 JSON 포맷 및 외부 연계 방안을 기술한다. IV장에서는 실제 축사 환경에서의 성능 분석 결과를 제시하며, 이벤트→반응→알림 지연, 메시지 신뢰도, 손실률 등 주요 지표를 기반으로 시스템의 반응성과 안정성을 평가한다.

V 장에서는 연구의 기대효과를 정리하며 결론을 제시한다.

II. 관련 연구

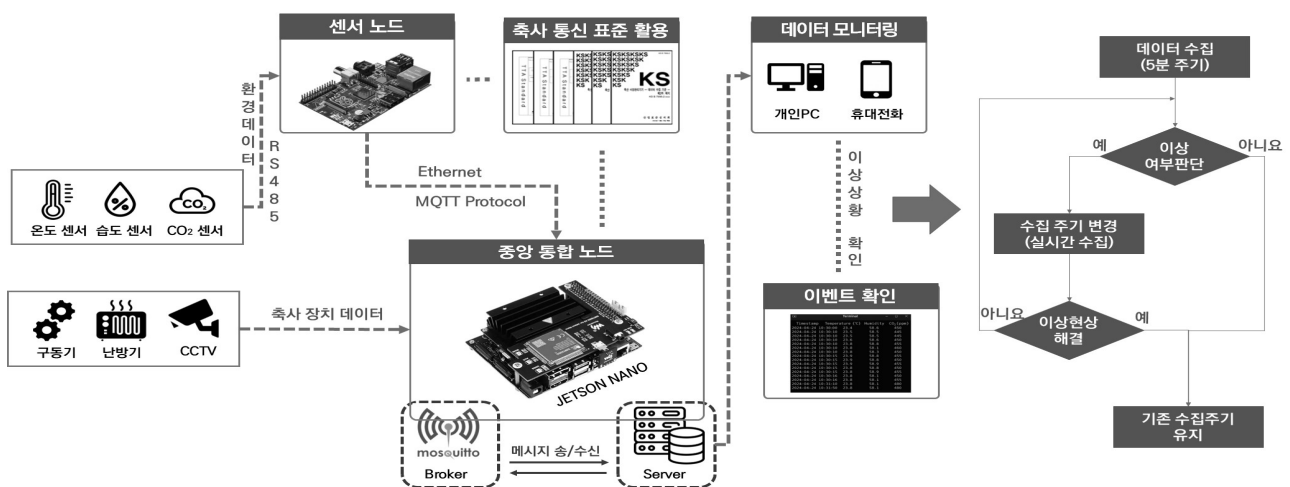


그림 1. 제안된 시스템의 구성도

1. 스마트 축사 IoT 기술 동향

스마트 축산 분야의 기술 동향은 단순한 센싱 및 모니터링 단계를 넘어, 가축의 행동 패턴 분석 및 질병 예측 등 고도화된 지능형 서비스로 진화하고 있다[1, 11]. 초기 스마트팜/축사 연구는 환경 센싱을 통한 자동 제어에 초점을 맞추었으나, 최근에는 센서 데이터의 정확성과 연속성을 기반으로 하는 사양 관리 알고리즘의 중요성이 대두되고 있다[9]. 그러나 이러한 지능화된 시스템의 판단 오류는 가축 복지 측면에서 위협이 될 수 있으므로, 데이터 수집의 신뢰성은 무엇보다 강조되어야 한다[2]. 농촌진흥청을 중심으로 축산 스마트팜의 국가 표준화에 대한 논의가 활발하게 진행되고 있으며, 이는 이기종 장비 간의 통신 일관성 확보와 플랫폼 확장성의 기반을 마련하고 있다[10].

2. 통신 프로토콜 비교 분석 및 MQTT 적용 연구

스마트축사 환경에서 사용되는 통신 기술은 크게 유선 방식과 무선 방식으로 나뉜다. 기존의 자동화 설비에서 널리 사용되던 RS-485 기반의 유선 통신은 비용 효율성과 안정적인 전송 거리가 장점이나, 장비별 배선 복잡도가 높고, 프로토콜이 장비 제조사별로 상이하여 상호운용성 확보가 어렵다는 한계가 명확하다[4, 5]. 또한, 메시지 유실 시 복구가 어렵고 단절 감지 기능이 미흡하여 데이터 신뢰성 확보가 어려운 경우가 많다.

