creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

양계용 멀티센서 모듈 개발과 데이터 활용 연구

Development of Multi-sensor Module for Broiler and Data Application

2022 년 2 월

서울대학교 대학원

바이오시스템공학과 바이오시스템공학전공

황 인 호

양계용 멀티센서 모듈 개발과 데이터 활용 연구

Development of Multi-sensor Module

for Broiler and Data Application

지도 교수 이 중 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2021 년 12 월

서울대학교 대학원

바이오시스템공학과 바이오시스템공학전공

황 인 호

황인호의 공학석사 학위논문을 인준함

2022 년 1 월

위 원 장 박 영 준 (인)

부위원장 이 중 용 (인)

위 원 김 준 용 (인)

국 문 초 록

전세계적인 코로나 19 대유행 상황이 이어지면서, 실내에서의 식품 소비가 증가함에 따라, 닭고기 소비 역시 최근 크게 늘어나게 되었다. 효율적으로 닭고기를 생산하기 위하여, 전세계적으로 육계사에 정보통신기술을 활용한 정밀축산 기술을 적용한 스마트 육계사 기술 개발이 이루어지고 있다. 이러한 스마트 육계사 기술을 구현하기 위해서는, 우선적으로 생산 시설의 반자동화와 함께 내부 환경을 실시간으로 모니터링할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 스마트 육계사 내 실시간 모니터링에 활용할 수 있는 멀티센서 모듈을 개발 및 활용하여, 실시간 환경 데이터 취득과 Modbus 통신을 통하여 측정 데이터를 웹상에서 확인할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다. 구성되는 센서류의 효율적인 활용이 가능하도록, 해당 멀티센서 모듈은 3D 프린터를 활용하여 출력된 플라스틱 인클로저 내에 탑재된 형태로 구현이 되었다. 또한 전산유체역학 분석을 통해, 해당 멀티센서 모듈 내부의 공기 유동 및 온도 분포를 확인하여, 설계된 멀티센서 모듈에 대한 센서 데이터 독립성 및 정확성을 검증하였다. 또한 멀티센서 모델로부터 측정된 데이터를 활용함으로써, 육계의 열스트레스 환경을 대변하는 온습도지수 값을 산출하여, 멀티센서 통합이 가능하도록 하였다. 또한 육계 사육 베드의 양 끝 두 지점에서 측정된 데이터를 통해 추정된 육계 사육 베드에서의 일일 오염원 생성량 데이터를 활용한

다중선형회귀분석을 통해, 육계의 일당증체량을 어림할 수 있는 예측 모델을 설계하여, 최종적으로 설계된 멀티센서 모듈 내에서도 기초적인 센서 융합이 가능하도록 하였다. 그 결과, 설계된 멀티센서 모듈은 센서의 데이터에 대한 독립성 및 정확성을 보장하여, 환경 데이터 계측을 하는데 문제없이 활용할 수 있음을 확인하였다. 두 지점에서 측정된 온습도지수 값의 경우, 각각 80.18±1.08, 80.62±1.06 로 나타나, 작업자와 육계 모두에게 고온의 열 스트레스 부하가 발생하고 있다는 것을 확인하였다. 그리고 육계의 일당증체량의 경우, 이는 SPSS 다중선형회귀분석을 통해 수립된 모델에 의해, 일일 육계 사육 베드 내 최대 온도차와 최대 이산화탄소 생성량의 비례합으로 나타나게 되었으며, 모델의 정확도에 대한 R^2 값이 0.8965로 나타나, 해당 예측 모델이 상당히 정확한 예측 성능을 가진다는 것 역시 확인할 수 있었다.

주요어 : 스마트 육계사, 멀티센서, 전산유체역학, 일당증체량, 다중선형회귀

학 번 : 2020-22274

목 차

1. 서론 1

1.1. 연구 배경 1

1.2. 문제점과 필요성 5

1.3. 연구 목적과 범위 7

2. 연구사 9

2.1. 환경 변수와 건강 및 생산성 9

2.2. 온습도지수 12

2.3. 환경 변수를 활용한 가축 생산성 예측 19

2.4. 환경 모니터링 센서 네트워크 20

2.5. 센서 통합과 센서융합 22

3. 연구 내용 및 방법 27

3.1. 공시 육계사 27

3.2. 공시 환경 센서 모듈 30

3.3. 멀티센서 모듈 내부의 공기 유동 CFD 분석 41

3.4. 육계사 내부 환경 계측 및 일당증체량 예측 모델 수립 43

4. 결과 및 고찰 47

4.1. 멀티센서 모듈의 CFD 분석 47

4.2. 육계사 내부 환경 계측치 및 일당증체량 예측 모델 52

5. 결론 66

6. 참고 문헌 67

Abstract 75

List of Tables

Table 1 THI range and heat satisfaction of workers (Hubbard et al., 1999) 16
Table 2 Optimal THI ranges for ROSS 708 at different ages (Aviagen, 2014) 17
Table 3 Device specifications of the MQ136 H_2S Sensor 31
Table 4 Device specifications of the MQ137 NH_3 Sensor 31
Table 5 Device specifications of the SCD30 Sensor 32
Table 6 Device specifications of the SPS30 Particulate Matter Sensor 32
Table 7 Device specifications of the VEML7700 Ambient Light Sensor 33
Table 8 Response times of each sensor in complex environment sensor module 38
Table 9 The distribution of the airflow vector over the entire volume 47
Table 10 The distribution of temperature over the entire volume 48
Table 11 Model Summary of broiler body weight gain 61
Table 12 ANOVA Analysis of broiler body weight gain... 62
Table 13 Coefficients of broiler body weight gain prediction model 62

List of Figures

Figure 1 Comparison on sensor fusion and multi-sensor integration (Elmenreich, 2002) 23
Figure 2 Overview of smart broiler house KUM-3000 ... 27
Figure 3 Overview of broiler cages and manure belts 28
Figure 4 Simplified configuration of KUM-3000 system 29
Figure 5 Indexes of each cell in cage system 29
Figure 6 Overview of environmental sensors utilized in the experiment 30
Figure 7 Overview of Arduino MEGA 2560 equipment 34
Figure 8 Overview of SmartLink equipment 34
Figure 9 Register map of complex environment sensor module data implemented according to KS X 3267 36
Figure 10 Configuration of designed complex environment sensor module and gateway 37
Figure 11 3D model of the complex environment sensor module enclosure 39
Figure 12 Area of the enclosure; (a) fan attachment part, (b) MQ136, MQ137 sensor, (c) SPS30 sensor, (d) SCD30 sensor attachment part, (e) wall part for distinguishing board and sensors and (f) Arduino Mega 2560 board attachment part 40
Figure 13 The final implementation form of the complex environment sensor module 41

Figure 14 3D modeling of complex environment sensor module used for CFD analysis 42
Figure 15 Floor plan of the overall winter broiler breeding system; (a) Kerosene stove, (b) and (c) complex sensor modules 44
Figure 16 Installation of the (a) complex environment sensor module and (b) SmartLink equipment 45
Figure 17 CFD analysis results of airflow and temperature distribution in the complex environment sensor module; (a) temperature sensor, (b) gas sensor, and (c) top of the enclosure 50
Figure 18 Measured temperature data from position IN and OUT 53
Figure 19 Measured relative humidity data from position IN and OUT 54
Figure 20 Measured THI data from position IN and OUT 55
Figure 21 Measured carbon dioxide concentration data from position IN and OUT 56
Figure 22 Measured PM10 concentration data from position IN and OUT 57
Figure 23 Measured hydrogen sulfide data from position IN and OUT 58
Figure 24 Measured ammonia data from position IN and OUT 59
Figure 25 Measured illuminance data from position IN and OUT 60

Figure 26 Comparison on predicted DBWG and actual DBWG 64

1. 서론

1.1. 연구 배경

현재 전세계적으로 코로나19가 유행함에 따라, 가정 내에서의 식품소비가 증가하였으며, 그 중에서도 닭고기의 소비가 크게 증가하고 있다. 닭고기는 우리 식문화에서 중요한 역할을 차지하고 있으며, 닭고기의 재료가 되는 육계의 우리나라 연간 생산량은 2020년 기준 647,000t으로, 전년 대비 1.55%가 증가하는 등, 국내 농업 분야에서 중요한 품목으로 여겨지고 있다(MAFRA, 2021).

육계 사양 기술은 사료의 개발을 통한 영양개선과 육종기술 및 환경조절기술의 발전에 따른 경제적 생산성 향상의 방향으로 발전하였으나, 동물복지의 중요성이 인식되면서 사양 중 환경을 쾌적하게 하는 방향의 중요성이 더욱 커지고 있다(Chen et al., 2020). 육계 사육방식은 평사형, 케이지형, 그리고 배터리형으로 발전되어 왔으며, 육계는 그 크기가 작으므로 돼지나 소와 같은 대동물에 비해 높은 밀도로 생산되며, 개체관리 기술을 적용하기 어려워 군집사육되는 것이 일반적이다.

현재 많은 수의 육계사는 생산성을 높이기 위해, 밀폐구조의 육계사과와 반자동화된 시스템을 통해 가축을 밀집하여 사육하고 있다. 이는 큰 공간을 차지하지 않고도 많은 수의 개체를 효과적으로 기르고, 출하 시 필요 노동력이 절감된다는 경제적인

이점을 갖고 있다. 그러나 밀폐 육계사에서는 베드, 깃털, 사료 등으로부터 다양한 분진이 발생하여 공기질이 악화된다(Donham et al., 2002). 축사에서 발생하는 유기질 미세 분진에는 항원 미생물이 대량으로 증식될 수 있기 때문에, 일반 $PM_{2.5}$ 미세분진보다도 위험성이 더욱 높다(Viegas et al., 2013). 따라서 이러한 미세분진 환경은 육계의 생장 뿐만 아니라 작업자의 건강에도 치명적으로 작용할 수 있다. 또한 계분이 변질 부패되는 과정에서 발생하는 악취와 계분 청소 시 발생하는 분진도 중요한 환경관리 대상이다. 이러한 분진 농도를 비롯하여, 육계사 내부의 이산화탄소, 황화수소, 그리고 암모니아 농도가 육계의 생장에 주요한 지표로 활용될 수 있다(Li et al., 2009; Ni et al., 2012).

닭은 땀을 흘리지 않는 정온동물로서 온도변화에 대한 적응력이 낮아, 우리나라와 같이 뚜렷한 여름과 겨울을 가진 경우 환경제어가 어렵고, 실패하는 경우 대량 폐사의 피해를 받게 되는 민감한 축종이다. 생물의 환경에 대한 적응능력은 습도에 따라 크게 영향을 받기 때문에, 이를 복합적으로 고려한 새로운 환경지표를 사양에 적용하며, 이러한 환경지표로 활용되는 대표적인 것으로 온습도지수(THI, temperature humidity index)가 있으며, 이는 축종마다 각기 다른 계산식으로 산출된다(Habeeb et al., 2018; Purswell et al., 2012).

따라서 육계를 사육할 때에는, 주요 유해 기체 농도와 열

스트레스 환경을 실시간으로 관측하는 것이, 그 생산성과 동물복지의 증진하는데 중요한 역할을 하게 된다.

한편, 2010년대 중반부터 국내에서 정밀축산(precision livestock farming) 기술을 활용한 스마트 축산 기술이 부각되고 있다. 이 기술은 축사 내외부에 다양한 센서를 설치하고, 해당 센서로부터 얻어지는 빅데이터 정보를 토대로 사양을 관리하거나, 설비와 기계를 자동화하고 환경관리용 기계를 원격으로 제어하게 하는 기술이다(Berckmans, 2017). 이러한 기술은, 디지털 데이터를 활용하여 농업을 이룬다는 점에서, 디지털 농업(digital agriculture)이라고 부르기도 한다(Klerkx et al., 2019). 육계 분야에서도 이러한 디지털 농업 기술을 활용한 스마트 육계사가 국내외에서 등장하게 되었으며, 이러한 스마트 육계사에서는 사료탱크, 사료공급장치, 급수장치 등의 여러 작동기가 센서에 의해 원격 및 자동적으로 제어가 되며, 냉난방 역시 환경센서가 측정하는 환경 데이터의 범위에 따라 자동적으로 제어가 이루어진다(Kim et al., 2021).

또한, 센서분야에서는 센서관리의 방법의 일원으로, 여러 센서를 하나의 통합된 형태로 결합하여, 보다 복합적인 데이터를 만들고, 기록, 저장하여 실시간으로 작업자에게 이를 송수신할 수 있는 멀티센서 통합(multi-sensor integration) 기술을 활용하고 있다. 이와 유사하면서도 보다 적극적인 방법으로는 센서 융합(sensor

fusion) 기술이 있으며, 이는 개별적인 센서 데이터를 결합하여 보다 높은 신뢰도를 지니고 새로운 의미를 갖는 데이터를 파생시키는 기술로, 현재 농업분야에서는 트랙터의 자율주행 알고리즘을 개발하는데 널리 활용되고 있다(Blank et al., 2012; Elmenreich, 2002).

1.2. 문제점과 필요성

현재 IoT 기술의 도입을 통해 확보되는 빅데이터를 기반으로 하는 스마트 육계사 기술이 널리 보급되어지고 있으나, 이러한 기술의 도입을 저해하는 여러 잠재적인 파생 문제점들이 있다.

첫째로, 현장에 설치되어 있는 다양한 센서의 상태를 동시에 유지 및 관리하는데 어렵다는 문제점이 있다. 스마트 육계사를 도입하기 위해서, 각 환경 데이터를 수집하는 개별적인 센서 여러 개가 서로 다른 곳에 설치되기 때문에, 육계사 내부에 복잡하면서도 과도한 전선을 필요로 하게 되어, 육계사 청소 또는 육계 입추 및 도계 시에 의도하지 않게 결선이 되거나 센서류의 파손이 쉬이 발생할 수 있다.

둘째로, 축산환경이 열악하여 분진과 유해가스에 의해 각종 센서나 정보수집을 위한 전자장비들이 부식되어 수명이 짧아지고, 열악한 환경에서 측정되는 센서의 측정값이 먼지부착 또는 표면 부식으로 인해 그 정확도를 상실하여, 잘못된 측정치를 제공하는 문제가 발생한다.

셋째로, 센서류를 활용하여 축사 내 환경정보를 측정하지만, 이러한 측정 데이터를 바로 활용하지 않고 이를 가공해서 활용하게 되어 번거로움이 따른다는 문제점이 있다. 대표적 예로는 사양관리에 중요 지표로 활용되는 THI가 있으며, 이는 측정된 온도정보와 습도정보를 결합하여 계산되어야 하기 때문에, 이러한

기본 정보가 농장정보시스템(farm information management system)에서 수집되어 해석될 필요가 있다. 따라서 이러한 농장정보시스템이 모종의 이유로 운행이 정지될 경우, 축사에서는 THI를 활용한 제어가 불가능해지며, 전체적인 구동에 어려움을 겪게 된다.

넷째로, 축사 내 환경정보를 이용한 농작업 자동화에 대한 연구는 많이 수행되고 있으나, 이러한 정보를 활용하여 사양에 대한 고급 정보를 제공하는 측면에 대한 연구는 아직 미흡하다는 문제점이 있다. 따라서 스마트 팜에 대한 기대가 높음에도 불구하고, 이러한 많은 정보를 어떻게 활용하는지에 대한 의문점이 발생하는 등, 농업인들의 불만이 높은 실정이다.

