

스마트축사 내 MQTT 데이터 통신 검증 방법에 관한 연구

(A Study on Verification Methods for MQTT Data Communication in Smart Barns)

김현우, 이명훈, 여현*

(Kim Hyeon Woo, MeongHun Lee, Yoe Hyun*)

요약

본 연구에서는 스마트축사 환경에서 MQTT 프로토콜을 활용한 데이터 통신의 신뢰성과 안정성 검증 방법을 제시하였다. 이를 위해 실제 축사와 유사한 환경의 테스트베드를 구축하고, 브로커와 센서 노드를 구성하여 온·습도 및 이산화탄소 데이터를 송수신하였다. 실험은 QoS 수준별 통신 성능과 센서 노드 수 증가에 따른 부하 변화를 중심으로 수행하였다. 분석 결과, QoS 수준이 높을수록 전송 신뢰성이 향상되었다. QoS 1 이상에서 패킷 손실률 0%, 무결성 지표 0.998 이상으로 안정적인 통신이 유지되었다. 노드 수 증가 시 평균 지연시간은 121.4~174.5 ms로 증가하였으나 병목 현상은 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 MQTT 통신이 축사와 같은 제한된 무선 네트워크 환경에서도 안정적이고 효율적인 데이터 교환이 가능함을 입증한다. 본 연구는 향후 스마트축사 통신 표준화 및 성능 평가 기준 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

■ 중심어 : MQTT ; 스마트축사 ; 데이터 통신 ; 검증 ; QoS

Abstract

This study presents a method for verifying the reliability and stability of data communication using the MQTT protocol in a smart livestock barn environment. To achieve this, a testbed resembling an actual livestock barn was constructed, and a broker and sensor nodes were configured to transmit and receive temperature, humidity, and carbon dioxide data. Experiments focused on communication performance at different QoS levels and load changes with increasing sensor node counts. Analysis revealed that transmission reliability improved with higher QoS levels. Stable communication was maintained at QoS 1 or higher, achieving 0% packet loss rate and an integrity metric of 0.998 or higher. When the number of nodes increased, the average delay time rose to 121.4 - 174.5 ms, but no bottlenecking was observed. These results demonstrate that MQTT communication enables stable and efficient data exchange even in constrained wireless network environments like livestock barns. This study can serve as foundational data for future standardization of smart barn communications and the establishment of performance evaluation criteria.

■ keywords : MQTT ; Smart Barn ; Data Communication ; Verification ; QoS

I. 서 론

최근 국내 축산업은 사육 규모의 대규모화와 농촌의 고령화로 인한 인력 감소에 따라 자동화 및 인공지능 기술의 도입이 빠르게 확산되고 있다.

특히, 사양관리의 효율성 및 생산성 향상을 위해 센서, 제어기기, 영상장비 등을 통합하는 스마트축사 시스템의 보급이 확대되고 있는 추세이다. 스마트축사는 각종 축사 내 환경 데이터를 실시간으로 수집하고 제어함으로써 가축의 생육 환경을 최적화 할 수 있는 기술로 발전하였으나, 통신 인프라

준회원, 국립순천대학교 스마트농업공학과, 정회원, 국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과

*정회원, 국립순천대학교 인공지능공학부

이 논문은 2025학년도 국립순천대학교 글로컬대학 사업비의 지원을 받아 연구되었음.

접수일자 : 2025년 10월 17일

제재확정일 : 2025년 11월 13일

교신저자 : 여현 e-mail : yhyun@scnu.ac.kr

측면에서는 현재까지도 유선 RS485 기반 구조의 통신 방식을 채택하고 있다[1]. RS485는 초기 설치 비용이 적고, 신호 간섭에 강하다는 장점이 있으나, 축사 환경의 특성상 배선의 손상 및 구조의 복잡성, 물리적 거리 제약, 유지보수의 어려움 등으로 인해 데이터가 유실될 수 있으며, 확장성 및 안정성이 떨어지는 한계가 존재한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 MQTT 통신 방식을 적용했다. MQTT는 경량 메시징 프로토콜로, 브로커를 중심으로 한 Publish - Subscribe 구조로 토픽을 지정하여 해당구조가 실현되고, 이를 통해 송신자와 수신자가 직접적인 배선으로 연결되지 않아도, 즉 무선으로 데이터 전달이 가능하다. 이러한 방식은 네트워크 부하를 최소화하고, QoS 수준 설정을 통해 데이터의 전송 신뢰성 및 실시간성을 보장한다. 또한, 저전력·저대역폭 환경에서도 안정적으로 동작한다.

