

Implementation of an Individually Ventilated Cage System Applying Air Conditioning Control Method

Yu-Hyun Kim*, Jin-Young Lee**

*Assistant Research Engineer, Patio Inc., Busan, Korea

**CEO, L&G CO., LTD., Gimhae, Korea

[Abstract]

In this paper, we propose a laboratory animal breeding device IVC(Individually Ventilated Cage) system that applies a customized air conditioning control method according to the air information inside the laboratory animal cage. This method maintains an optimal breeding environment in which the experimental animals are not stressed inside the cage by precisely controlling the ACH(Air Change per Hour). In addition, for the convenience of animal experiment researchers, it is a system capable of monitoring breeding environmental variables such as temperature, humidity, differential pressure, ACH, blower RPM(Rotations Per Minute), HEPA(High Efficiency Particulate Air) filter replacement cycle, pre-filter replacement cycle, CO₂ concentration, NH₃ concentration, and air speed. In order to test the performance of the developed system, two laboratory mice were placed in one cage, and environmental variables were monitored while raising them in the developed system for about 6 hours. As a result of the experiment, the experimental animal breeding environment target value presented in the IACUC(Institutional Animal Care and Use Committee) guidelines was satisfied.

▶ **Key words:** Laboratory animals, Breeding equipment, Individually ventilated cage system, Monitoring system, Air conditioning control method

[요 약]

본 논문에서는 실험동물 케이지 내부의 공기정보에 따른 맞춤형 공조 제어 방법을 적용한 실험동물 사육장치 개별 환기 케이지(IVC, Individually Ventilated Cage) 시스템을 제안한다. 이 방법은 시간당 환기 횟수(ACH, Air Change per Hour)를 정밀 제어하여 케이지 내부에서 실험동물이 스트레스 받지 않도록 최적의 사육환경을 유지하게 한다. 또한, 동물실험 연구자의 편의를 위해 온도, 습도, 차압, 시간당 환기 횟수, 송풍기 분당 회전수(RPM, Rotations Per Minute), 고성능 먼지 포집 필터(HEPA-Filter, High Efficiency Particulate Air Filter) 교체주기, 전처리 필터(Pre-Filter) 교체주기, 이산화탄소(CO₂) 농도, 암모니아(NH₃) 농도, 공기속도에 대한 사육환경변수 모니터링이 가능한 시스템이다. 개발 시스템에 대한 성능을 테스트하기 위해 실험용 쥐 2마리를 1개의 케이지에 넣은 후 약 6시간 동안 개발 시스템에서 사육하면서 환경변수들을 모니터링 하였다. 실험결과 동물실험윤리위원회/실험동물윤영위원회(IACUC, Institutional Animal Care and Use Committee) 가이드라인에서 제시한 실험동물 사육환경 목표수치를 만족하였다.

▶ **주제어:** 실험동물, 사육장치, 개별 환기 케이지 시스템, 모니터링 시스템, 공조 제어 방법

• First Author: Yu-Hyun Kim, Corresponding Author: Jin-Young Lee

*Yu-Hyun Kim (dbgus115@naver.com), Patio Inc.

**Jin-Young Lee (landgtech@landg.co.kr), L&G CO., LTD.

• Received: 2023. 05. 12, Revised: 2023. 06. 07, Accepted: 2023. 06. 07.

I. Introduction

최근 세계적으로 중증 급성 호흡기 증후군(SARS, Severe Acute Respiratory Syndrome), 중등 호흡기 증후군(MERS, Middle East Respiratory Syndrome), 코로나바이러스 감염증 2019(COVID-19, Coronavirus Disease 2019) 등 각종 전염병 발생 및 노령화 사회 진입에 따라 의료 및 바이오·생명산업이 급격하게 확대되고 있기 때문에 선진국을 중심으로 백신 연구, 인간개능 연구를 비롯하여 전 세계가 생명연장의 꿈을 실현시킬 다양한 프로젝트를 진행하고 있다[1][2]. 특히, 바이오·생명산업분야는 현재 세계 시장을 선점하기 위한 국가 간의 경쟁은 매우 치열한 상황이고 주로 미국, 유럽, 일본 등의 선진국들이 시장을 선점하고 있으며, 지속적인 연구 개발과 산업화 경쟁력을 확보하기 위한 투자를 확대하고 있다. 한국에서는 정부의 생명공학 육성 기본계획 수립을 통한 지원 사업 확대 및 민간의 꾸준한 투자가 증대되고 있으며, 2025년 세계 시장 점유율 4~5%를 목표로 관련 인력 및 시설 등의 인프라를 적극적으로 활성화 시키고 있다[3][4].

