



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

밀폐형 스마트 육계사에서 습식  
스크러버 작동이 악취와 온·습도에  
미치는 영향

**Performance of a Wet Scrubber and its Affect  
on Temperature and Humidity in Closed  
Smart Broiler House**

2022년 8월

서울대학교 대학원

바이오시스템공학과 바이오시스템공학전공

양도이

밀폐형 스마트 육계사에서 습식  
스크러버 작동이 악취와 온·습도에  
미치는 영향

지도교수 이 중 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2022년 6월

서울대학교 대학원  
바이오시스템공학과 바이오시스템공학전공  
양 도 이

양도이의 석사 학위논문을 인준함  
2022년 8월

위 원 장 김 학 진 (인)

부위원장 이 중 용 (인)

위 원 양 승 환 (인)

## 국문 초록

축산업 대형화에 따라 발생하는 환경 문제가 이슈화되면서 축산시설에서 발생하는 암모니아 저감 연구가 매우 시급한 실정이다. 전체 암모니아 배출량 중 농업 부문에서 배출되는 암모니아가 78.7%이며, 이 중 축산 분뇨로 인한 배출량이 97.8%로, 축사에서 발생하는 악취는 인근 주민들의 불편함뿐만 아니라 사육하는 가축의 건강 및 품질 문제, 농장 관리인과 일꾼의 건강에도 영향을 끼친다. 따라서 본 연구의 목표는 밀폐형 스마트 육계사에 악취 저감을 위한 습식 스크러버를 적용하여 이에 대한 암모니아와 이산화탄소 저감을 확인하고, 습식 스크러버 운영으로 인해 밀폐형 스마트 육계사의 온·습도 변화를 파악하여 습식 스크러버의 적합성을 검토하는 것이다.

본 연구에서는 밀폐형 스마트 육계사(Smart-closed poultry house)에 습식 스크러버를 사용하여 사육 기간 중 발생하는 암모니아 농도 저감 효율을 확인하기 위해 분무율과 풍속 변화를 변수로 선정하여 성능 평가를 진행하였으며, 각 노즐 유량과 fan의 풍량을 측정하였다. 각 구동 조건은 습식 스크러버를 약 2시간 동안 구동하면서 암모니아와 이산화탄소 저감을 비교·분석하여 실험에 사용된 습식 스크러버의 문제점을 파악하였다. 계사 내부이자 returning duct 중간에 설치된 2번 센서와 습식 스크러버 통과한 후의 5번 센서를 기준으로 암모니아, 이산화탄소, 온·습도, 습식 스크러버 수조 물의 EC와 pH를 측정하였으며 1.02 LPM 노즐 유량과 42.43 CMM fan으로 습식 스크러버를 구동했을 때 39.4%의 암모니아 저감을 나타내었다. 이산화탄소의 경우, 0.54 LPM 유량과 42.43 CMM fan으로 습식 스크러버를 구동했을 때 29.9%의 이산화탄소 저감을 확인하였다.

해당 실험을 통해 노즐 유량이 줄어들 수록 계사 내부의 온도가 올라가는 것을 확인하였으며, 실험 당일엔 비가 와 높은 습도가 측정되었다. 그러나, 0.54 LPM 노즐과 42.43 CMM fan 조건과 1.02 LPM 노즐과 12.60 CMM fan 조건으로 습식 스크러버를 운영했을 때 비교적 낮은 습도를 유지할 수 있었다. 더불어, 습식 스크러버 수조 물의 EC와 pH에 따라 물을 오랫동안 교체하지 않을 시 암모니아와 이산화탄소 저감이 어려우므로 수조의 물을 자주 교체해주는 것이 습식 스크러버의 효과를 증대할 수 있는 가장 좋은 방법이다.

따라서, 본 연구를 통해 계사 내부에 심한 악취가 발생하는 경우, 습식 스크러버를 구동하여 악취를 줄이고, 계사 내부의 온도를 낮추어 과습을 최소화하는 것을 제안한다. 또한, 유량과 풍량을 조절하여 온·습도 뿐만 아니라 암모니아와 이산화탄소와 같은 축산 가스를 관리하고, 습식 스크러버의 용액을 주기적으로 교체하여 효과적인 악취 저감 시스템을 운영하는 것을 추천한다. 향후 습식 스크러버가 밀폐형 육계사에 미치는 다습 현상에 대한 문제점을 세부적으로 파악하여 개선한다면 습식 스크러버가 축사시설에도 더 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 보인다. 이를 통해 축사시설에서 발생하는 암모니아와 이산화탄소 농도를 저감하는 효과를 겸비하여 축산 스마트팜 기술과 축산 환경 향상에 기여할 수 있을 것이다.

**주요어 : 밀폐형 스마트 육계사, 악취 저감, 습식 스크러버**

**학 번 : 2019-26664**

# 목 차

1. 서론 .....	1
1.1. 연구 배경 .....	1
1.2. 문제점과 필요성 .....	3
1.3. 연구 목적과 범위 .....	4
2. 연구사 .....	5
2.1. 육계와 사양 정보 .....	5
2.1.1. 육계의 품종과 특징 .....	5
2.1.2. 육계 사육시설 .....	5
2.2. 악취와 악취 관리 .....	6
2.2.1. 악취 물질의 종류와 특성 .....	6
2.2.2. 육계사 형태에 따른 악취 발생 .....	7
2.2.2.1. 개방형 사육시설 .....	7
2.2.2.2. 밀폐형 사육시설 .....	8
2.2.3. 양계사 악취 관리 기준 .....	9
2.3. 악취 저감 기술 .....	11
2.3.1. 악취 저감 기술 .....	11
2.3.1.1. 화학적 방법 .....	11
2.3.1.2. 생물학적 방법 .....	12
2.3.1.3. 물리적 방법 .....	12
2.3.2. 습식 스크러버 .....	13
2.4. 스마트 양계사 .....	15
2.4.1. 스마트 양계사의 구성 .....	15
2.4.2. 축사 내 온습도 관리 및 데이터 관리의 중요성 .....	17
2.4.3. 스마트팜 악취 저감 장치 .....	18
3. 연구 내용 및 방법 .....	22

3.1. 육계 .....	22
3.2. 시험 육계사 .....	22
3.3. 환경계측센서 .....	27
3.3.1. 일반 환경 센서 .....	27
3.3.1.1. 온·습도 .....	27
3.3.2. 공기질 센서 .....	27
3.3.2.1. 암모니아 .....	27
3.3.2.2. 이산화탄소 .....	28
3.3.3. 수질 센서 .....	28
3.3.3.1. pH .....	28
3.3.3.2. EC .....	29
3.4. 습식 스크러머 .....	30
3.4.1. 습식 스크러머 .....	31
3.4.2. 밀폐형 스마트 육계사 내부 공기 토출구의 풍량 .....	31
3.4.2.1. 밀폐형 스마트 육계사 내부 공기 토출구의 풍량 측정 .....	32
3.4.3. 노즐 .....	35
3.5. 환경정보 수집 및 통신 .....	39
3.5.1. 밀폐형 스마트 육계사 환경 센서 .....	39
3.5.2. 환경 데이터 취득 방법 .....	40
3.5.2. 환경 데이터 통신 .....	44
4. 결과 및 고찰 .....	45
4.1. 습식 스크러머의 암모니아와 이산화탄소 저감 효과 .....	45
4.2. 밀폐형 스마트 육계사 내부의 온·습도 변화 .....	50
4.3. 습식 스크러머 수조 물의 EC와 pH 변화 .....	52
4.4. 밀폐형 스마트 육계사의 습식 스크러머 운영방안 .....	53

5. 결론 .....	56
Appendix .....	59
참고문헌 .....	69
Abstract .....	75

## List of Tables

<b>Table 1.</b> Device specifications of humidity and temperature transmitter (KSH-7310) .....	27
<b>Table 2.</b> Device specifications of NH <sub>3</sub> sensor (KSF-NH3-100) .....	27
<b>Table 3.</b> Device specifications of CO <sub>2</sub> sensor (KCD-HP100-3F) .....	28
<b>Table 4.</b> Device specifications of pH meter .....	29
<b>Table 5.</b> Device specifications of EC meter .....	29
<b>Table 6.</b> Specification of fan installed in air handling unit .....	31
<b>Table 7.</b> Device specifications of anemometer .....	32
<b>Table 8.</b> Average air volume of outlet 1 to 6 using different fan inverter frequencies .....	34
<b>Table 9.</b> Nozzle specifications .....	36
<b>Table 10.</b> Average flow rate of nozzle at wet scrubber .....	37
<b>Table 11.</b> Specifications of water pump .....	38
<b>Table 12.</b> Removal efficiencies of NH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> .....	49

## List of Figures

<b>Figure 1.</b> Effects of ammonia concentration on humans by ppm .....	10
<b>Figure 2.</b> Configuration of smart broiler farm based on smart farm Korea .....	17
<b>Figure 3.</b> Raising chicks in the closed smart poultry house .....	22
<b>Figure 4.</b> Concept diagram of closed smart poultry house .....	23
<b>Figure 5.</b> Raising chicks in the closed smart poultry house .....	24
<b>Figure 6.</b> Configuration of closed smart poultry house with scrubber and air handling unit .....	25
<b>Figure 7.</b> Overview of sensors used in the experiment .....	26
<b>Figure 8.</b> Overview of scrubber .....	30
<b>Figure 9.</b> Fan in air handling unit .....	31
<b>Figure 10.</b> Locations of six outlets in the closed smart poultry house (in mm) .....	32
<b>Figure 11.</b> Measuring point of air velocity .....	33
<b>Figure 12.</b> Measuring air velocity at outlet .....	33
<b>Figure 13.</b> Changes in air volume at different outlets using different fan inverter frequencies .....	35
<b>Figure 14.</b> JC28-120-32 nozzle .....	37
<b>Figure 15.</b> Overview of supplementary equipments	

in the wet scrubber .....	38
<b>Figure 16.</b> Ammonia gas detector .....	39
<b>Figure 17.</b> Returning duct inside the closed smart poultry house .....	40
<b>Figure 18.</b> Installed sensors with sensor node .....	40
<b>Figure 19.</b> Simplified configuration of closed smart poultry house including scrubber, sensor nodes, sensors, and air handling unit with scrubber .....	42
<b>Figure 20.</b> FarmOS UI showing all the real-time data of temperature, humidity, carbon dioxide, ammonia concentration in ppm .....	43
<b>Figure 21.</b> Ammonia concentration measured at sensor position 5 .....	45
<b>Figure 22.</b> Ammonia concentration measured at sensor position 2 .....	46
<b>Figure 23.</b> CO <sub>2</sub> concentration measured at sensor position 5 .....	47
<b>Figure 24.</b> CO <sub>2</sub> concentration measured at sensor position 2 .....	47
<b>Figure 25.</b> Air temperature measured at sensor position 2 .....	49
<b>Figure 26.</b> Air temperature measured at sensor position 5 .....	50
<b>Figure 27.</b> Humidity measured at sensor position 2 .....	50
<b>Figure 28.</b> Humidity measured at sensor position 5 .....	51

<b>Figure 29.</b> Change of EC in scrubber solution .....	52
<b>Figure 30.</b> Changes in pH in scrubber solution .....	52
<b>Figure 31.</b> Sensors covered with dust and particulate matter during the experiment .....	54

# 1. 서론

## 1.1. 연구배경

최근 가금류에 대한 수요가 높아지면서 닭고기 소비 또한 증가하고 있다. 2000년 우리나라 1인당 닭고기 소비량은 9.63kg이었으나, 2019년 기준 18.7kg로 약 2배가 증가하였다(김희진, 2021). 이에 대한 연장선으로 양계 산업의 성장이 급격하게 성장하면서 효율적인 양계 생산을 위한 새로운 기술이 소개되고 있다. 양계 생산 규모가 증가하면서 닭 5만 수 이상을 보유하고 있는 양계 생산 규모는 2021년 전년 대비 6.2% 증가하며(통계청, 2021년), 양계 산업은 축산업의 주요 사업으로 자리 잡고 있다.

그러나 축산업 대형화에 따라 암모니아 배출량으로 인한 환경 문제가 심각해지고 있다. 국내 대기오염물질 배출량 보고서에 따르면 전체 암모니아 배출량 중 농업 부문에서 배출되는 암모니아는 전체의 78.7%이고, 이 중 축산 분뇨로 인한 암모니아 배출량은 97.8%로 보고되었다(권경석, 2020). 농업 부문의 암모니아 배출량을 감소시키기 위해서는 국내 가축별 악취물질 배출특성이 먼저 파악되어야 하지만, 현재까지 농업 부문의 암모니아 배출량의 정확한 원인 파악과 악취 저감에 대한 해결방안을 내놓지 못하고 있다. 축산업의 선진국으로 꼽히는 네덜란드의 경우, 1990년부터 축산 암모니아 배출량에 대한 조사를 시행하였다. 네덜란드는 기존의 사육시설뿐만 아니라, 암모니아 저감을 위해 공기 스크러버(Air scrubber)가 설치된 사육시설에서 배출되는 암모니아 배출량을 조사하여 축산시설의 암모니아 배출량을 관리해왔다(Mosquera et al., 2004; Melse & Ogink, 2005). 또한, 미국의 미네소타 주는 약 200여 곳의 축산 사육시설과 85곳의 분뇨 저장 시설에서 배출되는 악취, 암모니아, 황의 배출량을 조사하여 악취의 원인을 파악하고, 계절별 악취 분포도를 조사하여 축

산시설 및 분뇨관리 시설에 대한 유해 가스 배출량을 파악하고 지리적 위치에 따른 관찰 연구를 진행하였다(Gay et al., 2002). 이처럼 축산시설로부터 발생하는 악취 발생을 최소화하기 위해선 암모니아를 포함한 축산 가스 배출량에 대한 조사가 먼저 이루어져야 한다. 그러나, 악취 저감 시설을 보유하고 있는 국내 축산시설이 부족할 뿐만 아니라 암모니아와 같은 유해 가스 배출 저감을 위한 별도의 악취 관리 시설 설치를 독려하거나 가스 배출량에 대한 축산시설 규정이 적극적으로 추진되지 않고 있다.

## 1.2. 문제점과 연구 필요성

주로 대규모 생산을 하는 양계 산업에서 다수 발생하는 분뇨관리, 악취 조절, 수질오염, 토양오염 등 환경적인 문제들은 우리나라 축산업계의 영원한 숙제로 남아 있다. 또한, 가축 생산량이 증가함에 따라 인근 지역에서는 사람들의 불쾌한 냄새에 대해 민원이 꾸준히 늘어나고 있는데 2018년 한 해 동안만 발생한 악취 관련 민원 32,452건이 접수되었다. 이 중 축사시설 관련 민원만 6,705건으로 전체의 20.7%를 차지하였다(환경부, 2018). 때론 악취로 인해 축산농가와 인근 주민의 갈등이 깊어져 축사 신축 및 운영 유지에 대한 반대가 심해 축사 경영을 하지 못하는 상황이 발생하기도 한다. 이처럼 축사 운영에 있어 악취와 미세먼지 발생의 주원인으로 꼽히는 암모니아는 2020년 전체 가축 생산량의 암모니아 배출량은 1만3000톤에 육박했으며(농림축산식품부, 2021년), 축사에서 발생하는 악취는 인근 주민들의 불편함뿐만 아니라 사육하는 가축의 건강 및 품질 문제, 농장 관리인과 작업자의 건강에도 영향을 미친다. 축사 운영 시 발생하는 악취는 인간과 가금류에 호흡기 질환, 피부 자극, 중추신경계 손상하여 심각한 건강 문제를 일으킨다는 많은 연구 결과가 보고된 바가 있다(Donham et al., 1995; Radon et al., 2001; Naseem & King, 2018).

따라서 본 연구에서는 밀폐형 스마트 육계사 내 악취 저감 습식 스크러버를 적용하여 이에 대한 성능을 평가하는 것이 이 연구의 최종 목표이다. 밀폐형 스마트 육계사(Smart-closed poultry house)에 습식 스크러버를 사용하여 사육 기간 중 발생하는 암모니아 농도 저감 효율을 확인하기 위해 분무율과 풍속 변화를 변수로 선정하여 성능 평가를 진행하였다. 또한, 습식 스크러버의 문제점을 파악 및 개선하고, 밀폐형 스마트 육계사의 습식 스크러버 운영이 끼치는 영향에 관해 연구하였다.

## 1.2. 연구 목적

본 연구의 목적은 악취문제를 해결한 폐쇄형 스마트 육계사를 개발하는 것이다. 이 논문에서는 자동화 사육시설을 갖춘 밀폐형 다층 케이지 육계사에서 공조기에 습식 스크러버를 직결하여 작동시킬 때에 육계 사육공간 내에서 습식 스크러버의 사용 목적인 악취 저감 성능을 평가하고, 스크러버의 작동이 온도와 습도 등 사육환경에 미치는 영향을 평가하여 스크러버 설계 개선이나 활용에 대한 가이드 라인을 제공하는 것이다. 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 밀폐형 다층 케이지 육계사용 습식 스크러버를 개발하고, 습식 스크러버의 성능 평가를 위한 환경계측시스템을 개발한다. 단, 계측하는 환경인자는 건구온도, 습도, 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ) 농도, 암모니아( $\text{NH}_3$ ) 가스 농도로 제한한다.
2. 육계를 실제로 병아리에서 출하될 때까지 사육하는 조건에서 습식 스크러버를 작동하면서 공조 공간 내부와 습식 스크러버 전후에서 환경 데이터를 수집하여 습식 스크러버의 악취 제거율을 작동조건별로 분류하여 평가한다.
3. 습식 스크러버 작동과 비작동시 환경데이터를 비교하여 스크러버 작동이 사육공간 환경에 미치는 영향을 평가한다.
4. 습식 스크러버의 성능과 사육환경에 미치는 영향을 고려하여 스크러버 설계 개선점과 스크러버 활용에 대한 가이드 라인을 제시한다.

## 2. 연구사

### 2.1 육계와 사양 정보

#### 2.1.1. 육계의 품종과 특징

육계(Broiler)란 닭고기 생산을 위해 사육하는 닭의 품종 중 하나로, 국내 대표적인 육계의 품종으로 로스(Ross), 아바에이커(Arbor Acres), 인디안 리버(Indian River)를 사육한다. 하림, 삼화원종, 한국원종, 사조원종은 육용 원종계를 수입하는 회사로 자사 브랜드 닭고기의 가격 경쟁력과 품질 안정화를 위해 연간 약 41만수 정도 수입되고 있다(Korea Poultry Association, 2012).

