



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](#)

공학석사 학위논문

스마트 육계사를 위한
통합 센서 모듈 개발 및 성능 평가

Development and Evaluation of Integrated
Sensor Module for Smart Broiler House

2023년 2월

서울대학교 대학원

바이오시스템공학과 바이오시스템공학전공

최원준

스마트 육계사를 위한 통합 센서 모듈 개발 및 성능 평가

지도 교수 이 중 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2023 년 2 월

서울대학교 대학원

바이오시스템공학과 바이오시스템공학전공

최 원 준

최원준의 공학석사 학위논문을 인준함

2023 년 2 월

위 원 장 김 학 진 (인)

부위원장 이 중 용 (인)

위 원 양 승 환 (인)

국 문 초 록

최근 전세계적으로 닭고기 소비가 크게 늘어나고 있다. 효율적으로 닭고기를 생산하기 위하여, 전세계적으로 육계사에 정보통신기술을 활용한 정밀축산 기술을 적용한 스마트 육계사 기술 개발이 이루어지고 있다. 스마트 내부 환경을 실시간으로 측정하고 센서들과 이 정보를 이용하여 생산 시설을 자동화하거나 제어할 수 있는 제어 시스템으로 구성된다. 스마트 육계사에서 사용되는 환경 측정용 센서는 온도, 습도, 조도, 분진, 유해 가스 센서 등이다. 그러나 다양한 센서를 각각 설치할 경우 설치 장소의 제한이나, 높은 설치 비용, 센서 노드 점검, 배터리 교체 등의 센서 관리의 어려움 등의 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 육계사용 환경 정보 수집용 센서 모듈이 필요하다.

본 연구에서는 스마트 육계사에 필요한 다양한 센서들을 하나로 통합한 형태의 센서 모듈인 통합 센서 모듈을 설계하고 제작하였다. 센서 모듈은 육계사 내부 환경에서 내구성을 확보하고 측정값이 정확할 수 있도록 설계되었다. 제작된 센서 모듈의 동작과 계측 특성을 확인하기 위한 검증 시스템을 개발하고 성능평가가 이루어졌다. 계측의 정확도는 비교 계측기의 측정값과 센서 모듈의 측정값을 비교하여 평가하였다. 모든 경우

개별적으로 사용했을 때 비하여 RMSE 값이 증가하여 정확도가 소폭 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 하지만 여전히 $\pm 5\%$ 이내로 충분히 사용할 수 있다고 판단하였다. 이 오차는 hysteresis 에 의하여 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 Hysteresis 를 최소화하기 위해 센서 모듈 enclosure 의 공기가 외부와 교환이 좀더 원활 하게 이루어질 수 있도록 개선하고 hysteresis 를 보정할 수 있는 보정식을 활용할 수 있을 것이다. 추후 이러한 hysteresis 를 최소화하는 방법에 대한 연구와 실증 실험 이 이루어진다면 더욱 정확한 성능으로 정밀 농업기술과 스마트 농업 기술 향상에 기여할 것이다.

주요어 : 스마트 육계사, 통합 센서 모듈, 성능 평가

학 번 : 2021-23657

목 차

1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적과 범위	4
2. 문헌조사	5
2.1 스마트 육계사	5
2.2 모니터링 시스템	6
2.3 육계사 내 환경변수	10
2.4 센서 성능 평가	12
3. 연구 내용 및 방법	15
3.1 센서 모듈의 요구 조건	15
3.2 통합 센서 모듈 제작	17
3.3 통합 센서 모듈 성능 실험	30
3.4 CFD를 활용한 내부 유동 분석	33
4. 결과 및 고찰	34
4.1 통합 센서 모듈 성능 실험 결과	34
4.2 CFD 시뮬레이션 결과	45

5. 결론.....	48
6.참고문헌.....	49

1.서론

1.1. 연구 배경 및 필요성

닭고기는 인간의 주요 식량 자원 중 하나이며 그 소모량은 매해 증가하고 있다. 국내육계 생산 규모는 꾸준히 증가하여 사육 수 5만 이상을 보유하고 있는 육계생산 시설은 2021년 전년 대비 6.2% 증가하였으며(통계청, 2021년), 육계 산업은 축산업의 주요 사업으로 자리 잡고 있다. 증가하는 수요에 따라 육계산업의 규모도 자라고 있지만 최근에는 조류 인플루엔자, 동물 복지, 환경오염과 같은 여러 문제점들이 대두되고 있다.

이러한 문제에 대응하기 위해 나온 대안 중 하나가 정밀축산이다. 정밀축산이란 가축, 생산물, 농경환경 등을 실시간으로 모니터링하는 기술을 활용하여 다양한 정보를 제공하고 농가의 경영결정에 도움을 주거나 자동화된 시스템을 말한다. 지속적인 모니터링을 통해 실시간으로 문제가 발생할 때 신속하고 최적화된 개입을 가능하게 하여 동물복지와 생산성을 확보할 수 있게 된다.

정밀 축산을 위해 필요한 것이 센서 네트워크 기술이다. 센서 네트워크란 소형 전원 장치 그룹과 무선 또는 유선 네트워크 인프라로 구성되어 산업

시설, 농장, 병원 등 다양한 환경의 조건들을 측정하여 기록, 분석을 위해 연결된 네트워크에 데이터를 전송하는 시스템을 일컫는다. 센서 네트워크를 통하여 얻은 다양한 데이터를 토대로 사람과 AI를 활용한 최적의 판단을 하여 효율성을 증가하고 생산성을 확보할 수 있게 된다.

스마트 육계사를 위한 센서 네트워크를 구성하기 위해서는 온도, 습도, 조도, 분진, 유해 가스 센서 등 다양한 센서를 필요로 한다. 그러나 다양한 센서를 각각 설치할 경우 설치 장소의 제한이나, 높은 설치 비용, 센서 노드 점검, 배터리 교체 등의 센서 관리의 어려움 등의 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 육계사 환경 정보의 수집에 필요한 다양한 센서들의 특성을 고려하여 하나의 센서 모듈로 통합된 센서 모듈이 필요하다. 통합 센서 모듈은 각기 센서들을 따로 설치하는 것에 비해 비용, 내구성, 설치 및 관리의 용이성 등 다양한 장점을 갖게 된다. 이에 더해 통합 센서 모듈을 고정위치에 설치하는 것이 아니라 이동형 대차에 장착함으로써 더욱 적은 센서 모듈로 더 넓은 범위의 환경데이터를 측정할 수 있도록 하고자 한다.

육계사 내부는 온도와 습도가 높고 일반적인 농작물 재배환경과 달리 분진이 많으며 암모니아와 같은 부식성 가스의 농도가 높은 환경으로 센서들이 고장이 나기 쉬운 환경이다. 통상적인 농작업 환경에서 잘

작동하던 센서 모듈도 육계사 내부에서는 고장을 자주 일으키거나 정상적으로 작동하지 않을 수 있다. 이를 방지하기 위해서 센서가 분진과 부식 가스로부터의 노출을 최소화해야 한다. 하지만 노출을 과하게 억제할 경우 센서의 측정에 영향을 줄 수 있기 때문에 정확성과 내구성의 적절한 균형을 찾아낼 필요가 있다.

1.2. 연구 목적과 범위

본 연구의 목적은 스마트 육계사에 필요한 환경측정용 센서모듈 개발이다. 센서 모듈은 고정된 상태 또는 이동 대차에 장착된 상태에서 사용할 수 있도록 제작되며 구체적인 목적은 다음과 같다.

첫째, 스마트 육계사에 필요한 다양한 센서들을 하나로 통합한 형태의 센서 모듈인 통합 센서 모듈을 설계하고 제작한다. 통합 센서 모듈은 육계사내 환경에서도 쉽게 고장 나지 않으면서 측정값이 정확할 수 있도록 설계되어야 한다.

둘째, 개발된 통합 센서 모듈의 동작 상태를 확인하기 위하여 검증용 시스템을 개발한다.

셋째, 검증 결과를 통하여 성능을 평가하고 개선할 수 있는 방법을 검토한다.

2. 문헌조사

2.1 스마트 육계사

국내 축산 스마트팜은 온·습도, 암모니아, 이산화탄소 센서가 설치되어 실시간으로 내부 환경상태를 모니터링하고, 온·습도 변화에 따라 환기팬이나 쿨링패드를 가동하여 내부 환경을 제어한다(최희철, 2021). 스마트 육계사(smart poultry farm)에도 비슷한 제어 조건이 적용된다. 그러나, 스마트팜이라고 해결되어야 하는 문제가 아예 없는 것은 아니다. 다른 스마트 축사와 같이 악취 및 미세먼지 문제는 스마트 육계사도 공통적으로 해결해야 하는 문제이며, 스마트 육계사에서 발생하는 온·습도, 암모니아, 이산화탄소 측정은 암모니아 발생량 추정과 환기량 판단에 도움을 줄 수 있는 중요 요소로 이용된다. 농림수산식품교육문화정보원(EPIS) 소속의 스마트팜 코리아에 따르면 국내 스마트 육계 내부시설에는 계사별 CCTV, 사료 급이량 제어, 환기제어, 온도제어, LED등 조도와 점등 제어, 내부 음압 제어를 필수적으로 포함하며 환경관리로는 온·습도 센서, 조도 센서, 이산화탄소·암모니아 센서, 누전 감지 센서 등을 포함한다

2.2 모니터링 시스템

Alonso et al. (2020)는 글로벌 엣지 컴퓨팅 아키텍처를 통해, 스마트 팜링 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 있는 시스템을 구축하였다. 이를 통해 질병에 걸린 개체를 초기에 효과적으로 감지하여 전체적인 육계사의 효율과 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. 서로 다른 지역에 있는 독립적 네트워크의 추가적인

처리 및 배포를 위해 표준 인터넷 프로토콜을 통해 중앙 데이터베이스에 집계된다. 이렇게 구현된 지역 네트워크는 모두 워싱턴 주에서 성공적으로 구현되었다. 또한 지역 제조업체 간의 새로운 계약을 통해 재배농들이 이를 상업적으로 이용할 수 있게 되었다.