그러나 다른 분야와는 다르게 축산 분야에서는 실제 환경에서의 MQTT 통신의 신뢰성 및 데이터 무결성 검증 연구가 부족한 실정이다. 대부분의 연구에서는 MQTT의 통신에 관한 성능 검증을 스마트온실과 같은 곳 또는 다른 분야에서만 제시[2]하며, 축사 환경에서의 실제 성능 분석을 진행한 사례는 거의 없는 상황이다.

따라서 본 연구의 목적은 실제 축사 환경과 유사하게 구현된 테스트베드에서 MQTT 통신의 데이터 전송 신뢰성과 안정성을 검증하기 위한 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Jetson Nano 기반의 MQTT 브로커와 센서 노드 간 통신 환경을 구축하고, 온·습도 및 이산화탄소 센서 데이터를 활용하여 지연시간, 패킷 손실률, QoS 수준별 전송 안정성을 측정하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 MQTT프로토콜과 관련된 선행 연구를 고찰하고, 3장에서는 본격적인 연구 방법과 시스템 설계 과정에 대해 상세히 설명한다. 4장에서는 연구 프로세스를 바탕으로 진행한 테스트베드 기반의 통신 검증

결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론 및 기대효과, 향후 연구 방향을 서술한다.

II. 관련연구

본 장에서 MQTT 프로토콜의 기술적 배경 및 적용 사례를 고찰한다. MQTT 프로토콜의 구조적 특징과 농축산 분야 적용 연구를 분석함으로써 본 연구의 가능성에 대해 제시하고자 한다.

1. MQTT 프로토콜의 개요 및 적용 사례
MQTT는 경량형 메시징 프로토콜로, Publish - Subscribe 구조를 기반으로 한다. 송신자와 수신자는 직접 연결되지 않고 중앙의 브로커를 통해 메시지를 중계하며, QoS 수준(0, 1, 2)을 통해 통신 신뢰성을 제어한다. 이러한 구조는 제한된 네트워크 환경에서 높은 안정성을 제공하며, 스마트농업·산업자동화 등 다양한 분야에서 적용되고 있다.

가. 스마트농업 분야의 MQTT 적용 연구

Samudra Vishal Mukherji 등(2019)은 “Smart Agriculture using IoT and MQTT Protocol” 연구에서 MQTT 기반 데이터 전송이 HTTP 대비 약 30% 이상의 지연 감소 효과를 보였다고 보고하였다[3]. 또한, Amit Sharma and Shilpa Gautam은 MQTT와 머신러닝을 결합한 농업 환경 예측 시스템을 구현하여, 실시간 데이터 송수신의 안정성을 검증하였다[4].

나. 산업용 IoT 및 엣지 플랫폼 적용 사례

Victor Seoane와 터키 사카리아 대학교는 MQTT와 CoAP을 비교하여, MQTT가 산업용 IoT 환경에서 지연이 적고 메시지 손실률이 낮다는 점을 실험적으로 입증하였다[5]. 한편, Seokjin Shin 등은 MQTT와 Kafka를 통합한 엣지 컴퓨팅 플랫폼을 구현하여, 대규모 센서 데이터를 실시간으로 처리할 수 있는 구조를 제시하였다. 이러한 연구들은 MQTT의 저전력·저대역폭·고효율 구조가 분산형 IoT 환경에 적합함을 보여준다[6].