반면 IoT 환경에 특화된 프로토콜인 MQTT는 경량 메시징 규격으로, 낮은 대역폭과 높은 지연율의 네트워크 환경에서도 효율적인 통신을 제공하며, 발행-구독 모델을 기반으로 한다[7]. 특히, MQTT는 메시지 신뢰성을 보장하기 위해 0, 1, 2의 세 단계 QoS(Quality of Service) 레벨을 제공하여, 데이터의 손실을 최소화하고 중복을 제어함으로써 데이터 연속성 및 신뢰성을 확보하는 데 유리하다[8]. 싱가포르 국립 대학교에서는 유선 및 무선 통신 기술을 비교·분석한 연구를 통해, MQTT와 같은 무선 기반 경량 프로토콜이 데이터 전송의 유연성과 실시간성 확보에 효과적임을 보여준데[6]. 또한, 건국대학교 소속 연구진은 MQTT 프로토콜 내에서 동기 및 비동기 통신 메커니즘을 엔드투엔드로 구현하는 E-MQTT 연구를 통해 MQTT의 반응형 통신 구조로서의 가능성을 제시하였다[3].

CoAP(Constrained Application Protocol) 또한 IoT 환경에서 사용되는 경량 프로토콜이지만, CoAP가 주로 요청-응답(Request-Response) 모델을 사용하는 반면, MQTT는 이벤트 기반의 비동기 발행-구독 모델을 사용하므로, 예기치 않은 환경 변화에 즉각적으로 대응해야 하는 스마트축사 환경에서는 이벤트 중심

의 반응형 통신 구조를 제공하는 MQTT가 더 적합하다는 결론을 내릴 수 있다[8].

3. 선행 연구와의 차별성

기존의 MQTT 기반 스마트팜/축사 연구들은 대부분 특정 장비의 데이터 모니터링 및 기본 제어 기능을 구현하는 데 중점을 두었으며, 시스템 전체의 이기종 장비 상호운용성 확보 및 데이터 수집 구조의 표준화를 통한 고도화된 시스템 연계에 대한 깊이 있는 논의는 부족했다.

본 논문은 다음의 세 가지 측면에서 선행 연구와 차별성을 가진다. 첫째, 기존 연구에서 미진했던 제조사별 이기종 장비의 통합 연동 문제를 해결하기 위해, 국가 표준화 동향을 반영한 표준 토픽 및 JSON 포맷 기반의 게이트웨이 구조를 제시한다. 둘째, 표준 MQTT의 한계(브로커까지의 신뢰성)를 넘어, E-MQTT 개념과 QoS Level 1/2을 결합하여 데이터 유실 없는 종단 간(End-to-End) 고신뢰성을 보장하는 반응형 메커니즘을 설계한다. 셋째, 단순 모니터링 수준에 머물렀던 선행 연구와 달리, 브로커 클러스터링[7]을 통한 높은 스케일러빌리티를 확보하고, AI 및 클라우드 빅데이터 분석에 즉시 연계 가능한 고도화된 지능형 운영체제 전환 기반을 제공한다.

III. 본론

1. 시스템 아키텍처 개요

본 연구에서 제안하는 MQTT 기반 스마트축사 반응형 데이터 수집 시스템의 전체 아키텍처는 그림 1과 같이 구성된다. 시스템은 센서 노드 (Sensor Node), 중앙통합노드(Central Integrated Node), 데이터 모니터링 시스템, 그리고 외부 연계 모듈로 구성된다. 전체 통신은 경량 및 비동기 특성을 지닌 MQTT 발행-구독 모델을 채택하여 실시간 응답성을 확보하고 이기종 장비 연동에 유연성을 제공한다. 중앙 통합 노드에는 Mosquitto 브로커가 포함되어 메시지 큐 관리를 담당하며, Jetson Nano와 같은 고성능 엣지 컴퓨팅 디바이스를 기반으로 구현된다.