국내 토종닭 시장의 점유율이 낮은 이유는 수입 닭보다 균일도가 떨어지고, 생산성이 낮으며 다양성이 부족하여 선호도가 떨어지기 때문이다. 로스(Ross)는 뛰어난 성장률과 높은 근육량을 가졌으며, 부화율이 높고 빠른 성장과 조기 도계가 가능한 품종으로 하림과 삼화원종이 주로 수입한다. 인디안 리버(Indian River)는 한국원종이 수입하는 원종계로 육용 병아리를 생산해 체리부로를 비롯한 많은 육계농가에 공급하고 있다. 인디안 리버는 다른 품종에 비해 다리살과 가슴육 비율이 적절하다(Kim, 2012). 반면, 아바에이커(Arbor Acres)는 로스(Ross)보다 성장률이 더 빠르나, 로스의 육종계가 낳은 달걀의 무게가 아바에이커의 달걀보다 더 무거워 병아리 체중에 영향을 미친다(Hassan & Ali, 2018).

#### 2.1.2. 육계의 사육시설

일반적으로 계사 내부에서 발생하는 악취는 계분(poultry manure)이 주원인으로 꼽힌다. 계분을 쉽게 처리하기 위해 대부분의 농가는 주로 깔짚을 사용한다. 깔짚을 바닥에 깔고 병아리를 사육할 시, 높은 수분함량으로 인해 계사 내부의 암모니아 수치가 증가한다. 이러한 환경은 닭 발바닥 염증과 호흡계 관련 질병 등을 생길 수 있는 환경을 형성시

킨다(하태웅, 2020; 조현성, 2009). 사육 기간 중 사용된 계사 깔짚은 재 활용하여 추후 비료로 재사용이 가능하다는 장점이 있다. 그러나, 제대로 된 깔짚 관리가 이루어지지 않을 시에는 어린 병아리 성장률 저하의 요인이 되기도 한다. 깔짚의 습도를 적당하게 유지하기 위해서는 주기적인 환기, 온습도 관리 및 급수 관리를 철저히 하고 주변 환경의 위생 상태를 확인해야 한다(조현성, 2009). 닭의 사육두수는 매년 증가하고, 닭을 포함한 주요 축종의 사육 규모가 대형화되고 있으므로 악취 관리에 더 관심을 가져야 한다.

한편 계사 형태에 따른 악취 발생 농도 및 발생빈도가 다르므로 국내 가장 많이 사용되는 개방형 계사와 밀폐형(무창) 계사의 악취 발생에 대한 충분한 이해가 필요하다. 또한, 국내 육계뿐만 아니라 산란계, 종계 등의 다양한 계사 형태에서의 악취 발생한다.

## 2.2. 악취와 악취 관리

### 2.2.1. 악취물질의 종류와 특성

대표적인 악취유발물질은 휘발성 유기화합물(Volatile organic compound; VOC), 휘발성 무기화합물(Volatile inorganic compound; VIC)로 크게 나누어진다. VOC는 benzene, phenol, toluene, mercaptan 등이 있고, VIC는 암모니아, 염소, 황화수소류 등을 포함한다. 이 중 축사 악취유발물질로 꼽히는 질소화합물과 황화합물은 대표적으로 암모니아( $\text{NH}_3$ )와 황화수소(Hydrogen sulfide,  $\text{H}_2\text{S}$ )가 있다. 암모니아는 자극성 냄새특성을 갖고 있으며, 오랜 시간 노출될 경우 눈과 목이 따갑거나 두통을 유발한다. 반면, 황화수소는 썩은 달걀 냄새를 띄며 암모니아와 달리 0.47 ppb의 비교적 낮은 농도에도 심한 악취를 느낄 수 있다.

계사의 악취는 주로 닭의 계분으로부터 발생한다. 닭의 일령이 늘어날수록 닭의 사료 섭취량이 증가하면서 계분의 양 또한 급격하게 증가

한다. 닭의 일령이 높을수록 계분 처리를 정기적으로 수행하지 않는다면, 더 심한 악취가 발생하게 되고 따라서, 계분을 깨끗하게 처리하지 않는 계사일수록 계분이 발효되면서 심한 악취를 발생시킨다. 또한, 악취물질은 계분벨트나 벽, 계사 내부 장비에 미세분진과 함께 흡착되거나 공기 중으로 운반되어 악취가 분산된다(최홍립, 2000).

닭의 사육 기간에는 악취뿐만 아니라 다량의 미세먼지와 분진이 발생한다. 계사의 악취는 닭의 사육 기간이 늘어날수록 닭의 사료와 닭의 성장 과정에서 빠지는 닭털로 인한 미세먼지와 계분으로 인한 악취유발물질 등으로 인해 꾸준한 계사 환경관리가 필요하다. 악취는 계사 내부의 닭들의 복지와 건강을 해칠 뿐만 아니라, 닭의 증체량에 영향을 미치기 때문에 경제적 이윤을 남기기 위해서는 농가에겐 악취 관리 또한 필수적으로 관심을 가져야 하는 부분이다. 따라서, 일령별 암모니아 발생량과 계분 발생량에 따른 악취 발생량을 확인할 필요가 있고 계분 처리를 즉시 해주는 것이 암모니아 가스 생산을 최소화할 수 있는 가장 근본적인 해결책이다.

## 2.2.2. 육계사 형태에 따른 악취 발생

### 2.2.2.1. 개방형 사육시설

개방형 계사는 주로 자연 환기 방식을 사용하여 악취의 농도뿐만 아니라 계사 내부의 온·습도를 조절한다. (Ogink & Koerkamp, 2001) 그러나 보통 개방형 계사는 대규모 사육을 하므로 정확한 사육 규모나 사육두수별 악취물질 배출특성을 파악하기는 힘들다. 개방형 환기를 하는 산란계사의 경우, 암모니아 농도가 평균 16.4 ppm이었으며, 같은 환기 방식의 육계사의 암모니아 측정농도는 평균 14.4 ppm이었다. 그리고 다른 축종과 비교했을 때 암모니아 농도가 육계와 산란계사에서 9.5 ~ 15.0 ppm으로 높게 나타났다 (Jang et al., 2009). 육계의 경우, 계사 내

부 환기가 잘되고 깔짚이 잘 건조되는 환경이어야 한다. 급수용 니플을 사용할 때, 물이 누수되지 않고 깔짚이 젖지 않도록 미리 대비해야 한다. 계사 내부의 낮은 습도는 깔짚과 먼지들로 인해 다량의 먼지가 발생할 수 있으며 적절한 습도를 유지해야만 악취유발을 방지할 수 있다.

개방형 산란계사의 경우, 케이지 아래로 다량의 분뇨가 축적되면서 심한 악취를 발생할 수 있고, 분뇨를 외부로 이동시킬 경우 악취가 발생한다. 따라서, 개방형 산란계사에서는 톱밥과 왕겨 등을 수분조절용으로 사용하여 악취 발생과 해충 발생을 예방한다. 또한, 스크래퍼나 컨베이어를 이용한 분뇨이송 방식을 사용할 때 악취가 발생할 수 있으니, 매일 분뇨를 처리하여 계사 내 악취를 관리해야 한다(월간양계, 2016).

#### 2.2.2.2. 밀폐형 사육시설

양계의 효율적인 사육 방식으로 꼽히는 밀폐형 사육 방식은 계사 외부로부터 공기나 열이 들어오지 않도록 천장이나 벽을 단열재를 이용하여 완전히 밀폐시켜 사육하는 방법이다. 밀폐형 사육 방식은 주로 산란계 사육 방식으로 알려져 있다. 산란계뿐만 아니라 육계에도 밀폐형 사육이 가능하고 밀폐형 사육의 가장 큰 장점으로 꼽히는 일당 증체량 증가, 평당 사육 수수 증가와 높은 사육 효율이 있다(축산환경과 시설, 2016). 한편, 육계의 생물학적 특성상 털, 비듬, 계분, 사료 등을 포함한 분진 발생으로 인해 내부 환경관리가 중요하고, 조류 인플루엔자와 같은 전염병에 매우 취약하여 방역 관리가 매우 중요한 가축이다.

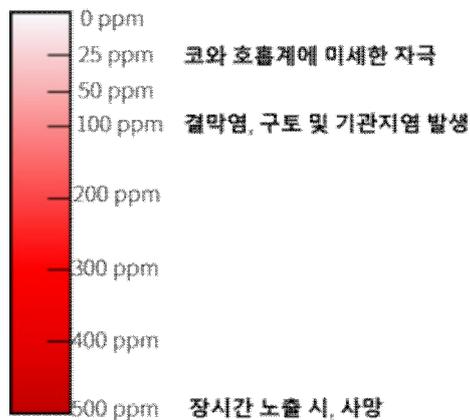
또한, 사육 기간 중 발생하는 암모니아 배출량은 내부의 환기 방식과 사육 규모, 일령에 따라 다르게 발생하므로 보통 집약적으로 사육하는 무창형(windowless) 또는 밀폐식 계사는 대부분 황화수소, 메탄, 이산화탄소보다 암모니아 농도가 월등히 높게 측정된다(박지훈 등, 2015). 무창형(windowless)의 밀폐형(closed) 사육시설에는 충분한 환기가 되지 않을뿐

더러, 일령(day)이 늘어날수록 발생하는 암모니아 배출량이 증가하여 더 높은 암모니아 농도가 발생하며 밀폐되고 한정된 공간 내에 사육 수가 증가할수록 사료 냄새와 분뇨가 섞여 불쾌한 악취 발생 및 암모니아를 포함한 해로운 가스가 발생한다. 무창 계사의 경우 강제 환기 방식을 가장 많이 사용하며, 밀폐된 공간에서의 고밀도 사육으로 인해 닭이 움직일 수 있는 공간을 제한한다. 이는 성장률 저하와 질병 발생 등 다양한 문제를 발생시키고(Meseret, 2016), 육계의 사육 밀도가 높아질수록 Foot pad dermatitis와 같은 질병의 발생 가능성이 증가하고, 고밀도 사육으로 인한 고열 스트레스는 육계의 성장률을 감소시키고 폐사율을 증가시킨다(McLean et al., 2002). 이처럼 사육시설의 종류에 따라 육계 성장률과 폐사율에 차이를 보이며, 사육 기간 중 발생하는 악취 농도 또한 다르게 나타난다. 계사 악취의 주원인인 암모니아는 밀폐형과 개방형 육계 사육시설 형태에 따라 다르게 발생·측정된다. 같은 규모의 사육두수라도 밀폐형 사육시설이 더 높은 암모니아가 발생한다. 밀폐형과 개방형 육계 사육시설의 암모니아 발생 농도는 각각 25 ppm과 15 ppm이 측정되었으며, 황화수소의 경우 11.9 ppb와 11.7 ppb가 측정되었다(Jang et al., 2009). 암모니아뿐만 아니라 분진 4종(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, 흡입성 분진, 호흡성 분진)이 자주 발생하며, 환기 방식에 따라 4종의 배출량에 영향을 끼친다(Jang et al., 2022).

### 2.2.3. 양계사 악취 관리 기준

축사 내 허용 암모니아 농도는 25 ppm으로 (동물의 적절한 사육·관리 방법 등에 관한 법률 시행규칙 별표 1, 환경부), 상시 축사시설 내 암모니아 농도를 확인·관리가 필요하다. 만약 작업 환경에서 암모니아 25 ppm가 발생할 경우, 가축과 사람의 코과 호흡계에 미세한 자극을 줄 수 있으며, 50~100 ppm에 노출된 경우엔 결막염, 구토 및 목에 자극

을 가할 수 있다. 100~500 ppm 이상에 장시간 노출되는 경우에는 사망까지 이를 수 있다는 연구 사례 및 사건 보고가 있다(딩엔 & 문찬석, 2019)(Fig. 1). 이처럼 대기 오염의 원인으로 꼽히는 암모니아 배출량에 대한 문제는 환경적으로 논란이 될 뿐만 아니라, 생물학적 관점으로도 반드시 해결되어야 하는 문제이다.



**Figure 1** Effects of ammonia concentration on humans by ppm

이에 대한 대책으로 농림축산식품부는 2016년부터 2022년까지 전체 초미세먼지와 암모니아 배출량을 30% 감축하기 위한 저감 대책을 발표하였다. 이 중 주요 관리 방안으로 축사시설현대화 추진, ICT 암모니아 측정기 보급 및 교육·점검을 실행하고 있다(Kim et al., 2019). 축산악취개선 사업이 추진되면서 다양한 시도를 하고 있지만, 축산냄새는 기후, 축사 형태, 악취 저감 시설 활용 부족, 분뇨처리 방법 등으로 인해 꾸준히 발생하고 있다. 또한, 축사 주변에는 기류 안정화 현상으로 인해 이른 새벽이나 늦은 저녁에 높은 악취를 발생시키고 기상 여건에 따라 악취의 체감도가 변하기 때문에 정확한 축산 악취의 원인과 강도를 측정하기 쉽지 않

다. 정부는 악취의 원인 파악과 문제 해결을 위해 스마트팜 연구사업, 시스템 개발 등이 수행하고 있다. 실제 연구 사례로는 세종시가 스마트팜 농가와 협력하여 악취 민원을 2019년 74건에서 2020년 33건, 절반 이상을 줄이는 성과를 보이며 축산 스마트팜 기술이 악취 감축에 도움을 주는 것을 확인하였다(이영희, 2021).

## 2.3. 악취 저감 기술

### 2.3.1. 악취 저감 기술

오래전부터 농축산업에서 발생하는 악취를 줄이기 위한 악취 저감 기술 연구 및 개발되었다. 악취 처리 기술에는 크게 세 가지로 분류되는데, 1) 화학적 방법(chemical), 2) 생물학적 방법(biological), 3) 물리적 방법(physical methods)로 나뉜다. 대표적인 악취처리방법은 활성탄 흡착법, 토양탈취법, 오존산화법, 촉매연소법, 바이오 필터법, 바이오 스크러버법, 약액세정법이 있다.

#### 2.3.1.1. 화학적 방법

일반적인 생물학적 악취 저감 방법은 첨가물에 의한 식이조절, 혐기성 소화가 존재한다. 사료에 단백질 함량을 조절하거나 생균을 사료에 첨가하여 가축에 급이할 경우, 소화 과정에 유용한 미생물을 증가시킴으로써 분뇨의 악취유발 물질을 감소시키는 효과가 있다. 분뇨에서 발생하는 발효성 악취를 줄이는 이 생물학적 방법은 별도의 사료가 필요하여, 맞춤형 사료 구매에 대한 경제적인 부담이 있다는 단점이 있다.

오존 산화법은 높은 산화력을 가지고 있는 오존을 사용한 VOC 물질을 산화 분해하는 방식이다. 그러나, 오존은 안전상의 이유로 사용·관리법이 까다롭고 잔류 오존 저감 처리를 요구하므로 추천하지 않는다. 다른 화학적 방법으론 촉매연소법이 존재한다. 촉매연소법은 귀금속 및 전이금속을 이용한 촉매가 주로 이루어져, 주로 산업체에서 사용되며 축산에서는 적

용이 극히 드물다. 그리고 약액세정법 또는 약액 흡수 산화법은 악취물질과 세정액과 접촉시켜 화학적 흡수가 일어난다. 세정액을 사용할 경우 원하는 악취 저감 효과에 따라 사용할 수 있는 선택성을 가지고 있지만, 대량의 세정액을 구매하기 위해 높은 비용이 요구된다는 단점이 있다. 그러나 설치, 유지·관리비용이 다른 악취 저감 기술보다 저렴하고 먼지도 동시 제거가 가능하다.

#### **2.3.1.2. 생물학적 방법**

한편, 생물학적 악취 저감 기술로 바이오 필터, 바이오 스크러버를 사용한다. 바이오 필터는 미생물의 대사 활동 원리를 이용해 악취 및 VOC를 물, 이산화탄소와 무해한 염으로 분해하는 방법이다. 바이오 필터는 저농도 악취에 적합하고 복합가스 처리가 가능하다. 2차 산물로 유해하지 않는 물이나 이산화탄소를 배출하나, 큰 설치면적을 요구하고 고농도처리에 적합하지 않다. 바이오 필터는 축산폐수 처리장에 이용된다.

#### **2.3.1.3. 물리적 방법**

가장 기본적인 물리적 방법의 악취저감기술은 외부의 신선한 공기를 강제적 또는 자연적으로 유입·환기하여 축사시설 내부의 악취 농도를 낮추거나 악취유발 물질을 외부로 내보내는 방법이 있다. 반면 축산업에서 흔히 찾아볼 수 있는 물리적 악취 제거 방법으로 토양흡착법, 활성탄 흡착법 등이 있다. 기본적인 원리는 공기 중 암모니아 농도를 흡착 및 탈착시켜 악취를 제거하는 방식이다(Liu & DeRouchey, 2014). 토양탈취법은 악취 가스 중 암모니아와 황화수소를 토양에 흡입시켜 토양에 존재하는 미생물에 의해 분해 및 흡착시켜 화학반응에 의한 악취 제거법이다. 유지 관리가 비교적 용이하나, 토양을 보관할 넓은 면적이 필요하고 적당한 습기를 위해 물을 살포해줘야 한다. 활성탄을 이용한

악취 흡착법은 미세구멍에 VOC 물질이 흡착되어 악취를 저감하는 방법이 있다. 활성탄 흡착법은 저농도에 효과적이며 암모니아와 같은 가벼운 성분은 처리가 어렵고 흡착제의 2차 처리가 필요하여 높은 유지·관리비를 요구한다.

바이오 스크러버를 이용한 악취 저감 기술은 악취물질 분해 미생물이나 단순 수용액을 이용하여 공기 중 존재하는 암모니아를 수용액에 흡착·탈취시켜 악취 농도를 저감 시킨다. 다른 악취 제거 기술과 달리, 운전비 및 유지·관리 비용이 비교적 저렴한 편이나, 미생물의 종류에 따라 처리 가능한 악취물질이 제한적이고 흡착제의 부정기적 교환주기로 인해 제거 효율이 천차만별이며 유지 관리가 어렵다는 치명적인 단점을 갖고 있다 (Choo & Nam, 2004). 또한, 악취 제거 시스템의 초기 설치비용과 유지비용이 제거하고자 하는 오염도에 따라 천차만별이며 (Kim et al., 2015), 축사 규모에 따라 공기 오염도 또는 암모니아 농도가 다르므로 상용화에 어려움이 있다.

### 2.3.2. 습식 스크러버

고농도의 암모니아가 발생하는 밀폐형 축사에는 배출되는 공기를 제어해야 하므로 악취 관리가 매우 중요하다. 또한, 외부로 배출되는 냄새를 저감 해야 하는 밀폐형 축사의 특성상 바이오 커튼, 바이오 필터 및 방풍벽을 이용하는 등 다양한 방법이 소개되었다. 이 중 습식 스크러버는 공기 중 존재하는 암모니아뿐만 아니라 이산화탄소, 분진, 및 세균 등의 제거에도 효과적이다. 보편적으로 많이 사용되는 습식 스크러버는 축사에서 배출되는 냄새 물질을 흡수 및 중화시킬 수 있는 미생물이나 별도의 수용액을 사용해야 하고 주기적인 교체 기간이 있다는 점에서 경제성과 편리성의 한계를 보였다. 그러나, 국내 밀폐형 육계 사육시설에서 사용되는 습식 스크러버가 극소수이기 때문에 이에 관한 연구가

미흡한 실정이다. 현재 조사된 자료에 따르면, 국내 습식 스크러버는 밀폐형 사육시설이 아닌 다른 사육시설 형태나 가축을 대상으로 연구가 진행된 것을 확인하였다. 따라서 밀폐형 육계사에 적합한 맞춤형 습식 스크러버 개발과 이와 관련된 연구가 절실히 필요한 상황이다.