따라서, 스마트 육계사에서 환경센서를 효율적으로 관리할 수 있는 방안이 필요하며, 센서류의 수명과 측정치의 정확도를 향상시킬 수 있는 방법이 필요하다. 또한 측정된 정보를 이용하여 시설과 기계를 자동화하는 외에도, 축산 농업인에게 필요한 고급 정보를 제공하는 연구가 시도되어야 한다.

1.3. 연구 목적과 범위

본 연구는 양계용 환경센서를 효율적으로 관리하는 방안으로, 멀티센서 통합 기술을 활용한 멀티센서 모듈을 개발하고, 이를 활용하여 취득한 환경 데이터를 토대로 육계사 내부 환경의 열 스트레스 환경 적합도와 육계의 일당증체량 예측이 기술적으로 가능하다는 것을 육계사에서 실증하고자 한다. 본 연구의 구체적인 목적은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

1. 센서의 효율적인 관리 방안으로서, 적절히 설계된 센서박스에 센서들을 배치한 통합형 멀티센서 모듈을 개발한다. 단, 멀티센서 모듈은 육계 생장의 주요 인자로 여겨지는, 온도, 습도와 유해 가스인 NH_3, CO_2, H_2S 농도, 그리고 조도와 분진(particulate matter, PM_{10}) 농도를 측정하는 것으로 제한한다.
2. 개발된 센서 모듈에 대한 3D 모델을 생성하고, 이를 활용한 전산유체역학(computational fluid dynamics; CFD) 분석을 통해, 센서 인클로저와 센서 배치 형태가 육계사 내부 환경을 측정하는데 적합한지를 평가하여, 그 정확성과 실용성을 확인한다.
3. 센서융합의 개념을 적용하여, 센서 모듈 단계에서 개별적 센서가 제공할 수 없는 환경정보로서 육계와 작업자의 THI를 생성하여, 농장정보시스템과 별개로 육계사 내부 작동기의

제어 및 자동화에 활용할 수 있는 방법을 제안한다.

4. 센서 모듈에서 제공되는 데이터를 활용하여, 육계사 내부의 사양 환경이 일당증체량에 미치는 영향에 대해 모델을 수립하여 그 정확도를 평가한다. 구체적으로, 육계 일당증체량 예측 모델과 THI 산출 수식을 활용하여, 최종적으로 멀티센서 통합의 형태로서 기초적인 센서 융합 기술을 활용한 육계사의 실시간 모니터링 시스템을 구성한다.

2. 연구사

2.1. 환경 변수와 건강 및 생산성

육계를 포함한 동물 자원의 부산물로 인하여 발생하는 암모니아는, 작업자의 어지럼증 및 호흡곤란을 야기한다. 또한 높은 농도의 암모니아 환경은, 육계의 생장을 저해하고 이상행동을 초래한다(Beker et al., 2004; Miles et al., 2004). 이러한 암모니아는 주로 육계의 배설물로부터 발생하며, 특히 계분 벨트를 활용한 청소 시에 급속도로 발생한다(Zhao et al., 2016). 육계의 생장은 암모니아 뿐만 아니라 대기 조성으로부터 큰 영향을 받게 된다. 대기 중 다양한 기체 중에서도, 암모니아와 이산화탄소의 농도, 그리고 습도가 육계 사육환경을 확인하는데 중요한 지표로서 작용한다(Li et al., 2009; Ni et al., 2012). 높은 이산화탄소 환경에서, 육계의 호흡을 비롯한 여러 문제 행동들이 발생하며, 약 20% 농도에서 4분 간 노출될 경우 자세를 완전히 잃게 되고, 40%의 농도에서 15분 이상 노출될 경우에는 폐사하는 문제점이 발생하게 된다(Gerritzen et al., 2007; Gerritzen et al., 2000). 양돈 분야에서는 황화수소의 농도 역시 주요 지표로서 활용하고 있으나, 육계의 경우에는 먹이, 사육 환경 등의 차이에 의해, 황화수소의 농도가 사육 개체 및 작업자에 위험이 될 정도까지 높게 측정되지는 않는다(Dai & Blanes-Vidal, 2013; Kim et al., 2008). 허나 황화수소는 그 노출기준이 타 기체에 비해 훨씬 낮기 때문에,

사육 개체 및 작업자의 안전을 확보하기 위해서는 이에 대한 관찰 역시 필요하다. 따라서 내부 환경의 적합도를 판단하기 위해서는, NH_3, CO_2, 그리고 H_2S의 농도가 중요한 지표로서 작용하게 된다.

유해 기체 뿐만 아니라, 양계에서는 열 스트레스 역시 매우 중요한 역할을 한다. 대부분의 육계 개체는 18~20 ℃의 열 중립 구간을 보유하고 있으며, 대기 중의 온도가 그 이상을 넘어서게 되면 개체의 생장률, 생산력 및 다양한 생화학적 요인들에 큰 부정적인 영향을 받게 된다(Ensminger & Oldfield, 1990). 육계에게 열 스트레스 환경이 주어지게 될 경우, 면역력이 약해져 염증이 발생하며, 자유 라디칼과 활성 대사물질(ROS; Reactive oxygen species)이 발생되고 내부 황산화 시스템이 억제되어 지질, 단백질 및 DNA에 산화가 일어나 내부 장기에 이상이 나타나게 된다. 또한 간, 신장, 갑상선의 기능이 억제되고 티로신의 작용이 저해되어 직장 온도와 호흡률의 상승이 나타나게 된다. 육계의 주변 대기 환경이 열 중립 범위를 넘어서게 되면, 서서히 호흡에 이상 증세가 나타나며, 35℃ 이상의 고온 환경이 주어지게 될 경우에는, 호흡이 더욱 가빠지게 되고 물리적인 피로감을 느끼게 된다. 그 이상의 온도 및 습도가 주어진 극한 환경에 놓이게 될 경우에는, 개체 스스로 체온을 조절할 수 없게 되어 결국 폐사에 이르게 된다(Farag & Alagawany, 2018).

이때 유해 기체들은 기존의 미세 분진환경과 함께 작용하여,

작업자에게 더욱 복합적인 문제점을 야기한다. 육계사에서 발생하는 분진은 약 25%의 단백질을 포함하여 유기물질의 함량이 높고, PM_{10} 이하의 분진이 약 1/3을 차지한다. 이러한 미세 유기 먼지에는 암모니아를 포함한 독성 기체들이 보다 쉽게 흡수되어, 기존의 유해 기체 노출 한도보다 더욱 낮은 농도에서도 작업자에게 메스꺼움과 같은 건강 상 이상증상을 야기한다(Neghab et al., 2018). 이러한 독성 인자들에 의해, 밀폐건물에 종사하는 작업자들에게는 유기먼지독성증후군(Toxic Organic Dust Syndrome)이라는 폐질환이 발생하기도 한다.

현재 이러한 주요 환경 인자가 동물의 건강과 복지에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 널리 진행되고 있다.

Meluzzi and Sirri (2009)는 닭의 복지상태에 영향을 미치는 사육인자를 설명하고 사육 밀도, 조도, 계분의 특성 및 대기질(암모니아, 이산화탄소, 습도, 먼지)의 영향에 대하여 검토하였다. 그리고 생산적 특성 등 광범위한 지표를 고려한 단일복지지수를 도입하여, 생리, 행동 지표를 통한 농가 동물복지 평가가 가능하도록 하였다.

Xiong et al. (2017)는 상대습도가 동물 건강과 복지에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 그 결과, 높은 상대습도는 생육부진을 유발하여 동물복지에 악영향을 미치며, 오히려 상대습도가 낮을 경우 동물 호흡기가 손상되고 병원균의 전염성을 높여 감염성

질환의 발병률을 높이는 것을 확인하였다.

2.2. 온습도지수

온습도지수(THI)는 열스트레스 환경이 동물의 체온조절 상태에 미치는 영향을 평가하기 위하여 개발된 지표이다. 일차적으로는 사람을 위하여 개발되었으며, 그 수식은 다음 Eq. 1과 같다(Thom, 1958).

$$\mathrm{THI} = \mathrm{t}_{db} + 0.36\mathrm{t}_{dp} + 41.2, \qquad (1)$$

where

THI = temperature humidity index

t_{db} = dry bulb temperature, ℃

t_{dp} = dew point temperature, ℃

해당 지표의 산출 방식은 종에 따라 다르며, 소의 경우에는 다음 Eq. 2와 같이 나타난다(Buffington et al., 1981).

$$\mathrm{BGHI} = \mathrm{t}_{bg} + 0.36\mathrm{t}_{dp} + 41.2, \qquad (2)$$

where

BGHI = black globe humidity index

t_{bg} = black globe temperature, ℃

이때 흑구온도지수의 경우 환경 분야에서는 더위체감지수라고 부르기도 한다.

칠면조, 산란계와 육계를 비롯한 가금류에 대한 THI 산출식에 대한 연구 역시 진행되었으며, 그 수식은 다음 Eq. 3~6과 같다(Brown-Brandl et al., 1997; Tao & Xin, 2003; Xin et al., 1992; Zulovich & DeShazer, 1990).

$$\mathrm{THI}_{hen\ turkeys} = 0.74t_{db} + 0.26t_{wb} \quad (3)$$

$$\mathrm{THI}_{tom\ turkeys} = 0.42t_{db} + 0.58t_{wb} \quad (4)$$

$$\mathrm{THI}_{layers} = 0.6t_{db} + 0.4t_{wb} \quad (5)$$

$$\mathrm{THI}_{broilers} = 0.85t_{db} + 0.15t_{wb} \quad (6)$$

where

$\mathrm{THI}_{\text{tom turkeys}}$ = THI of tom turkeys

$\mathrm{THI}_{\text{hen turkeys}}$ = THI of hen turkeys

$\mathrm{THI}_{\text{layers}}$ = THI of layers

$\mathrm{THI}_{\text{broilers}}$ = THI of broilers

본 연구에서는 건습구 온도계를 활용하지 않고, 반도체 온습도센서를 활용하여 건구온도 및 상대습도를 측정하기 때문에,

습구온도 t_{wb}의 값을 도출할 필요가 있다. 건구온도 t_{db}와 상대습도 RH가 주어졌을 때, 다음과 같은 수식을 통해 습구온도 t_{wb}를 구할 수 있다(ASHRAE, 2017).

$$\ln p_{ws} = C_1 T^{-1} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln T \tag{7}$$

$$p_w = RH \cdot p_{ws}(t_{db}) \tag{8}$$

$$\mathrm{W} = 0.62198 \frac{p_w}{p - p_w} \tag{9}$$

$$W_s^* = 0.62198 \frac{p_{ws}(t_{wb})}{p - p_{ws}(t_{wb})} \tag{10}$$

$$\mathrm{W} = \frac{(2501 - 2.381 t_{wb}) W_s^* - 1.006(t_{db} - t_{wb})}{2501 + 1.805 t_{db} - 4.186 t_{wb}} \tag{11}$$

where

T = absolute temperature, K=℃+273.15

C_1 = −5800.2006

C_2 = 1.3914993

C_3 = −0.048640239

C_4 = 4.17648×10^{-5}

C_5 = -1.44521×10^{-8}

C_6 = 6.5459673

p_w = partial pressure of water vapor, Pa

RH = relative humidity

p_{ws} = saturation pressure, Pa

t_{db} = dry bulb temperature, ℃

W = humidity ratio, kg_w/kg_{da}

p = atmospheric pressure, 101325 Pa

W_s^* = saturation humidity ratio, kg_w/kg_{da}

t_{wb} = wet bulb temperature, ℃

이때 t_{db}와 RH가 주어지므로 Eq. 2~4를 통해 p_w, W 값을 계산해낼 수 있으며, t_{wb}의 경우 Eq. 5, 6의 W와 W_s^*의 관계식을 통해, $t_{wb}=t_{db}$에서 시작하는 음의 방향의 iteration을 수행하여 계산해낼 수 있다.

어림을 통해 일련의 계산 과정을 보다 단순화할 경우, 육계에 대한 THI의 경우 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다(NRC, 1971).

$$\begin{aligned}&\mathrm{THI}_{broilers}\\&=(1.8t_{db}+32)-[(0.55-0.0055RH)(1.8T-26.8)]\end{aligned} \quad (12)$$

현재 국립축산과학원에서는 축종에 상관 없이 Eq. 12를 활용하여 가축의 THI를 산출하며, 이를 가축 사육 시의 기상정보로 활용하고 있다(NIAS, 2016). 이렇게 산출되는 THI의 범위에 따른 작업자의 온도적합성은 다음 Table 1과 같이 나타난다(Hubbard et al., 1999).

Table 1 THI range and heat satisfaction of workers (Hubbard et al., 1999)

THI Range	Description
THI<74	Satisfactory
74≤THI<79	Unsatisfactory Results on decrease of work efficiency
THI>84	Extreme situation Results on extreme health problem

또한 육계 종 중 하나인 ROSS 708 종에 대한 일령별 육계에 대한 최적의 공기 온도, 상대 습도 및 THI 범위는 Table 2와 같이 나타난다(Aviagen, 2014).

Table 2 Optimal THI ranges for ROSS 708 at different ages (Aviagen, 2014)

Age of birds, d	THI ranges	
	Lower	Upper
1	78	84
3	76	81
6	73	80
9	72	78
12	72	77
15	70	75
18	68	74
21	67	73
24	65	71
27	64	70

따라서 이러한 THI 수식을 활용하여 실시간으로 THI 값을 산출해낸다면, 해당 값이 작업자 및 육계의 적정 THI 범위인지를 확인하여, 현재 환경이 작업자 또는 육계에게 적합한 환경인지 판단할 수 있는 척도로서 활용이 가능하다.

현재 농업 분야에서는, 다양한 가축 축종에 대한 최적의 THI 산출식을 유도 및 활용하여 THI를 산출해내고, 해당 데이터를 가축의 열 스트레스 환경 및 실시간 매개변수에 대한 판정 척도로 활용하고자 하는 여러 연구가 진행되었다.

Gates et al. (1995)는 건물 열 모델을 활용하여 육계사 내 쿨링

포그 시스템의 유무에 따른 THI의 시간당 값을 계산하였다. 미국 238개 지역의 30년에 걸친 시간당 여름 날씨 데이터를 지리 정보 시스템(GIS) 데이터베이스에 통합하여, THI의 고립선과 열 스트레스 한계를 초과하는 시간의 백분율을 도식화하였다. 그 결과 쿨링 포그 시스템의 활용 여부에 따른 지역적 열 스트레스의 감소를 통해 시스템의 냉각 효율을 검증할 수 있었으며, 이 기법을 통해 육계사의 설계 및 관련 관리 결정을 보조하는 데 사용될 수 있다.

Habeeb et al. (2018)는 젖소 수유에 스트레스 원인으로 작용 가능한 열 스트레스에 대한 평가 방법을 제시하였다. 해당 방법은 THI, HIS(열 스트레스 지수) 등식과 다른 열 지수 차트를 사용하여 수행되었다. 이렇게 산출된 지수를 통해, 젖소의 쾌적도와 열 스트레스 수준을 가늠할 수 있다.