2. 데이터 수집 방법 및 전처리 모듈 구현

가. 데이터 수집 메커니즘 및 하드웨어 구성

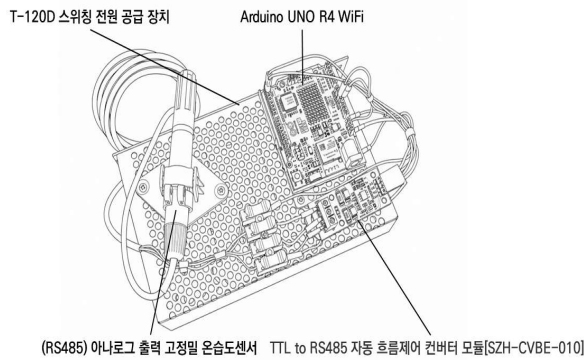


그림 2. 센서 노드

데이터 수집은 중앙 통합 노드의 요청에 따라 센서 노드가 응답하는 요청/응답 기반으로 이루어지며, 이는 그림 2에 제시된 Arduino 기반 센서 노드를 통해 구현된다. Jetson Nano의 데이터 수집기는 5초 주기로 `/bam/cra/ftm01/cmd` 토픽에 `{“cmd”:“sample”}` 명령을 발행한다. 아두이노 노드는 이 명령을 수신하면 센서 값을 읽으며 통신 설정은 슬레이브 ID 및 레지스터 개수를 포함하여 정의된다. 이러한 구조는 다양한 제조사의 유선 센서(이기종 장비)와의 안정적인 연동을 위한 기반이 된다.

센서 노드는 획득한 원시 데이터(`hum_raw`, `temp_raw`)를 JSON 형태로 토픽에 발행하며, 명령어 처리 결과는 `/bam/ctrl/ftm01/ack` 토픽으로 회신하여 요청-응답 일치성을 보장한다.

나. 전처리(오류 필터링 및 정규화) 및 저장 구조

데이터 수집기는 센서 노드로부터 발행된 원시 데이터(RAW data)의 신뢰성을 높이기 위한 일련의 전처리 과정을 거치게 된다. 전처리 과정의 첫 번째는 오류 필터링이다. 수신된 데이터에 대해 유효한 숫자 여부를 검증하며 센서의 물리적 범위검사를 수행하여 통신 노이즈나 측정 오류로 인한 잘못된 데이터를 자동으로 걸러낸다. 그 다음으로 데이터 정규화가 이루어진다. 원시 데이터를 범용적인 JSON 형식으로 변환하며, 데이터의 호환성을 확보한다. 마지막으로 위 과정을 거쳐 표준화된 데이터는 Node-RED 대시보드를 통해 시각화가 이루어짐과 동시에 연속성 확보를 위해 지정된 경로에 JSONL 형식으로 저장된다.

다. 메시지 포맷 및 토픽 설계

표 1. 토픽 유형

토픽유형	토픽 구조	역할 및 설명
------	-------	---------

제어/응답	<code>/bam/ctrl/ftm01/cmd</code> , <code>/bam/ctrl/ftm01/ack</code>	요청-응답 기반의 제어 및 처리 확인
원시 데이터	<code>/bam/raw/ftm01/1</code>	센서 노드에서 직접 발행하는 원시값
표준데이터	<code>/bam/sensor/temp001/data</code>	전처리후 재발행되는 표준 JSON 데이터
상태/이벤트	<code>/bam/alert/events</code> , <code>/bam/health/events</code>	임계치 초과 알람 및 센서/시스템 고장 상태 정보 발행

표 1의 토픽 유형 표에서 나타나듯 수집 계층의 전처리 모듈을 통해 정규화된 표준 데이터는 이기종 시스템과의 호환성을 보장하는 JSON 형식으로 재발행된다. 이 공통 포맷은 데이터의 유형과 메타 정보를 명확히 담고 있으며, 핵심 필드는 다음과 같이 정의된다: `device_id` (센서 고유 ID), `type` (데이터 유형: temperature, humidity 등), `value` (측정값), `unit` (단위: C, % 등), 그리고 데이터 생성 시각을 나타내는 `timestamp` 필드이다. 특히, `timestamp`는 데이터 기록의 일관성을 위해 KST 기준 YYYY-MM-DD HHMMSS 형식으로 통일되어 기록되며, 이는 데이터의 무결성 및 시계열 분석의 정확도를 높이는 데 필수적이다. 또한, 제어/응답 토픽에 사용되는 메시지에는 요청과 응답을 매칭시키는 상관 ID(`corr` 필드)가 추가되어 종단 간 신뢰성을 보장한다.