Ahsan and Ahmed (2012)는 Wireless Sensor Network(WSN)을 적용한 농업 방식을 제시하고, 13가지 유형의 전통 농업에서 어떠한 센서와 네트워크가 적용되는지를 논의하였다. 또한 응용 분야 별로 WSN에 가장 적합한 농업 유형을 식별하였으며, 최근 WSN의 농업 응용 프로그램에 대한 검토를 통해 당면 과제를 파악하고 미래 발전방향을 제시하였다.

Srbínovska 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 온실감시 시스템을 설계하였다.

Ignat et al. (2014)은 비파괴 센서 결과값과 파괴 기준 변수의 센서융합을 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, 이를 통해 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.

Hwang et al. (2022)은 Figure 1. 과 같은 온도, 습도, 조도, CO2외에도 황하수소와 암모니아 농도를 측정할 수 있는 새로운 센서 모듈과 시스템을 개발하고 이를 활용하여 내부환경요소와 육계 증체량과의 관계 모델을 만들었다. 이 센서 모듈은 스마트 육계사의 센서네트워크 구축에 필요한 온도, 습도, 조도, CO2, 황하수소, 암모니아를 측정할 수 있으며 크기는 20x20x20이내의 크기로 육계사 내 설치하는데 무리가 없으며 저비용

설계를 통하여 설치 및 유지 비용을 최소화하는데 성공하였다. 하지만 고정된 상태에서의 작동만을 고려하였으며, 팬을 통한 환기 방식으로 인해 내부 공기 순환이 과하여 사용시간에 비하여 센서부에 분진이 많이 노출이 되는 문제가 있다. 또한 적절한 성능평가가 이루어지지 않아 정확성을 검증하기가 힘들다.



Figure 1. sensor module by Hwang et al (2022)

2.3 육계사 내 환경변수

Gerritzen et al. (2007)은 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 된다고 밝혔다.

Beker et al. (2004)에 의하면 암모니아는 주로 육계의 배설물로부터, 특히 계분 벨트를 활용한 청소 시에 급속도로 발생하며, 육계의 생장을 저해하고 이상행동을 초래한다.

Dai & Blanes-Vidal. (2013)에 의하면 양돈 분야에서는 황화수소의 농도 역시 주요 지표로서 활용하고 있으나, 육계의 경우에는 먹이, 사육 환경 등의 차이에 의해, 황화수소의 농도가 사육개체 및 작업자에 위험이 될 정도까지 높게 측정되지는 않는다. 허나 황화수소는 그 노출기준이 타 기체에 비해 훨씬 낮기 때문에, 사육 개체 및 작업자의 안전을 확보하기 위해서는 이에 대한 관찰 역시 필요하다.

Ensminger & Oldfield. (1990)에 의하면 육계에서는 열 스트레스 역시 매우 중요한 역할을 한다. 대부분의 육계 개체는 열 중립 구간을 보유하고 있으며, 대기 중의 온도가 그 이상을 넘어서게 되면 개체의 성장률, 생산력 및 다양한 생화학적 요인들에 큰 부정적인 영향을 받게 된다.

육계사에서는 베드, 깃털, 사료 등 다양한 분진 원인이 내부에서 발생하여 분진 환경이 조성된다는 문제점이 있다(Donham et al., 2002). 이렇게 발생하는 미세 분진 내부에는 항원으로 작용할 수 있는 미생물이 다량 분포하고 있기 때문에, 기존의 PM2.5 미세분진보다도 위험성이 더욱 높다(Viegas et al” 2013).

따라서 육계를 사육 시에 온도, 습도, 분진, 이산화탄소 및 유해 기체 농도와 열 스트레스 환경을 실시간으로 관측하는 것이, 그 생산성과 동물복지의 증진하는데 중요한 역할을 하게 된다.

2.4 센서 성능 평가

Fahlen et al. (1992)은 두개의 CO₂ 센서를 비교평가 하였다. 실험실과 장기간에 걸친 필드테스트로 이루어졌으며 CO₂ 농도가 1000ppm일때는 정상적으로 작동하였으나 농도가 2000ppm일때에는 오차가 300ppm까지도 발생하는 것을 관찰할 수 있었다.

Fisk et al. (2006) 은 9개의 빌딩에 설치된 44개의 CO₂ 센서를 평가하였다. 연구결과 대부분의 센서들은 빌딩 내부와 외부의 CO₂ 농도 차이를 측정하기에 부족한 정확도를 보였다. 이 논문에서 온도나 습도의 영향이 고려되지 않았다.

Pandey et al. (2007) 은 두종류의 CO₂ 센서의 정확도를 비교하였다. 각 종류별로 3개씩 총 6개의 센서가 실험에 사용되었으며 실험은 자체 제작한 인클로저를 사용하여 진행되었다. 6개의 센서는 0ppm, 500ppm 1000ppm의 CO₂농도를 갖는 혼합기체에 노출되었으며 최대 73ppm의 오차를 갖는 것으로 측정되었으나 온도나 습도의 영향이 고려되지 않았다.

Kim et al. (2009) 은 온도 및 습도 변화에 따른 수소 센서의 응답 특성에 대한 실험을 하였다. 반도체식, 전기화학식, 접촉연소식의 세 가지 수소센서 타입에 대하여 수소의 갑작스러운 노출에 대한 과도응답을 실험적으로 연구하였다. 온도는 수소센서 출력신호의 크기에 영향을 미치며,

특히 접촉연소식 타입에 더 큰 영향을 미친다는 결과가 나왔으나 상대습도가 센서응답에 미치는 영향은 크게 나타나지 않았다.

Liang et al. (2020) 은 그래핀 기반 암모니아 센서의 성능을 평가하였다. 실험 결과 그래핀 기반 암모니아 센서는 주변의 습도가 일정할 때 주변 온도 및 가스농도와 선형적인 관계를 갖는 것으로 나타났으며, 반복적인 실험을 통하여 오차는 1%미만, 반복성은 98.58%로 측정 되었다.

Frankenthal et al. (1993)는 전자기기에서 분진이 주는 영향을 알아보기 위한 실험 장치를 개발하였다. 분진이 전자기기에 어떻게 고장을 낼 수 있는지에 대하여 상세한 이론을 통하여 설명하며 이러한 실험이 필요한 근거를 제시하고 있다.

Huang et al. (2015)는 Mid-Power LED가 습도가 높은 환경에서의 신뢰성을 측정하기 위하여 Wet High Temperature operation life (WHTOL)라는 실험을 설계하였다. MPLED의 성능하락 요인에 대하여 분석하고 습도가 높은 환경에서는 이러한 성능하락이 더욱 빠르게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 이전에 사용되던 성능테스트 방식인 LM-80-08 과 비교하여 시간에 따른 성능 그래프의 형태는 유사하면서도 훨씬 적은 시간에 빠른 변화를 볼 수 있음을 보여줘 유효한 ALT임을 입증하였다.

Charki et al. (2011), 전자기판의 온도와 진동에 대한 Upper Operation Limit을 구하는 실험을 진행하였다. 여기서 행한 ALT는 Highly Accelerated Life Testing(HALT)으로 앞의 두 실험이 Quantitative ALT였다면 HALT는 Qualitative ALT의 한종류이다. Qualitative ALT는 주로 고장모드와 메커니즘을 알기 위한 실험이며 Quantitative ALT는 수명과 신뢰도를 측정하기 위한 실험이다. 본 논문에서는 전자기판이 오작동을 일으킬 때까지 온도/진동을 계속 상승시키면서 Upper Operation Limit을 구하는 실험을 하였다.

Vintr et al. (2016), 기차에 사용될 온도센서의 ALT를 설계하였다. 센서는 기차가 작동할 때 180도까지 상승하며 기차의 작동이 멈추었을 땐 외부 온도로 맞춰지며 사용될 장소의 기후 특성상 최대 영하50도까지 떨어질 것으로 예상하였다. 이를 재현하기 위해 실험실에서 온도센서를 주기적으로 영하50도에서 영상180도까지의 온도변화를 거치게 하는 실험을 하였다. 실사용의 주기와 비교하여 실제 목표 수명인 10년을 재현하기 위해 9개월의 실험기간이면 충분하였다.

3. 연구 내용 및 방법

3.1 센서 모듈의 요구 조건

센서 모듈이 갖추어야 할 구체적 요구조건은 선행 연구에서 찾을 수 없었으므로 스마트 육계사의 사육환경을 고려하여 육계사용 센서모듈이 만족해야 하는 조건을 다음과 같이 정하였다.

1. 정확도의 확보를 위하여 센서 모듈을 사용하여 얻은 측정치는 센서를 외부에서 단독으로 사용했을 때의 측정치와 비교했을 때와 같거나 일정한 관계를 갖고 있어야한다.
2. 센서 모듈은 육계장 내부는 습도가 높고 먼지가 많으며 악취가 심한 환경으로 센서 모듈은 이러한 열악한 환경에서도 문제없이 작동을 해야 한다.
3. 센서 모듈은 육계장의 육계에게 노출되거나 일상적 육계 관리중에도 고장이 나지 않을 정도로 물리적 충격에 대한 내구성을 확보해야 한다.
4. 센서 모듈은 설치에 부담이 될 정도로 제작 비용이 높아서는 안 되며 유지보수 비용이 합리적인 수준이어야 한다.
5. 센서 모듈은 설치가 용이하고 일상적 육계 관리에 지장을 주지 않을 정도로 작아야 한다.

6. 센서 모듈의 정비는 복잡하지 않아야 하며 정비주기는 육계의 생육주기인 30일보다 길어야 한다.