Purswell et al. (2012)는 THI를 활용하여 주어진 건구 온도와 상대 습도 범위에 따른 무거운 육계의 실시간 성능을 측정하였다. 이를 위하여 증체량, 사료 섭취량, 사료 전환률 등의 실시간 성능 매개 변수를 비교했다. 그 결과 THI가 약 21℃를 초과하였을 때 조류의 성능이 크게 저하되고 체온이 1.7℃ 상승하였다. 그리고 회귀 분석을 통해, THI와 주요 네 가지 성능 매개 변수 사이에는 2차 관계가 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

Tao and Xin (2003)는 수컷 육계의 온도-습도-속도

지수(THVI)를, 18개의 열적 난이도 조건에 급성 노출되었을 때의 개체 체온(t_b) 상승에 기초하여 설정하였다. 이를 통해 THVI는, $THVI=(0.85\times t_{db}+0.15\times t_{wb})\times V^{-0.058}$의 수식으로 나타나게 된다. 조류에 대한 항상성 상태는 1.0, 2.5, 4.0 또는 >4.0℃의 한계치에 따라 정상, 경보, 위험 또는 비상으로 분류하였다.

2.3. 환경 변수를 활용한 가축 생산성 예측

Gorczyca and Gebremedhin (2020)는 머신 러닝 알고리즘을 활용하여 환경 열 스트레스 요인이 젖소의 생리적인 반응에 미치는 영향을 평가하였다. 여러 머신 러닝 알고리즘 중 벌점화 선형 회귀, 랜덤 포레스트, 그라디언트 부스팅, 인공 신경망 4종의 알고리즘을 활용하여 그 예측 성능을 비교하였으며, 그 결과 랜덤 포레스트와 인공 신경망과 같은 비선형 머신러닝 알고리즘이 일관되게 젖소의 생리학적 반응을 잘 예측하는 것을 확인하였다.

Lee et al. (2015)은 머신 러닝 기술을 활용하여 모돈의 생산성을 예측하는 모델을 개발하였다. 여러 머신 러닝 기술 중 로지스틱 회귀, 의사 결정 트리, 인공 신경망, K-최근접 이웃 알고리즘을 활용하여 알고리즘에 따른 예측 성능을 비교하였으며, 그 결과 인공신경망 및 앙상블 모델에서 최고의 성능을 나타내는 가장 높은 리프트 값이 나타나는 것을 확인하였다.

Lee et al. (2015)은 실험 돈사에서 수집된 데이터를 기반으로

하여, 비육돈의 비율일당증체량을 예측하는 모델을 수립하여 활용하였다. 해당 예측 모델 수립을 위하여 매일 측정된 온도, 습도, 이산화탄소, 풍속의 일평균, 일최소, 일최대 데이터와 비율일당증체량을 활용하였으며, 트리기반 알고리즘을 활용하여 환경 데이터로부터 비율일당증체량을 예측하는 모델을 수립하였다. 그 결과 일평균 온도가 비율일당증체량을 결정하는 가장 주요한 요인임을 확인하였다.

2.4. 환경 모니터링 센서 네트워크

Ahsan and Ahmed (2012)는 WSN을 적용한 농업 방식을 제시하고, 13가지 유형의 전통 농업에서 어떠한 센서, WSN가 적용되는지를 논의하였다. 또한 응용 분야 별로 WSN에 가장 적합한 농업 유형을 식별하였으며, 최근 WSN의 농업 응용 프로그램에 대한 검토를 통해 당면 과제를 파악하고 미래 발전 방향을 제시하였다.

Alonso et al. (2020)는 글로벌 엣지 컴퓨팅 아키텍처를 통해, 스마트 파밍 환경에서 IoT, 엣지 컴퓨팅, 인공지능 및 블록체인 기술을 적용한 플랫폼을 제시하였다. 이를 통해 낙농장에서의 유제품 및 사료 곡물 상태의 실시간 모니터링, 추적이 지속 가능하도록 설계하였다.

Ammad-Uddin et al. (2014)는 육계사에 무선 센서 네트워크를

활용하여, 육계사의 상태를 실시간으로 확인하고 문제에 대해 효과적으로 대처할 수 있도록 하였다. 이를 통해 육계 생산 수율을 높이고, 질병에 걸린 개체를 초기에 효과적으로 감지하여 전체적인 육계사의 생산성을 높이고자 하였다.

Mahbub (2020)는 농지 및 축산농가를 위한 임베디드 시스템, IoT 및 무선 센서 네트워크를 기반으로 하는 농업 시스템을 제안하였다. 해당 시스템에는 전자 회로 시스템, 사용된 네트워크 프로토콜 및 PC와 스마트폰 등의 스마트 원거리 모니터링 시스템을 포함하며, 스마트 농업 시스템에 대항하여 발생할 수 있는 몇 가지 과제를 설명하여 잠재적인 문제점에 대한 해결 방안 역시 도모하였다.

Pierce and Elliott (2008)는 워싱턴 주의 두 가지 농업 애플리케이션, 농업 기상 네트워크 및 농장 내 동파 모니터링 네트워크의 구현 방식에 대한 연구를 진행하였다. 지역 센서 네트워크는 마스터-리피터-슬레이브 네트워크로 구성된 900 MHz, 주파수 호핑, 확산 스펙트럼(FHSS) 라디오를 장착한 우리의 AWN200 데이터 로거로 구성된다. 서로 다른 지리적 영역에 있는 독립적 네트워크의 추가적인 처리 및 배포를 위해 표준 인터넷 프로토콜을 통해 중앙 데이터베이스에 집계된다. 이렇게 구현된 지역 AgWeatherNet WSN과 온팜 AgFrostNet 네트워크는 모두 워싱턴 주에서 성공적으로 구현되었으며, WSU와 지역 제조업체

간의 새로운 계약을 통해 재배농들이 이를 상업적으로 이용할 수 있게 되었다.

Ramli et al. (2020)는 LoRa를 사용한 스마트 팜 시스템을 위한 적응형 네트워크 메커니즘을 제시하였다. 제안된 적응형 네트워크 메커니즘은 애플리케이션 계층에서 구현되며, 네트워크 상태에 따라 프로토콜을 조정할 수 있다. 이렇게 제안된 시스템은 평균 지연 시간과 수집된 총 센서 데이터 수 측면에서 신뢰성을 확보할 수 있으며, 싱글 프로토콜 방식보다 향상된 네트워크 성능을 유지할 수 있다.

Srbinovska et al. (2015)는 작물을 환경 모니터링 측면에서 보다 효율적으로 재배하고 그 관리 비용을 낮추기 위해 식물 온실을 위한 무선 센서 네트워크 아키텍처를 제안하였다. 온실환경의 특징을 분석하여, 온도, 습도, 조명 등의 주요 환경변수를 결정하였으며, 이를 모니터링하기 위한 무선센서 네트워크 기술 기반의 실용적이고 저렴한 온실감시시스템을 설계하였다.

2.5. 센서 통합과 센서융합

육계사 내부의 다양한 환경 데이터를 수집하기 위해서는, 각 데이터를 수집하는 여러 센서를 결합하여 보다 복합적인 데이터를 만들고, 기록, 저장하여 실시간으로 작업자에게 이를 송수신할 수 있는 통신 기술이 필요하다. 이렇게 여러 센서의 결합으로 이루어진

방식을 멀티센서 통합 방식(Multi-sensor Integration)이라고 한다. 이러한 방식은 단순하게 각각의 데이터를 수집하고 송수신하는 데에 국한된다는 문제점이 있다. 이러한 멀티센서 통합 방식의 단점을 해결하기 위해 도입된 기술이 바로 센서 융합 기술이다. 센서 융합 기술이란, 개별적인 센서 데이터를 결합하여 보다 높은 신뢰도를 지니고 새로운 의미를 갖는 데이터를 파생시키는 기술로, 현재 자율주행 알고리즘에서 널리 사용되고 있다(Fig. 1).

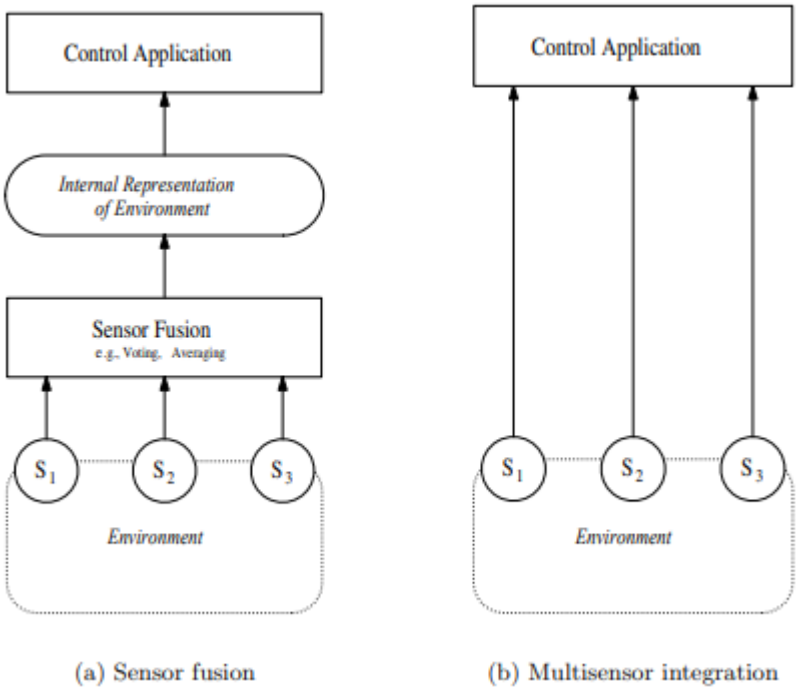


Figure 1 Comparison on sensor fusion and multi-sensor integration (Elmenreich, 2002)

센서 융합 기술은 새로운 복합적인 데이터를 생성한다는 점에

있어 멀티센서 통합 방식과 다르게, 신뢰성의 증가, 확장된 공간 및 시간의 범주와 조건의 증가, 모호성 및 불확실성의 감소, 간섭에 대한 견고성, 해상도의 향상이라는 여러 장점을 갖게 된다(Elmenreich, 2002).

농업 분야에서도 이러한 센서 융합 기술을 통해, 보다 고차원적인 데이터를 취득하고 이를 활용하고자 하는 연구가 널리 진행되었다.

Blank et al. (2012)은 트랙터 주행에 응용 가능한 저수준 센서 융합 접근법을 제안하였다. 해당 프로그램은 최신의 흐름과는 다르게 시스템 또는 센서 모델에 의존하지 않으며, 상대적인 센서 거리에 기반한 경험적 다수결 접근 방식을 채택하였다. 이는 매우 희박한 시스템 정보와 계산 자원을 처리할 수 있어, 농업 영역에서 효과적으로 작용할 수 있다. 해당 접근법을 활용한 시뮬레이션과 실험을 통해, 불량한 측정값을 신뢰성 있게 식별하고 충돌하는 데이터를 제거할 수 있으며, 이러한 방식으로 기계의 상위 레벨 기능에 사용할 수 있는 일관된 데이터 기반이 제공할 수 있다.

Bravo et al. (2004)은 450~900nm의 초분광 반사 정보와 형광 영상촬영 데이터를 융합하여, 현장 조건에서 질병으로 인한 식물 스트레스를 감지하고 인식할 수 있도록 하였다. 겨울밀의 황녹 질환을 모델 시스템으로 사용하였으며, 영상 분광기를 활용하여 건강하거나 감염된 식물의 초분광 반사 영상을 현장에서 촬영하였다. 550nm와 690nm 형광 영상을 비교함으로써 질병의

발견이 가능하였으며, 질병으로 인식된 영상의 픽셀 분율을 최종 형광 질병 변수인 병변 지수(LI)로 설정하였다. 이는 2차 판별 모형에 활용되어 센서 융합을 통한 알고리즘을 구현하였으며, 이는 기존의 스펙트럼 또는 형광 모델에 비해 향상된 질병 구분 능력을 갖게 되었다.

Ignat et al. (2014)은 비파괴 센서 결과값과 파괴 기준 변수의 센서 융합을 통해 생산물의 품질을 예측하고자 하였다. 본 연구에서는 분광 광도계, 가시적 범위의 초분광 영상, 이완 및 초음파 테스트 및 색상 측정 데이터를 활용하였다. 모델 구축을 위해 선형 및 비선형 회귀 방법이 적용되었으며, 이렇게 구현된 다중 센서 모델은 모든 단일 센서 모델보다 더 나은 성능을 기록하였다. 기준 변수의 융합을 통해, 제품의 품질을 평가할 수 있는 새로운 복합 품질 지수를 개발하였으며, 이는 생산물의 종합적인 품질과 성숙 단계를 예측하고 보다 수월한 수확 일정을 결정할 수 있었다.

Khot et al. (2008)는 이산 칼만 필터(DKF)를 활용하여 디지털 고도 모델(DEM)과 지형 보정 모듈(TCM) 센서에서 얻은 자세 각도 추정치에 대한 센서 융합을 적용하여, 자주 분사기의 롤링 및 피치 각도 추정치를 개선하였다. DKF, DEM 기반 롤링 및 피치 추정치, TCM 센서 롤 및 GPS 기반 피치 추정치를 기준 IMU 측정치와 비교하여 퓨전 알고리즘의 성능을 검증하였다. DKF는

데이터 중단과 같은 DEM의 한계 상황을 극복할 수 있었고, 동시에 농업용 자주 분무기의 자세 추정치를 개선할 수 있었다.

3. 연구 내용 및 방법

3.1. 공시 육계사

본 연구는 강릉에 소재한 ㈜대상키우미시스템의 KUM-3000 시작기를 활용하여 진행하였다(Fig. 2).

Figure 2 Overview of smart broiler house KUM-3000

KUM-3000은 밀폐형 케이지 계사로, 컨테이너 내부에 3층형의 육계를 사육할 수 있는 케이지와 사육 베드를 두고, 그 하단에 계분

컨베이어 벨트를 설치한 구조이다. 전체 컨테이너의 크기는 18×4.0×3.75 m이며, 2개의 급이기마다 칸막이가 설치되어 있는 구조로 이루어져 있다(Fig. 3). KUM-3000의 케이지 시스템을 단순화하면 크게 사료 및 음수가 흐르는 관과 이에 연결된 급수 및 급이기(사양부), 상단의 조명부, 플라스틱 슬랫으로 이루어진 육계가 자라는 사육 베드, 그리고 계분벨트 및 청소부의 네 부분으로 이루어져 있다(Fig. 4). 그 외에도 환기를 위한 덕트 및 후드, 작업자가 지나갈 수 있기 위한 통로, 작업자를 위한 복도 측면의 조명 등이 있다.