다. MQTT의 보안 및 신뢰성 관련 연구

Jaspreet Kaur 등은 “Enhancing Security in MQTT-Based IoT Networks”에서 MQTT 통신의

보안 취약점을 분석하고, 머신러닝 기반 공격 탐지 기법을 제안하였다[7]. 또한, Tinu Anand Singh 와 J. Chandra은 스마트온실 제어 환경에서 QoS 수준별 통신 안정성을 비교 분석하여 QoS 1이 가장 효율적임을 실험적으로 검증하였다[8].

이러한 관련연구를 미루어 봤을 때, MQTT는 통신 효율성과 확장성 측면에서 RS485 대비 우수한 성능을 보이지만, 축사 환경의 전파 간섭, 다중 센서 구조, 가스 센서의 신호 특성 등 실제 축산 조건을 반영한 실증 연구는 거의 보고되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 실제 축사 환경을 모사한 테스트베드 환경에서 MQTT 통신의 성능 검증을 수행하고자 한다.

III. 본 론

본 절에서는 실제 스마트축사 환경을 테스트베드로 구현하고, 해당 환경에서 발생하는 다양한 환경 데이터를 MQTT 통신을 활용하여, 실시간으로 송수신 하는 과정에서의 성능과 안정성을 검증하는 방법을 제안한다.

1. 연구개요

본 연구의 목표는 스마트축사 환경에서 발생하는 온·습도 및 이산화탄소 등의 환경 데이터를 안정적인 송수신이 가능한 MQTT 기반 데이터 통신 검증 방법을 제안하는 것이다.

이를 위해 실제 축사 환경을 모사한 테스트베드를 구축하고, MQTT 통신의 신뢰성과 안정성을 정량적으로 평가했다.

또한, 센서 노드와 PC 사이에 브로커를 배치하여 MQTT의 Publish - Subscribe 구조를 구현하였다. 본 연구에서는 이러한 구조를 기반으로, 센서 노드가 주기적으로 데이터를 발행(publish)하도록 구성하고, 브로커가 이를 구독(subscribe)하여 PC로 전달하는 형태의 시스템을 설계하였다.

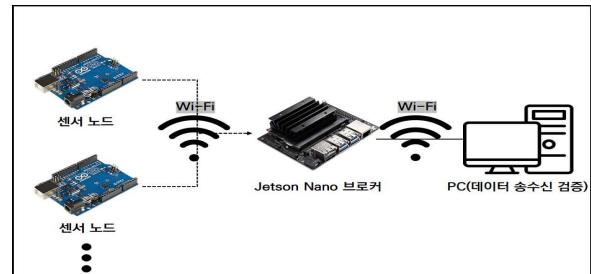


그림 1 MQTT 데이터 통신 검증 전체 구성도

2. 시스템 설계 및 구성

본 연구의 시스템은 Jetson Nano 기반 브로커, 환경 센서 노드, 무선 네트워크, 그리고 데이터 검증하는 PC로 구성된다. Jetson Nano를 활용한 브로커는 메시지 중개 및 로그 수집을 담당하며, 센서 노드는 실시간으로 환경 데이터를 발행한다.

가. 테스트베드 환경 개요

실험은 실제 축사 환경과 유사한 조건을 구현하기 위해, 내부 온도 25~30°C, 상대습도 70~85%, 이산화탄소 농도 400~3000ppm의 조건으로 밀폐형 공간(2 m × 2 m × 1.5 m) 범위에서 진행하였다. 공간 내에는 전열기, 가습기, 환기팬, 이산화탄소 발생기를 설치하여 축사 환경에서 발생할 수 있는 온·습도 변화 및 이산화탄소 발생 조건을 인위적으로 재현하였다. Wi-Fi를 기반으로, 센서노드와 브로커, 그리고 PC와 연결하였으며, 브로커와 센서 노드 간 평균 통신 거리는 약 5 m, 최대 10 m로 설정하였다. 실험 환경에는 온도, 습도, 이산화탄소 센서가 연결된 아두이노 보드 4 개를 설치하였으며, 각 노드는 5초 간격으로 데이터를 발행(publish)하도록 설정하였다. 또한, 노드 간 전파 간섭을 평가하기 위해 노드 한 개를 더 추가하여 1~5개 노드를 순차적으로 추가하여 부하 조건을 조정하였다.