3.2 통합 센서 모듈 제작

본 연구에서는 육계의 생장에 영향을 미치는 주요 요인인 온도, 습도, 이산화탄소, 암모니아 가스, 조도 및 분진을 측정할 수 있는 통합 센서 모듈을 개발하였다. 해당 통합센서 모듈의 구성요소는 센서들을 제어하고 데이터를 서버로 송신할 수 있는 소형 컴퓨터인 Arduino MEGA 2560(Figure2), 3D 프린터를 통해 제작된 인클로저, 데이터 백업을 위한 MicroSD 카드 모듈과 SD카드, 그리고 다수의 센서로 이루어진다. 센서는 육계사내 예상되는 환경을 측정할 수 있도록 측정범위와 정확도가 고려되어 선정되었다. 이때 활용하는 센서의 모습은 다음과 같다(Figure3)

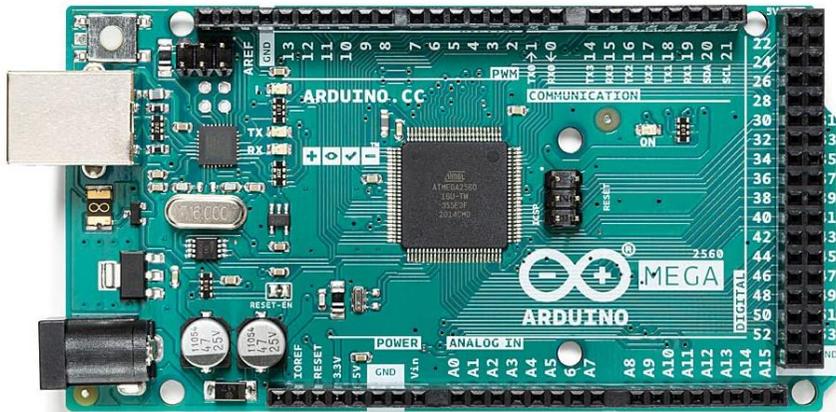


Figure2. Overview of Arduino MEGA 2560



(a)SCD30 Sen



(b) SPS30 Sensirion



(c)ZE03-NH3 winsen



(d) VEML7700 adafruit

Figure3. Overview of environmental sensors used for the integrated sensor

센서들의 사양은 다음과 같다(Table1-6)

Table1. Device specifications of the CO2 Sensor, SCD30

Parameter	Value
CO2 measurement range	0 – 40'000 ppm
Accuracy	± (30 ppm + 3%MV)
Repeatability	± 10 ppm
Temperature stability	± 2.5 ppm / °C
Response time	20 s
Accuracy drift over lifetime	± 50 ppm

Table2. Device specifications of the Temperature Sensor, SCD30

Parameter	Value
Temperature measurement range	- 40°C – 70°C
Accuracy	± (0.4°C + 0.023 × (T [°C] – 25°C))
Repeatability	± 0.1°C
Response time	> 10 s
Accuracy drift	< 0.03 °C / year

Table3. Device specifications of the Humidity Sensor, SCD30

Parameter	Value
Humidity measurement range	0 %RH – 100 %RH
Accuracy	± 3 %RH
Repeatability	± 0.1 %RH
Response time	8 s
Accuracy drift	< 0.25 %RH / year

Table4. Device specifications of the NH3 Sensor, ze03-NH3

Parameter	Value
NH3 measurement range	0 – 100 ppm
Resolution	1ppm
Response time	< 150s

Table5. Device specifications of the Illuminance Sensor, VEML7700

Parameter	Value
Illuminance measurement range	0 - 20 klx
Resolution	0.0036 lx

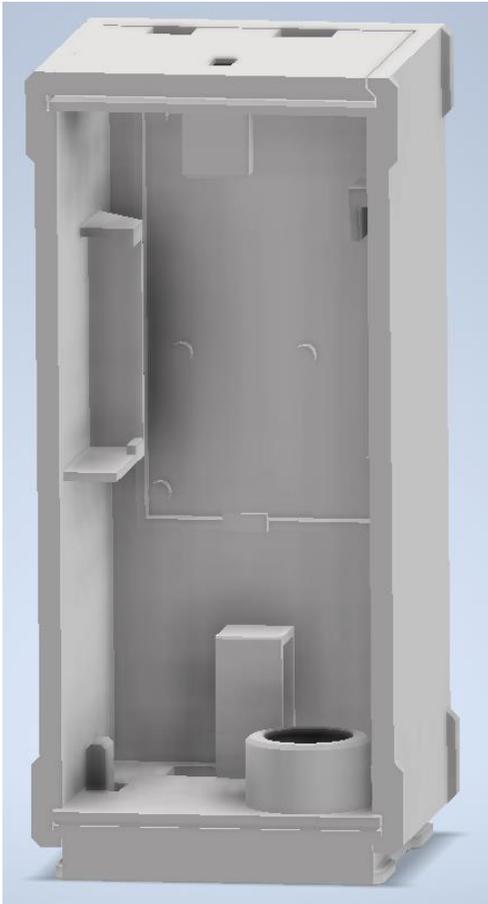
Table6. Device specifications of the PM Sensor, SPS30

Parameter	Value
Mass concentration accuracy	±10%
Mass concentration range	0 - 1'000 µg/m ³
Mass concentration resolution	1 µg/m ³
Number concentration range	0 - 3'000 1/cm ³
Sampling interval	1 s
Start-up time	< 8 s

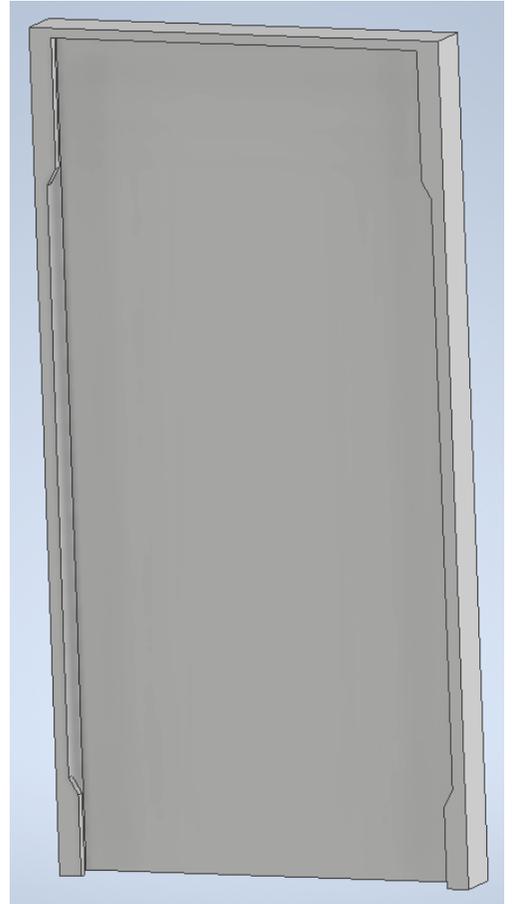
센서들은 Arduino MEGA 2560에 결선 되어 전원을 공급받으며 시리얼 통신을 통해 측정값을 Arduino MEGA 2560로 전송하며 이를 Arduino MEGA 2560에서 수집 후 시리얼 포트를 통하여 서버로 전송한다. 통신상에 오류가 있을 경우를 위하여 데이터를 모듈 내부의 MicroSD카드에 추가로 백업한다. 데이터 수집 주기는 각 센서들의 최소 측정 주기와 사용 환경을 고려하여 1분으로 설정하였다.

인클로저는 Autodesk Inventor(Autodesk, USA) 프로그램을 활용하여 설계하였다. 이후 3D 프린터(DP200, Sindoh)로 PLA 필라멘트를 사용하여 인클로저를 출력하였으며, 해당 인클로저에 센서류를 탑재하여 최종적으로 통합 센서 모듈을 개발 및 구현하였다. 인클로저는 전력소모가 더 적고 추가적인 비용이 들지 않는점, 구조가 간단하여 고장이 더 적은점, 설치되는 장소가 밀폐형 육계사로 내부에 공기순환을 위한 장치가 있는 환경이라는 점 등을 고려하여 흡입식이 아닌 확산식으로 설계하였다. 인클로저는 벽면이나 기둥에 설치하기 쉽고 설치했을 때 최대한 방해가 되지 않도록 가로세로폭이 좁고 높이가 길도록 설계하였다. 크기는 가로x세로x높이 98x78x191(mm) 이다. 센서와 보드를 보호하기 위하여 시리얼포트를 제외하고 외부에 노출되는 부분이 없게 설계하여 충격이나 이물질로부터 보호한다. 센서에서 측정을 위하여 외부와 접촉이 필요한

부분을 제외한 회로와 나머지 구성요소들은 외부와 분리된 공간에 배치되어 이물질과 물기의 침투를 막고 습기나 유독성기체에 의한 부식을 최대한 방지하였다. 센서의 최소 부분만이 외부와 접촉을 하게 한다. 또한 이 외부 노출 부분을 아래방향을 향하도록 설계되어 먼지가 쌓이거나 액화되어 고인 수분이 흘러 들어가 침수되는 것을 방지하여 시간이 지남에 따라 오차가 커지거나 고장의 위험이 커지는 것을 방지하였다. 센서를 덮는 덮개의 경우 기체교환이 최대한 잘되게 면적을 최소화하되 측정오차나 고장을 막기 위하여 센서에 직접 향하는 바람은 막을 수 있게 설계되었다. 최종적으로 완성된 모습은 다음과 같다.(Figure4-10)



(4)



(b)