그러나 대부분의 축사 관련 작업이 노동집약적이며 축사 관리인 또한 불쾌한 냄새를 발생하는 계분처리 중 악취 스트레스를 겪을 수 있고, 악취 시스템을 설치했을 때 꾸준한 유지·관리가 어렵다는 것이 국내에 스크러버 또는 악취 시스템이 널리 보급되지 않는 대표적인 이유이다. 또한, 국내 축산법에 따르면 축사 설계 시 악취 관리를 위한 별도의 시스템을 요구하지 않는다. 대부분의 국내 축사는 별도의 악취 시스템을 보유하고 있지 않으므로 다른 환경 조건에 스크러버나 악취 관리 시설 이용이 끼치는 영향에 관한 연구가 부족하다.

공기가 일방적으로(One-way path) 순환하는 밀폐형 계사(closed broiler house)에서 습식 스크러버(wet scrubber)의 역할은 집중적인 대기 오염 예방 및 악취 관리에 도움을 줄 수 있다. 하지만 일반적인 습식 스크러버는 미생물 및 약품비 구입으로 인한 과도한 유지관리비와 사용 미숙으로 인해 많은 농가에서 활용되기 어렵다. 그리고 일반 우사·돈사와 달리 밀폐형 계사에서는 대량으로 발생하는 미세먼지와 털로 인해 습식 스크러버 작동 이후의 관리가 매우 중요하다. 그러나 노동집약적인 축사에서 악취 관리 시설은 농가 관리인에겐 너무 부담스러운 일이다. 대부분 농가 관리인들은 악취 관리에 대한 중요성을 충분히 인지하고 있으나, 이에 적합한 해결방안은 없는 상황이다.

## 2.4. 스마트 육계사

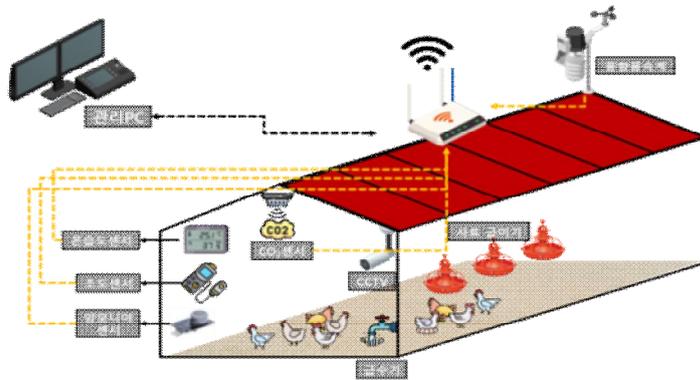
### 2.4.1. 스마트 육계사의 구성

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 양계사(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 양계사도 공통적으로 해결해야 하는 문제이며, 스마트 양계사에서 발생하는 온·습도, 암모니아, 이산화탄소 측정은 암모니아 발생량 추정과 환기량 판단에 도움을 줄 수 있는 중요 요소로 이용된다.

닭의 사육시설과 가장 유사를 띄고 있는 오리를 예를 들자면, 최근 운영되고 있는 오리 스마트팜은 내부에서 측정되는 암모니아 농도가 일정 수치 이상 증가하면, 자동으로 살균제를 분사하는 간단한 스마트 악취 방지 시스템을 갖추었다(Korea Duck Association, 2021). 그러나 현재까지의 국내 연구 동향을 살펴보면, 축산 스마트팜의 악취 저감 방법 연구에 대해 보고된 바가 없다. 또한, 국내 스마트팜 코리아 기관은 양계 스마트팜 시스템 중 계사 환경관리를 위한 센서, 환경 제어 시스템, 외부시설을 모니터링하기 위한 음수·사료빈 관리 시스템은 포함하나, 악취 저감 시스템이나 시설 등을 포함하지 않는다. 악취 관리는 축산업 전체의 가장 큰 걱정거리이기도 하나, 실제 스마트 축사를 운영하는 농장 관리인이나 관계자를 위한 스마트 악취 관리 시스템에 대한 적극적인 대책이나 기술이 활발히 소개되지 않고 있다.

국내 외 해외 연구 사례들도 크게 다르지 않다. 해외 축산 스마트팜의 악취 관련 연구 동향을 살펴보면, 축사 내부에서 발생하는 암모니아 및 황화수소 가스를 모니터링하기 위한 전자코(electronic nose) 개발 (Aunsa-Ard et al., 2021)과 같은 악취 물질 농도를 측정하기 위한 연구와 돈사 중심의 악취 저감 관련 연구가(Constantini et al., 2020) 대부분이며 양계 스마트팜의 악취 저감 기술 연구는 확인되지 않는다. 국내 축산업에서 발생하는 악취 저감에 관한 지속적인 관심이 필요한 상황이며, 국내 축산 스마트팜에 적합한 악취 저감 방법을 연구할 필요가 있다.

농림수산식품교육문화정보원(EPIS) 소속의 스마트팜 코리아에 따르면 국내 스마트 육계 내부시설에는 계사별 CCTV, 사료 급이량 제어, 환기 제어, 온도제어, LED등 조도와 점등 제어, 내부 음압 제어를 필수적으로 포함하며 환경관리로는 온·습도 센서, 조도 센서, 이산화탄소·암모니아 센서, 누전 감지 센서 등을 포함한다(Fig. 2). 그러나 스마트팜 코리아에서 정의하는 스마트 육계사에는 내부환경 관리장비로 암모니아 농도를 측정하는 장비만 취급할 뿐, 계사에서 발생하는 악취에 대한 별도의 관리 시스템을 포함하지 않는다.



**Figure 2** Configuration of Smart Broiler Farm based on Smart Farm Korea

이처럼 스마트팜 코리아의 기준에 따르면 축사 스마트팜은 온·습도, 암모니아, 음수 등의 환경정보 수집장치가 내부 환경관리 장비로 설치가 필수적이지만, 악취 측정 방법·악취 저감 시스템·악취 모니터링 시스템 등과 같은 악취 관리 시스템은 선택적 설치 시설에 해당한다. 따라서, 악취 관리 시스템은 모든 스마트 양계사에 엄격하게 요구되는 조건이 아니므로 실제 밀폐형 육계 사육시설에서 수행된 악취 저감 효과에 관한 연구 보고가 미흡한 실정이다. 이와 더불어 스마트 양계사에 악취 시스템이 스마트팜 코리아에 필요 장비·시스템으로 반영되지 않는 대표적인 이유로, 국내 습식 스크러버가 보급이 활발히 이루어지지 않기 때문이다. 습식 스크러버는 높은 초기 투자비용과 꾸준한 기기 유지 관리가 필요하므로 보급화가 어렵다.

#### 2.4.2. 축사 내 온·습도 관리 및 데이터 관리의 중요성

농림축산식품부는 축산분야 ICT 융복합 확산사업으로 축사 내·외부의 환경 모니터링 및 조절 장비 분야에 악취 측정·악취저감시스템·악취 모니터링 시스템 등을 포함하였다. 스마트 축사에 설치된 센서와 ICT 장비들

은 사육환경 관리 또는 환경정보 모니터링을 위해 사용되며, 센서로 얻은 사육 데이터는 축사 내부 환경제어를 위해 활용할 수 있고, 온·습도나 암모니아·이산화탄소·황화수소와 같은 축산 가스 농도를 실시간으로 확인할 수 있다. 내부 환경에 따라 환기팬을 가동하여 악취를 줄이거나 쿨링패드를 가동하여 적정한 온·습도를 유지할 수 있다. 이처럼 센서값은 축사 내부 환경을 제어하기 위해 사용되나, 사육 기간 중 발생하는 내부 먼지와 분진으로 인해 센서 고장이 빈번히 일어나는 경우가 있다. 관리자가 센서를 주기적으로 관리해주지 못하거나 센서 사용법을 제대로 숙지하지 못했다면, 센서의 수명이 줄어들고 이는 축사의 생산성 저하를 초래한다(Choi & Kim, 2019). 이에 대한 해결법으로 사용자의 센서와 ICT 장비 사용에 대한 충분한 숙지와 다수의 센서를 설치하여 정밀한 센서값을 받는 방법이 있다. 축사 내부 한두 개의 센서가 오작동하더라도 위치별 데이터를 얻어 다양한 위치의 데이터를 얻거나, 개별 제어와 동시 제어를 가능케 하여 만약의 상황을 대비하여 부분적 제어가 가능해야 한다.

#### 2.4.3. 스마트팜 악취 저감 장치

해외 연구 사례에 따르면 양계 시설복지·축사 내의 환경관리·농장 관리인의 건강 등의 이유로 전자코(Electronic nose)를 이용한 암모니아를 포함한 축산 가스 배출량을 확인할 수 있으며(Aunsa-Ard, et al., 2021), 국내 양계 스마트팜 기술으로는 축산 암모니아 배출량을 모니터링하기 위한 ICT 기술(Yoon, et al., 2021)이 있다.

이와 더불어, 2019년 농림축산식품부는 농축산분야에서 발생하는 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)와 암모니아(NH<sub>3</sub>) 배출량을 감축하기 위한 미세먼지 저감 대책을 발표하였다. 2016년 기준 농축산분야 초미세먼지 발생량은 전체 발생량의 5.8%(20.3천 톤), 2차 생성 미세먼지 전구물질 배출량은 전체 발생량의 12.1%(356천 톤)이다. 미세먼지가 가장 많이 발생하는

가축은 계사 바닥에 왕겨, 깔짚 등을 깔아 먼지가 많이 발생하는 육계로 알려져 있다(Lee, 2003). 농축산분야 미세먼지를 체계적으로 감축하기 위해 농림식품기술기획평가원, 농촌진흥청과 산림청이 협업하여 미세먼지 감축 목표 설정 및 저감 대책을 발표하였으며, 축산분야 암모니아 발생을 감축하기 위해 1) 농업기술센터에 전체 농가의 40%에 미생물제제 공급 및 구매자금 지원, 2) 축산환경 개선지역 집중관리, 3) 축사시설현대화 추진, 4) 축산분뇨처리를 위한 퇴비유통전문조직을 육성 및 퇴비 부숙도 관리도 강화 방안 제안, 5) 축사 밀폐화를 이용한 암모니아 방출 최소화 방식을 추진하였다(한국오리협회, 2019).

최근 사육 환경관리의 편리성을 추구하는 농가들이 많아지면서, 밀폐형 사육시설이 활발히 보급되고 있다. 밀폐형 사육의 또 다른 장점으로 대규모 가축 사육이 가능하다는 점인데, 이는 가축 생산성 관리와 축사 내부 환경제어가 용이하다(Park et al., 2015). 반면, 밀폐형 사육시설 특성상 공기 교환(air exchange)가 어려우므로 가축 사육형태나 작업 유형에 따라 작업자의 특별한 관리가 필요하다. 따라서 밀폐형 사육시설에도 악취 관리를 하기 위해 다양한 악취 저감 기술이 도입되었다.

밀폐형 사육시설에서 주로 사용되는 악취 방지 시설은 생물탈취법(Biological deodorization method)과 흡착(Adsorption) 방법, 또는 수세방식(Scrubbing)이 있다. 습식 스크러버는 수세방식의 대표적인 예로 악취물질 종류에 따라 물·산·알카리·산화제·수용액 등을 사용할 수 있다(한국환경공단, 2011). 밀폐형 사육시설에서 사용되는 습식 스크러버 방식의 암모니아 및 황화수소 처리효율은 약 89%이지만, 온·습도 및 오염물질 농도에 따라 처리효율이 크게 변한다. 처리 후 세정액의 추가적인 처리장치가 필요하고 운영비가 많이 든다는 단점이 있다. 보통 습식 스크러버

사용 후 발생하는 세정액은 폐수로 간주하여 별도의 폐수 처리장에 위탁하여 처리한다.

반면 밀폐형 사육시설의 환기시설에 악취 저감을 위해 추가 설치하는 흡착시설에서는 산성 흡착제에 악취물질을 흡착하여 처리한다. 주로 암모니아와 황화수소를 처리하며 처리효율은 53% 이하로 습식 스크러버 방식보다 효율이 비교적 매우 낮은 편이며, 미세먼지와 악취물질을 동시 제거가 가능하지만, 처리시설의 유지·관리 비용이 많이 든다(유영성 & 심규승, 2007). 하지만 현실상 모든 축사에 맞는 악취 저감 시설 또는 악취 흡착시설을 설치하기에는 경제적 부담이 크다. 더불어, 대부분 축사는 개방형이자 자연 환기 방식으로 운영되는 축사가 많으므로 개방형이나 자연 환기 방식의 축사는 악취 관리가 어렵고 분진 및 미세먼지 관리가 쉽지 않다. 따라서 대부분 축사는 배출된 암모니아가 발생하더라도 아무런 처리 없이 외부로 배출시킨다. 이렇게 배출된 암모니아는 기류를 타고 인근 주거지역으로 이동하여 민원이 발생하는 결과를 초래한다(Lee, 2003). 그러므로 원활한 축사 운영을 위해서는 인근 주민으로부터 신고되는 민원을 최소화하기 위해 한적한 곳에서 운영하는 경우가 많고, 밀폐형 사육시설에서 발생하는 악취 저감 관리 연구가 매우 부족하다. 기존에 수행된 연구 결과에 따르면, 국내 연구 중 축산업에서 발생하는 악취 저감에 관한 연구 보고는 대부분 돈사를 대상으로 실행되었다. 또한, 다른 축산동물과 달리 다양한 형태의 사육시설을 보유한 육계를 포함한 양계는 사육 유형에 따른 악취 저감 효과를 객관적으로 파악하기 어렵다. 따라서 악취 저감 효과를 알아보기 위해서는 악취 저감 효율에 대해 이해가 필요하다.

약취 저감 효율에 관한 식은 아래와 같다.

$$\text{Equation 1. } \eta = 1 - \left(\frac{C_o}{C_i}\right) \times 100 \text{ (Kwak et al., 2015)}$$

*where,*

$\eta$ : removal efficiency, %

$C_i$  : gas concentration at inlet (ppm)

$C_o$  : gas concentration at outlet (ppm)

### 3. 연구 내용 및 방법

#### 3.1. 육계



**Figure 3** Raising chicks in the closed smart poultry house

본 실험을 위해 진행된 총 사육 기간은 30일이며, 총 1,000마리의 병아리가 사육되었다(Fig. 3). 출하 시 목표 생체중은 1.6 kg 이상이였다. 사육되는 병아리의 품종은 육계 아바 에이커(Arbor Acres)로, 아바에이커 품종은 단기간에 빨리 자랄 수 있는 특징을 가지고 있다. 아바에이커는 대표적인 육계 품종으로 고기를 얻기 위한 품종이다. 또한, 국내에서 가장 부화장에서 공급이 잘 되고, 유통이 원활한 품종이다.

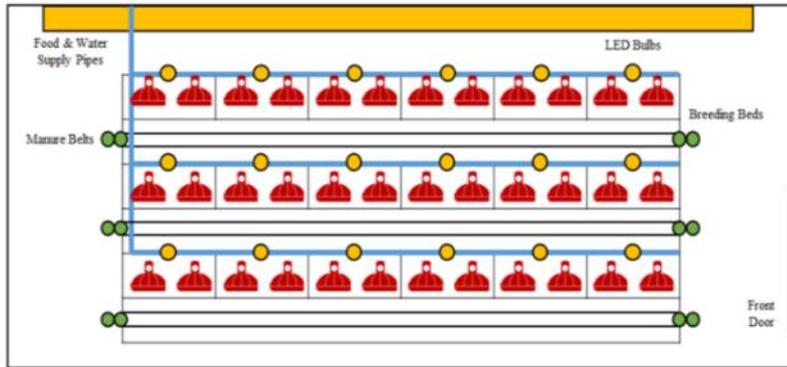
#### 3.2. 시험 육계사

본 연구는 강릉시 과학단지에 소재한 (주)대상키우미시스템의 모델 KUM-3000 밀폐형 스마트 육계사를 활용하여 진행하였다(Fig. 4).



**Figure 4** Concept diagram of closed smart poultry house

밀폐형 스마트 육계사는 컨테이너 내부에 3층 형의 케이지와 계분 벨트를 갖추고 있다. 전체 컨테이너의 크기는  $18 \times 4.0 \times 3.6$  m이며, 케이지 가운데에는 급이기와 급수기가 설치되어 있어 병아리들이 상시 사료와 물을 섭취할 수 있도록 하였다. 육계가 자라는 사육 베드에는 플라스틱 슬랫과 상단의 조명부, 환기를 위한 덕트 및 후드, 관리인이 지나갈 수 있는 통로와 복도 측면의 조명이 설치되어 있다(Fig. 5).



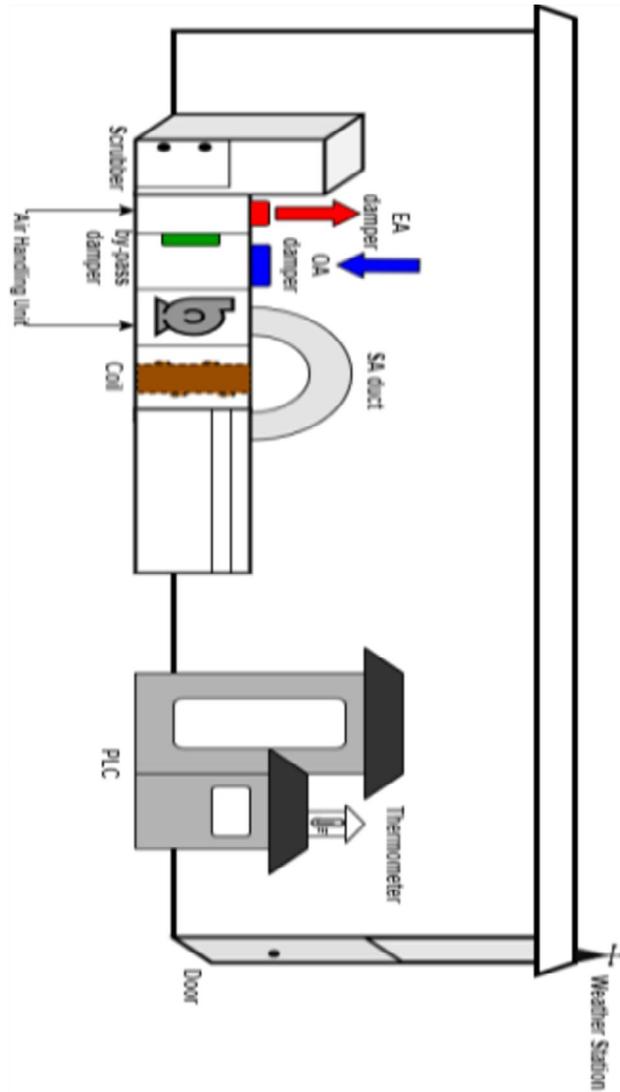
**Figure 5** Simplified configuration of closed poultry house

본 연구에서는 밀폐형 방식의 육계사를 이용하여 계사 내부의 공기가 순환하며 유동하고, 최소한의 환기를 하여 환기 후 발생하는 온·습도의 편차를 줄이도록 설계되었다. 밀폐형 스마트 육계사 외부에는 공조기(Air handling unit), 습식 스크러버, 외부기상대과 백엽상, PLC, SA(Supply air) duct가 있다(Fig. 6). 공조기(Air handling unit)은 계사 내부 온습도 조절을 위해 내부 공기를 바깥으로 빼내는 EA(External air) damper, 온습도 조절을 위해 외부 공기가 유입되는 OA(Outside air) damper, 계사 내부 환경에 따라 제어되는 by-pass damper, 냉수와 온수가 흘러 지나가는 코일(coil)과 계사 내부에 바람을 유입시키는 SA duct가 있다.