Figure 3 Overview of broiler cages and manure belts

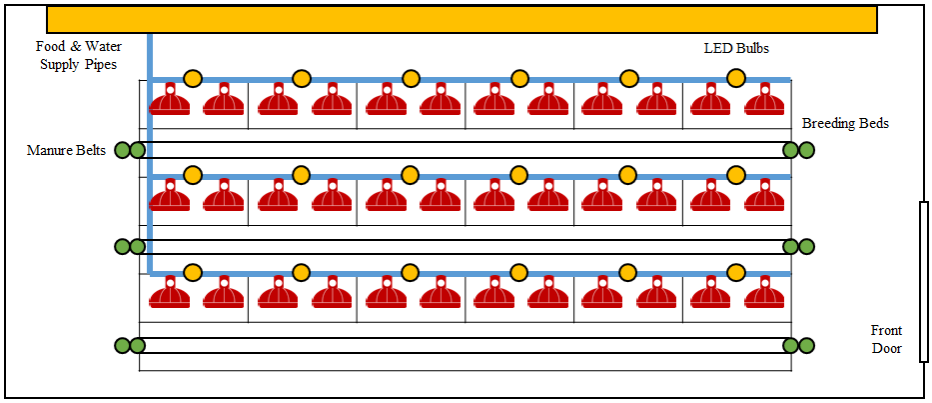


Figure 4 Simplified configuration of KUM-3000 system

각 사육 칸을 보다 효과적으로 인덱싱하기 위해, 칸막이와 컨베이어벨트로 둘러싸인 하나의 부분을 셀이라고 칭하였다. 각 셀은 2.3×2.0×0.4 m의 크기로 이루어져 있으며, 총 3단 6열의 구조로 이루어져 있다. 출입 방향을 기준으로 첫 열을 A로 지칭하여, 마지막 열을 F열로 두었으며 1단부터 3단까지의 셀을 A1~F3으로 인덱싱하였다(Fig. 5).

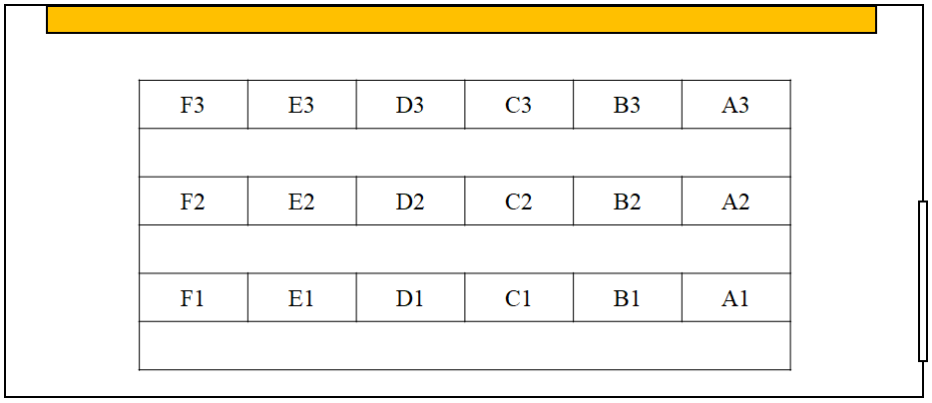


Figure 5 Indexes of each cell in cage system

3.2. 공시 환경 센서 모듈

본 연구에서는 육계의 생장에 영향을 미치는 주요 환경 데이터인 온도, 습도, 이산화탄소, 황화수소, 암모니아 농도, 조도 및 분진 농도를 동시에 측정할 수 있는 멀티센서 모듈을 개발하였다. 해당 멀티센서 모듈은 저가형 센서들과 해당 센서들로부터 데이터를 받아오고 웹 상으로 이를 송신하는 소형 컴퓨터, 그리고 3D 프린터를 통해 맞춤형으로 제작되는 인클로저로 이루어진다. 이때 활용하는 센서들의 종류는 다음과 같다(Fig. 6).

(a) MQ136 H_2S Sensor, Winsen (b) MQ137 NH_3 Sensor, Winsen (c) SCD30, Sensirion

(d) SPS30, Sensirion (e) VEML7700, Vishay Intertechnology

Figure 6 Overview of environmental sensors utilized in the experiment

해당 센서들은 다음과 같은 사양을 가지고 있다(Table 3~7).

Table 3 Device specifications of the MQ136 H_2S Sensor

Parameter	Description
Sensor Type	Semiconductor (Catalytic Combustion)
Target	Hydrogen Sulfide (H_2S)
Detection range	1 – 200 ppm
Sensitivity	Rs(in air)/Rs(50ppm H_2S) ≥ 3

Table 4 Device specifications of the MQ137 NH_3 Sensor

Parameter	Description
Sensor Type	Semiconductor (Catalytic Combustion)
Target	Ammonia Gas (NH_3)
Detection range	5 – 500 ppm
Sensitivity	Rs(in air)/Rs(50ppm NH_3) ≥ 2

Table 5 Device specifications of the SCD30 Sensor

Parameter	Description
Sensor Type	Semiconductor (NDIR)
Target	Carbon Dioxide (CO_2), Temperature, Relative Humidity
CO2 measurement range	0 – 40,000 ppm ±(30 ppm+3%)
Response time	20s
Humidity measurement range	0%RH – 100%RH ±2%RH
Temperature measurement range	−40℃ – 70℃ ±0.3℃

Table 6 Device specifications of the SPS30 Particulate Matter Sensor

Parameter	Description
Sensor Type	Semiconductor (Laser Scattering)
Target	Particulate Matter ($PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, PM_4, PM_{10})
Mass concentration range	0 – 1,000 $\mu g/m^3$
Mass concentration resolution	1 $\mu g/m^3$
Sampling interval	1s

Table 7 Device specifications of the VEML7700 Ambient Light Sensor

Parameter	Description
Sensor Type	Semiconductor (Photodiode)
Target	Ambient Light
Ambient light range	0 – 120,000 lx
Ambient light resolution	0.0036 lx
Output code	16 bit, I^2C

해당 센서들은 소형 컴퓨터인 Arduino MEGA 2560(Arduino, Italy)에 결선되어 전원을 공급받는 동시에 시리얼 통신을 통해 데이터를 측정 및 저장한다(Fig. 7). Arduino 보드에 기록된 데이터는 또 다른 소형 컴퓨터인 SmartLink(FarmOS, Korea) 장비에 RS485 모드버스 방식으로 연결된다(Fig. 8). 그리고 통신 오류를 대비하기 위해, MicroSD 카드 모듈을 추가적으로 연결하여, 취득 데이터가 게이트웨이로 넘어가기 이전 MicroSD 카드에 데이터를 저장하도록 하였다.

Figure 7 Overview of Arduino MEGA 2560 equipment

Figure 8 Overview of SmartLink equipment

Master 인 SmartLink 에서 Slave 인 센서 노드로부터 데이터를 받을 때, 스마트 온실 KS 표준 중 “KS X 3267 스마트온실 센서구동기노드 및 온실통합제어기 간 RS485 기반 모드버스 인터페이스” 표준을 준수하기 위해, 다음과 같은 레지스터 맵을 구상하여, 임베디드 코드를 작성하는데 이를 활용하였다(Fig. 9).

Information of Equipments	1	2	3	4	5	6	7	8
Information	Organization Code	Company Code	Product Type	Product Code	Protocol Version	Number of Connected Equiments	Serial Number	
Type	Uint 16bit	Uint 16bit	Uint 16bit	Uint 16bit	Uint 16bit	Uint 16bit	Uint 32bit	
Value	1	9	1	1	1001	5	0	

Information of Connected Products	101	102	103	104	105
Information	Equipment Code #1 (Temperature, Humidity and CO_2 Sensor)	Equipment Code #2 (H_2S Sensor)	Equipment #3 (NH_3 Sensor)	Equipment #4 (Illuminance Sensor)	Equipment Code #5 (Particulate Matter Sensor)
Type	Uint 16bit	Uint 16bit	Uint 16bit	Uint 16bit	Uint 16bit
Value	1	2	11	41	42

Node State	202
Information	Node State
Type	Uint 16bit

Information of Sensors	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214
Information	Temperature Sensor Value		Temperature Sensor State	Humidity Sensor Value		Humidity Sensor State	CO_2 Sensor Value		CO_2 Sensor State	H_2S Sensor Value		H_2S Sensor State
Type	Float 32bit		Uint 16bit	Float 32bit		Uint 16bit	Float 32bit		Uint 16bit	Float 32bit		Uint 16bit

Information of Sensors	215	216	217	218	219	220	221	222	223
Information	NH_3 Sensor Value		NH_3 Sensor State	Illuminance Sensor Value		Illuminance Sensor State	Particulate Matter Sensor Value		Particulate Matter Sensor State
Type	Float 32bit		Uint 16bit	Float 32bit		Uint 16bit	Float 32bit		Uint 16bit

Figure 9 Register map of complex environment sensor module data implemented according to KS X 3267

최종적으로, 웹 상에서 SmartLink 장비에 연결된 센서 노드로의 접속을 통해 실시간으로 복합환경 데이터를 확인 및 기록하게 되며, 그 구성은 다음과 같이 이루어진다(Fig. 10).

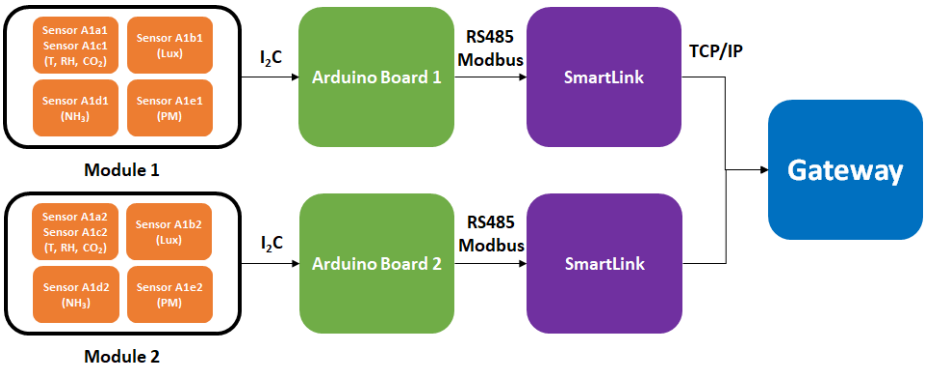


Figure 10 Configuration of designed complex environment sensor module and gateway

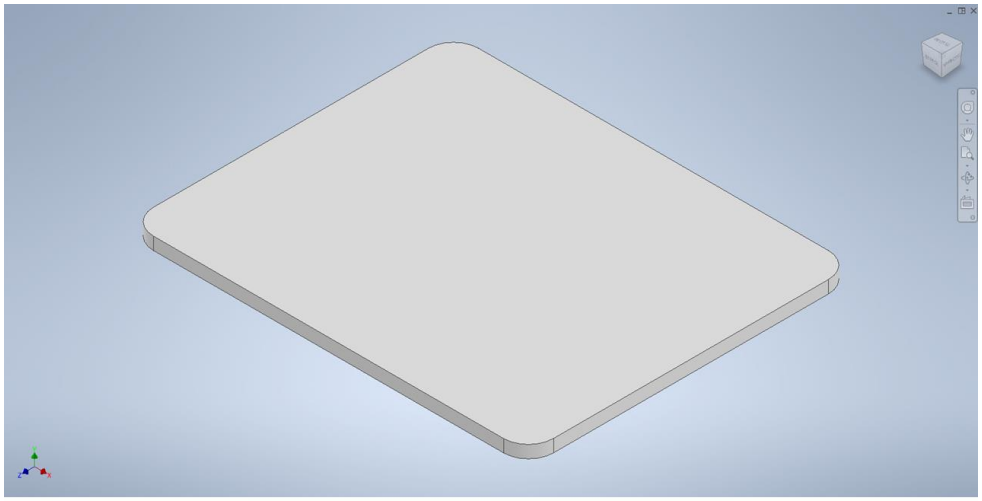
또한 데이터를 받아오는 주기를 결정하기 위해, 각 센서류의 반응 속도를 확인하였다(Table 8). 이를 종합한 결과, 작동 시간의 최소공배수인 1분에 한 번씩 데이터를 받아올 경우, 문제없이 데이터를 확보할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 8 Response times of each sensor in complex environment sensor module

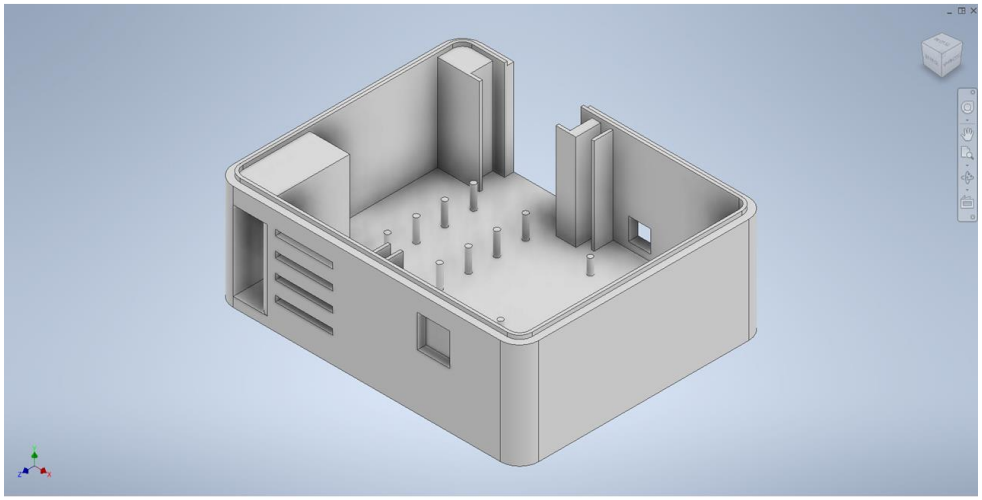
Sensor Name	Measuring Parameter	Response Time
SCD30	Temperature (T)	10 s
	Relative Humidity (RH)	8 s
	Carbon Dioxide (CO_2)	20 s
SPS30	Particulate Matter (PM)	8 s
VEML7700	Illuminance (Lux)	100 ms
MQ136	Hydrogen Sulfide (H_2S)	30 s (normal state) 1 s (when pre-heated)
MQ137	Ammonia (NH_3)	30 s (normal state) 1 s (when pre-heated)

저가형 센서 5개와 Arduino MEGA 보드로 이루어진 멀티센서 모듈은 비용 절감 및 맞춤형 설계를 위해 3D 프린터(DP200, Sindoh)를 활용하여 출력된 센서 인클로저에 탑재된다.

센서 인클로저 제작을 위한 3D 모델은 Autodesk Inventor(Autodesk, USA) 프로그램을 활용하여 다음과 같이 구현되었다(Fig. 11). 이후 해당 모델과 PLA 재질의 필라멘트를 활용하여 센서류를 탑재할 플라스틱 인클로저를 출력하였으며, 해당 인클로저에 센서류를 탑재하여 최종적으로 멀티센서 모듈을 개발 및 구현하였다.



(a)



(b)

Figure 11 3D model of the complex environment sensor module enclosure

인클로저의 내부는 센서 4종류와 Arduino 보드가 부착될 공간, 그리고 공기를 통과시킬 그리드 형태의 흡기부와 fan이 부착된

외기부로 이루어진다(Fig. 12). 배기부 fan의 경우, CFM-5010V-143-260-20(CUI Devices, USA) 제품을 활용하였으며, 해당 제품은 50x50 mm 크기의 소형 fan으로, 정격전압 12VDC 기준으로 13.8CFM의 공기 유량을 가진다. 이때 흡기부와 분진센서 전면부에 500 mesh(0.025mm) 크기의 스테인리스 직망을 부착하여, 분진 센서와 가스 센서류에 분진이 쌓여 성능이 떨어지는 것을 막도록 하였다.