3. 시스템 아키텍처 개요

가. 고신뢰성 반응형 수집 로직

시스템은 MQTT의 신뢰성 기능을 활용하여 단순한 주기적 모니터링을 넘어선 반응형 데이터 수집 메커니즘을 구현하였다. 구체적으로, 이벤트 트리거 동작은 데이터 수집기가 수신 데이터의 검증 후 임계치 초과를 감지하면 실시간 처리 우선순위를 부여하여 즉시 `/bam/alert/events` 토픽에 알람 이벤트를 발행하는 방식으로 이루어진다. 시스템이 정상 상태로 복귀할 때도 `recovered` 이벤트를 발행하여 상태 변화를 즉각적으로 알린다. 또한, 종단 간 신뢰성을 확보하기 위해 센서 노드가 제어 명령 토픽(`cmd`)을 QoS 1로 구독하고, 처리 후 ACK 토픽에 회신할 때 `corr` 필드를 활용하는 구조를 적용했다. 이 구조는 E-MQTT 개념의 기반이 되어 발행자(중앙 노드)가 메시지의 최종 처리 완료 여부를 확인하도록 함으로써 데이터 전송의 신뢰도를 보장한다. 마지막으로

로, 단절 감지 기능을 강화하기 위해 센서 노드는 MQTT 접속 시 LWT(Last Will and Testament)를 설정한다. 이를 통해 예기치 않은 연결 단절이 발생하더라도 `/barn/sensor/ftm01/status` 토픽에 Offline 상태를 자동 발행하게 하여, 하드웨어 단의 신뢰성 및 상태 감지 기능을 강화한다

나. 브로커 구성 및 외부 연계 모듈 구현

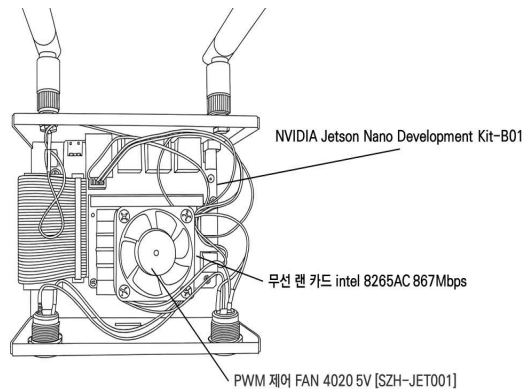


그림 3. 중앙 처리 장치

그림 3은 시스템의 확장성과 고도화를 위한 기반 구조를 중앙 처리 장치인 Jetson Nano에 구축하였다. 중앙 처리장치는 Mosquitto 브로커를 실행하여 이 역할을 수행하며, 확장성 확보 측면에서 Mosquitto 브로커 기반의 중앙 노드는 추후 브로커 클러스터링 구조를 용이하게 적용할 수 있는 기반을 제공한다. 이는 다수의 센서 노드가 연결되거나 메시지 처리량이 급증할 경우에도 시스템의 스케일러빌리티와 고가용성을 확보하는데 필수적이다. 또한 외부 연계 모듈은 Node-RED의 유연한 모듈 구조를 활용하여 구현된다. Node-RED는 `/barn/sensor/+data`와 같은 표준 데이터 토픽을 구독하고, 국가 표준화 동향을 반영하여 외부 플랫폼이 요구하는 형식(API, 클라우드 DB 등)으로 데이터를 자동으로 변환하고 검증하는 모듈을 손쉽게 추가할 수 있도록 설계되었다. 이를 통해 제안된 시스템은 단순한 데이터 수집을 넘어 AI 분석 시스템이나 외부 빅데이터 플랫폼으로의 용이한 데이터 연계 및 시스템 고도화를 가능하게 한다.