계사 내부의 온도와 습도에 따라 EA damper, OA damper 그리고 by-pass damper가 열고 닫히면서 외부 공기가 유입되거나 나가게 된다. 본 밀폐형 스마트 육계사는 일령별 사육에 적합한 온·습도에 따라 병아리 사육 실험이 진행되었으며, 병아리의 적합한 환경 온도에 따라 위에서 언급된 damper가 열렸다 닫히며 계사 내부의 온·습도를 조절한다.

본 연구에서는 밀폐형 방식의 육계사를 이용하여 계사 내부의 공기가

순환하며 유동하도록 하고, 최소한의 환기를 하여 환기 후 발생하는 온·습도의 편차를 줄이도록 한다. 또한, 습식 스크러버를 공조기 전에 설치하여 외부로 나가는 공기의 악취를 최소화하도록 설계되었다.



**Figure 6** Configuration of closed smart poultry house with scrubber and air handling unit

### 3.3. 환경계측센서

#### 3.3.1. 일반 환경 센서

본 연구에서는 습식 스크러버가 밀폐형 스마트 육계사에 영향을 미치는 주요 환경데이터인 온도, 습도, 암모니아, 이산화탄소 농도를 측정할 수 있는 센서를 센서 노드(Sensor node)에 연결하고, 습식 스크러버의 암모니아 줄이기 효과를 검증하기 위해 정해진 위치에 설치된 센서들로부터 측정값을 받았다.



**Figure 7** Overview of sensors used in the experiment (a) Sensor node (b) Humidity and temperature sensor, (c) NH<sub>3</sub> sensor, and (d) CO<sub>2</sub> sensor (Korea Digital, South Korea)

### 3.3.1.1. 온·습도

**Table 1** Device specifications of humidity and temperature transmitter(KSH-7310)

Parameter	Description
Sensor Type	Humidity: capacitance method
	Temperature: semiconductor method
Detection range	Humidity: ~99% RH
	Temperature: -40~60℃
Uncertainty at 25℃	Humidity: ±3% (10~90% RH)
	Temperature: ±0.3℃

### 3.3.2. 공기질 센서

#### 3.3.2.1. 암모니아

**Table 2** Device specifications of NH<sub>3</sub> sensor (KSF-NH3-100)

Parameter	Description
Sensor Type	Sensor transmitter
Mass	250g
Target	NH <sub>3</sub>
Detection range	0~100 ppm
Response time	35s
Resolution	0.1 ppm

### 3.3.2.2. 이산화탄소

**Table 3** Device specifications of CO<sub>2</sub> sensor (KCD-HP100-3F)

Parameter	Description
Sensor Type	Sensor transmitter (NDIR)
Mass	250g
Target	CO <sub>2</sub>
Detection range	0~3,000 ppm
Response time	65s
Resolution	10 ppm

### 3.3.3. 수질 센서

본 실험에서는 수조의 수질 변화를 알아보기 위해 pH와 전기전도도 EC 측정 meter를 이용하여 pH와 EC 모듈 팁을 수조에 충분히 잠기도록 설치하였다.

#### 3.3.3.1. pH

습식 스크러버 수조의 물 pH 변화에 따라 암모니아 저감 효율을 알아보기 위해 pH/ISE 모듈을 포함하는 Thermo Scientific Orion Versa Star Pro Meter를 사용하였다. pH 모듈 Orion 8107UWMMD을 연결하였고, 모듈의 팁이 물에 충분히 잠기도록 설치하였다.

**Table 4** Device specifications of pH meter

Parameter	Description
Accuracy	$\pm 0.002$
Calibration point	1 to 6
Range	-2.000 to 20.000
Resolution	0.1/0.01/0.001

### 3.3.3.2. EC (전기전도도)

본 실험을 진행하는 동안 EC 측정 모듈 011510MD (Thermo Scientific) 을 Thermo Scientific Orion Versa Star Pro Meter에 연결하여 수조 물의 전기전도도 변화를 확인하기 위해 모듈 팁이 물에 담갔다. 전기전도도 측정값의 정확도를 위해 1~2시간마다 모듈 팁을 수조에서 빼서 증류수에 잠깐 담갔다가 다시 수조에 넣어 EC를 측정하였다.

**Table 5** Device specifications of EC meter

Parameter	Description
Accuracy	0.5% of reading $\pm 1$ digit $> 3 \mu S$ ;
	0.5% of reading $\pm 0.01 \mu S \leq 3 \mu S$
Calibration point	up to 6
Range	0.001 $\mu S/cm$ to 3000 $mS/cm$
Resolution	0.001 $\mu S$ minimum, auto ranging up to 4 significant digits

### 3.4.1. 습식 스크러버

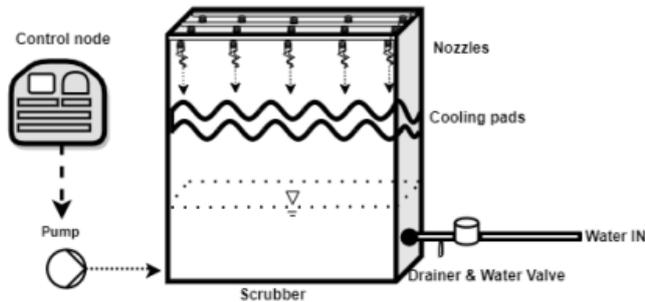


Figure 8 Overview of scrubber

밀폐형 스마트 육계사에 설치된 습식 스크러버는 노즐, 쿨링 패드, 펌프, 수조, 불탑, 배수관, 워터 밸브, 제어 노드로 구성하였다(Fig. 7). 제어 노드(Control node)는 습식 스크러버를 원격으로 제어할 수 있는 장치로, 노즐의 유량을 조절하기 위해 AC 가변속 드라이브(이하 인버터)를 제어 노드 안에 설치하였다. 수조의 크기는  $900 \times 1,000 \times 400$  mm로 수조의 부피는 360 L지만, 물은 260 L를 채웠다. 쿨링 패드는 길이  $600 \times 900$  mm, 두께 150 mm를 사용하였다. 본 실험에서는 습식 스크러버의 암모니아 저감 효과를 평가하기 위해 총 12시간 동안 습식 스크러버를 구동하였고, 노즐 유량과 풍속을 조절하기 위해 인버터를 사용하여 습식 스크러버의 유량과 계사 내부에 유입되는 풍량을 변수로 설정하였다.

### 3.4.2. 밀폐형 스마트 육계사 내부 공기 토출구의 풍량

밀폐형 스마트 육계사는 외부에 설치된 공조기 안에 있는 fan을 이용하여 공기 순환을 하고(Fig. 9, 필요시에는 SA duct를 통하여 새로운 공기를 밀폐형 육계사에 유입시킨다. Fan의 제어 명령은 계사 내부에 설치

된 내부 온·습도 기준으로 작동하게 된다. 공조기 안에 있는 fan의 사양은 Table 6.과 같다.



**Figure 9** Fan in air handling unit

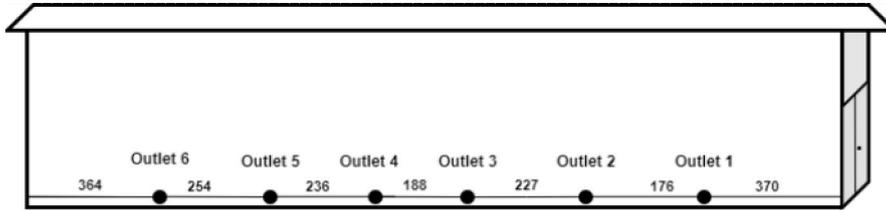
**Table 6** Specification of fan installed in air handling unit

Parameter	Description
	SWSF-2.5DS
Model	(Seawon Fan Machinery Co., South Korea)
Area of outlet	380 cm <sup>2</sup>
Air volume	84 CMM

#### 3.4.2.1. 밀폐형 스마트 육계사 내부 공기 토출구의 풍량 측정

밀폐형 스마트 육계사 내부 공기에 유입되는 풍량을 계산하기 위하여 계사 내부 공기 토출구 6개의 풍속을 각각 측정하였다. 계사 내부에는 토출구가 총 6개가 있으며 밀폐형 스마트 계사를 들어가는 문에서 가장 가까운 토출구를 Outlet 1으로 정하고, 제일 안쪽에 있는 토출구를 Outlet 6으로 정하였다. 6개의 토출구 간의 간격(mm)과 위치는 Fig. 9와 같이 나

타내었다.



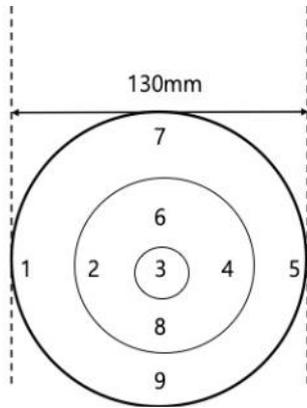
**Figure 10** Locations of six outlets in the closed smart poultry house (in mm)

각 토출구의 풍속을 측정하기 위해 사용한 풍속계의 사양은 아래와 같다(Table 7).

**Table 7** Device specifications of anemometer

Parameter	Description
Model	Testo 435 (Testo, Germany)
Detection range	0~60 m/s
Resolution	0.01 m/s

토출구의 풍속을 측정하기 위해 측정 포인트를 총 9개로 나누어 측정하였다. 토출구의 지름은 130mm로, 풍속계를 이용하여 각 9개의 측정 지점에서 풍속을 측정한 뒤, 풍량을 계산하였다(Fig. 10). Fan의 풍속을 AC 가변속 드라이브(이하 인버터)를 이용하여 풍량을 제어하였다. 밀폐형 스마트 육계사에 설치된 인버터는 최소 0 Hz부터 최대 60 Hz까지 출력이 되었으며, 본 세부 실험에서는 20 Hz부터 60 Hz까지 frequency를 10 Hz 간격으로 바꾸어 풍속을 측정하였다(Fig. 11). 총 3번 반복 실험을 통해 평균 풍량의 정확도를 도출하였다.



**Figure 11** Measuring point of air velocity



**Figure 12** Measuring air velocity at outlet

본 세부 실험은 풍속계를 이용하여 각 토출구의 9개 지점의 풍속을 측정하였으므로, 이를 바탕으로 풍량을 계산하였다(Appendix A~E). 풍량을 계산하기 위한 계산식은 아래와 같다.

$$Q_a = A \cdot V$$

$$= \frac{\pi}{4} d^2 (\text{measured air velocity in m/s}) (60 \frac{\text{m/s}}{\text{min}})$$

= air volume rate at each outlet point

where,

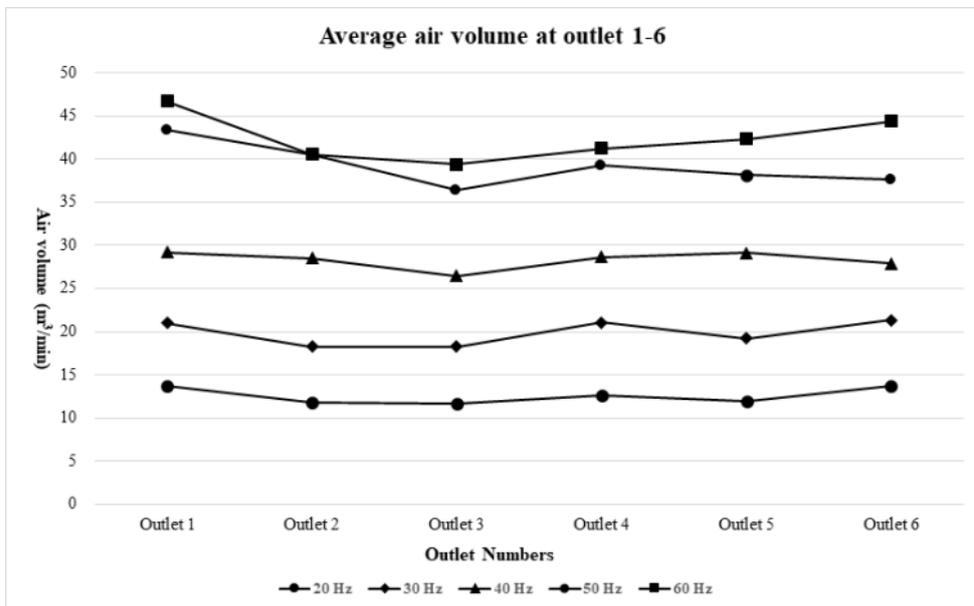
d = diameter of outlet

Table 3.는 총 6개의 토출구에서 풍속 측정값을 풍량으로 계산하고 각 Hz마다 3번 반복한 실험의 평균값을 나타낸다.

**Table 8** Average air volume of outlet 1 to 6 using different fan inverter frequencies

(unit: CMM)

Hz/ Outlets	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6	Average
20 Hz	13.75	11.78	11.74	12.65	11.98	13.69	12.60
30 Hz	21.01	18.26	18.29	21.08	19.24	21.32	19.87
40 Hz	29.23	28.53	26.46	28.68	29.16	27.88	28.32
50 Hz	43.34	40.59	36.36	39.27	38.20	37.59	39.22
60 Hz	46.69	40.57	39.39	41.25	42.32	44.38	42.43



**Figure 13** Changes in air volume at different outlets using different fan inverter frequencies

12.60 CMM일 때 Outlet 1-6의 풍량이 비교적 비슷하게 도출되었다. 12.60 CMM, 19.87 CMM, 28.32 CMM일 때 Outlet 1-6의 평균 풍량이 증가하는 것을 알 수 있었다. Outlet 1, 2과 4의 평균 풍량이 39.22 CMM과 42.43 CMM로 fan을 구동시켰을 때 매우 유사하였으며, 이는 다른 fan 풍속 조건과 달리 39.22 CMM과 42.43 CMM일 때의 평균 풍량이 크게 차이가 없는 것으로 해석된다. 그러나 42.43 CMM의 풍량으로 fan을 구동했을 때 Outlet 1의 평균 풍량이 가장 높게 측정되었다 (Fig. 11).

본 연구에는 12.60 CMM, 28.32 CMM, 42.43 CMM의 fan을 설정하여 습식 스크러버의 암모니아 저감 효과를 관찰하였다.

### 3.4.3. 노즐

본 약취 스크러버는 돼지 꼬리 모양의 노즐을 사용한 점이 특징이라고 할 수 있을만큼, 흔히 축사에 사용되지 않는 노즐을 사용하였다. 돼지 꼬리 노즐(JC29-180-32)은 일반 농업에서 사용되는 미립화(atomization) 된 노즐이 아닌, 청소용 설비에서 찾아볼 수 있는 노즐이다. 따라서 압력이 셀 뿐만 아니라, 분사 시 120° cone 모양으로 분사된다. 사육 기간 중 계사 내부에서 발생하는 닭털, 미세먼지, 사료 먼지 등이 공기에 흡착되어 이동할 시, 노즐에 물이 통과할 때 이물질로 인해 구멍에 막히는 현상을 예방하기 위해 오리피스 직경이 11.1mm인 돼지 꼬리 모양 노즐 15개를 설치한 습식 스크러버를 이용하여 실험을 진행하였다.



**Figure 14** JC28-120-32 nozzle  
(Jae Woon Nozzle)

노즐의 사양은 아래 Table 9.와 같다.

**Table 9** Nozzle specifications

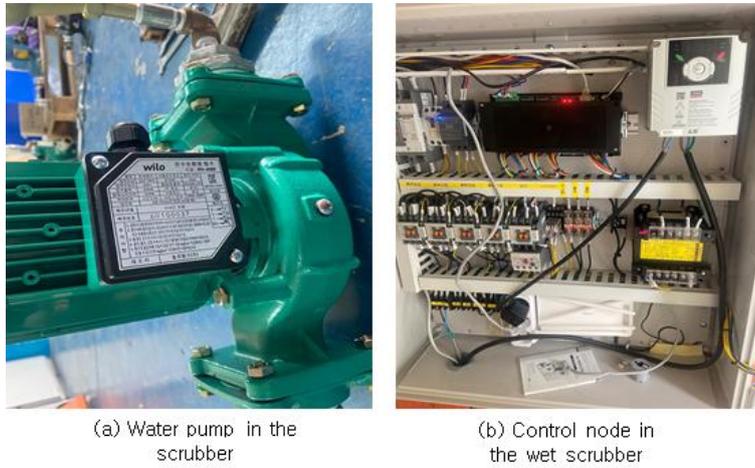
Parameter	Description
Model	JC29-180-32 (Jae Woon Nozzle, South Korea)
Spray angle	Full cone, 120°
Maximum foreign object passing orifice diameter	11.1 mm
k constant	56.1
flow rate	0.01 m/s

**Table 10** Average flow rate of nozzle at wet scrubber

Hz		LPM		Average (LPM)
60 Hz	1.47	1.34	1.26	1.35
50 Hz	1.24	1.03	1.09	1.12
40 Hz	1.02	0.98	0.89	1.02
30 Hz	0.85	0.92	0.88	0.88
20 Hz	0.57	0.49	0.56	0.54

노즐, 쿨링 패드, 수조, 펌프 그리고 제어 노드로 구성된 습식 스크러버는 FarmOS로 명령을 보내 작동하였다. 습식 스크러버에 설치된 펌프는 3상 380V 로(Fig. 15a), 인버터와 함께 제어 노드에 연결하여 펌프가 노즐로 보내는 물의 유량을 조절하였다(Fig. 15b).