Figure4. 3D model of integrated sensor module enclosure



Figure 5. Overview of integrated sensor module

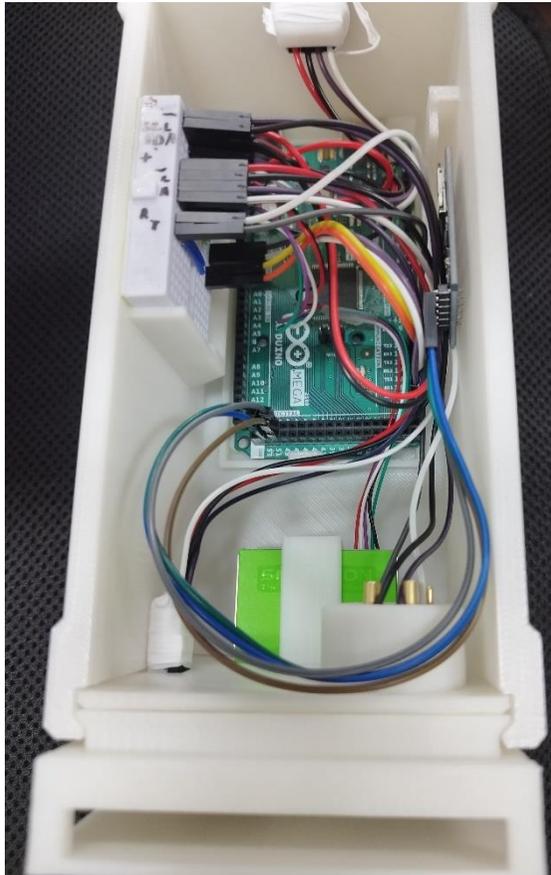


Figure 6. Inside view of integrated sensor module



Figure 7. Front view of integrated sensor module



Figure 8. Top view of integrated sensor module

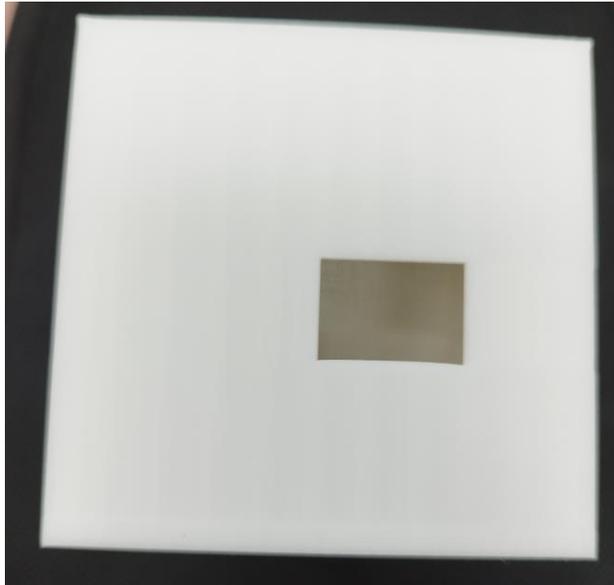


Figure 9. Bottom view of integrated sensor module



Figure 10. Bottom view of integrated sensor module without bottom cover

3.3 통합 센서 모듈 성능 실험

통합 센서 모듈로 제작하였을 때 센서의 개별 사용에 비하여 어떠한 성능변화가 있는지 평가하기 위하여 다음과 같은 실험장치를 구상하였다.

(Figure 11)

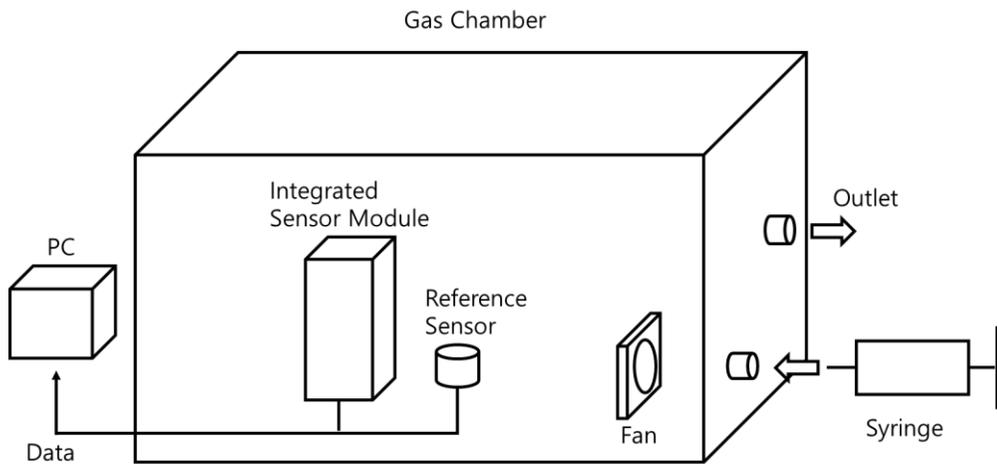


Figure 11. configuration of test gas chamber

아크릴로 만들어진 가로x세로x높이 15mmx20mmx30mm 의 가스 챔버에 통합 센서 모듈과 레퍼런스 센서를 배치한다. 이 둘은 시리얼포트를 통하여 PC와 연결되어 전원을 공급받고 센서를 통하여 측정되는 수치를 기록한다. 내부에는 팬이 있어 빠르게 내부 공기를 균일하게 혼합할 수 있게

도와준다. 측면에 샘플 가스를 투입할 수 있는 관이 있으며 사용하지 않을 때는 벨브를 잠구어 밀폐상태를 유지할 수 있게 한다. 압력조절을 위해 기체를 빼낼수 있는 출구관도 마찬가지로 벨브를 잠글 수 있는 구조이다. 기체를 투입할때는 정량의 기체를 투입 할 수 있게 500ml syringe를 사용했다. 매 실험 후 뚜껑을 열어 내부 공기를 충분히 교체한 후 진행하였다. 실험장치의 모습은 담과 같다(Figure 12.)

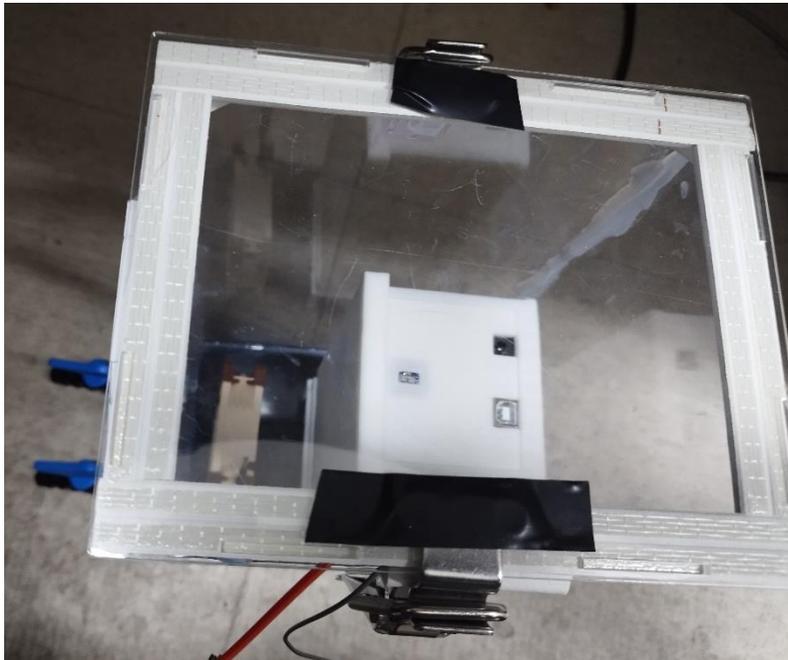


Figure 12. Overview of test gas chamber

실험은 다음과 같은 순서로 진행 된다.

(a) 각 실험 사이마다 챔버 내부 공기를 충분히 순환시켜준다.

(b) Syringe를 통하여 챔버 내부 기체가 목표상태가 되도록 가스샘플을 적정량 투입한다. 내부 상태는 Reference Sensor 를 통하여 확인하며 내부 농도를 조절한다. 이때 팬을 사용하여 챔버 내부 기체를 균일하게 혼합해준다

(c) 내부 가스 농도를 상승시키면서 한번 하강시키면서 한번 측정 포인트마다 측정값을 기록한다

(d) 통합 센서 모듈과 대조용으로 사용된 센서의 값을 기록한다.

(e) 이와 같은 과정을 CO₂, NH₃, 습도, 온도 센서별로 개별적으로 사용되었을 때와 통합 센서 모듈에서 사용되었을 때 각각 2회 실시한다.

3.4 CFD를 활용한 내부 유동 분석

설계된 통합 센서 모듈 내부의 공기 유동 형태를 파악하기 위해 CFD 를 활용하였다. CFD 분석은 Autodesk CFD (Autodesk, USA) 프로그램을 활용하였다. 대상 주변 가로 x 세로 x 높이 50x50x50cm 의 공간을 설정하였으며 초기 온도는 20 도로 설정하였다. 이때 측면에서 30 도의 공기가 유속 10cm/s 로 불어 환경의 변화가 있다고 하였을 때를 시뮬레이션 하여 센서 단독을 사용했을때와 통합센서모듈을 사용했을 때 두가지의 경우 센서 측정값에 중요한 영향을 주는 센서 바로 외부 부분의 온도 변화를 관찰하였다.

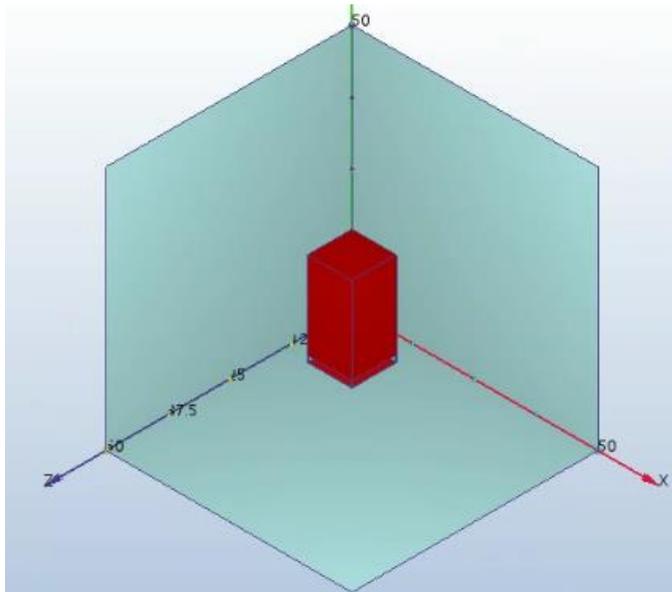
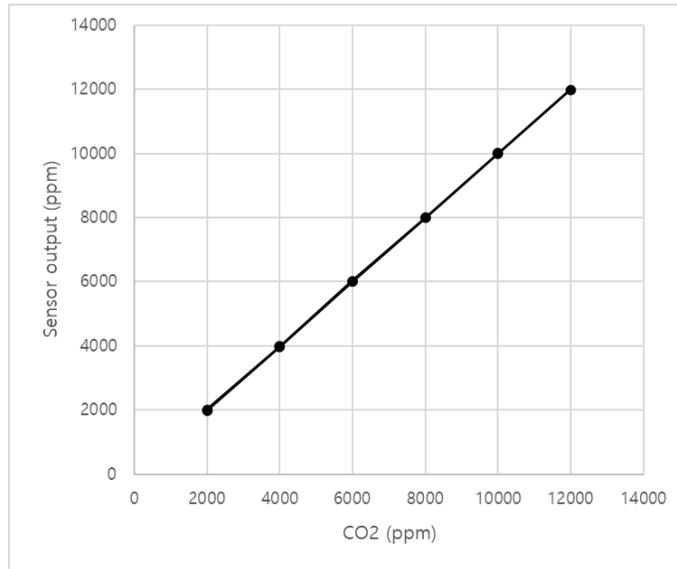