그림 2 테스트베드 시스템 구조도

나. 네트워크 및 통신 구조

MQTT 통신구조는 센서 종류별로 토픽을 지정하여 Publish - Subscribe 구조를 구현하였으며, 이를 통해 데이터가 효율적으로 송수신되도록 구성하였다. 표1은 센서 종류별로 구분된 토픽명을 나타낸 것이다.

표 1. 센서 종류별 구분

| 구분 | 토픽명 |
|--------------------|------------------|
| 온습도 센서 | /livestock/temp |
| 습도 센서 | /livestock/humid |
| CO ₂ 센서 | /livestock/co2 |

표 2는 본 연구에서 제시하는 MQTT 통신의 주요 설정 항목 및 메시지 구조에 관해 설명한다.

표 2. MQTT 메시지 구조 및 설정 항목

| 항목 | 내용 |
|----------------|---|
| Topic | /smartfarm/livestock/{sensor_type} |
| QoS Level | 0, 1, 2 |
| Payload Format | {"temp": x, "humi": x, "co2": x, "time": t} |
| Retain Flag | False |
| Encoding | UTF-8 / JSON 구조 |

3. 데이터 통신 검증 절차

데이터 통신 검증은 단순 수신 여부 뿐만 아니라, 전송 데이터의 무결성, 중복률, 지연시간, QoS 수준별 안정성을 함께 평가하였다. 그 절차는 그림 3과 같이 구성된다.

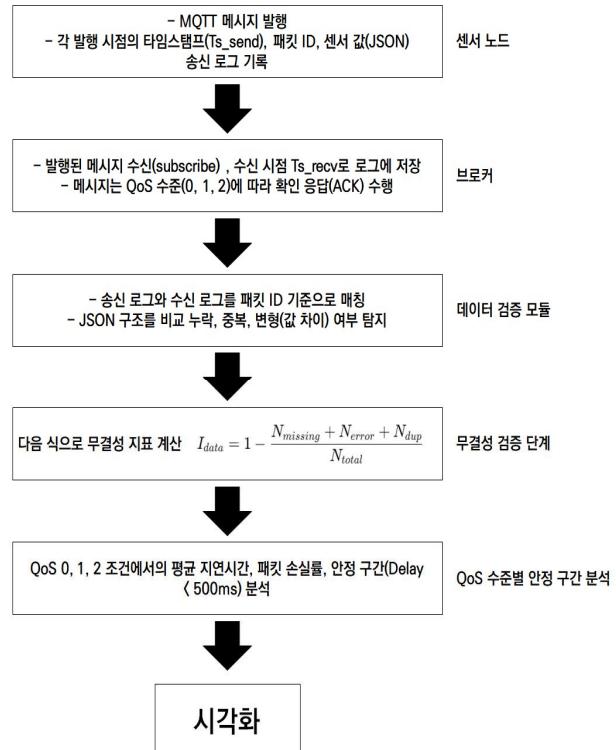


그림 3. 데이터 통신 검증 로직 흐름도

가. 데이터 수집 단계

각 센서 노드는 MQTT 발행 시 타임스탬프, 패킷 ID, 센서 데이터(JSON 형식)를 포함하여 전송하고, 브로커는 수신 시점을 타임스탬프로 기록한다.

나. 데이터 매칭 및 정합성 검증

발행 로그와 수신 로그를 패킷 ID 기준으로 매칭하고 JSON 필드 구조를 비교(누락·변형·중복 여부 판정)한다. 그리고 수신 값의 정상 범위(온도 25~30°C, 습도 70~85%, CO₂ 농도 400ppm~3000ppm)에 있는지 검증한다.

다. 통신 무결성 분석

데이터 무결성 지표는 다음과 같은 식으로 산출하였다.

$$I_{data} = 1 - \frac{N_{missing} + N_{error} + N_{dup}}{N_{total}} \quad (1)$$

여기서 $N_{missing}$ 은 미수신 패킷 수, N_{error} 는 변형 발생 패킷 수, N_{dup} 은 중복 수신 패킷 수를 의미한다.