노즐의 유량 측정을 위해 노즐 한 개의 유량을 측정하였다. 노즐 15개 중 임의의 3개를 선정하여 노즐의 각 유량을 다음에 나타내었다(Table 10). 본 실험에서는 조절 가능 범위 중 0.54 LPM부터 1.35 LPM까지 유량을 조절하여 암모니아 저감 효과를 알아보았다. 습식 스크러버 내부에 설치된 순환용 펌프의 사양은 Table 11.에 나타나 있다.



**Figure 15** Overview of supplementary equipments in the wet scrubber (a) water pump in the scrubber, (b) control node in the wet scrubber

**Table 11** Specifications of water pump

Parameter	Description
Model	PH-600i (Wilo, Germany) 380V 60 Hz
Power	600W
Total head	11m
Maximum pump capacity	320 l/min
Maximum allowable pressure	4 bar

### 3.5.2. 환경데이터 취득 방법

환경데이터 취득 전, 각 위치에 설치된 센서의 암모니아 측정 정확도를 시험하기 위해 암모니아 검지관 흡입기(Kitagawa, Japan)와 3L 암모니아

검지관을 이용하여 각 지점의 암모니아를 즉석 측정하여 암모니아 센서의 정확도를 확인하였다.



**Figure 16** Ammonia gas detector with glass tube

계사 내부에는 센서 노드(Fig. 14a)와 암모니아, 이산화탄소, 온·습도 센서 세트 3개를 설치하였고, 약취 스크리버를 지나기 전에 1개, 그리고 약취 스크리버를 통과한 공조기 안에 1개씩을 설치하여(Fig. 17), 총 5개의 센서 세트를 설치하였다. Returning duct의 총 길이 16.5m, 직경은 400mm로, 계사 내부에 설치한 센서 세트 3개는 계사 입구 기준 덕트 입구와 중간, 그리고 returning duct의 가장 안쪽에 설치하였다(Fig. 15).



**Figure 17** Returning duct inside the closed smart poultry house



**Figure 18** Installed sensors with sensor node

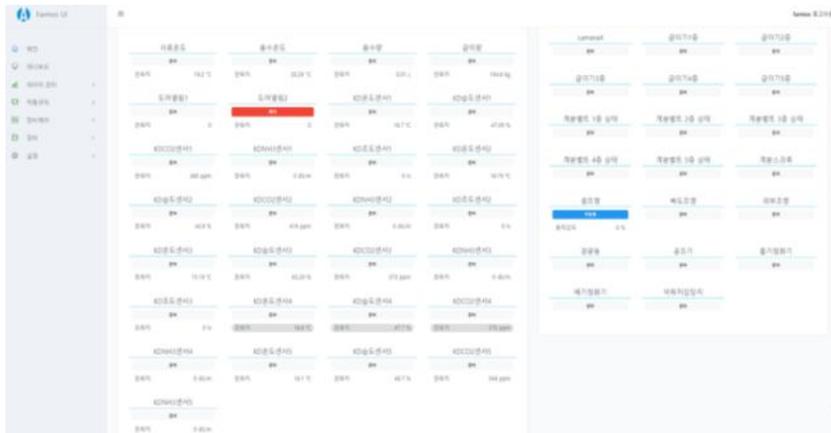
암모니아, 이산화탄소, 온·습도 센서는 총 5곳에 설치되었다. 해당 센서들은 계사 전체의 공기가 유동하는 returning duct 안에 3곳 (계사 입구, returning duct 가운데와 끝)에 설치되어 있으며(Fig. 17), 나머지 2곳은 공기가 약취 스크러버를 통과하기 직전의 습식 스크러버 입구와 습식 스크러버를 통과한 뒤인 공조기에 설치하였다. 본 실험의 전체적인 개념과

센서 설치 위치는 Fig. 18에 나타나 있다. 계사 입구에 설치된 곳을 1번 센서, returning duct의 가운데에 설치된 센서를 2번 센서로 임의 설정하고, 공기가 습식 스크러버에 이동하기 전과 계사 내부 덕트 가장 안쪽 위치한 곳에 설치된 센서를 3번 센서로 명시하였다. 또한, 오염된 공기가 습식 스크러버를 통과하기 전에 설치된 센서를 4번 센서라 칭하고, 습식 스크러버를 통과한 후이자 공조기 안의 fan 직전에 설치된 센서를 5번 센서로 칭하였다.



### 3.5.3. 환경데이터 통신

해당 센서들은 센서 노드(SSN-220, Digital Korea)에 결선 되어 전원을 공급받고, RS485 모드버스 방식을 이용하여 소형 컴퓨터인 라떼 판다(x86 기반 SBC 개발보드)로 정보를 수신받아 1분에 한 번씩 데이터를 저장한다. 저장된 데이터는 클라우드 서버 DB(Database)로 전달되어, DB에서 FarmOS UI로 실시간으로 확인이 가능하다(Fig. 17).



**Figure 20** FarmOS UI showing all the real-time data of temperature, humidity, carbon dioxide, ammonia concentration in ppm

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 습식 스크러버의 암모니아와 이산화탄소 저감 효과

암모니아 농도는 일령이 증가하고 계사 내부에 축적되는 계분의 양이 늘어날수록 증가한다. 이 실험은 많은 계분이 발생하기 시작하는 14일령 이후에 진행되었으며, 계사 내부에 있는 returning duct의 초입에 설치된 1번 센서에서 암모니아 농도가 가장 높게 측정되었다. 반면, 2번과 3번, 4번에서 측정된 암모니아 농도는 1번 센서보다 비교적 낮게 측정되었으며 습식 스크러버를 구동시켰을 때의 2번과 3번, 4번 센서의 암모니아 농도 값은 큰 차이가 없었다. 이는 계사 내부의 공기 일부가 포함된 암모니아 농도가 1번 센서에서 고농도로 측정되었다가 이동하는 다른 공기와 섞여 2번과 3번 센서의 암모니아 농도가 희석되는 것이라 추론할 수 있다. 또한, 1번과 5번 센서에서 측정된 암모니아 농도 측정값은 노즐 유량과 풍량에 따라 변하는데, 5번 센서는 1번 센서에서 측정된 암모니아 농도보다 더 높게 측정되었다. 본 실험은 각 위치한 센서들의 여러 환경적 요소를 영향받으므로 계사 내부의 암모니아와 이산화탄소 농도를 관찰하기 위해 returning duct의 가운데인 2번 센서를 기준으로 하고, 습식 스크러버의 성능을 확인하기 위해 센서 5번에서 얻은 측정값으로 비교했다.

이는 공조기 내부에 설치된 fan이 스크러버와 간격이 매우 가깝다는 점과 스크러버 내부에 설치된 노즐과 쿨링 패드 간의 거리가 짧고, 쿨링 패드가 one-layered로 설치되어 있다는 점이 5번 센서의 암모니아 농도가 높게 측정된 이유로 꼽을 수 있다. 또한, 본 실험의 암모니아 저감 효과를 이해하기 위해선 습식 스크러버를 거쳐 순환하면서 계사 내부에 유입되

는 2번 센서와 5번 센서의 암모니아 측정값이 가장 유의미하다고 판단된다. 5번 센서에서 측정된 암모니아 농도가 다른 암모니아 측정 지점보다 높더라도 2시간의 습식 스크러버 구동 시간 동안 2번 센서의 암모니아 농도 측정값을 낮추었으므로 습식 스크러버의 효과가 있었다.

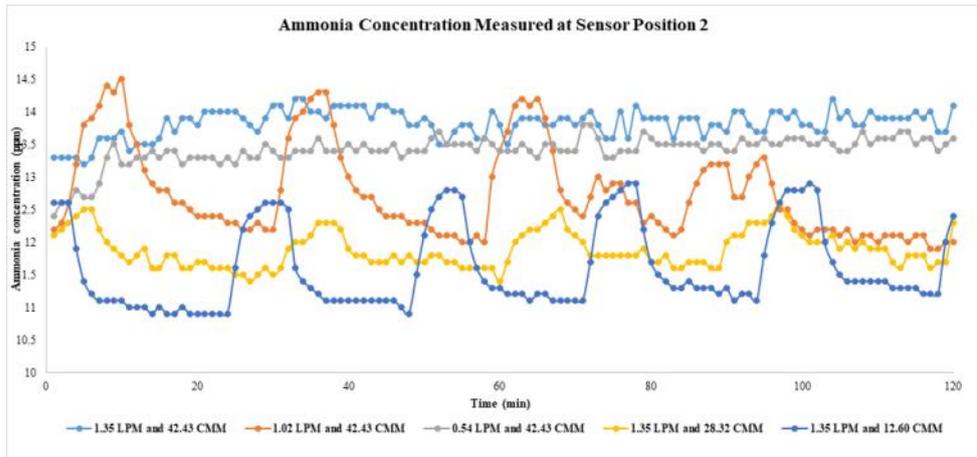


Figure 21 Ammonia concentration measured at sensor position 5

그러나, 암모니아 저감 효과는 습식 스크러버의 노즐 유량과 fan 풍량을 바꾸었지만 이에 대한 차이는 미미했다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 습식 스크러버와 fan의 거리가 매우 가깝고 습식 스크러버 내부에서 설치된 쿨링 패드와 노즐 간의 거리이자 암모니아를 포함한 공기가 물에 닿을 수 있는 시간이 짧았고, 사용된 쿨링 패드의 개수와 쿨링 패드 한 개의 두께 또한 적었으므로 습식 스크러버가 노즐 유량과 풍량에 따라 암모니아 저감율이 효과적이지 못하였다. 그러나, 2시간씩 습식 스크러버를 구동한 결과, 1.35 LPM 노즐 유량과 12.60 CMM fan을 사용했을 때 2번 센서에서 가장 낮은 암모니아 농도가 발생했으며, 암모니아 저감율이 습식 스크러버에 사용된 물을 교체하지 않은 채 스크러버를 구동할 경우, 효과가 점점 미미하다는 것을 이를 통해 검증할 수 있었다.

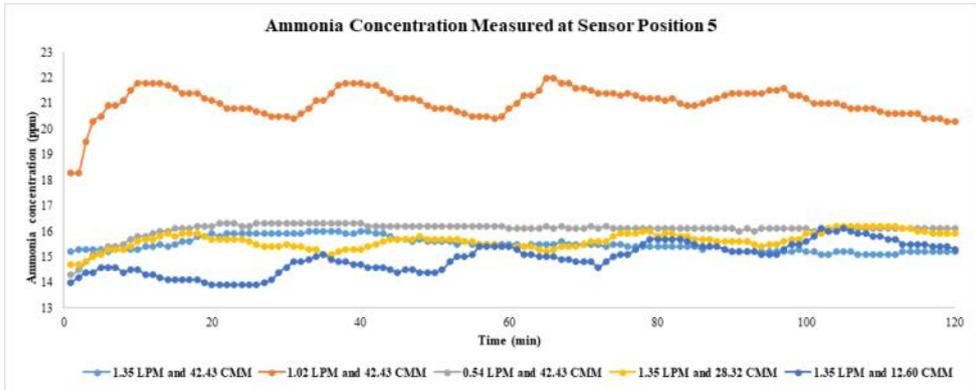


Figure 22 Ammonia concentration measured at sensor position 2

Fig. 23은 습식 스크리버를 통과한 후 공기가 순환하면서 이산화탄소 농도가 감소했다는 것을 보여준다. 이산화탄소의 경우, 낮은 풍량으로 fan을 구동시켰을 때 이산화탄소 저감 효과가 미미했고, 풍량이 높을수록 이산화탄소가 낮게 유지되었다. 1.35 LPM과 42.43 CMM fan으로 습식 스크리버를 구동시켰을 때 2번 센서와 5번 센서의 이산화탄소 농도가 우상향되는 현상을 확인할 수 있었으며, 다른 구동 조건과 달리 이산화탄소가 매우 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 계사 내부의 이산화탄소 농도가 매우 높아 습식 스크리버를 통해 이산화탄소가 줄어든 공기가 계사 내부에 유입되어도 유의미한 차이를 보여주지 못한 것으로 추측된다. 또한, 이산화탄소 농도는 2번과 5번의 측정값은 서로 비슷한 추세를 띄고 있지만, 습식 스크리버를 구동함으로써 계사 내부의 이산화탄소 농도 저감에 도움을 되는 것을 확인할 수 있었다.

앞서 언급한 Eq. 1을 이용하여 암모니아와 이산화탄소의 저감율을 계산하였다.

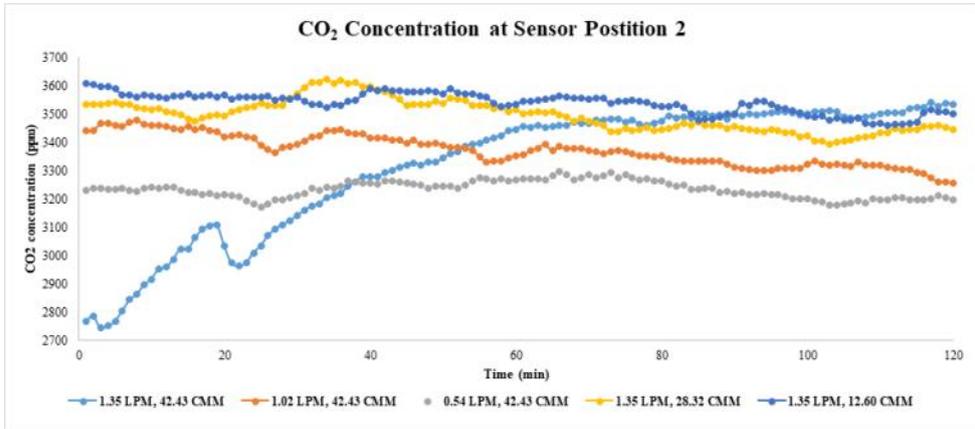


Figure 24 CO<sub>2</sub> concentration at sensor position 2

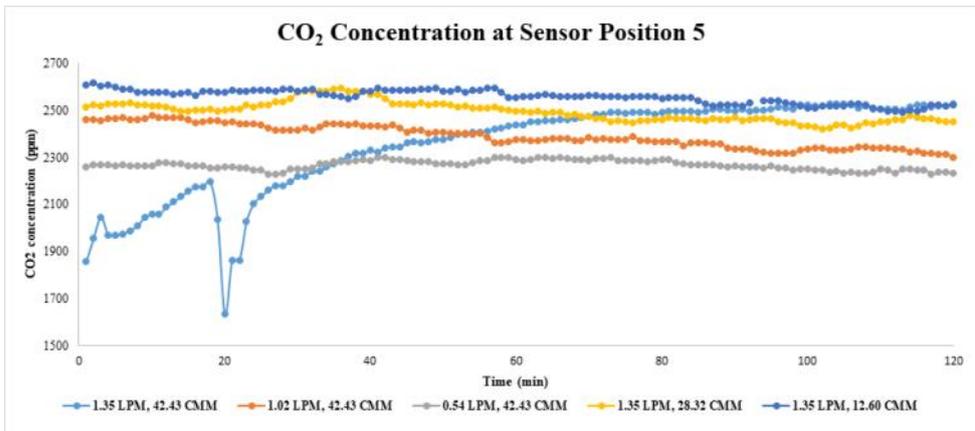


Figure 23 CO<sub>2</sub> concentration at sensor position 5

$$\text{Removal Efficiency } (\eta) = 1 - \left(\frac{C_o}{C_i}\right) \times 100 \text{ (Eq. 1)}$$

$\eta$ : removal efficiency, %

$C_i$  : gas concentration at sensor position 2 (ppm)

$C_o$  : gas concentration at sensor position 5 (ppm)

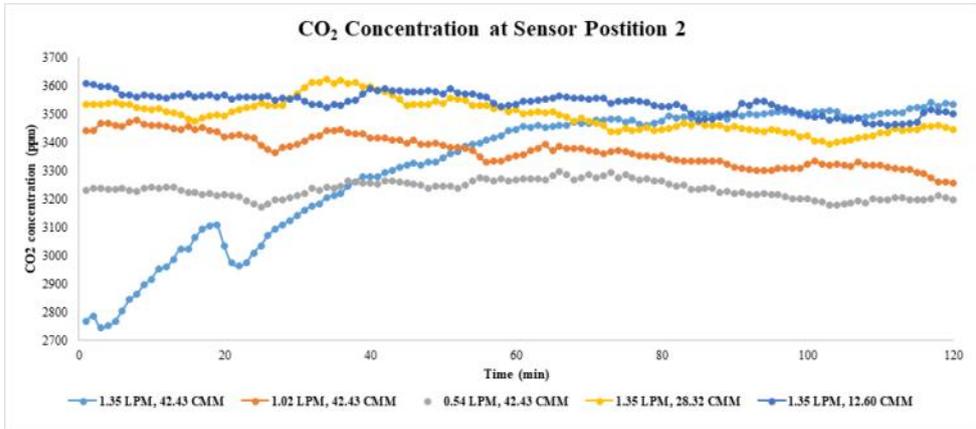


Figure 24 CO<sub>2</sub> concentration at sensor position 2

Table 12 Removal efficiencies of NH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>

Water flow rate (LPM)	1.35	1.02	0.54	1.35	1.35
Air flow rate (CMM)	42.43	42.43	42.43	28.32	12.60
NH <sub>4</sub> $\eta$ (%)	10.72	39.39	16.54	23.99	22.42
CO <sub>2</sub> $\eta$ (%)	29.15	29.13	29.88	28.62	27.71

Table 12.는 각 구동 조건의 암모니아와 이산화탄소 저감을 나타낸다. 1.02 LPM과 42.43 CMM fan의 구동 조건으로 습식 스크러버를 운영했을 때 가장 암모니아 저감이 가장 크게 나타났으며, 0.54 LPM과 42.43 CMM fan으로 구동했을 때 가장 높은 이산화탄소 저감이 발생하였다.

#### 4.2. 밀폐형 스마트 육계사 내부의 온·습도 변화

본 실험을 통해 습식 스크러버가 밀폐형 스마트 육계사 내부의 온·

습도에 끼치는 영향을 알아보기 위해 센서 2번의 계사 내부 온·습도 변화를 Fig. 25로 나타내었다. 본 실험에서는 계사 내부 설정 온도를 26°C로 설정하여 진행하였으므로, 26°C와 비슷한 목표 온도를 유지할 수 있었다. 또한, 온도 변화가 비슷한 패턴을 유지하는 이유는 계사 내부의 온도가 계사 내부 온도를 26°C로 설정하였으므로 27°C 이상 올라갈 경우, 온도가 저절로 내려가는 현상이 발생한 것이다. 또한, 0.54 LPM 노즐과 42.43 CMM fan으로 습식 스크러버를 구동했을 때 계사의 내부 온도 제어가 제대로 수행되지 못하는 것을 확인하였다(Fig. 25). 또한, 센서 5번에 측정된 값에 따르면(Fig. 26), 0.54 LPM 노즐과 42.43 CMM fan을 구동했을 때 습식 스크러버를 통과한 공기 온도가 가장 높게 나타났다. 이는 해당 구동 조건이 가장 뜨거운 오후 1시경 작동된 것이 원인이라 생각된다. 그리고 2번 센서에서 같은 구동 조건을 살펴봤을 때, 계사 내부의 온도가 비교적 낮게 나타난 것으로 보아, 습식 스크러버를 사용할 경우 계사 내부의 온도를 낮추는 것에 도움이 되는 것을 확인하였다.