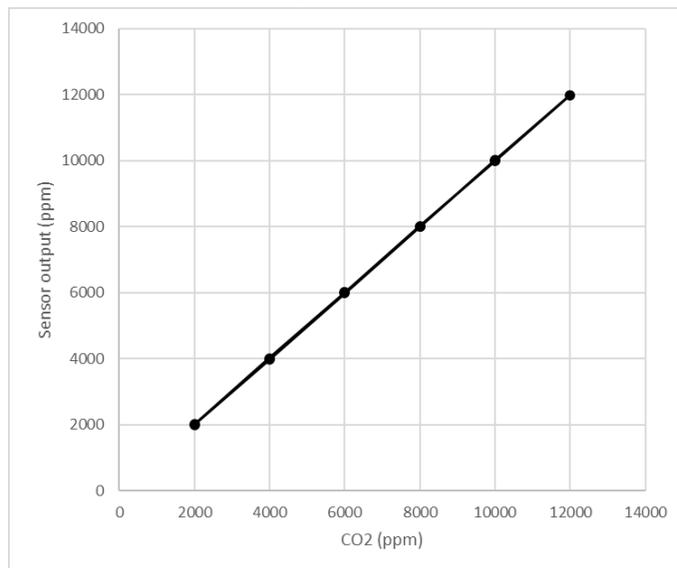
Figure 13. CFD environment settings

4. 결과 및 고찰

4.1 통합 센서 모듈 성능 실험 결과

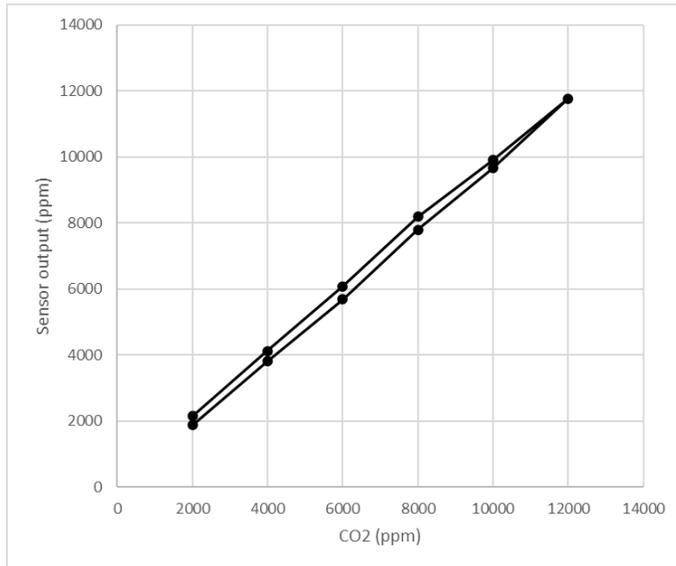


(a) test1

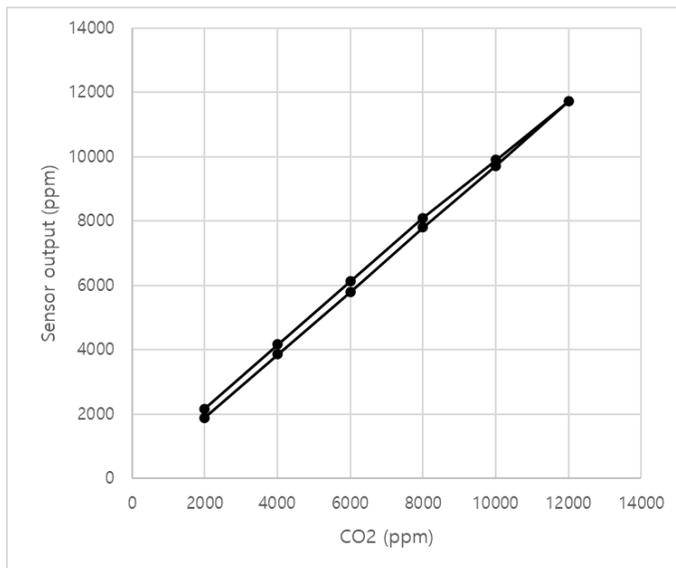


(b) test2

Figure 14. Test result of solely used CO2 Sensor

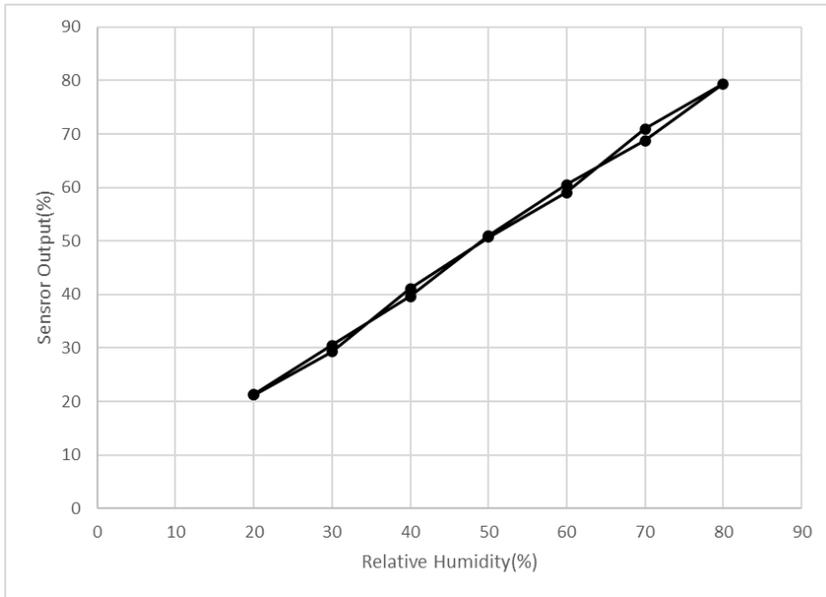


(a) test1

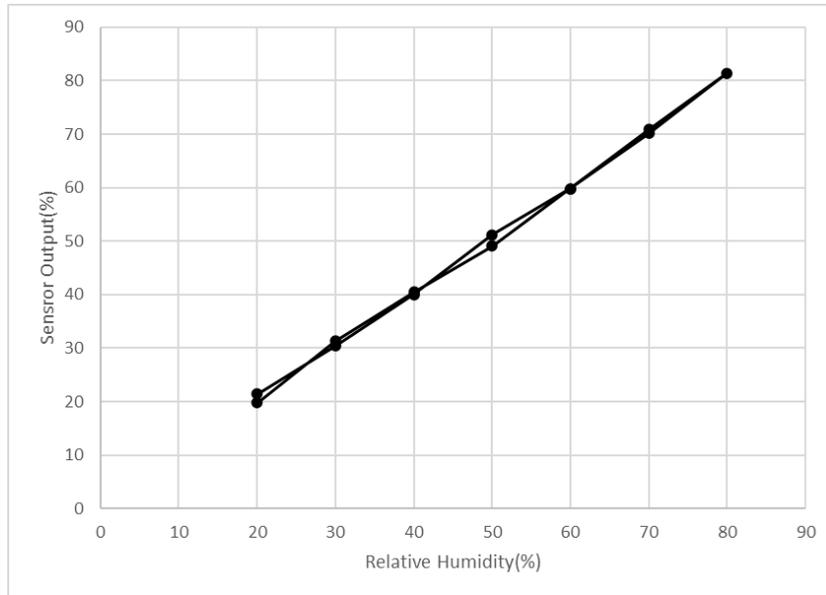


(b) test2

Figure 15. Test result of CO2 Sensor from integrated sensor module

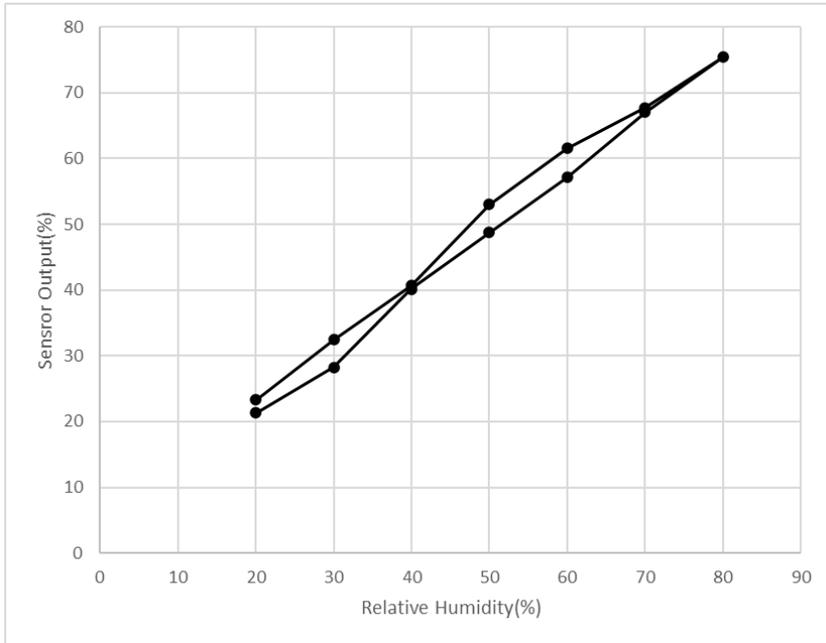


(a) test1

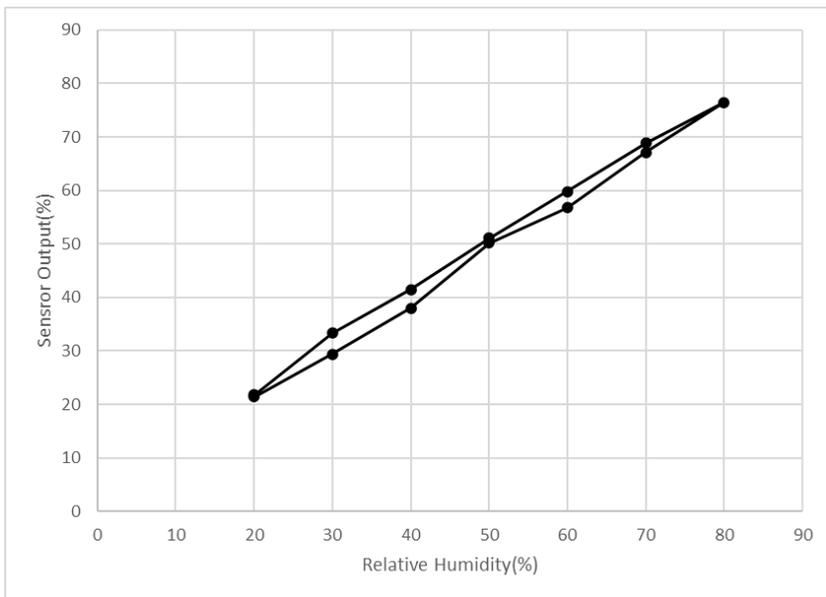


(b) test2

Figure 16. Test result of solely used RH Sensor

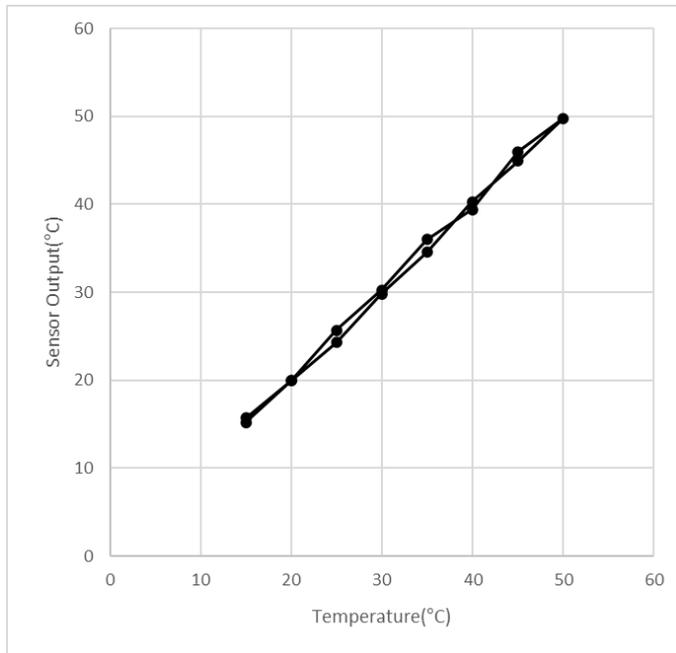


(a)test1

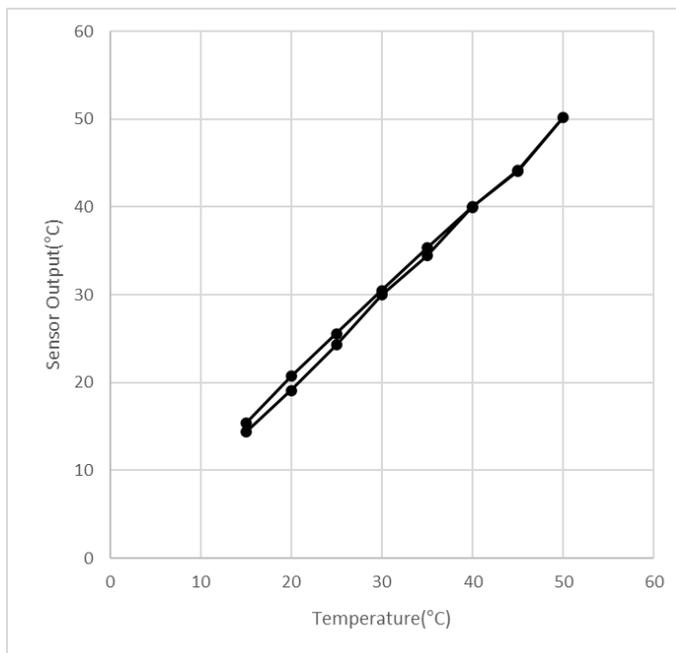


(b)test2

Figure 17. Test result of RH Sensor from integrated sensor module

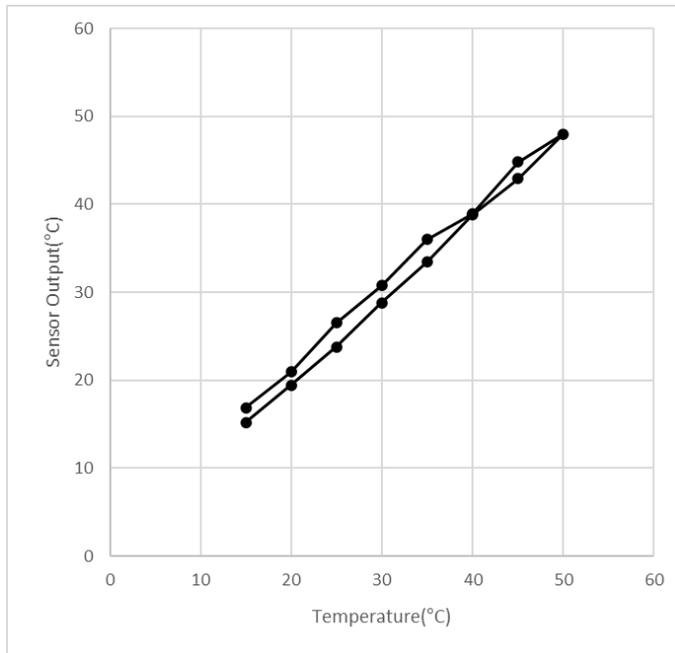


(a)test1

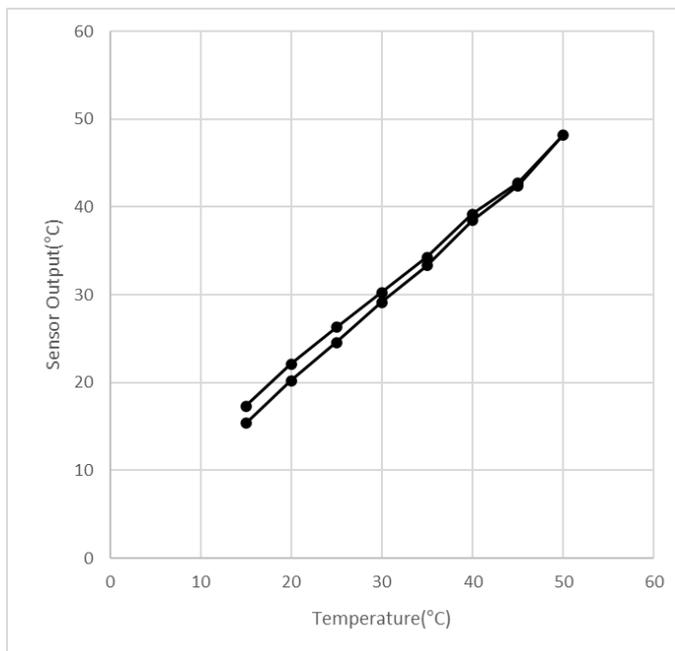


(b)test2

Figure 18. Test result of solely used Temperature Sensor

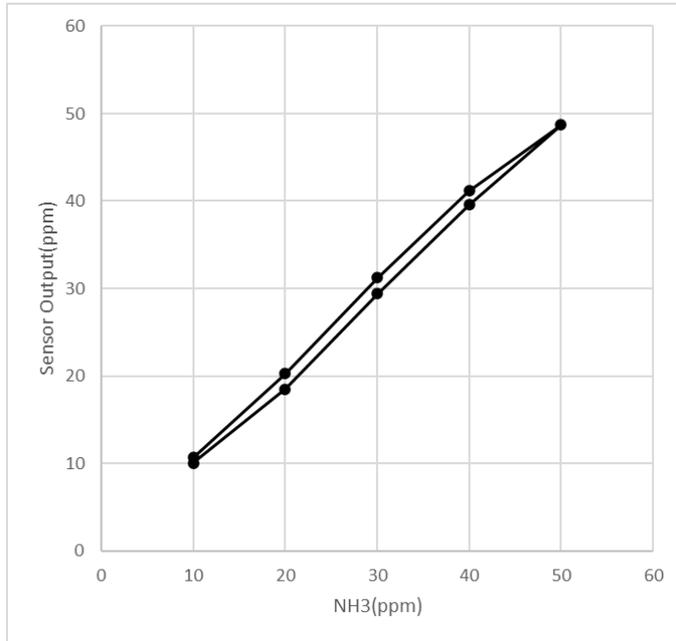


(a)test1

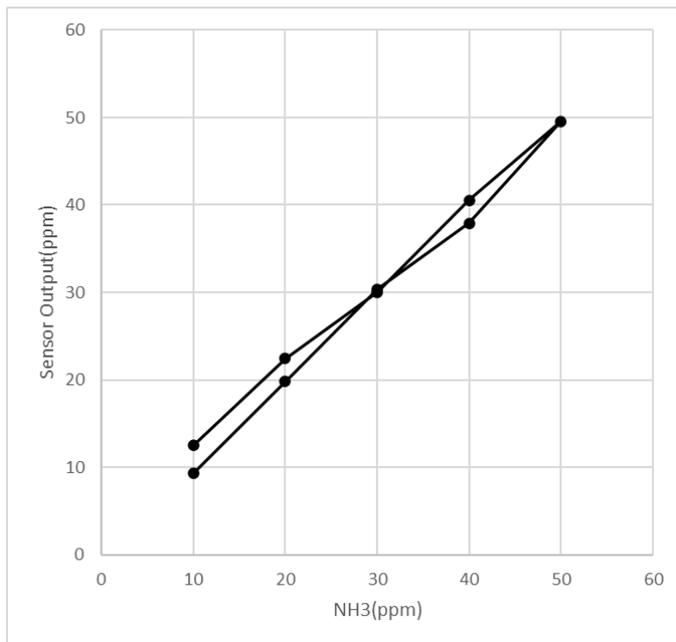


(b)test2

Figure 19. Test result of Temperature Sensor from integrated sensor module