라. QoS 수준별 안정 구간 분석

각 QoS 조건(0, 1, 2)에 대해 지연시간과 무결성 지표를 분 단위로 측정하고, 지연이 500 ms 이하인 구간을 안정 구간으로 정의하였다. 이를 통해

QoS별 통신 안정성과 시간대별 성능 변화를 분석하였다.

4. 데이터 분석 방법

MQTT 브로커 로그와 센서 발행 로그를 비교하여 데이터 전송의 신뢰성 및 실시간성을 분석하였다. Python 기반 Pandas 및 Numpy 라이브러리를 활용해 데이터셋을 처리하였으며, 평균 지연시간, 패킷 손실률, 전송 성공률을 지표로 산출하였다.

또한 시간대별 통신 안정성을 평가하기 위해 1분 단위로 메시지 수신 빈도와 누락 비율을 그래프로 시각화 하였다. 이 과정을 통해 MQTT 통신의 안정성을 정량적으로 평가하였다.

브로커 로그와 센서 로그의 매칭 결과를 Python 기반 파서에서 자동 처리하였으며, 분석 절차는 그림 4와 같다.

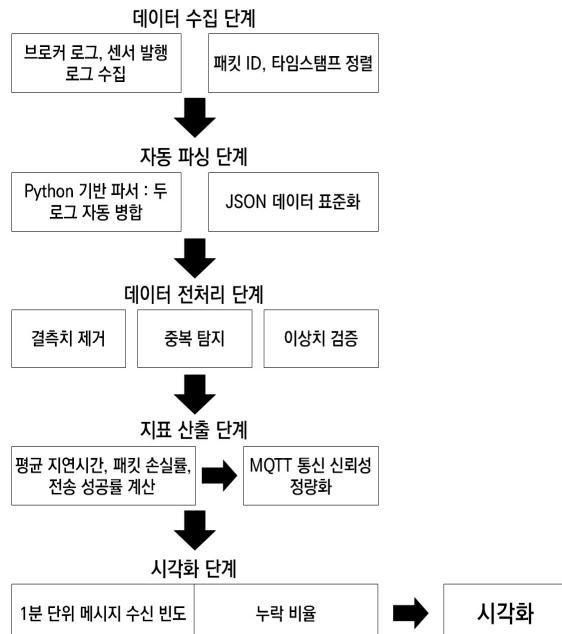


그림 4. 데이터 분석 절차 흐름도

IV. 연구결과

본 절에서는 구축된 테스트베드를 기반으로 수행한 MQTT 통신 검증 실험 결과를 제시하고, QoS 수준 및 센서 노드 수에 따른 통신 성능 변화를 정량적으로 분석하였다.

분석 항목은 평균 지연시간, 패킷 손실률, 전송 성공률, 데이터 무결성 지표로 구성되어 있다.

1. QoS 수준별 통신 성능 비교

MQTT의 QoS 수준은 메시지 신뢰성 보장 범위를 설정한다. 본 연구에서는 동일한 환경에서 QoS 0,

QoS 1, QoS 2의 조건으로 각각 1,000개의 메시지를 발행하여 성능을 비교하였다.

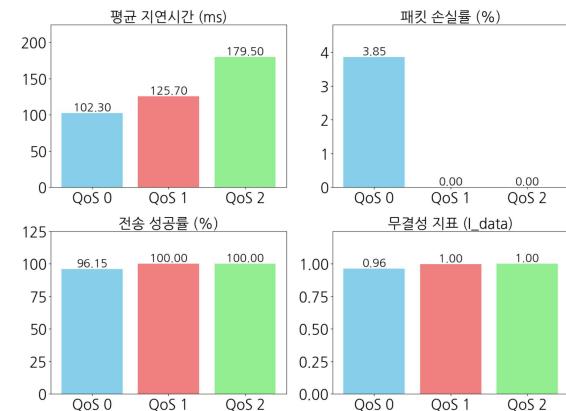


그림 5. QoS 수준별 통신 성능 비교 그래프

결과적으로 QoS 1이 전송 지연과 신뢰성 측면에서 가장 효율적이며, 축사 환경과 같은 제한적 네트워크 환경에서 표준 QoS 설정값으로 적합함을 확인하였다.