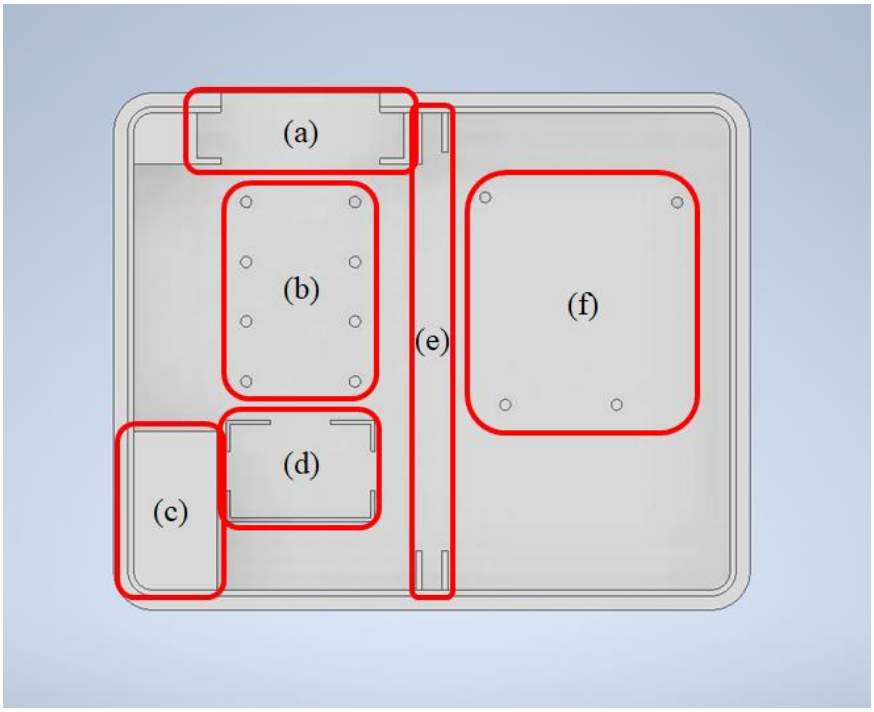


Figure 12 Area of the enclosure; (a) fan attachment part, (b) MQ136, MQ137 sensor, (c) SPS30 sensor, (d) SCD30 sensor attachment part, (e) wall part for distinguishing board and sensors and (f) Arduino Mega 2560 board attachment part

이러한 일련의 멀티센서 모듈은 다음과 같이 최종적으로 하나의 인클로저에 조립 및 부착되어 구현되었으며, 해당 멀티센서 모듈을 통한 최종적인 환경 데이터 취득 및 통신 시스템을 구현하였다(Fig. 13).

Figure 13 The final implementation form of the complex environment sensor module

3.3. 멀티센서 모듈 내부의 공기 유동 CFD 분석

설계된 멀티센서 모듈 내부의 공기 유동 형태를 파악하기 위해, 이전에 구현된 인클로저의 3D 모델을 비롯하여, 각 센서 형태의 3D 모델을 Autodesk Inventor를 활용하여 모델링하고 실험에 활용하였다(Fig. 14).

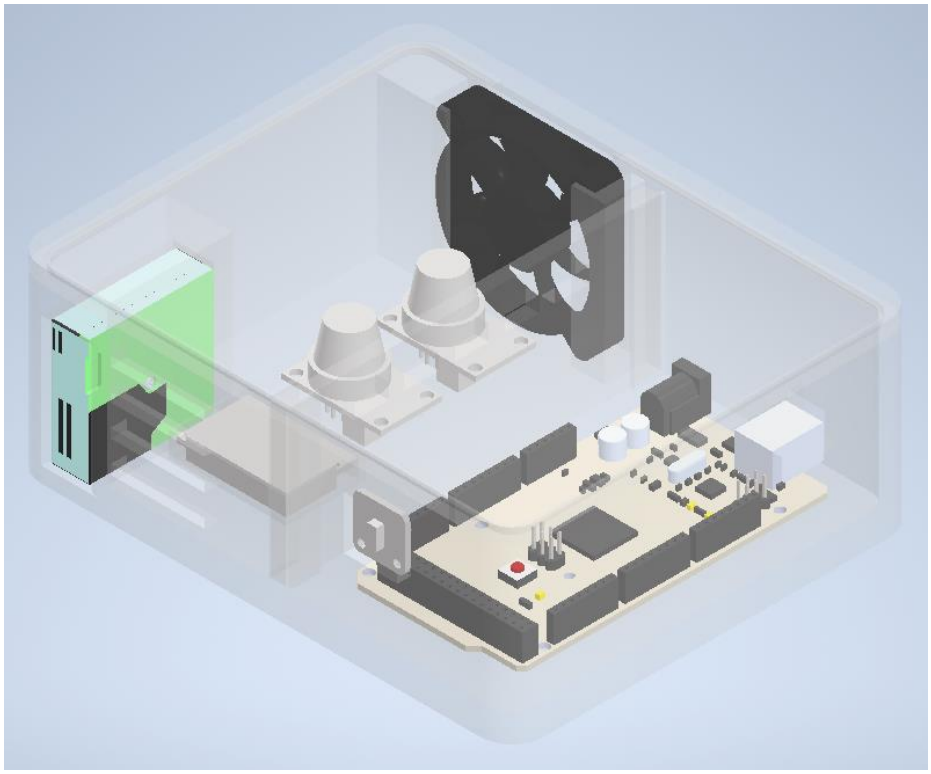


Figure 14 3D modeling of complex environment sensor module used for CFD analysis

CFD 분석은 Autodesk CFD(Autodesk, USA) 프로그램을 활용하여 이루어졌으며, 3D 모델의 지점별 공기 흐름 속도와 온도를 기록하고 시각화하였다.

시뮬레이션 시나리오는 일반적인 스마트 육계사의 내부 환경을 측정하는 상황으로 설정되었다. 앞부분의 격자 구조 유입구로 30℃의 외부 공기가 유입되어 뒷부분의 팬 구조를 통해 배출되며, 내부의 MQ-136, MQ-137 센서는 데이터 측정을 위해 지속해서 0.9W의 전력을 소모하면서 열을 방출하기 때문에, 해당 전력량만큼

열을 방출하는 발열체로 설정하여 실험을 진행하였다.

CFD 분석은 온도 센서 측정부와 암모니아 및 황화수소 센서 연소부로 나누어 해석을 진행하였다. 온도 센서 측정부의 시뮬레이션 결과를 통해, 해당 위치에서 측정되는 온도 값이 외부 온도와 일치하는지를 확인하였으며, 암모니아 및 황화수소 센서 연소부에서 발생하는 열이 fan에 의해 외부로 잘 배출이 되는지 역시 확인하였다. 그리고 최종적으로 전체 온도 및 유속 분포를 확인하여, 멀티센서 모듈 내 미세환경의 조성을 파악하고, 해당 센서 모듈이 육계사 내부 환경을 측정하는데 적합한지 여부를 파악하였다. 총 100번의 반복 수행을 통해, 정상 상태에서의 공기 유동을 생성하여 그 흐름을 파악하였다.

3.4. 육계사 내부 환경 계측 및 일당증체량 예측 모델 수립

CFD 분석을 통해 가상 환경에서 테스트한 멀티센서 모듈 장비를 실제 육계사 환경에 적용하여, 실제 데이터 계측 여부와 함께 멀티센서 통합이 가능한지를 파악하였다.

육계사 사육 및 계측 환경은 겨울철 난방 조건에서 이루어졌다. 사육한 닭의 종은 ROSS 종으로, 본 실험에서는 총 50수를 B2, C2의 두 셀에서 사육을 진행하였다. 병아리는 2021년 12월 9일에 입추되었으며, 15일령이 되는 23일부터 20일령이 되는 28일까지의

내부 환경 데이터를 취득하였다. 겨울철 난방 사육의 경우, 외부의 찬 공기 유입을 차단하기 위해 대부분의 공기 유입구를 막아둔채, 진입문 근처에 등유 난로(Shinil, Korea)를 피워 높은 온도 상태를 유지하였다. 해당 난로는 사육에 적합한 온도 환경을 유지하기 위해 1434kcal/h의 일정한 발열량을 유지하면서 지속적으로 구동되었으며, 전체적인 구조 및 난방 형태는 다음과 같이 요약할 수 있다(Fig. 15).

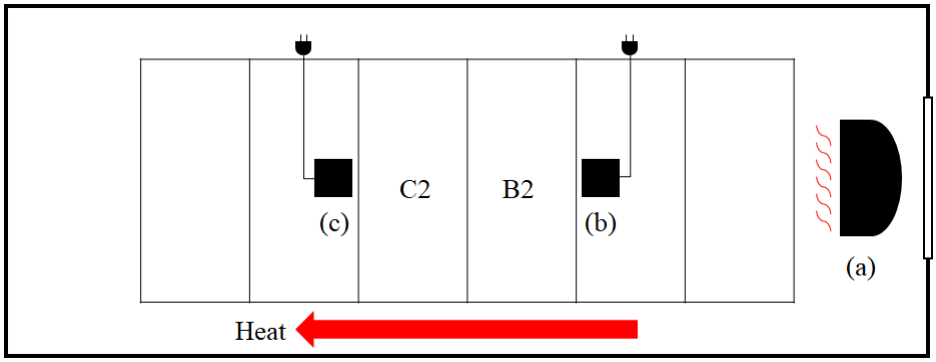


Figure 15 Floor plan of the overall winter broiler breeding system; (a) Kerosene stove, (b) and (c) complex sensor modules

따라서 추가적인 공기 유입이 없다고 가정하였을 때, 공기 유동 및 열 유동은 B2에서 C2 방향으로 이루어지기 때문에, (c) 위치에서의 공기 조성은 (b) 위치에서의 공기 조성에 B2와 C2의 육계로부터 발생되는 오염원이 더해진 형태라고 가정할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 (b)와 (c), 즉 육계가 사육되는 셀의 양 끝

지점에서 다음과 같은 형태로 환경 데이터를 측정하고(Fig. 16), 실시간으로 육계로부터 발생되는 오염원의 양을 추정한다. 이때 (b) 위치를 등유 난로로부터 공기가 유입되는 부분이라고 생각하여 공기 유입부(Inlet, 이하 IN), (c) 위치를 공기가 사육 베드를 거쳐서 빠져나가는 부분이라고 판단하여 공기 유출부(Outlet, 이하 OUT)이라는 심볼을 활용하여 계측을 진행하였다.

(a) (b)

Figure 16 Installation of the (a) complex environment sensor module and (b) SmartLink equipment

그리고 일당증체량의 주요 변인으로 여겨지는 일별 온도, 습도, 이산화탄소 농도 편차의 평균, 최댓값을 변수로 하여, IBM SPSS

Statistics 26(IBM, USA) 프로그램을 활용한 일당증체량 예측 모델에 대한 다중선형회귀분석을 진행하였으며, 모델의 유의확률 $p<0.05$인 모델을 찾아 해당 모델을 일당증체량 예측 모델로 판단하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 멀티센서 모듈의 CFD 분석

멀티센서 모듈 내부의 공기 유동 및 온도 분포를 분석한 결과, 다음과 같은 공기 유동 형태와 온도 분포를 확인할 수 있었다(Table 9, 10).

Table 9 The distribution of the airflow vector over the entire volume

Value Range [cm/s]	Percent Volume
0.00 – 92.68	87.99
92.68 – 185.36	8.06
185.36 – 278.04	2.22
278.04 – 370.73	0.82
370.73 – 463.41	0.56
463.41 – 556.09	0.20
556.09 – 648.77	0.04
648.77 – 741.45	0.03
741.45 – 834.13	0.02
834.13 – 926.81	0.02
926.81 – 1019.49	0.01
1019.49 – 1112.18	0.01
1112.18 – 1853.63	0.02
Total	100

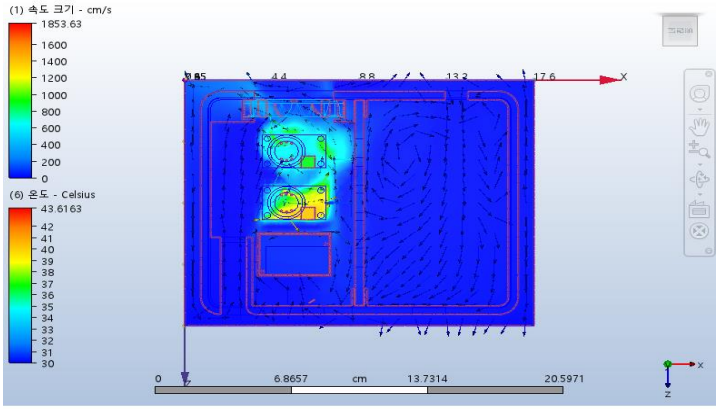
Table 10 The distribution of temperature over the entire volume

Value Range [℃]	Percent Volume
30 – 30.68	89.86
30.68 – 31.36	5.22
31.36 – 32.04	1.85
32.04 – 32.72	0.80
32.72 – 33.4	0.47
33.4 – 34.08	0.37
34.08 – 34.77	0.26
34.77 – 35.45	0.15
35.45 – 36.13	0.10
36.13 – 36.81	0.10
36.81 – 37.49	0.06
37.49 – 38.17	0.08
38.17 – 38.85	0.06
38.85 – 39.53	0.05
39.53 – 40.21	0.10
40.21 – 40.89	0.17
40.89 – 41.57	0.04
41.57 – 42.25	0.03
42.25 – 42.94	0.04
42.94 – 43.62	0.20
Total	100

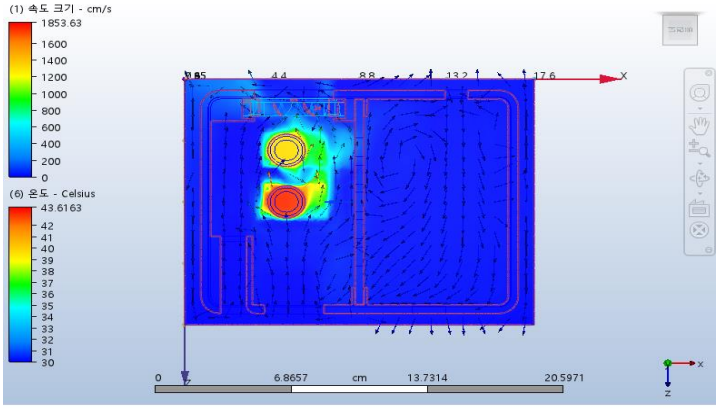
CFD 분석 결과, 내부 공기 중 30~30.68도 범위 온도를 갖는 공기가 차지하는 비율이 약 89.86%로, 연소 센서부를 제외한 모든

공기가 외기 온도를 따라가는 것을 확인할 수 있었다. 유속 분포의 경우, 온도 분포와 유사하게 0~92.68cm/s의 유속이 약 87.99%를 차지하여, 대부분의 유체 흐름이 해당 범위에 분포하였음을 확인할 수 있다.