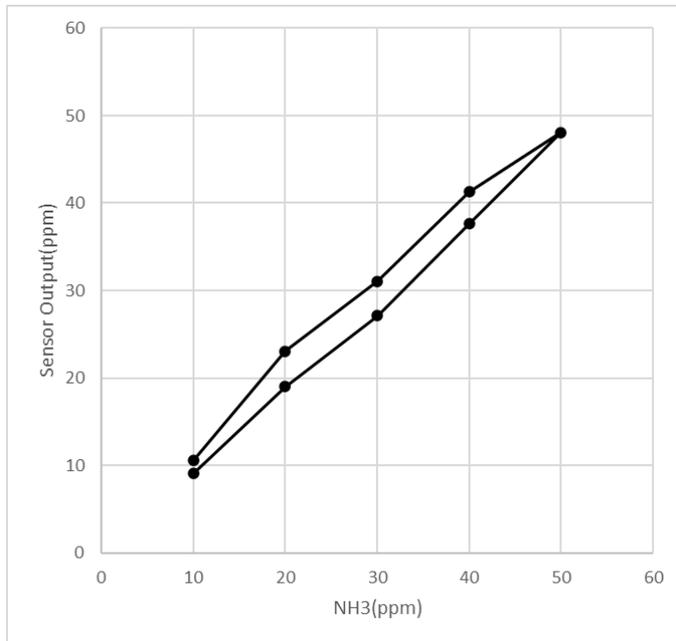


(a)test1

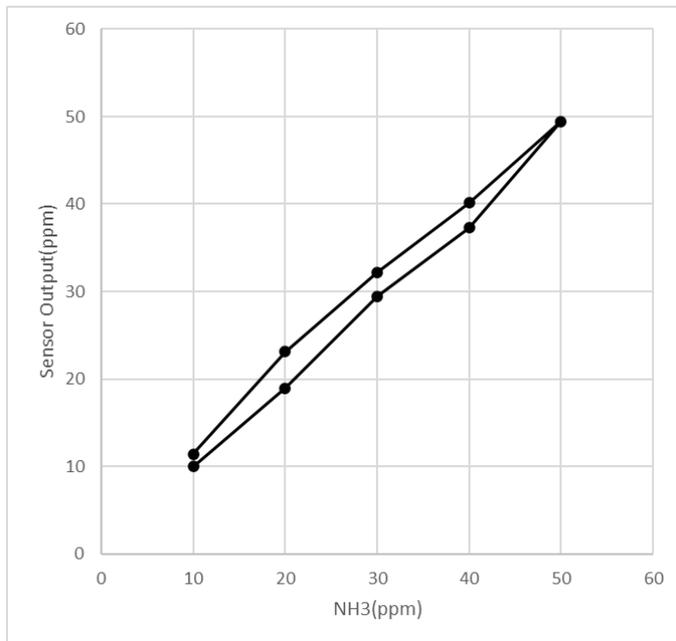


(b)test2

Figure 20. Test result of solely used NH3 Sensor



(a)test1



(b)test2

Figure 21. Test result of NH3 Sensor from integrated sensor module

Table7. RMSE of CO2 sensor test

RMSE(ppm)	test1	test2	average
Solely used	15.57	15.33	15.45
Integrated	201.86	178.44	190.15

Table8. Hysteresis error of CO2 sensor test

Hysteresis error(ppm)	test1	test2	average
Solely used	38	4	21
integrated	395	339	367

Table9. RMSE of Relative Humidity sensor test

RMSE(%)	test1	test2	average
Solely used	0.93	0.85	0.89
integrated	2.47	2.07	2.27

Table10. Hysteresis error of Relative Humidity sensor test

Hysteresis error(%)	test1	test2	average
Solely used	1.20	0.96	1.08
integrated	4.20	3.96	4.08

Table11. RMSE of Temperature sensor test

RMSE(°C)	test1	test2	average
Solely used	0.54	0.57	0.56
integrated	1.29	1.16	1.23

Table12. Hysteresis error of Temperature sensor test

Hysteresis error(°C)	test1	test2	average
Solely used	0.42	0.50	0.46
integrated	1.92	0.60	1.26

Table13. RMSE of NH3 sensor test

RMSE(ppm)	test1	test2	average