2. 센서 노드 수 증가에 따른 통신 부하 분석

센서 노드 수를 1개에서 5개로 증가시키며 MQTT 브로커의 부하 변화를 측정하였다. 노드 수가 증가함에 따라 평균 지연시간이 선형적으로 증가하였으나, QoS 1 조건에서는 데이터 손실이 발생하지 않았다.

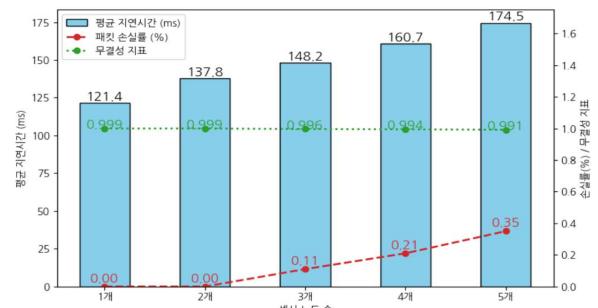


그림 6. 센서 노드 수 증가에 따른 통신 부하 분석 그래프

3. 시간대별 통신 안정 구간 분석

각 실험은 10분간 연속 송수신으로 진행되었으며, 1분 단위로 전송 성공률과 평균 지연시간을 측정하여 통신 안정 구간을 산출하였다. 지연이 500 ms 이하인 구간을 안정 상태로 정의하였다.

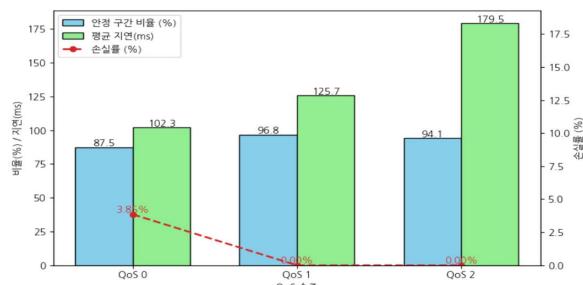


그림 7. 시간대별 통신 안정 구간 분석 그래프

4. 데이터 무결성 종합 분석

데이터 무결성 지표는 메시지 누락, 중복, 변형 발생률을 반영하여 통신 신뢰성을 정량화한다.

QoS 1 환경에서는 평균 0.998로 가장 안정적이었으며, 이는 MQTT 통신이 축사 환경의 습도·전파 간섭 등 물리적 요인에도 영향을 받지 않고 데이터 정확성과 실시간성을 유지할 수 있음을 입증하였다.