4. 사용자 중심 웹 대시보드 구현

가. 웹 대시보드 시각화 및 반응형 알림

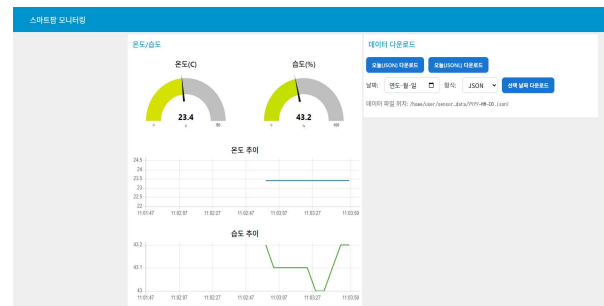


그림 4. 시각화

본 연구에서는 그림 4와 같이 Node-RED Dashboard를 활용하여 수집된 표준 데이터를 직관적으로 시각화하고 반응형 알림 기능을 구현했다. 데이터 시각화를 위해 Node-RED의 MQTT In 노드가 `/barn/sensor/+data` 토픽을 구독하고, 이를 `ui_chart`(시계열 그래프)나 `ui_gauge`(현재 값) 등의 대시보드 요소로 연결하여 온도 및 습도 데이터를 실시간으로 표시한다. 특히 반응형 알림 처리를 구현하기 위해 `/barn/alert/events` 토픽을 수신하며, 이를 switch 노드로 분기하여 `high_breach`나 `low_breach`와 같은 이벤트 유형에 따른 시각적 알림을 관리자에게 즉각적으로 제공한다. 또한 `/barn/health/events` 토픽을 통해 fault 또는 stale 상태 등 시스템의 상태 정보를 기록하고 모니터링함으로써, 시스템의 자가 진단 및 운영 효율성을 높인다.

IV. 결 과

1. 분석 개요 및 지표 정의

본 연구의 분석 결과는 반응형 수집 메커니즘과 MQTT 설정이 성능에 미치는 영향을 지연시간, 손실률, 처리율로 정량화하여 제시하였다. 이벤트 발생-반응-알림의 엔드-투-엔드 지연은 브로커/대시보드 타임스탬프 로그 기준으로 산출하였으며, 네트워크 조건을 정상, 혼잡, 가혹으로 구분하였다. 지표의 정의는 세가지로 구성된다. 첫 번째로는 지연시간(ms)으로 이벤트가 발생하면 사용자 알림의 최종 렌더 완료 시간(50회 반복, 평균±표준편차)을 나타낸다. 두 번째로는 손실률(%)이다. 손실률은 발행 대비 알림 생성까지 누락 비율(브로커/DB로그 기준)로 계산된다. 세 번째로는 처리율(msg/s)이며 초당 알림 생성까지의 완료 건수이다.

2. 반응형 수집 유무에 따른 평균 지연시간(ms)

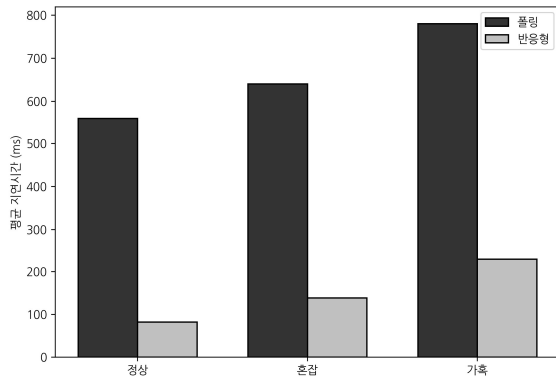


그림 5. 반응형 수집 유무에 따른 평균 지연시간 비교 그래프

그림 5와 같이 이벤트 트리거 기반 반응형 수집 구조는 폴링 대기를 제거하여 기존 폴링 구조와 비교했을 때 모든 조건에서 지연을 70~85% 단축한다. (정상 560→82 ms, 혼잡 640→138 ms, 가혹 780→231 ms; Δ 478/502/549 ms). 특히 가혹 환경에서 절대 단축 폭이 가장 커 네트워크 품질 저하 시에도 E2E 반응성이 유지됨을 확인하였다.

3. QoS/E-MQTT 설정에 따른 패킷 손실률(%)

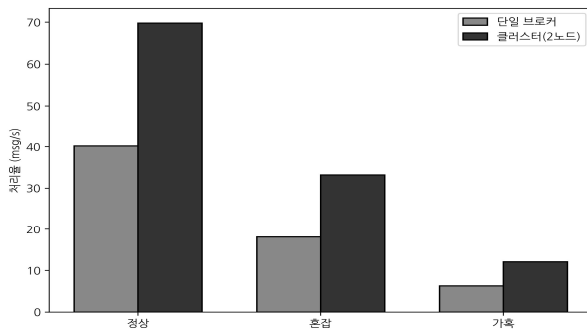


그림 6. 브로커 구성에 따른 처리율 비교 그래프

그림 6의 비교 그래프를 확인해보면 클러스터(세션 스티키+상태 동기화)는 단일 브로커 대비 처리율

18.1→33.2, 가혹 6.3→12.1). 특히 혼잡·가혹 조건에서 향상이 두드러져, 메시지 큐 적체와 재전송 오버헤드에 따른 성능 저하를 완화하는 것으로 해석된다.