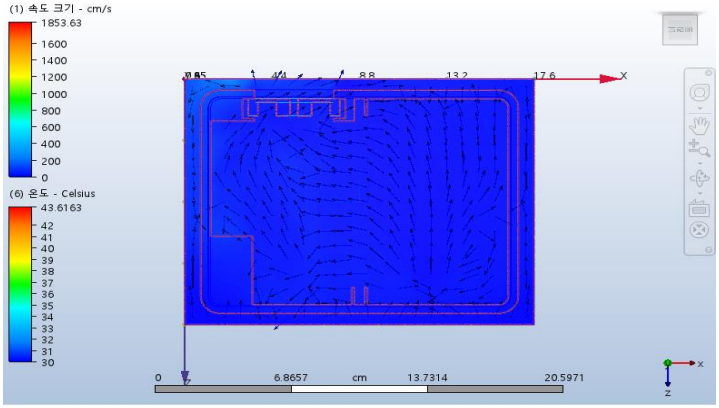
또한 온도 센서가 인클로저 내부에 설계된 위치에서 외기의 온도를 정확하게 읽어낼 수 있는지, 가스 센서 내 연소부에서의 공기가 그 외의 센서에 영향을 주는지, 그리고 전체적인 공기 흐름이 유입구에서 배출구 방향의 일방향성으로 나타나는지를 확인하였다. 이는 각 부분이 위치해 있는 지점을 포함하는 절단면에서 바라보았을 때의 온도 분포와 유속 분포 및 방향성을 확인하는 방식을 통해 이루어졌다(Fig. 17).



(a)



(b)



(c)

Figure 17 CFD analysis results of airflow and temperature distribution in the complex environment sensor module; (a) temperature sensor, (b) gas sensor, and (c) top of the enclosure

먼저 Fig. 17(a)에서의 결과로부터, 온도 센서부에서의 평균 표면 온도가 30.43℃로 나타나, 해당 위치에 온도 센서를 두었을 때 측정되는 외기 온도와 실제 온도가 약 1.44%의 오차율을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 기존에 설계한 온도 센서 위치에 온도 센서를 두었을 때, 정확한 외기 온도 데이터를 받아올 수 있다고 결론지을 수 있다.

Fig. 17(b)의 경우, 가스 센서에 의해 발생하는 열은 주변 공기의 온도를 매우 증가시키지만, 온도 측정을 비롯한 다른 센서의 측정에는 영향을 크게 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다. 다만 가까이 놓인 두 가스 센서에 의해 형성된 고온의 공기가 서로 섞이는 공기 흐름 형태를 보이기 때문에, 두 연소 센서의 정렬을 변경하는 등의 변형을 통해 이를 해소할 필요가 있다.

Fig. 17(c)의 경우, 멀티센서 모듈에서 목표로 하는 내부 공기 흐름은 전면에서 후면으로의 일방향성 흐름이지만, 센서 모듈 상층부의 경우 오히려 전면부로 공기가 빠져나가는 흐름을 관찰할 수 있다. 따라서 baffle 형상의 도입 등의 조치를 통해 이러한 흐름을 차단할 필요가 있다.

해당 CFD 분석 결과를 통해 종합적으로 판단하였을 때, 개발된 멀티센서 모듈의 인클로저 및 센서 배치는 균일한 내부 유속과 온도 분포를 보장하여, 육계사 내부 환경을 측정하는 데 충분히 활용이 가능하다는 점을 시사한다. 추가적으로 연소 방식의

이산화탄소와 황화수소 센서의 배치를 수정하거나, 상층부에 추가적인 구조체의 도입을 통해, 올바르지 않은 공기 흐름을 차단하여 그 균일성을 확보할 수 있다.

4.2. 육계사 내부 환경 계측치 및 일당증체량 예측 모델

해당 멀티센서 모듈을 활용하여 육계의 사육 베드에서 생성되는 잠열 등을, 두 위치에서의 센서값의 편차를 산출하여 예측을 진행하였다.

먼저 측정 기간동안 두 지점에서 각각 측정된 환경 데이터들은 다음 그래프들과 같다(Fig. 18~25).