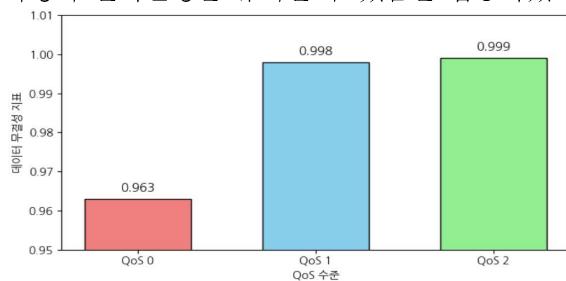


그림 9. 데이터 무결성 종합 분석 그래프

V. 결 론

본 논문에서는 스마트축사 환경에서 MQTT 데이터 통신의 안정성과 성능을 검증하기 위한 방법을 제시하였다. Jetson Nano를 브로커로, 센서 노드를 다중 구성하여 온·습도, 이산화탄소 데이터를 주기적으로 송수신하는 테스트베드를 구축하였다. 이를 기반으로 QoS 수준별 통신 성능과 노드 수 증가에 따른 부하 변화를 실험적으로 분석하였다. 실험 결과, QoS 수준이 높아질수록 데이터 전송 신뢰성은 향상되었으며, QoS 1 이상에서 패킷 손실률 0%, 무결성 지표 0.998 이상으로 안정적인 통신이 유지되었다. 반면, QoS 0에서는 3.85%의 패킷 손실이 발생하여 신뢰성 확보에 한계가 있었다. 또한, 센서 노드 수가 증가함에 따라 평균 지연 시간은 약 121.4 ms에서 174.5 ms로 상승하였으나, 통신 병목 현상은 발생하지 않았다. 이는 MQTT 프로토콜이 축사와 같은 환경에서도 안정적이고 신뢰성 높은 통신이 가능함을 입증한 결과이다.

따라서 본 연구에서 제시한 검증 방법은 향후 스마트축사에 MQTT를 활용한 효율적인 통신을 제공하고, 스마트축사의 통신 성능 평가 표준화 기준 마련에 기여할 수 있을 것이다.

향후 연구에서는 실제 축산 환경에서의 통신 안정성 모니터링 시스템을 구축하여 보다 종합적인 스마트축사 통신 검증 프레임워크를 제시하여 한다.

REFERENCES

- [1] 박준, 김준영, 김정훈, 방지현, 정세훈 and 심춘보, "IoT 및 멀티미디어 기반 스마트 한우 축사관리 플랫폼에 관한 연구," *멀티미디어학회논문지*, 제23권, 제12호, 1519-1530쪽, 2020년
- [2] 박홍진, "MQTT와 Node-RED를 기반한 MongoDB로 저장하는 스마트 팜 시스템 구현," *한국정보전자통신기술학회 논문지*, 제16권, 제5호, 256-264쪽, 2023년
- [3] S. V. Mukherji, R. Sinha, S. Basak, and S. P. Kar, "Smart Agriculture using Internet of Things and MQTT Protocol," Proc. of the 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon), Faridabad, India, pp. 14 - 16, 2019.
- [4] A. Sharma and S. Gautam, "A Novel IoT and Machine Learning-Based Architecture for Real-Time Paddy Crop Disease Detection and Monitoring," *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, pp. 668 - 678, 2025.
- [5] V. Seoane, C. Garcia-Rubio, F. Almenares, and C. Campo, "Performance Evaluation of CoAP and MQTT with Security Support for IoT Environments," *Computer Networks*, vol. 197, pp. 108338, 2021.
- [6] S. Shin, H. Kim, and J. Park, "An Edge Computing Platform Integrating Kafka and MQTT for Real-Time Sensor Data Processing," *Journal of Applied Science and Management Research (JSMS)*, vol. 12, no. 1, pp. 95 - 102, Feb. 2022.
- [7] J. Kaur, P. Singh, and R. Sharma, "Enhancing Security in MQTT-Based IoT Networks," *Journal of Positive School Psychology*, vol. 12, no. 4, pp. 1679 - 1688, 2023.
- [8] T. A. Singh and J. Chandra, "Enhancing Quality of Service (QoS) in MQTT Protocol for Internet of Things (IoT)," *Journal of Computer Science*, vol. 14, no. 5, pp. 639 - 644, 2018.

저자 소개



김현우(준회원)

2025년 국립순천대학교 멀티미디어공학과
학사 졸업

2025년 ~ 국립순천대학교 스마트농업
공학과 석사과정 재학

<주관심분야 : 미디어처리, 스마트 농업, 인공지능, IoT>



이명훈(정회원)

2006년 국립순천대학교 정보통신공학과
석사 졸업

2011년 국립순천대학교 정보통신공학과
박사 졸업

2010년 ~ 2013년 한국전자통신연구원
선임 연구원

2017년 ~ 2021년 국립농업과학원 연구사

2021년 ~ 현재 : 국립순천대학교 융합바이오시스템기계
공학과 교수

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



여현(정회원)

1993년 ~ 국립순천대학교 인공지능공학부
교수.

2020년 ~ 국립순천대학교 지능형
스마트농업 Grand ICT 연구센터
센터장.

<주관심분야 : 인공지능, 스마트 농업, IoT, 정보통신>