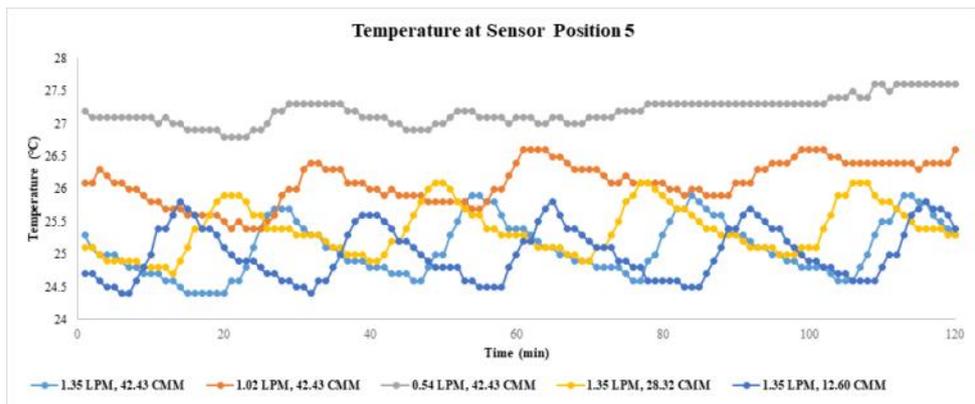
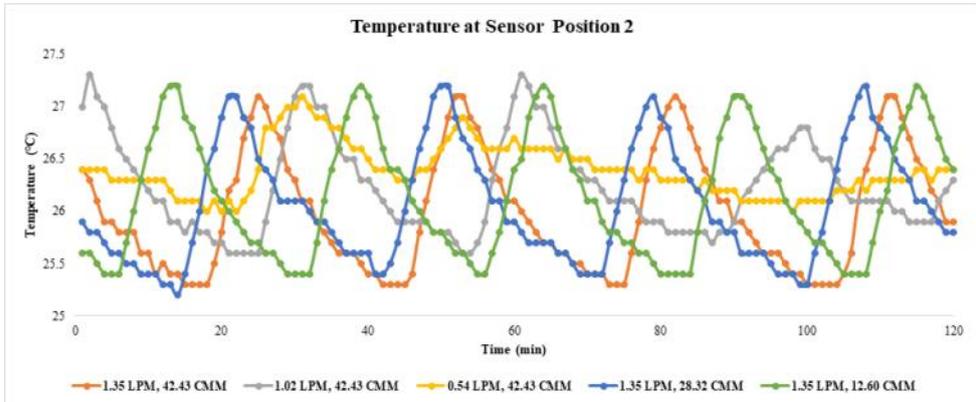


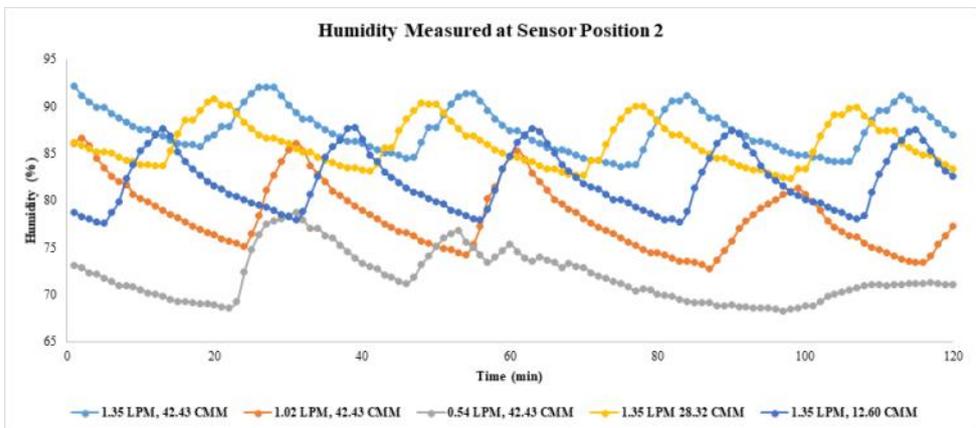
Figure 26 Air temperature measured at sensor position 5

한편, 계사 외부에 설치된 센서 5번의 측정값에 따르면 1.02 LPM과



**Figure 25** Air temperature measured at sensor position 2

0.54 LPM 노즐 유량으로 각각 42.43 CMM fan으로 구동했을 때 공기 온도가 증가하는 추세를 보였으며, 이는 노즐의 유량이 줄어들수록 편차가 심하게 나타났다. 따라서, 노즐의 유량은 공기 온도에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.



**Figure 27** Humidity measured at sensor position 2

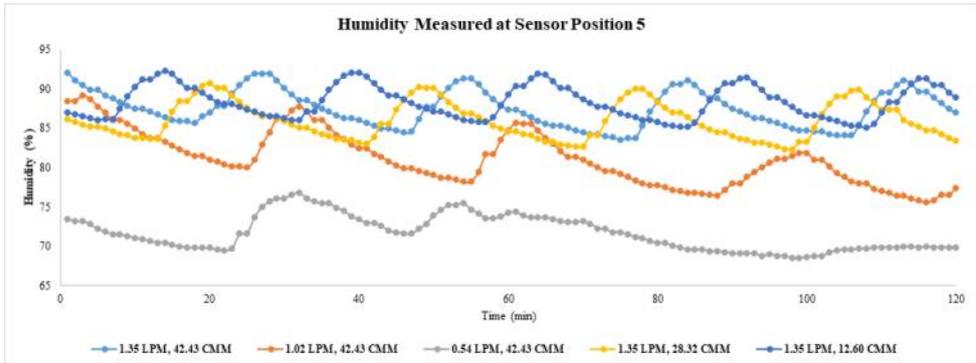


Figure 29 Humidity measured at sensor position 5

해당 실험은 우기에 진행되었고 실험 당일에도 비가 왔으며 습도가 전반적으로 매우 높게 나타났다. 앞서 언급된 조건들과 함께 계사 내부 습도의 변화를 살펴보자면, Fig. 25와는 다른 경향을 보였다. 계사 내부는 0.54 LPM 노즐과 42.43 CMM fan으로 습식 스크러버를 구동하였을 때 가장 낮은 습도를 유지할 수 있었으며, 다른 조건들로 구동했을 때는 최대 약 92%까지 습도가 올라갔다. 이는 습식 스크러버를 구동하지 않은 센서 5, 외부의 습도와 비슷하였으며, 0.54 LPM 노즐과 42.43 CMM fan, 1.02 LPM 노즐과 12.60 CMM fan 이 두 조건으로 습식 스크러버를 구동했을 때 더 낮은 습도를 유지할 수 있었다. 유량이 적을수록 계사 내·외부의 습도가 낮게 나타났다.

#### 4.3. 습식 스크러버 수조 물의 EC와 pH 변화

본 실험에서 사용된 수조 물의 EC와 pH 변화에 따라 오염된 공기의 암모니아와 이산화탄소 저감율이 다르게 나타난다. 0.54 LPM 노즐과 42.43 CMM fan으로 구동한 경우 수조 물을 교체하지 않고 스크러버를 총 10시간 구동한 후였으므로, EC가 가장 높게 나타나며 이에 따라 암모

니아와 이산화탄소 저감 효율이 가장 미미하게 나타났다(Fig. 29). 반면, 1.35 LPM 노즐과 42.43 CMM fan, 1.35 LPM 노즐과 28.32 CMM fan의 구동 조건은 초기에 구동되었으므로 EC의 변화가 가장 늦게 나타났다.

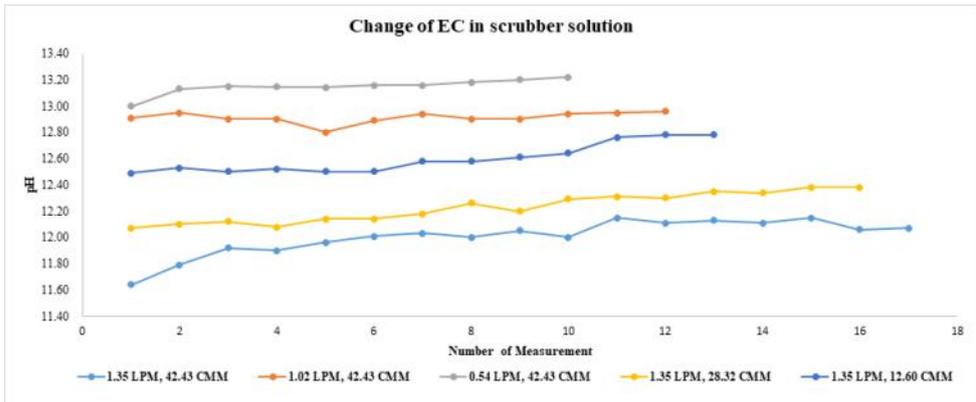


Figure 29 Change of EC in scrubber solution

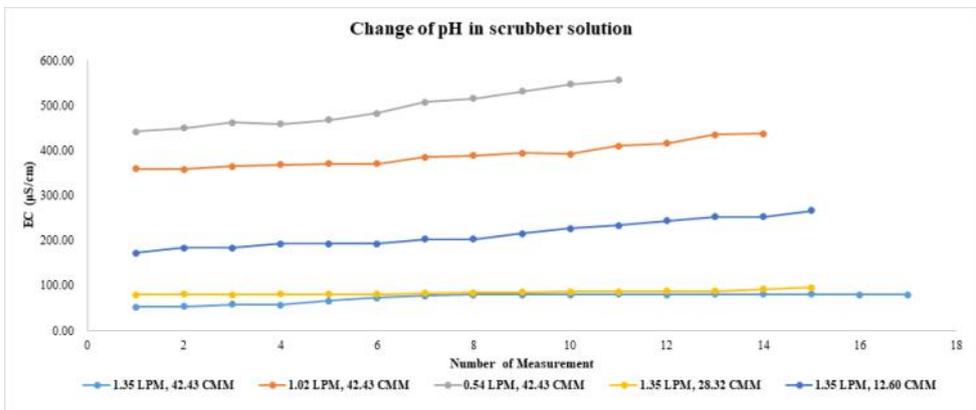


Figure 30 Change of pH in scrubber solution

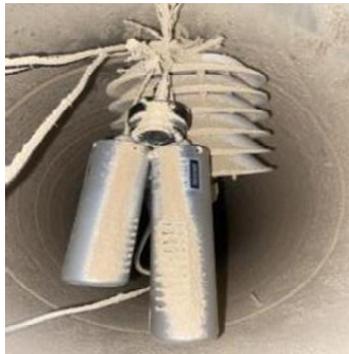
pH의 경우, 1.35 LPM 노즐과 42.43 CMM fan을 구동할 때 pH의 변화가 가장 많이 일어났으며, pH 변화가 가장 길게 나타났다. 한편 물 교체 없이 가장 오래 습식 스크리버를 구동한 0.54 LPM 노즐과 42.43 CMM

fan 조건에서 가장 높은 pH가 발생했으며, 변화하는 시간이 가장 짧았다. Fig. 29와 Fig. 30를 통해 수조의 물을 교체하지 않으면 높은 EC와 pH가 유지되는 것을 확인하였으며, 높은 EC와 pH는 효과적이지 않은 암모니아와 이산화탄소 저감을 초래하는 원인이라고 할 수 있다. 따라서, 암모니아와 이산화탄소 저감을 증대시키기 위해서는 습식 스크러버 수조의 물을 자주 교체해주는 것이 가장 효과적이다.

#### 4.4. 밀폐형 스마트 육계사의 습식 스크러버 운영방안

약 한 달간의 1,000수의 병아리를 밀폐형 스마트 육계사에 사육한 결과, 계사 내부에서는 계분, 닭털, 사료 먼지 등으로 인한 상상 이상의 먼지와 분진이 발생하였다(Fig. 31). 밀폐형 계사에는 개방형 계사와 달리 주기적인 환기가 어려우므로 더 쉽게 고장 날 수 있음을 확인하였고, 따라서 암모니아와 이산화탄소 센서는 정확한 측정을 위해 주기적인 필터 교체가 필요하다.

그러므로 초반부터 먼지와 분진을 제거할 수 있는 습식 스크러버를 운영하여 계사 내부의 먼지와 분진을 제거할 수 있도록 하는 것을 추천한다. 그러나, 고온·다습 현상은 사육 초창기의 닭 성장률을 방해할 수 있는 큰 요인이 될 수 있고, 사육 초기에는 암모니아나 이산화탄소가 저농도로 발생하므로 습식 스크러버의 구동이 필수적이진 않다.



**Figure 31** Sensors covered with dust and particulate matter during the experiment

따라서, 계사 내부에 암모니아와 이산화탄소가 발생하는 시기인 약 7일령 이후부터 습식 스크러버 운영을 추천한다. 더불어, 본 실험은 여름철 장마철에 진행되었으며, 이는 습식 스크러버의 운영이 여름철 밀폐형 계사 내부의 온·습도에 끼치는 영향을 검토할 수 있었다. 습식 스크러버와 공조기에서 발생하는 수분으로 인해 계사 내부의 습도가 기본 80% 이상 증가하는 것을 고려하자면, 습식 스크러버는 운영하는 것이 옳지 않다. 그러나, 계사 내부의 고습을 제습하기 위해서는 계사 내부의 온도를 낮추어 운영하는 것을 제안하며, 온도를 낮춰 운영할 경우 닭의 일령이 높을수록 낮은 온도를 요구하므로 계사 내부 설정 온도를 낮게 유지할 수 있다는 것이 장점이라고 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 밀폐형 스마트 육계사의 습식 스크러버 성능 평가를 위해 풍량·노즐 유량을 측정하여 암모니아와 이산화탄소 저감을 확인하고, 습식 스크러버로 인해 발생하는 밀폐형 육계사 내부의 온·습도 변화와 습식 스크러버 수조 물의 pH와 EC를 측정하였다. 계사 내부에 암모니아, 이산화탄소, 온·습도 센서를 3곳(1번, 2번, 3번 센서) 설치하고, 오염된 공기가 습식 스크러버를 통과하기 전과 후(4번, 5번 센서)에 설치하여 각 구동 조건당 약 2시간 동안 습식 스크러버를 운영하였다. 또한, 각 위치에 따른 암모니아와 이산화탄소의 저감을 확인하였으며, 이 중 2곳 (2번 센서와 5번 센서)을 기준으로 계사 내부의 암모니아·이산화탄소 저감과 온·습도 변화, 그리고 습식 스크러버 수조 물의 EC와 pH 변화에 대해 비교하였다.

1. 계사 내부에 설치한 2번 센서와 습식 스크러버를 통과한 후 설치된 5번 센서를 기준으로 암모니아 저감을 확인하였다. 1.35 LPM 노즐 유량과 12.60 CMM fan을 사용했을 때 2번 센서에서 가장 낮은 암모니아 농도가 발생했으며, 암모니아 저감이 습식 스크러버에 사용된 물을 교체하지 않은 채 스크러버를 구동할 경우, 효과가 점점 미미하다는 것을 이를 통해 확인할 수 있었다. 사용된 쿨링 패드의 개수와 쿨링 패드 한 개의 두께가 적고 공기가 물에 닿을 수 있는 접촉 시간이 짧았으므로 암모니아 저감율이 효과적이지 못했다. 1.02 LPM 유량과 42.43 CMM fan을 작동했을 때 39.4%의 암모니아 농도가 저감되었다.
2. 1.35 LPM 노즐 유량과 42.43 CMM fan 구동 조건일 때, 2번 센서와

5번 센서에서 측정된 이산화탄소 농도가 증가하는 것을 확인하였다. 그러나, 계사 내부의 이산화탄소 농도 저감에 도움을 줄 수 있는 것을 다른 구동 조건을 통해 확인하였다. 0.54 LPM 노즐 유량과 42.43 CMM fan로 구동했을 때 29.88%의 이산화탄소 저감을 확인하였다.

3. 계사 내부의 온도는 26℃로 설정되어 있어 2번 센서의 온도값은 27℃ 이상 올라가지 않았다. 센서 5번의 측정값에 따르면, 0.54 LPM 노즐과 42.43 CMM fan을 구동했을 때 습식 스크러버를 통과한 공기 온도가 가장 높게 나타났다. 노즐 유량이 줄어들수록 온도가 올라가는 현상을 확인하였으며, 해당 실험은 우기에 진행되어 실험 당일날에도 비가 와 습도가 매우 높게 나타났다. 0.54 LPM 노즐과 42.43 CMM fan으로 습식 스크러버를 구동하였을 때 가장 낮은 습도를 유지할 수 있었으며, 1.02 LPM 노즐과 12.60 CMM fan으로 구동했을 때 비교적 낮은 습도를 유지할 수 있었다.
4. 수조의 물의 pH와 EC 변화에 따른 암모니아와 이산화탄소 저감을 확인하기 위해 pH와 EC를 동시 측정하였다. pH의 경우, 1.35 LPM 노즐과 42.43 CMM fan으로 구동할 때 pH의 변화가 가장 길게 나타났다. 한편 물 교체 없이 가장 오래 습식 스크러버를 구동한 0.54 LPM 노즐과 42.43 CMM fan 조건에서 가장 높은 pH가 발생했으며, pH가 변하는 시간이 가장 짧았다. 또한, 1.35 LPM 노즐과 42.43 CMM fan, 1.35 LPM 노즐과 28.32 CMM fan의 구동 조건은 초기에 구동되었으므로 EC의 변화가 가장 늦게 나타났다. 따라서 물을 교체하지 않으면 높은 EC와 pH로 인해 암모니아와 이산화탄소 저감이 떨어진다. 따라서, 암모니아와 이산화탄소 저감을 증대시키기 위해서는 습식 스크러버 수조의 물을 자주 교체해주는 것이 가장 효과적이다.

5. 습식 스크러버를 구동했을 때 보통 85% 이상의 습도까지 증가하였으며, 이는 습한 날씨에 구동하였다고 하여도 매우 높은 습도가 발생하였다는 것을 뜻한다. 계사 내부의 습도가 기본 80% 이상 증가하는 경우에는 습식 스크러버를 운영하는 것을 추천하지 않는다. 그러나, 악취가 심할 경우 습식 스크러버를 운영이 필요하므로 계사 내부에서 발생하는 습도를 제어하기 위해서는 계사 내부 온도를 낮추어 운영하는 것을 제안한다. 향후 습식 스크러버가 밀폐형 육계사에 미치는 고온·다습 현상에 대한 문제점을 세부적으로 파악하여 보완한다면 습식 스크러버가 축사시설에도 더 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 보인다. 이를 통해 축사시설에서 발생하는 암모니아와 이산화탄소 농도 저감을 할 수 있어 축산 스마트팜 기술 향상에 기여할 수 있을 것이다.