Solely used	0.93	1.39	1.16
integrated	1.87	1.68	1.78

Table14. Hysteresis error of NH3 sensor test

Hysteresis error(ppm)	test1	test2	average
Solely used	1.78	2.60	2.19
integrated	4.05	4.17	4.11

모든 경우 개별적으로 사용했을 때 비하여 RMSE값이 증가하여 정확도가 소폭 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 하지만 여전히 $\pm 5\%$ 이내로 충분히 사용할 수 있을 정도였다. 개별 사용시와 비교해보았을 때 이 오차는 hysteresis에 의하여 발생함을 확인할 수 있다. Hysteresis는 거쳐 온 과거가 현재 상태에 영향을 주는 현상으로 어떤 물리량이 그 때의 물리조건만으로 결정되지 않고 이전에 그 물질이 경과해 온 과정에 의존하는 특성을 말한다. 네가지 센서 모두 개별적으로 사용하였을 때는 농도가 상승할 때와 하강할 때 측정값의 차이가 크지 않으나 통합 센서 모듈에서 사용될 때에는 농도가 상승시 측정 될때는 음의 오차를, 하강시 측정될 때에는 양의 오차가 크게 증가함을 확인할 수 있다. 이는 통합센서 모듈의 겨우 센서 주변부의 ambient environment 가 상대적으로 기체 교환이 원활하지 않아 이 ambient environment 가 외부 상태와 평행을 이루기까지 시간이 걸리기 때문으로 보인다. 또한 온도의 경우 enclosure 자체의 복사열의 영향도 받기 때문에 이러한 현상이 나타나는 것으로 보인다.

4.2 CFD 시뮬레이션 결과

CFD 시뮬레이션 결과는 다음과 같다(Figure22-24)

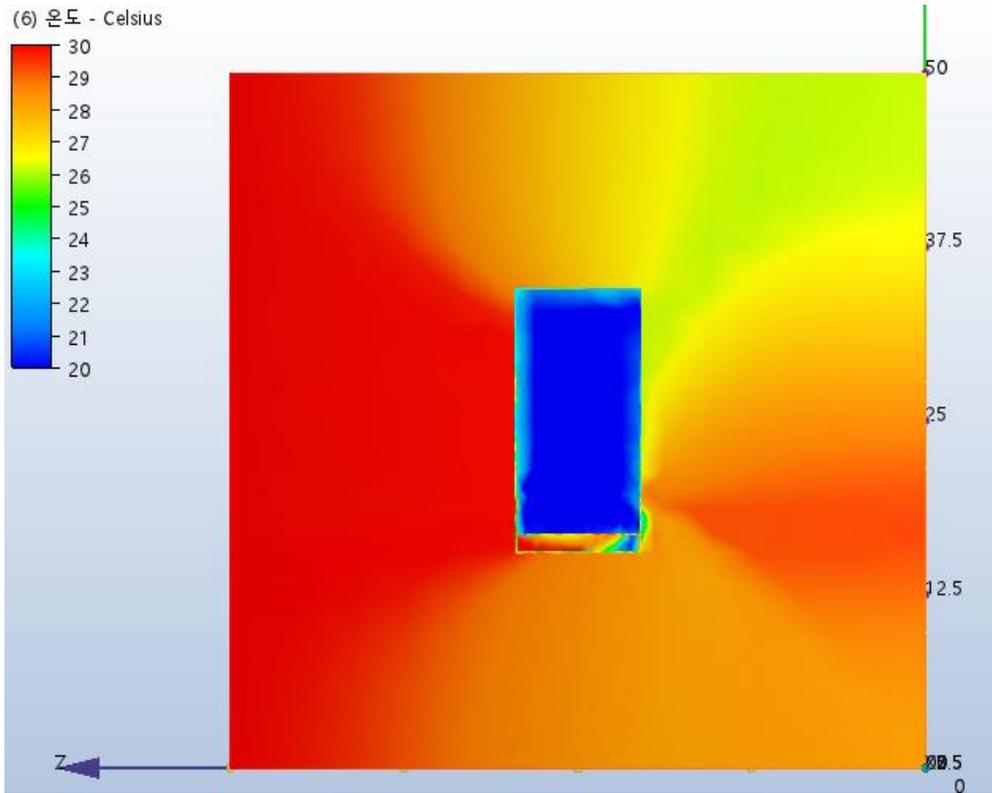


Figure 22. Temperature of ambient environment after 15 seconds with integrated sensor module

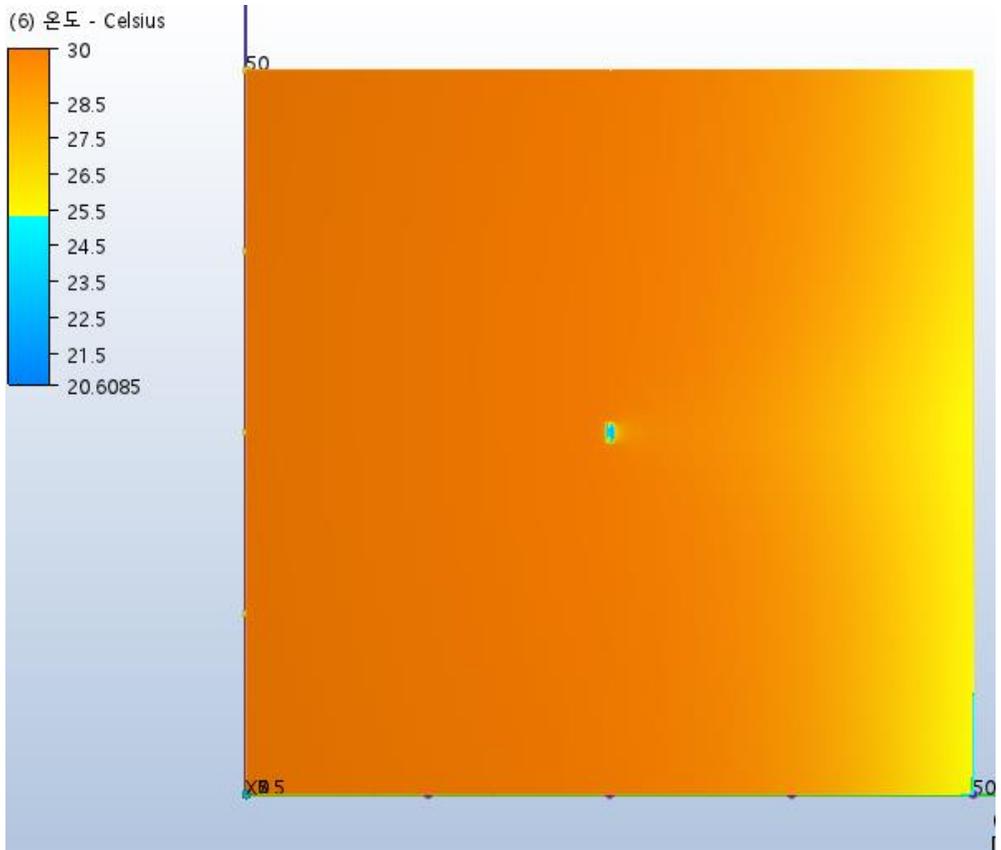


Figure 23. Temperature of ambient environment after 15 seconds with solely used sensor