4. QoS/E-MQTT 설정에 따른 패킷 손실률(%)

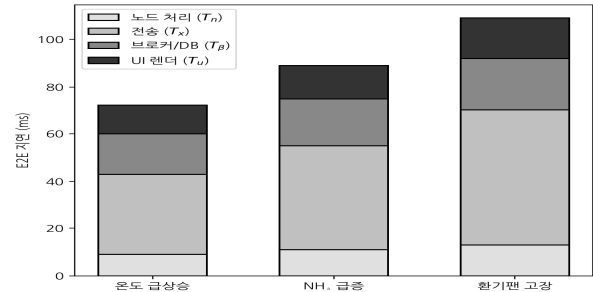


그림 7. 이벤트 유형별 E2E 지연 분해

이벤트별 E2E 지연은 그림 7의 그래프와 같다. 온도 급상승은 총 72ms(노드 처리 9ms, 전송 34ms, 브로커/DB 17ms, UI 렌더 12ms), NH3 급증은 총 89ms(11ms, 44ms, 20ms, 14ms), 환기팬 고장은 총 109ms(13ms, 57ms, 22ms, 17ms)로 측정되었다. 세 경우 모두 전송 구간의 비중이 대략 47~52%로 가장 커서, 네트워크 혼잡과 링크 품질이 전체 반응성을 좌우함을 시사한다. 이에 따라 우선 개선 과제로 (i) Wi-Fi 채널 및 출력 조정과 중계기 배치, (ii) 메시지 압축 또는 요약 적용, (iii) 이벤트 발생 시 전송 윈도우 제한과 배치 전송, (iv) 브로커를 현장 가까이 두는 에지 배치도 출된다.

5. MQTT 수집 전략별 성능 요약

표 2는 폴링 대비 반응형(이벤트 트리거) 수집의 효과와 QoS/E-MQTT 설정의 영향을 정량적으로 보여준다. 우선, 반응형 수집은 모든 조건에서 평균 지연을 대폭 단축하였다. (정상 560→78 - 82 ms,

표 2 MQTT 수집 전략별 성능 요약

설정	시나리오	지연(ms)	손실(%)	처리율(msg/s)
폴링+QoS0	정상	560±120	0.5	19.6
반응형+QoS1	정상	82±18	0.12	29.5
반응형+QoS2+E-MQTT	정상	78±16	0.05	40.2
폴링+QoS0	혼잡	640±160	2.2	9.1
반응형+QoS1	혼잡	138±35	0.62	16.7
반응형+QoS2+E-MQTT	혼잡	131±33	0.2	18.1
폴링+QoS0	가혹	780±210	5.8	3.4
반응형+QoS1	가혹	231±58	1.7	7.0
반응형+QoS2+E-MQTT	가혹	219±54	0.6	6.3

을 73~92% 향상시켰다(정상 40.2→69.8 msg/s, 혼잡 9.1→18.1 msg/s, 가혹 3.4→12.1 msg/s)로,

상대 단축률은 약 70~86%에 이른다. 동시에 처리율은 정상/혼잡/가혹 환경에서 각각 19.6→29.5 - 40.2, 9.1→16.7 - 18.1, 3.4→6.3 - 7.0 msg/s로 상승해, 반응형 수집이 지연과 처리율을 동시에 개선함을 확인하였다.

신뢰성 측면에서는 QoS를 상향하고 E-MQTT를 적용하면 E2E 손실률이 다소 감소한다. 정상 0.50%→0.12%→0.05%, 혼잡 2.20%→0.62%→0.20%, 가혹 5.80%→1.70%→0.60%로 낮아져, 최종적으로 QoS 대비 약 10배 수준의 손실 축소 효과를 보였다. 다만 QoS2+E-MQTT는 재전송 확인 오버헤드로 인해 특정 조건에서 처리율이 QoS1 대비 소폭 낮아질 수 있다.