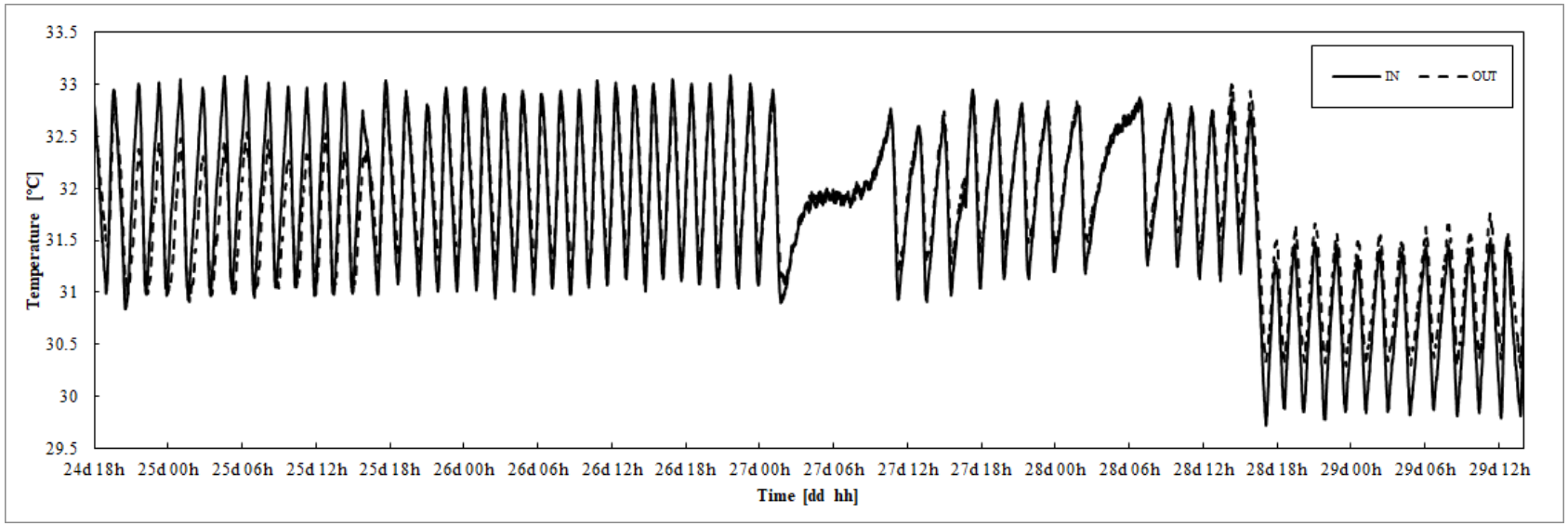


Figure 18 Measured temperature data from position IN and OUT

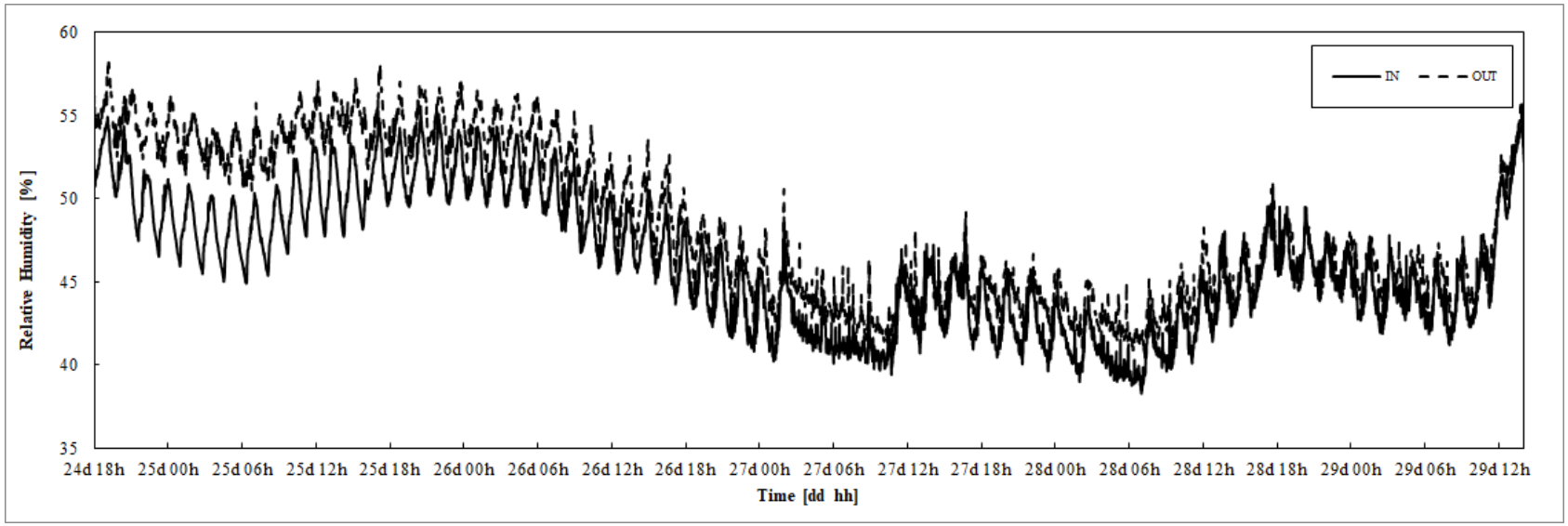


Figure 19 Measured relative humidity data from position IN and OUT

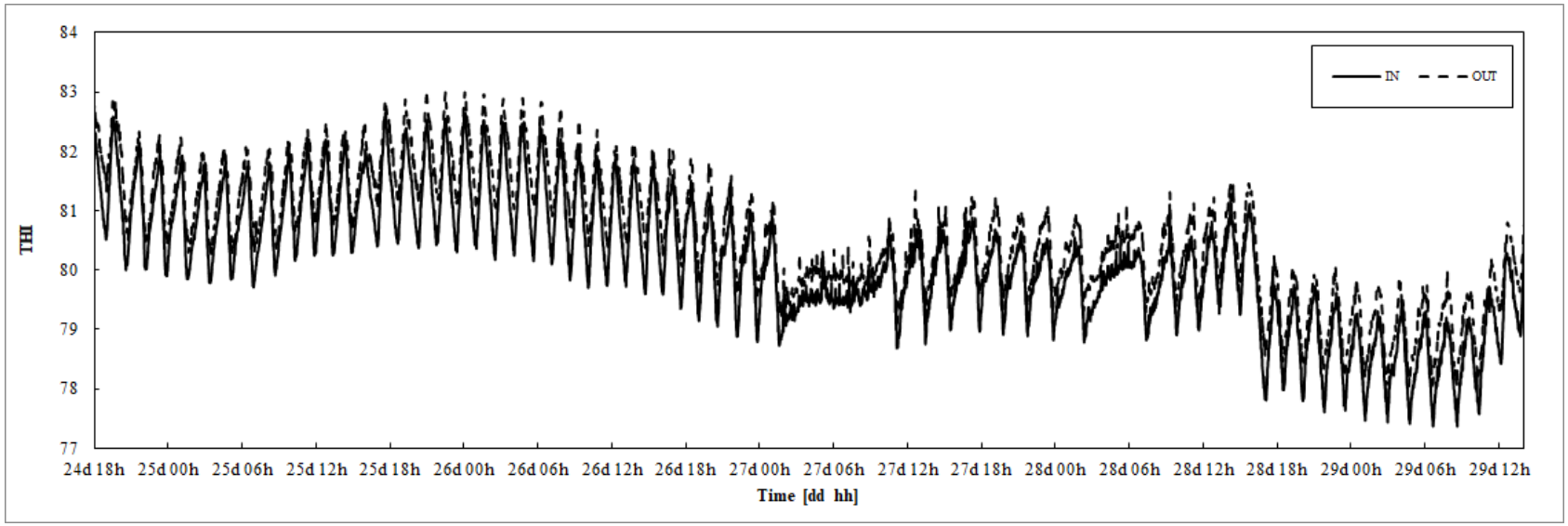


Figure 20 Measured THI data from position IN and OUT

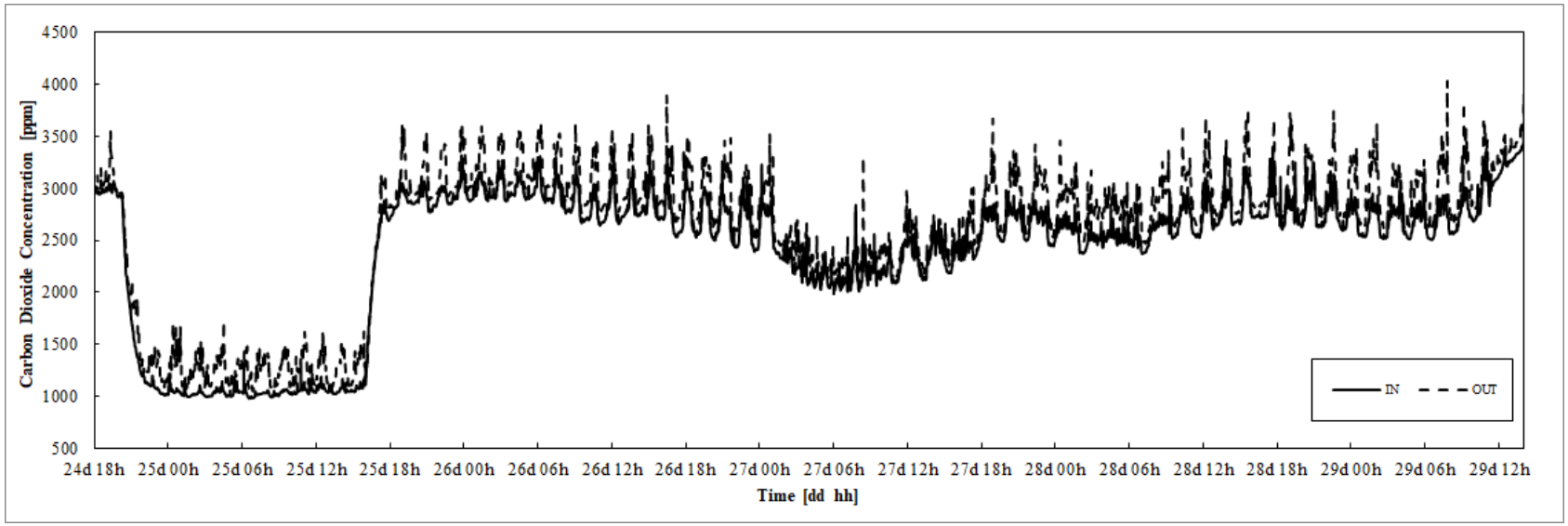


Figure 21 Measured carbon dioxide concentration data from position IN and OUT

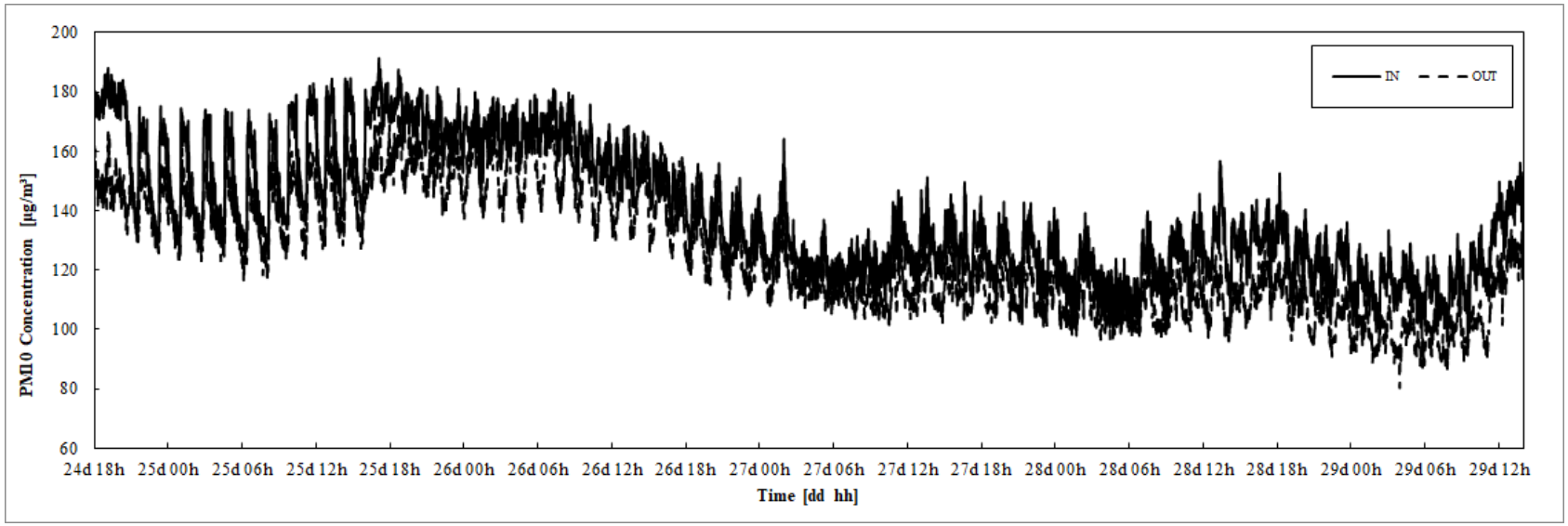


Figure 22 Measured PM10 concentration data from position IN and OUT

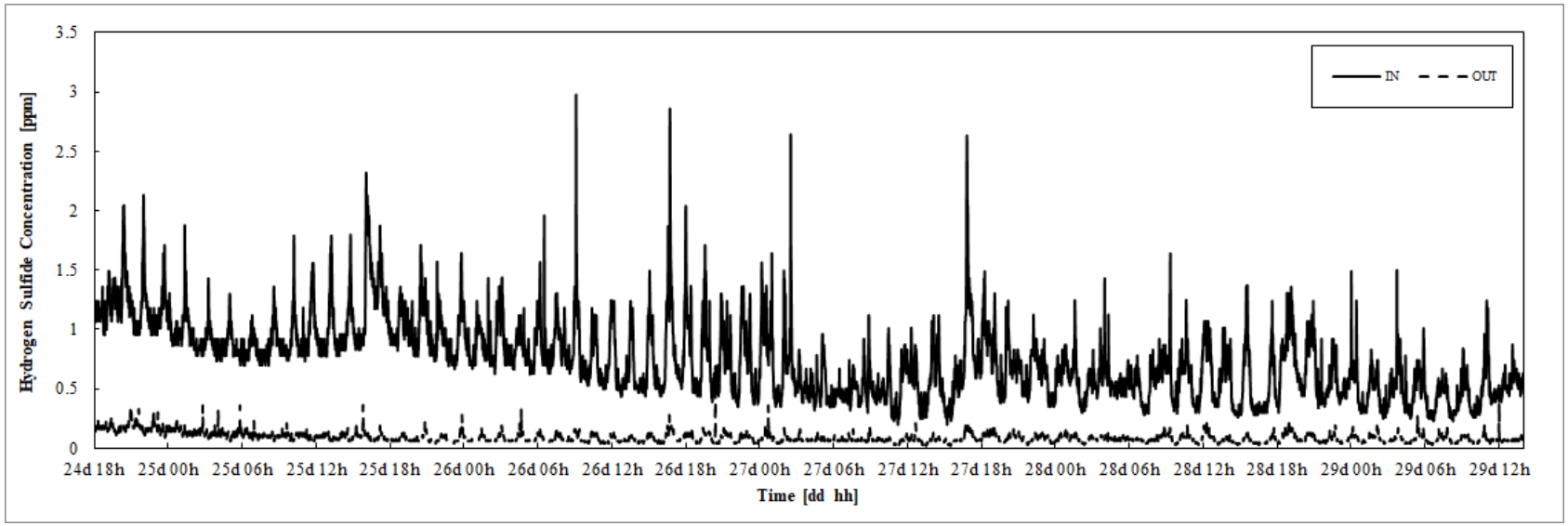


Figure 23 Measured hydrogen sulfide data from position IN and OUT

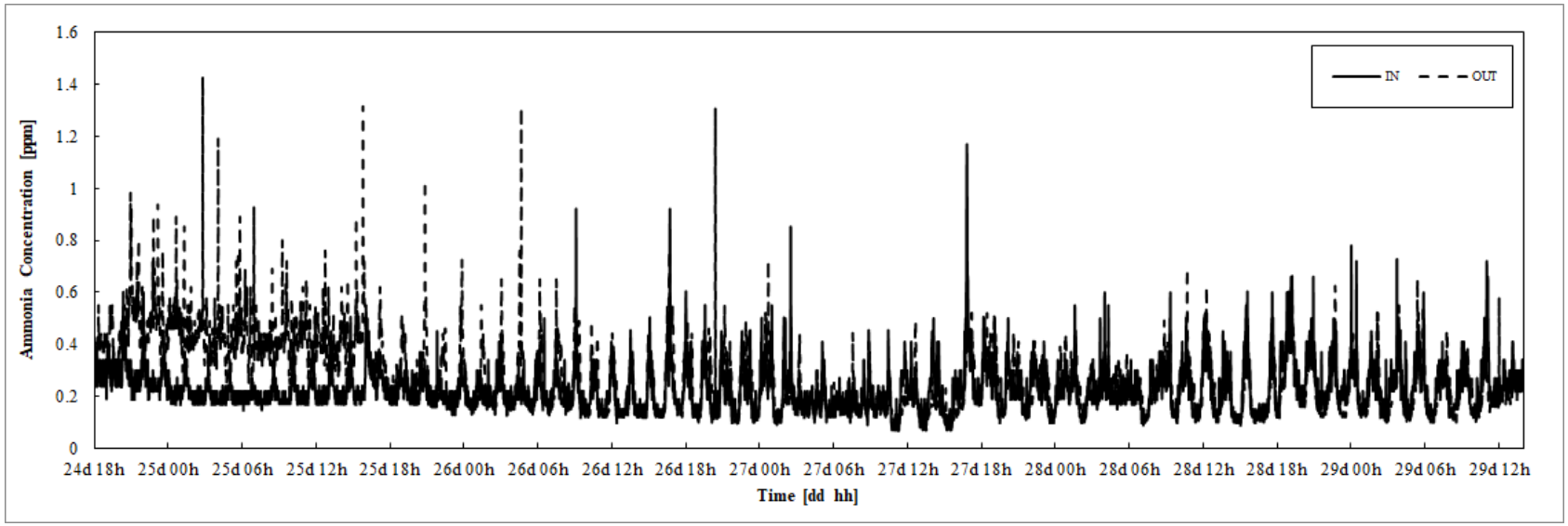


Figure 24 Measured ammonia data from position IN and OUT

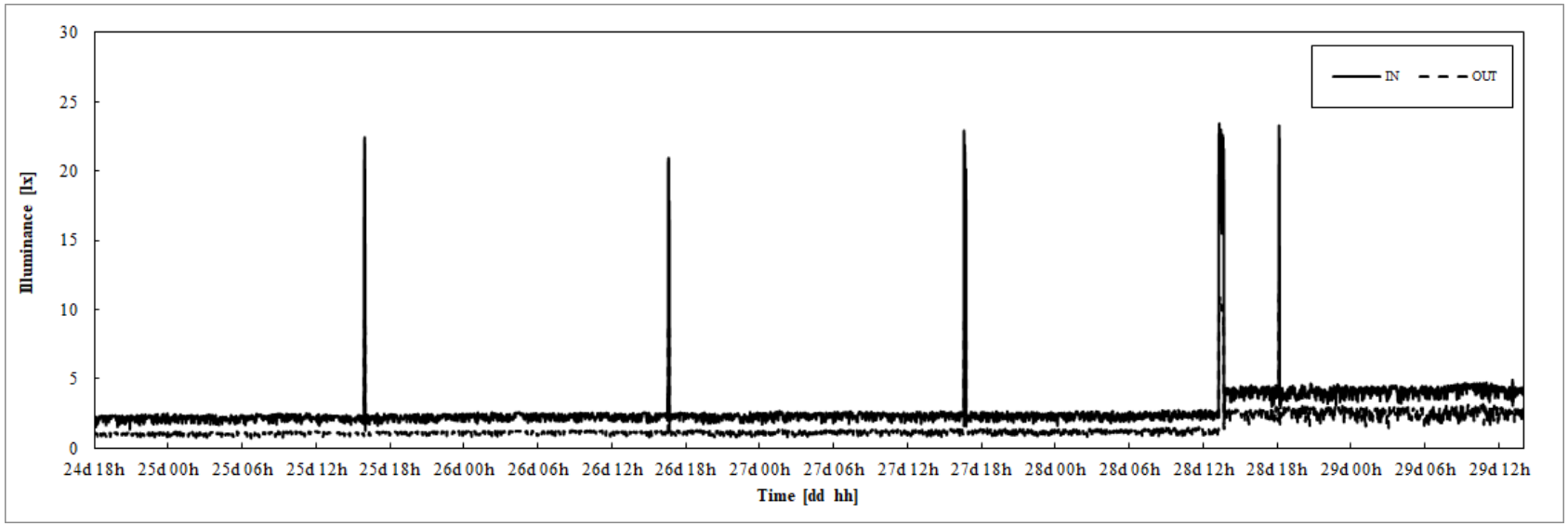


Figure 25 Measured illuminance data from position IN and OUT

우선적으로, 측정된 THI 값의 범위를 통해 사육 실험 환경의 작업자 및 육계에 대한 열 스트레스 환경적합도를 확인할 수 있다. IN 과 OUT 에서의 THI 값은 각각 80.18±1.08, 80.62±1.06 으로 나타나, 작업자와 육계 모두에게 고온의 열 스트레스 환경이 주어지는 것을 확인할 수 있다.

또한 일당증체량 예측 모델을 수립하기 위해 활용할 변수를 확정하였다. 측정된 데이터를 통해, 황화수소와 암모니아, 그리고 조도의 경우 큰 편차가 나타나지 않았으며, THI 의 경우 온도와 습도에 종속적인 변수이기 때문에, 해당 데이터셋을 제외한 온도, 상대습도, 이산화탄소, 그리고 분진 농도의 일령별 평균값과 최댓값을 산출하여, 이를 활용한 SPSS 다중선형회귀분석을 진행하였고, 해당 회귀분석에 대한 결과는 다음과 같다(Table 11~13).

Table 11 Model Summary of broiler body weight gain

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.947[a]	0.897	0.828	5.76909

a. Predictors: (Constant), CO2_MAX, T_MAX

Table 12 ANOVA Analysis of broiler body weight gain

ANOVA[a]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	865.186	2	432.593	12.998	.033[b]
	Residual	99.847	3	33.282		
	Total	965.033	5			

a. Dependent Variable: WEIGHTGAIN

b. Predictors: (Constant), CO2_MAX, T_MAX

Table 13 Coefficients of broiler body weight gain prediction model

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	−7.405	16.540		−0.448	0.685
	T_MAX	31.215	33.587	0.182	0.929	0.421
	CO2_MAX	0.048	0.011	0.874	4.467	0.021

a. Dependent Variable: WEIGHTGAIN

다중선형회귀분석 결과, 온도의 최댓값과 이산화탄소 농도의 최댓값으로 이루어진 회귀모형의 $p<0.05$ 로 나타나, 해당 회귀모델이 일당증체량을 예측하는 모델로써 활용하기 적합하다는 결론을 지을 수 있었다. 이때의 비표준화 계수값에 의해, 사육베드에서의 일일 온도 및 이산화탄소 최대 발생량 ΔT_{max} 와 ΔCO_2

$_{max}$ 에 대한 일당증체량 DBWG 는 다음과 같은 수식으로 나타나게 된다.

$$\mathrm{DBWG} = 31.215 \times \Delta \mathrm{T}_{max} + 0.048 \times \Delta \mathrm{CO}_{2\,max} - 7.405 \quad (13)$$

where

DBWG = daily body weight gain, g

ΔT_{max} = maximum temperature per day, ℃

$\Delta CO_{2\,max}$ = maximum carbon dioxide per day, ppm

이때 실제 일당증체량 측정값과 예측값 간의 R^2 값은 0.8965 로, 해당 예측 모델이 상당히 정확하게 일당증체량 값을 예측한다고 볼 수 있으며, 육계사의 내부 주요 환경 데이터의 조합을 통해 육계의 일당증체량을 어림할 수 있다고 결론지을 수 있다(Fig. 26).