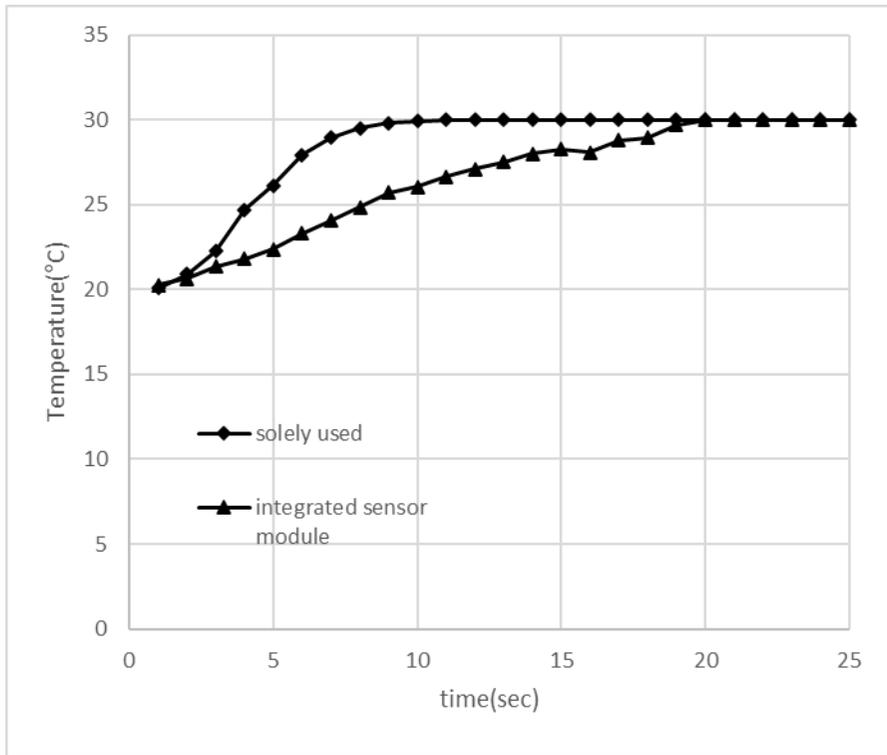


Figure24. Temperature over time of ambient air

CFD 시뮬레이션 결과 똑 같은 조건에서 통합센서모듈의 센서 주변부 온도의 변화가 상대적으로 늦음을 확인할 수 있었다. 이는 통합센서 모듈의 센서 주변부 기체교환이 상대적으로 더 어렵기 때문으로 이 영향으로 센서는 동일하여도 센서의 응답시간이 증가한 것 과 같은 영향을 받게 된다. 이 결과는 앞의 센서 성능평가에서 Hysteresis가 증가한 것과 같은 맥락으로 해석될 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 스마트 육계사에 필요한 다양한 센서들을 하나로 통합한 형태의 센서 모듈인 통합 센서 모듈을 설계하고자 하였다. 육계의 생장에 영향을 미치는 주요 요인인 온도, 습도, 이산화탄소, 암모니아 가스, 조도 및 분진을 측정할 수 있는 통합 센서 모듈을 개발하였다. 3D 프린터로 PLA를 사용하여 인클로저를 출력하였으며, 센서류를 탑재하여 최종적으로 통합 센서 모듈을 개발 및 구현하였다. 제작된 통합 센서 모듈은 성능 평가를 위해 가스 챔버를 활용한 실험장치에서 성능을 평가하였다. 평가된 센서는 각각 CO₂, 상대습도, 온도, NH₃ 네가지이다. 실험 결과 모든 센서는 개별적으로 사용된 경우에 비하여 정확도가 떨어지는 것을 발견할 수 있었다. Hysteresis 가 증가하여 오차가 커졌으며 이는 상대적으로 센서 주변 ambient environment 가 외부와 평형에 이르는데 걸리는 시간이 더 오래 걸리기 때문으로 보인다. 이러한 Hysteresis 를 최소화 하기 위해 enclosure의 기체교환이 좀더 원활하게 이루어 질 수 있도록 구조를 개선하고 Hysteresis를 보정 할 수 있는 보정식을 활용할 수 있을 것이다. 추후 이러한 hysteresis를 최소화하는 방법에 대한 연구와 실증 실험 이 필요할 것으로 보인다.

6. 참고문헌

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*.

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.

“Changes of Livestock Farming Structure based on Statistical Review.” Korean Statistical Information Service. (2021)

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.

Charki, A., Laronde, R., Guérin, F. et al. Robustness evaluation using highly accelerated life testing. (2011). *Int J Adv Manuf Technol* 56, 1253-1261

Choe, H.C. (2021). Chicken Management in Summer: Chicken Environment Management to Prevent Damage from Hot Weather in Summer. *Korean Poultry Journal*. 53(6), 148-152. (in Korean)

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.

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

Fahlen, P., H. Andersson, and S. Ruud. (1992). Demand Controlled Ventilating Systems - Sensor Tests. Swedish National Testing and Research Institute, Boras, Sweden, SP Report 1992:13.

Fisk, W.J., D. Faulkner, and D.P. Sullivan. (2006). Accuracy of CO₂ sensors in commercial buildings: a pilot study. LBNL-61962, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

R. P. Frankenthal, D. J. Siconolf, J. D. Sinclair (1993). Accelerated Life Testing of Electronic Devices by Atmospheric Particles: Why and How. *Journal of The Electrochemical Society*. 140 3129

Gerritzen, M., Lambooi, 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.

Jianlin Huang, Dušan S. Golubović, Sau Koh, Daoguo Yang, Xiupeng Li, Xuejun Fan, G.

Q. Zhang (2015). Degradation Mechanisms of Mid-Power White-Light LEDs Under High-Temperature-Humidity Conditions. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 15, no. 2, pp. 220-228

Hwang, I.H. (2022) Development of Multi-sensor Module for Broiler and Data Application

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. (2009). Quantification of ammonia and hydrogen sulfide emitted from pig buildings in Korea. *Journal of environmental management* 88(2), 195-202.

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,

Ting Liang, Ruifang Liu, Cheng Lei, Kai Wang, Zhiqiang Li, Yongwei Li (2020). Preparation and Test of NH₃ Gas Sensor Based on Single-Layer Graphene Film. *Micromachines* 2020, 11(11), 965

Mahbub, M. (2020). A smart farming concept based on smart embedded electronics, internet of things and 72 wireless sensor network. *Internet of Things*, 9, 100161.

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

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.

Pandey, S.K., K. Kim, and S. Lee. (2007). Use of a dynamic enclosure approach to test the accuracy of the NDIR sensor: evaluation based on the CO₂ equilibration pattern. Molecular Diversity Preservation International, Matthaeusstrasse, Switzerland, ISSN: 1424-8220.

Pierce, F., & Elliott, T. (2008). Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in 73 Eastern Washington. *Computers and electronics in agriculture*, 61(1), 32-43.

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.

Viegas, S., Faisca, V. M., Dias, H., Clérigo, A., Carolino, E., & Viegas, C. (2013). Occupational exposure to poultry dust and effects on the respiratory system in 74 workers. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 76(4-5), 230-239.

Vintr, Zdenek & Valis, David. (2016). Methodology of the accelerated life test of a

temperature sensor. Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice
(pp.31-35)

Abstract

Development and Evaluation of Integrated Sensor Module for Smart Broiler House

Choi, Wonjun

Biosystems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Recently, chicken consumption has been increasing significantly around the world. To produce chicken efficiently, the development of precise livestock technology using information and communication technology is being carried out worldwide. First, it is necessary to develop a system capable of monitoring the internal environment in real time along with semi-automation of production facilities in order to implement such smart land-based technology. Various sensors are required to configure a sensor network for smart hexagonal technicians. However, when each of the various sensor modules is installed, problems such as limited installation locations, high installation costs, sensor node inspection, and battery replacement occur. To solve this

problem, a sensor module integrated into one sensor module is required in consideration of characteristics of various sensor modules required for collecting environmental information on land survey.

This study designed an integrated sensor module consisting of sensors that can measure temperature, humidity, carbon dioxide, ammonia gas, illumination, and dust, which are the main factors affecting the growth of the meat system. The integrated sensor module is designed to be narrow and long in width and height so that it is easy to install on the wall or pillar and does not interfere with the installation as much as possible. To protect the sensor and board, it is designed to protect them from external impacts or foreign substances except for serial ports, and circuits and other components except for external contact are placed in a space separated from the sensor to prevent penetration of foreign substances and water and corrosion caused by moisture or toxic gas. The external exposed part is designed to face downward to prevent dust accumulation or liquefaction to flow in and flood.

When manufactured as an integrated sensor module, an experimental device was organized and experimented to evaluate the performance change compared to the individual use of sensors. An integrated sensor module and a reference sensor are disposed in a gas chamber made of acrylic, and there is a fan inside to help quickly and uniformly mix the internal air. The internal environment was changed through a pipe capable of injecting sample gas into the side surface, and the measured

value of the sensor was recorded after confirming that a specific state was reached through the reference sensor. In addition, it was intended to check whether gas exchange inside the integrated sensor module is carried out smoothly by utilizing CFD.

As a result, it was confirmed that the RMSE value of the measured value of the integrated sensor module increases and the hysteresis error increases, compared to when sensors are used individually. In addition, through CFD analysis, it was confirmed that the environmental change time inside the integrated sensor module increased compared to when a single sensor was used. To minimize such hysteresis, a correction formula that can improve the gas exchange of the enclosure to be performed more smoothly and correct the hysteresis may be used. If research and demonstration experiments on how to minimize such hysteresis are conducted in the future, it will contribute to the improvement of precision agricultural technology and smart agricultural technology with more accurate performance.

keywords : Broiler, integrated sensor module, performance evaluation

Student Number : 2021-23657