V. 결론

본 연구에서 제안한 MQTT 기반 반응형 데이터 수집 시스템은 표준화된 토픽 구조와 JSON 포맷을 적용해 이기종 장비 간 연동하고, QoS 및 E-MQTT 메커니즘을 통해 종단 간 신뢰성을 보장한다. 또한 브로커 클러스터링 구조를 도입하여 부하 분산과 확장성을 강화하였으며, Node-RED 기반 대시보드와 외부 연계 기능을 통해 데이터를 실시간으로 처리하고 시각화할 수 있도록 구성하였다. 지연 최소화와 신뢰성 향상을 동시에 달성함으로써, 스마트축사 환경의 실시간 제어와 이상 감지 시스템 구축에 직접 활용될 수 있다. 또한, 표준화된 JSON 포맷과 브로커 클러스터링 구조를 통해 다양한 장비 및 외부 플랫폼과의 연동이 용이하여, 향후 AI 기반 분석·예측 시스템이나 클라우드 농장 관리 플랫폼의 핵심 데이터 인프라로 확장될 수 있을 것으로 예상된다. 이를 통해 본 연구는 지능형 축산 운영과 데이터 기반 의사결정 체계 고도화에 실질적으로 기여할 수 있을 것으로 보인다.

REFERENCES

- [1] Terence, S., et al., "Systematic Review on Internet of Things in Smart Livestock Management Systems," *Sustainability*, vol. 16, no. 10, p. 4073, 2024.
- [2] Tuytens, F. A. M., et al., "Twelve Threats of Precision Livestock Farming (PLF) for Animal Welfare," *Frontiers in Veterinary Science*, vol. 9, 2022.
- [3] Im, Y., and Lim, M., "E-MQTT: End-to-End Synchronous and Asynchronous Communication Mechanisms in MQTT Protocol," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 22, p. 12419, 2023.
- [4] Khatoun, P. S., et al., "Semantic Interoperability for IoT Agriculture Framework with Heterogeneous Devices," *Advances in Intelligent Systems and Computing*

(Springer), pp. 347 - 356, 2020.

- [5] Lee, S. K., and Park, H. J., "Add a Loss of Signal (LOS) Indicator to Your RS-485 or RS-422 Transceiver," *Analog Dialogue*, vol. 52, 2018.
- [6] Goh, J. Y., and Chua, D. W., "A Comparative Analysis of Wired vs. Wireless Data Communication Technologies," *International Journal of Electrical and Data Communication*, vol. 5, no. 2, pp. 45 - 52, 2024.
- [7] Spohn, M., "On MQTT Scalability in the Internet of Things: Issues, Solutions, and Future Directions," *Journal of Electronics and Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, 2022.
- [8] Seane, V., et al., "Performance Evaluation of CoAP and MQTT with Security Support for IoT Environments," *International Journal of Communication Systems*, vol. 34, no. 4, 2021.
- [9] Zou, X., et al., "Current Status and Prospects of Research on Sensor Fault Diagnosis of Agricultural IoT," *Sensors*, vol. 23, no. 5, p. 2528, 2023.
- [10] 장동화 외, "축산 스마트팜 국가 표준화 동향," 축산시설환경학회지, 제26권, 제1호, 37 - 45쪽, 2024년
- [11] Zhou, J., et al., "Developing a Modern Greenhouse Scientific Research Facility—A Case Study," *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2575, 2021.

저 자 소 개



신현태(준회원)

2025년 ~ 국립순천대학교 스마트농업공학과 석사과정 재학

<주관심분야 : IoT, 인공지능, 스마트 농업, 하드웨어>



이명훈(정회원)

2006년 국립순천대학교 정보통신공학과 석사 졸업

2011년 국립순천대학교 정보통신공학과 박사 졸업

2010년 ~ 2013년 한국전자통신연구원 선임연구원

2017년 ~ 2021년 국립농업과학원 연구사

2021년 ~ 현재 : 국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과 교수

<주관심분야 : 빅데이터 활용, 스마트 농업, 인공지능, 전파 응용 기술, 표준화>



여현(정회원)

1993년 ~ 국립순천대학교 인공지능공학부 교수

2020년 ~ 국립순천대학교 지능형 스마트농업 GrandICT 연구센터 센터장

<주관심분야 : 인공지능, 스마트농업, IoT, 정보통신>