APPENDIX A. Air velocity and air volume in 20 Hz fan inverter frequency  
at different points of outlet

							(unit: m/s)
Point/Outlet	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6	
1	4.32	3.63	4.61	4.60	4.36	0.74	
	4.60	3.72	4.64	4.05	3.98	1.27	
	4.84	3.45	4.59	4.50	4.65	1.24	
2	4.78	4.77	4.59	4.93	4.71	4.68	
	4.78	4.87	4.90	5.02	4.84	2.94	
	4.71	4.73	4.75	4.91	4.88	4.38	
3	4.67	4.85	4.70	4.73	4.56	4.93	
	4.56	4.62	4.93	4.75	4.17	4.91	
	4.62	4.81	4.65	4.87	4.77	4.95	
4	4.47	3.81	1.53	4.45	1.98	4.46	
	4.66	3.82	3.36	2.21	1.22	4.56	
	4.60	4.49	1.30	4.43	4.11	4.84	
5	4.70	0.60	0.80	0.60	1.07	4.46	
	4.71	0.45	0.88	0.73	1.09	4.50	
	4.56	0.71	0.81	1.40	1.17	4.58	
6	4.55	4.40	4.66	4.73	3.64	4.93	
	4.51	4.74	4.68	4.51	3.92	4.68	
	4.53	4.67	4.49	4.52	4.13	4.82	
7	0.84	0.77	1.39	3.07	1.51	4.48	
	0.93	1.02	1.22	0.78	3.22	3.95	
	0.89	1.33	2.43	4.29	3.79	4.25	
8	4.83	4.86	4.79	4.68	4.72	5.29	
	4.80	4.79	4.53	4.94	4.91	5.18	
	4.86	4.77	4.77	4.86	4.80	4.96	
9	5.37	4.96	5.27	4.76	5.14	5.43	
	5.51	5.16	5.09	5.04	5.03	5.32	
	5.36	5.10	5.18	4.95	5.25	5.38	
Average air volume	4.32	3.70	3.69	3.97	3.76	4.30	
Total Average	3.96						

(unit: CMM)

Point/Outlet	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6
1	13.75	11.56	14.68	14.65	13.88	2.36
	14.65	11.84	14.77	12.90	12.67	4.04
	15.41	10.98	14.61	14.33	14.81	3.95
2	15.22	15.19	14.61	15.70	15.00	14.90
	15.22	15.51	15.60	15.98	15.41	9.36
	15.00	15.06	15.12	15.63	15.54	13.95
3	14.87	15.44	14.96	15.06	14.52	15.70
	14.52	14.71	15.70	15.12	13.28	15.63
	14.71	15.31	14.81	15.51	15.19	15.76
4	14.23	12.13	4.87	14.17	6.30	14.20
	14.84	12.16	10.70	7.04	3.88	14.52
	14.65	14.30	4.14	14.10	13.09	15.41
5	14.96	1.91	2.55	1.91	3.41	14.20
	15.00	1.43	2.80	2.32	3.47	14.33
	14.52	2.26	2.58	4.46	3.73	14.58
6	14.49	14.01	14.84	15.06	11.59	15.70
	14.36	15.09	14.90	14.36	12.48	14.90
	14.42	14.87	14.30	14.39	13.15	15.35
7	2.67	2.45	4.43	9.77	4.81	14.26
	2.96	3.25	3.88	2.48	10.25	12.58
	2.83	4.23	7.74	13.66	12.07	13.53
8	15.38	15.47	15.25	14.90	15.03	16.84
	15.28	15.25	14.42	15.73	15.63	16.49
	15.47	15.19	15.19	15.47	15.28	15.79
9	17.10	15.79	16.78	15.16	16.37	17.29
	17.54	16.43	16.21	16.05	16.02	16.94
	17.07	16.24	16.49	15.76	16.72	17.13
Average air volume	13.75	11.78	11.74	12.65	11.98	13.69
Total Average	12.60					

APPENDIX B. Air velocity and air volume in 30 Hz fan inverter frequency  
at different points of outlet

(unit: m/s)

Point/Outlet	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6
1	7.27	4.64	6.99	7.16	6.77	1.30
	7.18	4.37	6.90	7.11	6.78	1.67
	7.06	5.88	7.33	6.79	6.43	1.50
2	7.66	7.08	7.48	7.64	7.40	5.79
	7.40	7.20	7.40	7.50	7.39	6.53
	7.40	7.30	7.21	7.55	7.48	6.11
3	7.22	7.24	7.32	7.45	7.48	7.54
	7.23	7.19	7.20	6.95	7.47	7.86
	7.06	7.21	7.51	7.52	7.44	7.30
4	7.58	7.24	5.11	6.43	6.14	7.40
	7.02	6.81	3.57	6.93	5.29	7.47
	7.14	6.68	1.59	6.98	2.33	6.69
5	7.30	6.94	1.34	1.52	1.53	6.91
	7.25	1.27	1.25	1.45	1.50	6.98
	7.04	1.29	1.11	1.51	1.81	7.19
6	7.00	1.05	6.91	6.94	6.09	7.15
	6.58	6.99	6.86	7.30	6.33	7.40
	6.08	6.99	6.59	7.36	7.32	7.33
7	1.03	7.13	4.76	6.59	2.81	7.11
	1.07	2.51	2.91	6.15	5.52	6.91
	1.13	0.68	3.50	6.92	4.58	6.93
8	7.47	3.76	7.18	7.68	7.69	7.95
	7.41	7.44	7.22	7.85	7.56	8.01
	7.64	7.33	7.12	7.66	7.66	7.86
9	7.56	7.09	7.65	7.82	8.12	8.56
	8.25	7.93	7.59	8.05	8.23	8.83
	8.15	7.61	7.50	7.96	7.97	8.51
Average air volume	6.60	5.74	5.74	6.62	6.04	6.70
Total Average	6.24					

(unit: CMM)

Point/Outlet	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6
1	23.15	14.77	22.26	22.80	21.56	4.14
	22.86	13.91	21.97	22.64	21.59	5.32
	22.48	18.72	23.34	21.62	20.47	4.78
2	24.39	22.54	23.82	24.33	23.56	18.44
	23.56	22.92	23.56	23.88	23.53	20.79
	23.56	23.24	22.96	24.04	23.82	19.45
3	22.99	23.05	23.31	23.72	23.82	24.01
	23.02	22.89	22.92	22.13	23.78	25.03
	22.48	22.96	23.91	23.94	23.69	23.24
4	24.13	23.05	16.27	20.47	19.55	23.56
	22.35	21.68	11.37	22.06	16.84	23.78
	22.73	21.27	5.06	22.22	7.42	21.30
5	23.24	22.10	4.27	4.84	4.87	22.00
	23.08	4.04	3.98	4.62	4.78	22.22
	22.42	4.11	3.53	4.81	5.76	22.89
6	22.29	3.34	22.00	22.10	19.39	22.77
	20.95	22.26	21.84	23.24	20.15	23.56
	19.36	22.26	20.98	23.43	23.31	23.34
7	3.28	22.70	15.16	20.98	8.95	22.64
	3.41	7.99	9.27	19.58	17.58	22.00
	3.60	2.17	11.14	22.03	14.58	22.06
8	23.78	11.97	22.86	24.45	24.48	25.31
	23.59	23.69	22.99	24.99	24.07	25.50
	24.33	23.34	22.67	24.39	24.39	25.03
9	24.07	22.57	24.36	24.90	25.85	27.25
	26.27	25.25	24.17	25.63	26.20	28.11
	25.95	24.23	23.88	25.34	25.38	27.10
Average air volume	21.01	18.26	18.29	21.08	19.24	21.32
Total Average	19.87					

APPENDIX C. Air velocity and air volume in 40 Hz fan inverter frequency  
at different points of outlet

(unit: m/s)

Point/Outlet	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6
1	9.22	7.95	9.55	9.86	8.02	2.39
	8.90	8.48	9.04	10.23	9.87	7.36
	8.11	9.11	9.33	10.43	9.13	4.28
2	9.56	9.57	9.98	10.18	9.57	8.79
	9.41	9.22	9.50	9.96	9.79	8.79
	8.67	9.80	9.70	9.86	9.81	7.07
3	9.45	9.46	9.95	10.31	10.09	10.39
	10.08	9.67	9.89	10.05	10.44	10.07
	9.94	10.03	9.44	10.08	10.33	9.31
4	9.94	9.54	3.72	8.50	7.76	10.04
	10.60	10.28	9.78	9.67	10.19	10.68
	10.36	10.85	10.04	9.52	9.45	9.67
5	10.26	1.60	1.90	1.56	3.51	8.06
	11.51	10.46	5.30	7.09	7.32	10.55
	10.94	10.92	1.41	8.57	8.70	9.07
6	7.77	9.40	8.94	9.62	8.84	9.62
	10.15	9.64	9.22	9.37	9.77	0.95
	10.16	9.30	9.56	9.88	9.56	10.04
7	1.49	7.28	3.01	7.24	7.97	8.67
	9.53	4.62	8.68	4.60	7.66	9.86
	2.11	6.11	8.58	8.76	8.65	9.66
8	10.13	9.88	9.93	10.31	10.04	10.48
	9.98	9.71	9.25	9.72	10.77	10.47
	9.55	9.81	9.23	9.54	9.97	10.36
9	11.05	10.48	10.43	8.94	10.36	11.17
	9.58	9.26	9.47	9.95	9.80	9.91
	9.40	9.48	9.56	9.37	9.87	8.73
Average air volume	9.18	8.96	8.31	9.01	9.16	8.76
Total Average	8.90					

(unit: CMM)

Point/Outlet	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6
1	29.36	25.31	30.41	31.39	25.54	7.61
	28.34	27.00	28.78	32.57	31.43	23.43
	25.82	29.01	29.71	33.21	29.07	13.63
2	30.44	30.47	31.78	32.41	30.47	27.99
	29.96	29.36	30.25	31.71	31.17	27.99
	27.60	31.20	30.88	31.39	31.23	22.51
3	30.09	30.12	31.68	32.83	32.13	33.08
	32.09	30.79	31.49	32.00	33.24	32.06
	31.65	31.94	30.06	32.09	32.89	29.64
4	31.65	30.37	11.84	27.06	24.71	31.97
	33.75	32.73	31.14	30.79	32.44	34.00
	32.99	34.55	31.97	30.31	30.09	30.79
5	32.67	5.09	6.05	4.97	11.18	25.66
	36.65	33.30	16.87	22.57	23.31	33.59
	34.83	34.77	4.49	27.29	27.70	28.88
6	24.74	29.93	28.46	30.63	28.15	30.63
	32.32	30.69	29.36	29.83	31.11	3.02
	32.35	29.61	30.44	31.46	30.44	31.97
7	4.74	23.18	9.58	23.05	25.38	27.60
	30.34	14.71	27.64	14.65	24.39	31.39
	6.72	19.45	27.32	27.89	27.54	30.76
8	32.25	31.46	31.62	32.83	31.97	33.37
	31.78	30.92	29.45	30.95	34.29	33.34
	30.41	31.23	29.39	30.37	31.74	32.99
9	35.18	33.37	33.21	28.46	32.99	35.56
	30.50	29.48	30.15	31.68	31.20	31.55
	29.93	30.18	30.44	29.83	31.43	27.80
Average air volume	29.23	28.53	26.46	28.68	29.16	27.88
Total Average	28.32					

APPENDIX D. Air velocity and air volume in 50 Hz fan inverter frequency  
at different points of outlet in Hz

(unit: m/s)

Point/Outlet	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6
1	12.09	10.29	12.20	11.84	13.76	3.80
	14.34	11.69	12.06	12.91	12.46	5.83
	14.96	13.44	14.56	13.91	11.50	5.23
2	12.78	12.31	12.45	12.34	13.64	12.56
	15.19	15.04	12.28	12.71	11.76	10.13
	15.78	14.27	15.14	15.30	12.79	12.81
3	12.18	12.58	11.72	12.43	13.59	13.54
	15.48	14.30	12.71	12.45	12.17	13.20
	14.87	14.72	15.28	14.83	12.37	12.65
4	12.81	10.89	4.93	12.03	10.66	12.81
	15.63	14.18	13.20	13.67	12.07	12.65
	15.17	14.20	11.16	13.57	12.49	12.33
5	12.36	6.59	2.40	2.56	3.84	12.27
	14.31	9.71	2.39	10.17	11.87	12.62
	15.37	11.79	2.77	3.76	11.55	12.29
6	11.64	11.76	11.17	13.13	12.16	11.64
	13.99	14.21	12.60	12.41	11.97	13.64
	14.18	14.30	13.87	14.11	11.71	12.91
7	3.24	5.37	4.08	9.87	9.61	11.60
	10.50	13.06	12.40	11.29	12.38	13.14
	8.59	13.82	13.65	13.22	10.06	11.85
8	13.13	12.02	12.21	13.69	14.49	13.72
	15.77	14.89	13.78	12.90	12.87	13.66
	15.44	14.57	15.55	15.75	12.92	11.91
9	14.11	13.10	12.45	13.76	14.29	14.71
	16.85	15.64	16.05	12.24	12.80	12.76
	16.77	15.45	15.29	16.16	12.13	12.48
Average air volume	11.59	10.55	9.29	11.29	11.78	11.85
Total Average	12.32					

(unit: CMM)

Point/Outlet	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6
1	38.49	32.76	38.84	37.70	43.81	12.10
	45.66	37.22	38.40	41.10	39.67	18.56
	47.63	42.79	46.36	44.29	36.62	16.65
2	40.69	39.19	39.64	39.29	43.43	39.99
	48.36	47.89	39.10	40.47	37.44	32.25
	50.24	45.44	48.21	48.71	40.72	40.79
3	38.78	40.05	37.32	39.58	43.27	43.11
	49.29	45.53	40.47	39.64	38.75	42.03
	47.35	46.87	48.65	47.22	39.39	40.28
4	40.79	34.67	15.70	38.30	33.94	40.79
	49.77	45.15	42.03	43.52	38.43	40.28
	48.30	45.21	35.53	43.21	39.77	39.26
5	39.35	20.98	7.64	8.15	12.23	39.07
	45.56	30.92	7.61	32.38	37.79	40.18
	48.94	37.54	8.82	11.97	36.77	39.13
6	37.06	37.44	35.56	41.81	38.72	37.06
	44.54	45.24	40.12	39.51	38.11	43.43
	45.15	45.53	44.16	44.93	37.28	41.10
7	10.32	17.10	12.99	31.43	30.60	36.93
	33.43	41.58	39.48	35.95	39.42	41.84
	27.35	44.00	43.46	42.09	32.03	37.73
8	41.81	38.27	38.88	43.59	46.14	43.68
	50.21	47.41	43.87	41.07	40.98	43.49
	49.16	46.39	49.51	50.15	41.14	37.92
9	44.93	41.71	39.64	43.81	45.50	46.84
	53.65	49.80	51.10	38.97	40.75	40.63
	53.40	49.19	48.68	51.45	38.62	39.74
Average air volume	43.34	40.59	36.36	39.27	38.20	37.59
Total Average	39.22					

APPENDIX E. Air velocity and air volume in 60 Hz fan inverter frequency  
at different points of outlet in Hz

(unit: m/s)

Point/Outlet	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6
1	16.32	13.30	15.51	15.81	13.25	3.94
	14.18	12.22	14.73	14.43	13.89	4.57
	15.17	12.82	14.50	14.03	14.60	3.41
2	16.89	15.36	15.89	16.44	16.08	12.77
	15.18	14.55	15.43	15.02	15.18	14.88
	15.36	14.46	15.25	14.83	14.53	13.94
3	16.15	15.38	15.12	15.70	15.98	16.48
	15.21	14.54	15.53	14.58	14.71	15.65
	14.83	14.86	14.93	15.22	14.95	15.72
4	17.09	14.28	4.13	13.27	14.40	15.91
	15.23	14.46	12.93	12.77	10.02	14.65
	15.18	13.09	8.51	12.78	11.98	14.38
5	16.33	2.41	2.75	8.03	5.30	14.17
	15.69	4.04	3.02	2.68	3.88	14.39
	14.64	5.08	3.07	3.10	6.73	14.00
6	15.69	14.75	13.77	15.31	14.68	15.87
	13.59	14.39	14.05	14.38	14.41	15.35
	14.36	14.79	14.82	14.33	14.30	14.74
7	5.78	4.12	6.19	8.07	10.77	14.53
	11.27	10.27	10.86	7.70	11.60	14.23
	3.12	10.63	11.92	7.38	11.04	13.93
8	15.94	15.80	15.27	16.01	16.30	16.62
	15.13	14.80	14.58	15.40	15.41	15.78
	15.58	14.81	15.12	15.11	15.09	15.98
9	18.16	17.26	15.87	16.85	16.98	17.90
	16.57	15.76	15.74	15.42	16.28	16.80
	17.32	15.81	14.53	15.17	16.50	15.74
Average air volume	14.67	12.74	12.37	12.96	13.29	13.94
Total Average	13.33					

(unit: CMM)

Point/Outlet	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6
1	51.96	42.35	49.38	50.34	42.19	12.54
	45.15	38.91	46.90	45.94	44.23	14.55
	48.30	40.82	46.17	44.67	46.49	10.86
2	53.78	48.91	50.59	52.34	51.20	40.66
	48.33	46.33	49.13	47.82	48.33	47.38
	48.91	46.04	48.56	47.22	46.26	44.38
3	51.42	48.97	48.14	49.99	50.88	52.47
	48.43	46.29	49.45	46.42	46.84	49.83
	47.22	47.31	47.54	48.46	47.60	50.05
4	54.41	45.47	13.15	42.25	45.85	50.66
	48.49	46.04	41.17	40.66	31.90	46.65
	48.33	41.68	27.10	40.69	38.14	45.79
5	51.99	7.67	8.76	25.57	16.87	45.12
	49.96	12.86	9.62	8.53	12.35	45.82
	46.61	16.17	9.77	9.87	21.43	44.58
6	49.96	46.96	43.84	48.75	46.74	50.53
	43.27	45.82	44.73	45.79	45.88	48.87
	45.72	47.09	47.19	45.63	45.53	46.93
7	18.40	13.12	19.71	25.69	34.29	46.26
	35.88	32.70	34.58	24.52	36.93	45.31
	9.93	33.85	37.95	23.50	35.15	44.35
8	50.75	50.31	48.62	50.98	51.90	52.92
	48.17	47.12	46.42	49.03	49.06	50.24
	49.61	47.15	48.14	48.11	48.05	50.88
9	57.82	54.96	50.53	53.65	54.06	56.99
	52.76	50.18	50.12	49.10	51.83	53.49
	55.15	50.34	46.26	48.30	52.54	50.12
Average air volume	46.69	40.57	39.39	41.25	42.32	44.38
Total Average	42.43					

## 참 고 문 헌

Aunsa-Ard, W., Pobkrut, T., Kerdcharoen, T., Prombaingoen, N., & Kijpreedaborisuthi, O. (2021, January). Electronic Nose for Monitoring of Livestock Farm Odors (Poultry Farms). In 2021 13th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST) (pp. 176-180). IEEE.