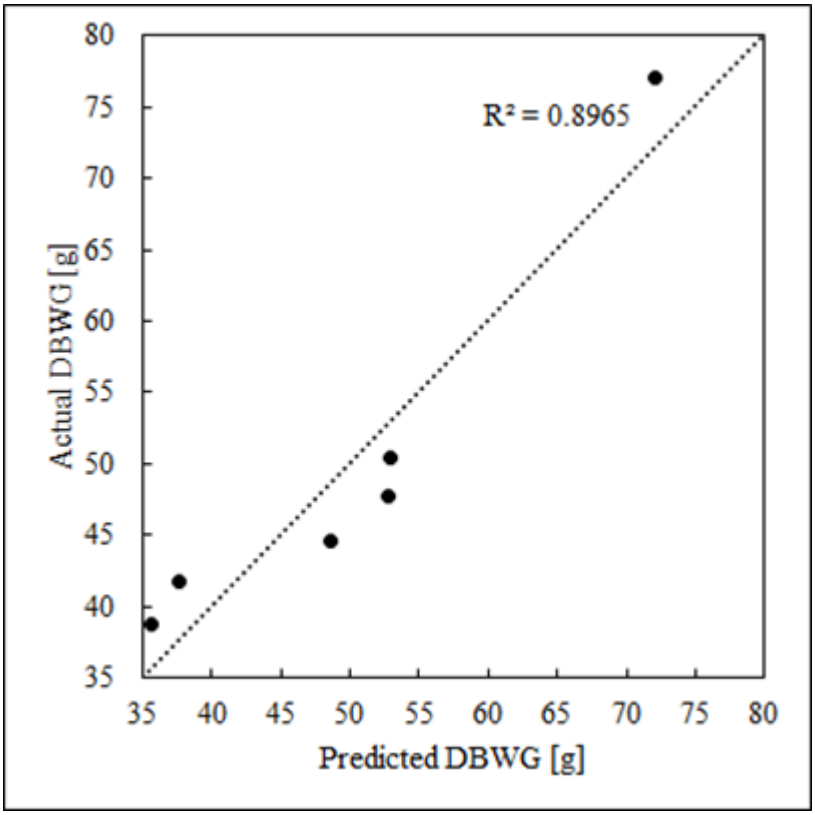


Figure 26 Comparison on predicted DBWG and actual DBWG

Lee et al. (2015)의 연구에서 제시된 비육돈의 비율일당증체량의 모델식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\mathrm{DBWG} \\ &= -0.0014 \times \mathrm{T}_{avg} + 0.0002 \times \mathrm{T}_{max} - 0.0001 \times \mathrm{RH}_{avg} \\ &+ 0.0003 \times \mathrm{RH}_{max} - 0.0053 \times \mathrm{wv}_{max} - 0.0225 \end{aligned} \quad (14)$$

where

DBWG = daily body weight gain, g

T_{avg} = average temperature per day, ℃

T_{max} = maximum temperature per day, ℃

RH_{avg} = average relative humidity per day

RH_{max} = maximum relative humidity per day

wv_{max} = maximum wind velocity per day, m/s

본 연구에서 수립된 육계의 일당증체량 모델식은, 일당증체량을 각 개체의 체중으로 나눈 비율일당증체량 모델식과 유사하게, 일별 주요 환경 변수들에 대한 다중선형회귀모델의 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 허나 해당 모델은 이산화탄소에 대한 변수를 포함하지 않고, 습도와 풍속에 대한 변수를 포함하여, 이러한 일당증체량에 대한 예측 모델은 축종에 따라, 그리고 사육 환경에서 측정된 데이터셋의 종류에 따라 차이가 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

따라서 최종적으로 본 연구에서는 멀티센서 모듈에서 측정되는 건구 온도와 상대 습도를 통해 THI 값을 산출해내어, 작업자와 육계에 대한 육계사의 열 스트레스 환경 적합도를 파악할 수 있었으며, 내부 환경 데이터에 대한 육계의 일당증체량을 예측하는 다중선형회귀모델을 수립하여, 직접 육계의 무게를 측정하지 않고도 육계의 일당증체량을 예측할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 스마트 육계사 모니터링을 위해 필요한 센서 노드를 구성하기 위해, 양계용 멀티센서 모듈을 설계 및 구현하여, 해당 센서 구성이 환경을 계측하는데 있어서 적합한지를 CFD 분석을 통하여 확인하였으며, 이를 활용한 실증적인 환경 계측을 통해 육계사 내부의 열 스트레스 환경 적합도를 파악하고 육계의 일당증체량을 예측할 수 있었다. 설계된 멀티센서 모듈은 저가형 센서를 활용한 일체형 센서 모듈로, 스마트 육계사 내부 환경을 실시간으로 모니터링하는 시스템을 구성하는데 큰 도움을 주리라 판단된다. 또한 육계 사육부의 양 끝 두 지점에서 측정된 데이터를 통해 육계사 내부의 열 스트레스 환경 적합도를 파악할 수 있었으며, 해당 데이터를 활용하여 산출된 육계 사육 베드 내 오염원의 발생량과 일당증체량 간의 다중선형회귀분석을 통해, 육계의 일당증체량을 예측할 수 있는 모델을 수립하였다. 해당 모델은 $p<0.05$의 유의 확률을 나타내어, 일별 최대 온도 및 이산화탄소 발생량의 산출을 통해, 육계의 일당증체량을 어림할 수 있다는 것을 확인하였다. 따라서 육계사 내부의 THI를 산출해내는 수식과 일당증체량에 대한 모델식을 도입하여 멀티센서 모듈에 적용시킴으로써, 육계사 내에서의 멀티센서 통합과 함께 기초적인 센서 융합 기술의 도입이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

6. 참고 문헌

Ahsan, A., & Ahmed, B. (2012). Identification of the type of agriculture suited for application of wireless sensor networks. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, *12*(12).

Alonso, R. S., Sittón-Candanedo, I., García, Ó., Prieto, J., & Rodríguez-González, S. (2020). An intelligent Edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario. *Ad Hoc Networks*, *98*, 102047.

Ammad-Uddin, M., Ayaz, M., Aggoune, E.-H., & Sajjad, M. (2014). Wireless sensor network: A complete solution for poultry farming. 2014 IEEE 2nd International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT),

ASHRAE. (2017). Fundamentals Handbook. SI edn. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*.

Aviagen. (2014). ROSS Broiler management handbook. In (pp. 19). Huntsville, AL.

Beker, A., Vanhooser, S., Swartzlander, J., & Teeter, R. (2004). Atmospheric ammonia concentration effects on broiler growth and performance. *Journal of Applied Poultry Research*, *13*(1), 5-9.

Berckmans, D. (2017). General introduction to precision

livestock farming. *Animal Frontiers*, *7*(1), 6-11.

Blank, S., Föhst, T., & Berns, K. (2012). A biologically motivated approach towards modular and robust low-level sensor fusion for application in agricultural machinery design. *Computers and electronics in agriculture*, *89*, 10-17.

Bravo, C., Moshou, D., Oberti, R., West, J., McCartney, A., Bodria, L., & Ramon, H. (2004). Foliar disease detection in the field using optical sensor fusion.

Brown-Brandl, T., Beck, M., Schulte, D., Parkhurst, A., & DeShazer, J. (1997). Temperature humidity index for growing tom turkeys. *Transactions of the ASAE*, *40*(1), 203-209.

Buffington, D., Collazo-Arocho, A., Canton, G., Pitt, D., Thatcher, W., & Collier, R. (1981). Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. *Transactions of the ASAE*, *24*(3), 711-0714.

Chen, Q., W Saatkamp, H., Cortenbach, J., & Jin, W. (2020). Comparison of Chinese broiler production systems in economic performance and animal welfare. *Animals*, *10*(3), 491.

Dai, X.-R., & Blanes-Vidal, V. (2013). Emissions of ammonia, carbon dioxide, and hydrogen sulfide from swine wastewater during and after acidification treatment: Effect of pH, mixing and aeration. *Journal of environmental management*, *115*, 147-154.

Donham, K. J., Cumro, D., & Reynolds, S. (2002). Synergistic effects of dust and ammonia on the occupational health effects of poultry production workers. *Journal of agromedicine*, *8*(2), 57–76.

Elmenreich, W. (2002). An introduction to sensor fusion. *Vienna University of Technology, Austria*, *502*, 1–28.

Ensminger, M. E., & Oldfield, J. E. (1990). *Feeds & nutrition*.

Farag, M. R., & Alagawany, M. (2018). Physiological alterations of poultry to the high environmental temperature. *Journal of thermal biology*, *76*, 101–106.

Gates, R. S., Zhang, H., Colliver, D. G., & Overhults, D. G. (1995). Regional variation in temperature humidity index for poultry housing. *Transactions of the ASAE*, *38*(1), 197–205.

Gerritzen, M., Lambooij, B., Reimert, H., Stegeman, A., & Spruijt, B. (2007). A note on behaviour of poultry exposed to increasing carbon dioxide concentrations. *Applied Animal Behaviour Science*, *108*(1–2), 179–185.

Gerritzen, M., Lambooij, E., Hillebrand, S., Lankhaar, J., & Pieterse, C. (2000). Behavioral responses of broilers to different gaseous atmospheres. *Poultry science*, *79*(6), 928–933.

Gorczyca, M. T., & Gebremedhin, K. G. (2020). Ranking of

environmental heat stressors for dairy cows using machine learning algorithms. *Computers and electronics in agriculture*, *168*, 105124.

Habeeb, A. A., Gad, A. E., & Atta, M. A. (2018). Temperature-humidity indices as indicators to heat stress of climatic conditions with relation to production and reproduction of farm animals. *Int J Biotechnol Recent Adv*, *1*(1), 35-50.

Hubbard, K., Stooksbury, D., Hahn, G., & Mader, T. (1999). A climatological perspective on feedlot cattle performance and mortality related to the temperature-humidity index. *Journal of production agriculture*, *12*(4), 650-653.

Ignat, T., Alchanatis, V., & Schmilovitch, Z. e. (2014). Maturity prediction of intact bell peppers by sensor fusion. *Computers and electronics in agriculture*, *104*, 9-17.

Khot, L., Tang, L., Steward, B., & Han, S. (2008). Sensor fusion for improving the estimation of roll and pitch for an agricultural sprayer. *Biosystems engineering*, *101*(1), 13-20.

Kim, K. Y., Ko, H. J., Kim, H. T., Kim, Y. S., Roh, Y. M., Lee, C. M., & Kim, C. N. (2008). Quantification of ammonia and hydrogen sulfide emitted from pig buildings in Korea. *Journal of environmental management*, *88*(2), 195-202.

Kim, M.-J., Mo, C., Kim, H. T., Cho, B.-K., Hong, S.-J., Lee, D. H., Shin, C.-S., Jang, K. J., Kim, Y.-H., & Baek, I. (2021). Research and Technology Trend Analysis by Big Data-Based Smart Livestock Technology: a Review. *Journal of Biosystems Engineering*, 1-13.

Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, *90*, 100315.

Lee, W., Hwang, S., & Kim, J. (2015). Analysis on Proportional Daily Weight Increase of Swine Using Machine Learning. Proceedings of the Korean Institute of Information and Commucation Sciences Conference,

Li, H., Xin, H., Burns, R. T., Roberts, S. A., & Bregendahl, K. (2009). Effects of Dietary Modification on Laying Hens in High-Rise Houses: Part I-Emissions of Ammonia, Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide. Livestock Environment VIII, 31 August-4 September 2008, Iguassu Falls, Brazil,

MAFRA. (2021). Major statistics on agriculture, livestock and food. In.

Mahbub, M. (2020). A smart farming concept based on smart embedded electronics, internet of things and

wireless sensor network. *Internet of Things*, *9*, 100161.

Meluzzi, A., & Sirri, F. (2009). Welfare of broiler chickens. *Italian Journal of Animal Science*, *8*(sup1), 161-173.

Miles, D., Branton, S., & Lott, B. (2004). Atmospheric ammonia is detrimental to the performance of modern commercial broilers. *Poultry science*, *83*(10), 1650-1654.

Neghab, M., Mirzaei, A., Shouroki, F. K., Jahangiri, M., Zare, M., & Yousefinejad, S. (2018). Ventilatory disorders associated with occupational inhalation exposure to nitrogen trihydride (ammonia). *Industrial health*, *56*(5), 427-435.

Ni, J.-Q., Chai, L., Chen, L., Bogan, B. W., Wang, K., Cortus, E. L., Heber, A. J., Lim, T.-T., & Diehl, C. A. (2012). Characteristics of ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and particulate matter concentrations in high-rise and manure-belt layer hen houses. *Atmospheric Environment*, *57*, 165-174.

NIAS. (2016). *Report of development of livestock adaption tool*

for climate change.

NRC. (1971). *A guide to environmental research on animals*. National Academies.

Pierce, F., & Elliott, T. (2008). Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in

Eastern Washington. *Computers and electronics in agriculture*, *61*(1), 32-43.

Purswell, J. L., Dozier III, W. A., Olanrewaju, H. A., Davis, J. D., Xin, H., & Gates, R. S. (2012). Effect of temperature-humidity index on live performance in broiler chickens grown from 49 to 63 days of age. 2012 IX International Livestock Environment Symposium (ILES IX),

Ramli, M. R., Daely, P. T., Kim, D.-S., & Lee, J. M. (2020). IoT-based adaptive network mechanism for reliable smart farm system. *Computers and Electronics in Agriculture*, *170*, 105287.

Srbinovska, M., Gavrovski, C., Dimcev, V., Krkoleva, A., & Borozan, V. (2015). Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *Journal of cleaner production*, *88*, 297-307.

Tao, X., & Xin, H. (2003). Temperature-humidity-velocity index for market-size broilers. 2003 ASAE Annual Meeting,

Thom, E. (1958). Cooling degree: day air conditioning, heating, and ventilation. *Transactions of the American Society*, *55*, 65-72.

Viegas, S., Faísca, V. M., Dias, H., Clérigo, A., Carolino, E., & Viegas, C. (2013). Occupational exposure to poultry dust and effects on the respiratory system in

workers. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, *76*(4-5), 230-239.

Xin, H., DeShazer, J. A., & Beck, M. M. (1992). Responses of pre-fasted growing turkeys to acute heat exposure. *Transactions of the ASAE*, *35*(1), 315-318.

Xiong, Y., Meng, Q.-S., Jie, G., Tang, X.-F., & Zhang, H.-F. (2017). Effects of relative humidity on animal health and welfare. *Journal of integrative agriculture*, *16*(8), 1653-1658.

Zhao, L., Hadlocon, L. J. S., Manuzon, R. B., Darr, M. J., Keener, H. M., Heber, A. J., & Ni, J. (2016). Ammonia concentrations and emission rates at a commercial poultry manure composting facility. *Biosystems Engineering*, *150*, 69-78.

Zulovich, J., & DeShazer, J. (1990). Estimating egg production declines at high environmental temperatures and humidities. *Paper-American Society of Agricultural Engineers*(90-4021).

Abstract

Development of Multi-sensor Module for Broiler and Data Application

Inho Hwang
Biosystems Engineering
The Graduate School
Seoul National University

As the global COVID-19 pandemic situation has been continued, the food consumption at home has increased as well. As a result, the consumption of chicken has also increased significantly recently. In order to breed broilers efficiently, the development of precision livestock farming technology using information and communications technology is being carried out worldwide, in the form of smart broiler house. In order to adjust precision livestock farming to broiler production, first of all, it is necessary to develop a system that can monitor the internal environment in real time along with semi-automation of production facilities. This research aims to develop a system that can verify data measurement on the web through real-time environmental data acquisition and Modbus communication, by developing and utilizing a multi-sensor module that can be used

for real-time monitoring within the smart broiler house. The multi-sensor module was built as mounted in the customized plastic enclosure using a 3D printer, to use the sensors efficiently. By checking air flow and temperature distribution inside the multi-sensor module with computational fluid dynamics analysis, the sensor data independence and accuracy were verified, ensuring the performance of the developed sensor module. Multi-sensor integration was used to calculate temperature humidity index values which represent the thermal stress environment of the smart broiler house. Based on the environmental data measured at both ends of the breeding unit, a predictive model of broilers' daily body weight gain was created by a multi-linear regression. As a result, it was confirmed that the designed multi-sensor module could guarantee the independence and accuracy of the sensors' data, and thus could be used without any problem in measuring environmental data. Temperature humidity values measured at two different points were 80.18±1.08 and 80.62±1.06, respectively, indicating that both workers and broilers were under high-temperature thermal stress. The daily body weight gain prediction model established through multi-linear regression was appeared to be the proportional sum of the maximum daily temperature difference and the maximum daily carbon dioxide generation from the breeding bed. The R-squared values of the model was 0.8965, indicating that the prediction model had a high accurate prediction performance.

Keywords : Broiler, Multi-sensor, Sensor Integration,

Computational Fluid Dynamics, Daily Body Weight Gain, Multi-linear Regression

Student number : 2020-22274