“Ammonia Emissions from Livestock Farming”. Ministry of Agriculture of Korea. 2021.

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

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)

Choi, H.L.(2000). Ventilation and Odor Control of Poultry Facilities. Korean Journal of Poultry Science. 54-59. (in Korean)

Choi, H.M., Kim, J.M. (2019). Anomaly Detection System of Smart Farm ICT Device. Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC). 19(2), 169-174. (in Korean)

Choi, T.Y., Seo, I.H., Seon, J.G., K, O.J & Ahn, Y.H.(2016). Odor Treatment Technology (pp. 13). Donghwa Technology.

Choo, S.T. & Nam, C.M. (2004). Removal Technologies of Odor and Volatile Organic Compounds from Industrial Processes. Journal of Korean Society of Industrial Application. 7(3), 289-297. (in Korean)

Constantini, M., Bacenetti, J., Coppola, G., Orsi, L., Ganzaroli, A., & Guarino, M. (2020). Improvement of Human Health and Environmental Costs in the European Union by Air Scrubbers in Intensive Pig Farming. *Journal of Cleaner Production*. 275, 124007.

Dachaine C, Grimard Y, Cormier Y. Influence of building maintenance, environmental factors, and seasons on airborne contaminants of swine confinement buildings. *AIHAJ*. 2000 Jan-Feb;61(1):56-63.

Ding, Y. & Moon, C.S. (2019). Literature Review of the Reduction of Hydrogen Sulfide and Ammonia in Livestock Pen: Comparison between Korean and Chinese Cases. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*. 29(4), 442-451. (in Korean)

Donham, K. J., Reynolds, S. J., Whitten, P., Merchant, J. A., Burmeister, L., & Pependorf, W. J. (1995). Respiratory dysfunction in swine production facility workers: Dose response relationships of environmental exposures and pulmonary function. *American journal of industrial medicine*, 27(3), 405-418.

Gay, S.W., Schmidt, D.R. Clanton, C.J., Janni, K.A., Jacobson, L.D., & Weisberg, S. (2003). Odor, Total Reduced Sulfur, and Ammonia Emissions from Animal Housing Facilities and Manure Storage Units in Minnesota. *American Society of Agricultural Engineers. Applied Engineering in Agriculture*. 19(3), 347-360.

Ha, T.H. (2018). Technology Status to Reduce Livestock Odor. *Rural Resource*. 60(2). pp. 11-15. (in Korean)

Hassan, H.K., & Ali, M.M. (2017). Performance of Ross 308 and Arbor Acres Broiler Breeder and their Commercial Broiler in Iraq. *Journal of Global Pharma Technology*. 12(9), 376-379.

Jang, D-H., Yang, K-Y., Kwon, K-S., Kim, J-B., Ha, T-H., & Jang, Y-N. (2022). Investigation on Generation and Emission of Particulate Matters and Ammonia from Mechanically-ventilated Layer House. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, (64)1, 99-110. (in Korean)

Jang, Y.K., Jung, B.J., Kim, J., Song, K.B., Kim, H.J., & Yoo, Y.H. (2009). Assessment of Odor Characterization and Odor Unit from Livestock Facilities by animals. Journal of Environmental Effect Assessment, (19)1, 29-38. (in Korean)

Jo, H-S. 2009. "Importance of effective management of recycled broiler stacks". Monthly Korean Chicken. 15(11), 101-105.

Kim, D.J. (2012). Attention is being paid to "Indian River" in the domestic meat industry. Korean Poultry Association. 44(10), 122-125.

Kim, J.-G., Lee, J.-Y., Park, B. H., & Choi, J.-S. (2015). The Simultaneous removal of NOx using Wet Scrubber. Journal of Oil & Applied Science, 32(2), 296 - 301. <https://doi.org/10.12925/JKOCS.2015.32.2.296>

Kim, K.Y. (2017). Distribution of Concentration and Emission of Dust according to Types of Poultry Buildings in Korea. Journal of Environment Health Science 43(3), 185-193. (in Korean)

Korea Duck Association. (2019). Livestock Notes - Announcement of Measures to Reduce Particulate Matter by Agricultural and Livestock Sector. Monthly Duck's Village. 194, pp. 33-38. (in Korean)

Korea Duck Association. (2021). Duck Village People - Changsoo Kim and Eunjoo Joo, CEO of Hope and Happy Farm. Monthly Duck's Village. 218, pp. 20-23. (in Korean)

Korea Environment Corporation. (2011). Casebook of Odor Technology Diagnosis. pp. 84–86. (in Korean)

Korea Poultry Association. (2016). Road to the Eco-Friendly Chicken Industry - Guidelines for the Management of Odor. *Journal of Korean Poultry*. 48(4), 145–149.

Kwon, K.S. (2020). Trend of Particulate Matter Research in Livestock: Effects and Characteristics of Livestock Particulate Matter. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 62(2), 15–23. (in Korean)

Lee, D.S. (2006). “Theory and Practice of Poultry Ventilation in Korea.”pp. 111–119. (in Korean)

Lee, S.H. (2003). Research Trend of Automation for Livestock Production and Odor Reducing Technique in Livestock Houses. *Journal of Biosystems Engineering*, 28(5), 469 - 482. <https://doi.org/10.5307/JBE.2003.28.5.469>

Lee, Y.H. (2021). “Performance and Planning of Odor Reduction using ICT equipment.”*Pig&Pork Korean Pork*.  
<https://www.pignpork.com/news/articleView.html?idxno=110>

Liu, Z. & DeRouchey, J. (2014). “Technologies for Odor Control in Swine Production Facilities.” Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service.

McLean, J. A., Savory, C. J., & Sparks, N. H. C.(2002) Welfare of male and female broiler chickens in relation to stocking density, as indicated by performance, health and behaviour. *Animal Welfare*. 11(1), 55–73.

Meseret, S. (2016). A review of poultry welfare in conventional production system. *Livestock Research for Rural Development*. 28(12).

Ministry of Agriculture of Korea, 2021

Mosquera, J., J. M. G. Hol, and N. W. M. Ogink. (2004). Analysis of ammonia emissions from pig husbandry (1990–2003) (in Dutch, with English abstract). Report 312. Wageningen, The Netherlands: Agrotechnology and Food Innovations, Wageningen UR.

Naseem, S. & King, J. A. (2018). Ammonia Production in Poultry Houses Can Affect Health of Humans, Birds, and the Environment - Techniques for its Reduction during Poultry Production. *Environmental Science and Pollution Research*. 25, 15269–15293.

Ogink, N.W.M. & Koerkamp, P.W.G. Groot. (2001). Comparison of odor emissions from animal housing systems with low ammonia emission. *Journal of Water Science and Technology*. 43(11), 245–252.

Park, J., Seok, J., Lee, S., Kwon, O., Lee, K., Heo, Y., & Yoon, C. (2015). Ammonia and hydrogen sulfide monitoring in broiler barns and cattle barns. *Journal of Environmental Health Sciences*, 41(5), 277–288.

Park, P.H. (2013). Optimal Operation Factors and Economic Evaluation of Stripper/Scrubber System for Ammonia Recovery.

Radon, K., Danuser, B., Iversen, M., Jörres, R., Monso, E., Opravil, U., & Nowak, D. (2001). Respiratory symptoms in European animal farmers. *European Respiratory Journal*, 17(4), 747–754.

“Reported Civil Complaints regarded to Livestock Production”, Ministry of Environment, 2018.

Statistics Korea. 2020. Structure Change of Livestock Farming based on

Statistics. 2022. Bureau of Social Statistics. (in Korean)

Yoo, Y.S. & Sim, K.S. (2007). Improvement of Efficient Odor Reduction on where Frequent Odor Complaints are Reported. Policy Research, 1-1. Gyeonggi Research Institute. (in Korean)

Abstract

# Performance Evaluation of Wet Scrubber and its Affect on Temperature and Humidity in Closed Smart Broiler House

Doe Yang

Major in Biosystems Engineering

Department of Biosystem Engineering

The Graduate School

Seoul National University

As environmental problems arising from the enlargement of the livestock industry become an issue, research on ammonia reduction occurring in livestock facilities is very necessary. 78.7% of the total ammonia emissions are from the agricultural sector, of which 97.8% are from livestock manure. And the odor generated from livestock farms affects not only the inconvenience of nearby residents but also the health and quality of livestock, as well as the farm managers and workers. Therefore, the goal of this study is to apply a wet scrubber in the smart poultry house to reduce odor to mitigate

ammonia and carbon dioxide concentration, and to examine the suitability of the wet scrubber by understanding the temperature and humidity changes at the smart poultry house.

In this study, the performance evaluation was conducted by selecting the spray rate and air volume as variables to evaluate the efficiencies of ammonia and carbon dioxide reduction. To identify the problem of the wet scrubber, each driving condition was applied to compare and analyze ammonia and carbon dioxide reduction for about 2 hours of wet scrubber operation. The EC and pH of scrubber water, ammonia, carbon dioxide, temperature and humidity, were measured based on Sensor 2 installed in the middle of the returning duct and Sensor 5 after passing through the wet scrubber. The efficiency of ammonia reduction was about 39.4% when the wet scrubber was operated at 1.02 l/min nozzle flow rate and 42.43 m<sup>3</sup>/min fan. In the case of carbon dioxide, it was confirmed that the carbon dioxide was reduced by 29.9% when the wet scrubber was driven with a fan at 0.54 l/min nozzle flow rate and 42.43 m<sup>3</sup>/min of fan.

Additionally, the temperature inside the smart poultry house increased as the nozzle flow rate decreased. However, when the wet scrubber was operated under 0.54 l/min of nozzle flow rate with 42.43 m<sup>3</sup>/min of fan, and 1.02 l/min of nozzle flow rate with 12.60 m<sup>3</sup>/min fan conditions, the relatively low humidity was observed. In addition, it was difficult to reduce ammonia and carbon dioxide after using the wet scrubber water for a long period of time, so frequent

replacement of water is recommended to increase the effectiveness of the wet scrubber.

Therefore, it is proposed to reduce odor by operating a wet scrubber and minimize over-humidity by lowering the temperature inside the poultry house. Moreover, it is also recommended to manage livestock gases such as ammonia and carbon dioxide as well as temperature and humidity by adjusting flow and air volume, with a frequent replacement of wet scrubber solution for the effective odor reduction system. For further study, the wet scrubber can be applied more effectively to the livestock facility if the problem of the humidity control at the smart poultry house is identified in detail and improved. Furthermore, this contribution would improve the technology of smart livestock farms and their environment by understanding the effect of ammonia and carbon dioxide mitigation.

**keywords : Closed smart poultry house, Odor reduction, Wet Scrubber**

***Student Number : 2019-26664***

## 감사의 글

먼저 부족한 저를 따뜻한 관심으로 지도해주시고 석사 과정을 마칠 수 있도록 도와주신 이중용 교수님께 감사한 마음 전하고 싶습니다. 제게 2019년은 교수님을 처음 뵙게 된 해이자, 공학이라는 학문을 처음 접하게 된 해였습니다. 교수님의 도움과 지도 밑에서 쉽게 지나칠 수 있는 사소한 부분부터 중요한 부분까지 많은 것들을 보고 배울 수 있었습니다. 지난 3년은 교수님께서 말씀하신 연구자가 갖춰야 할 태도에 대해서 깊게 생각할 수 있는 시간이었으며, 그 어느 때보다 뜻깊은 시간이었던 것 같습니다. 그리고 힘들 때 언제든 찾아오라는 말씀 듣고 사실 얼마나 심적으로 많은 도움이 되었는지 모릅니다. 교수님께 제가 많은 표현은 하지 못했지만, 항상 감사드린다는 말씀 다시 한번 전해드리고 싶습니다. 앞으로도 더 넓은 곳으로 나아가 교수님의 가르침 잊지 않으며 꾸준히 발전하는 연구자가 되도록 하겠습니다.

저의 부족한 논문을 꼼꼼히 검토해주시고 따뜻한 말로 응원해주신 김학진 교수님과 양승환 박사님께 감사드립니다. 교수님과 박사님의 진심 어린 조언으로 이 논문의 완성할 수 있었습니다. 또한, 제게 많은 관심을 주시고, 바이오시스템공학이라는 학문의 문을 열어주신 조성인 교수님, 정중훈 교수님, 김기석 교수님, 박영준 교수님께 감사의 말씀 전합니다.

그리고, 뒤에서 저의 실험과 논문의 진행도를 물어봐 주시고 관심을 주셨던 김준용 박사님께 진심으로 감사의 인사 전합니다. 박사님의 도움 없이는 이 논문을 시작할 수도, 진행할 수도 없었을 것 같습니다. 박사님께서 해주셨던 조언 덕분에 더 나은 연구 방향으로 나아갈 수 있었으며 많은 걸 배울 수 있었습니다. 박사님과의 대화를 통해서 전 다시 한번 의지를 다지고 저의 부족한 부분을 다시 한번 깨우치며 앞으로 나아갈 방향이 어딘지 다시 생각하게 되는 계기를 만들어주셨습니다. 박사님의 격려와 조언 덕에 이 논문을 시작할 수 있었으며, 끝을 맺은 것 같습니다. 그리고 그 누구보다 가장 의지했고 가족 같은 우리 생활환경

시스템연구실 선배님들과 실원들께 감사드립니다. 자주는 못 뵙지만, 가끔 오셔서 맛있는 밥 사주시는 박하나 선배님, 지수 선배님, 졸업하신 이춘구 박사님, 석사 과정 때 제가 질문 많이 해서 귀찮으셨을 텐데 항상 친절하게 답해주시고 너무 감사드립니다. 그리고 나의 정신적 지주이었으며 착하지만 무서운 x-랩장 동혁이, 내가 놓치는 부분이 있을 때 마다 옆에 붙쑥 나타나 조용히 도와주거나 조언해주고, 너로 인해 첫 대학원 생활 정말 도움 많이 받아 적응도 빨리할 수 있었어. 그리고 매일 질문할 때마다 촌데레식으로 매번 “네, 아니요, 모르겠는데요, 글썄요”로 대답하면서 나를 매우 귀찮아했지만 도움을 요청할 땐 가장 먼저 달려와 도와줬던 재석 선배, 선배는 제 사수여서 제가 더 많이 따랐던 것 같아요. 나와 애증의 관계(?)였지만 내가 많이 아끼는 인호, 우리 맨날 만나면 티격태격 싸우고 웃고 그랬었는데, 내가 너 항상 응원해, 알지? (모르면 이제부터 알도록). 귀여운 이재를 얻게 되신 착한 대현씨 (오빠), 착하고 호기심 많아서 질문도 많은 원준이, 현 랩장이자 항상 티키타카 주고받으며 장난도 많이 치고 뒤늦게 많이 친해진 정상 오빠, 그리고 항상 귀엽고 사랑스러운 막내 지수까지. 곧 미국 놀러 오면 얼굴 꼭 한번 봐요! 다들 너무 고맙고 덕분에 3년 동안 힘들었던 일들보다 즐거웠던 일들이 더 많았던 것 같습니다. 생물환경시스템공학 연구실은 제게 단순한 연구실, 대학원 생활이 아닌 제2의 가족이었습니다. 앞으로도 하시는 모든 일에 건승하시길 바라며 건강하시고 행복한 일만 있으시길 바랍니다.

그리고 가끔 만나 맛있는 거 먹으며 응원해주는 역학방 재은 언니와 강릉 출장 자주 같이 갔던 센서방 정선 언니 너무 고맙고, 하시는 연구 다 잘되시길 바라며 항상 행복하길 기원합니다. 이제는 前 원우회 회장이자 내가 도움 요청할 때마다 바로 달려왔던 주신이, 니가 빌려준 pH/EC 센서 덕분에 실험 진행할 수 있었어. 그리고 재밌고 착한 동우, 덕분에 대학원 생활이 너무 즐거웠어. 그리고 다 언급하지 못하지만, 과제를 같이 진행하면서 알게 된 다른 바이오시스템공학과 원우회분들, 졸업하신 박사님들 감사합니다. 또한, 대학원 생활에 많은 도움을 주신

모미정 선생님과 변은빈 선생님, 그리고 제 실험에 도움과 조언을 아낌 없이 주신 (주)대상키우미시스템의 김홍식 대표님, 김애경 팀장님, 유재연 부장님 너무 수고 많으셨고, 덕분에 실험 잘 진행하여 졸업하게 되었습니다. 닭 키우시느라 너무 수고 많으셨습니다. 제 실험에 적극적으로 협조해주시고 도와주셔서 깊은 감사의 인사 전합니다. 또한, 저를 딸처럼 이뻐 해주시고 항상 챙겨주시는 이상식 교수님께도 감사드립니다. 교수님께서 항상 절 걱정해주시고 응원해주시며, 따뜻한 말씀 건네주시어 제가 다시 한번 미국 유학길에 오를 수 있었던 것 같습니다.

곁에서 항상 절 믿고 사랑으로 응원해주시는 부모님과 할머니, 저도 많이 사랑하고 앞으로 더 이쁘고 착한 딸, 손녀딸이 되도록 노력할게요. 그리고 내가 힘들 때마다 항상 응원해주고 나의 졸업을 누구보다 먼저 축하해주었던 내 소중한 친구들, 유정, 수민, 동렬, 보민이에게 감사의 말을 전합니다.

그리고 마지막으로 이번에 같이 졸업하며 항상 나와 각자의 연구에 대해 새벽까지 고민하고 서로 조언해주고, 외로운 고민의 시간을 함께 보냈던 사랑하는 내 남자친구이자 곧 남편이 될 윤홍이에게 항상 고맙다는 말 전합니다. 같이 대학원 생활하는 동안, 힘들 때나 기쁠 때나 항상 곁에 있어 주고 제가 연구가 잘되지 않을 땐 투정도 부리고 하소연도 참 많이 했는데 항상 곁에서 묵묵히 들어주고 그 누구보다 진심으로 응원해줘서 고맙습니다. 앞으로도 같이 또 따로, 미국 가서 함께 각자의 연구에 대해 고민하며 더 나은 연구자가 되도록 노력하겠습니다. 모두 건강하시고 항상 행복하시길 바랍니다.

감사합니다.

2022년 비가 많이 오는 여름 8월의 어느 날  
생물환경시스템공학 연구실  
양도이 올림