의료 및 바이오·생명산업용 공정기기, 장치 분야의 경우 국내 관련분야 기업 대부분이 영세하고 투자여력이 낮아 의료 및 바이오·생명산업용 공정기기 장치들 중 많은 부분을 수입에 의존하고 있다. 또한, 산업에 대한 분석 및 정보의 유통이 원활하지 않고 미국이나 유럽 등의 진입장벽이 높으며 일본, 미국, 독일 등 3대 전통적 의료 및 바이오·생명산업 강국이 세계 시장의 60% 이상을 지배하고 있는 독과점 형태로 유지되고 있는 실정이다. 한국은 관련분야에서 세계 10위권 밖의 수준으로 선진국과의 기술 격차가 2-4년 정도이며 기능성, 정밀도 관련 기술은 5년 이상의 격차가 있다[3][4].

생명공학 일부 기술 분야 및 신약 산업은 인간의 생명 및 건강과 관련된 것으로 성과가 제품으로 개발되어 시장에 진출하기 위해서는 여러 단계의 개발 과정을 거쳐야 한다. 특히, 개발 물질의 안전성 및 재현성 평가를 위하여 사람을 대상으로 한 시험에 들어가기 전에 실험동물을 사용하여 안전성과 재현성 예측하기 위한 모든 시험이나 연구를 실시하여야 한다. 국내에서 바이오산업의 발전과 더불어 실험동물을 이용하는 동물실험 분야에 대한 관심이 더욱 증가하고 있다. 수의학, 의학, 약학은 물론 농학, 이학 등 광범위한 분야에서 실험동물을 이용, 동물실험을 하고 있으며 이와 더불어 1980년대 이후 국내 동물실험시설 및 관련 장비는 규모나 시설 면에서 급속히 증가하였다. 그러나 몇 개의 격리방식(Barrier)시설을 제외하고는 동물복지

를 고려하지 않은 열악한 사육환경으로 인한 미생물학적 오염 증가, 사용자와 동물과의 기류 동선의 비효율성, 저장 공간 부족 등 많은 문제가 있다[5][6].

따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해 본 논문에서는 ‘공조 제어 방법을 적용한 실험동물 사육장치 개별 환기 케이지(IVC, Individually Ventilated Cage) 시스템’을 제시하고 이를 구현하였다. 또한, 최근 5년간 보건·의료분야 동물실험에서 사용된 실험동물 중 약 80%를 차지하고 있는 실험용 쥐를 대상으로[7], 구현한 시스템의 성능을 평가하였다. IVC 시스템은 실험용 쥐를 사육하기 위한 케이지, 케이지를 장착하고 환기시키기 위한 랙(Rack), 케이지 내부 환기 제어를 위한 공조기인 AHU(Air Handling Unit)으로 구성된다. 동물실험실 내부의 공기를 필터(Filter)로 여과하여 배관을 통해 각 케이지로 공급하고, 케이지 내부의 공기를 필터로 여과하여 배출하는 시스템을 제안한다. 공조 제어 방법을 적용하기 위해 케이지 내부 공기 정보를 취득하고, 시간당 환기횟수(ACH, Air Change per Hour)를 지능형으로 자동 조절하는 방법을 구현하였다. 취득된 케이지 내부 공기 정보는 사용자가 모니터링 및 관리할 수 있도록 실험동물 사육장치 IVC 시스템을 개발하였다. 동물복지를 고려한 사육환경 구현으로 인해 미생물학적 오염 감소, 저장 공간 확보, 사용자와 동물과의 기류동선 효율성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 또한, 사용자는 원격으로 실험동물을 관리하여 쾌적하고 편리한 환경에서 사육할 수 있으며, 사용자와 실험동물 간 오염을 막을 수 있는 장점이 있다. 본 논문은 1장 서론, 2장 배경 지식, 3장 공조 제어 방법을 적용한 실험동물 사육장치 IVC 시스템 제안, 4장 검증, 5장 결론 및 향후 계획으로 구성된다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Domestic Trends

기존 의료 및 바이오, 생명산업 시장에 유통, 적용되고 있는 실험동물 사육장치 국내 기술 수준은 현재 매우 초보적인 단계로 미국이나 유럽 선진 장비를 모방하여 제작하여 국내 저가제품 시장에 부분적으로 공급하고 있는 수준이다. 국내 제품의 경우, 공급업체 규모가 영세하고 기술 수준이 낮아, 기존 공급제품들이 사용 중 차압 유지가 불안정하고 환기 및 케이지 압력제어 효율이 낮으며, 수동형 고정 환기 시스템을 적용하고 있어 사용의 불편은 물론 교

차오염 발생 등 신뢰성 부족으로 병원이나 제약회사 등 대부분의 사용자가 사용을 기피하고 있는 실정이다[7][8].

1.2 Overseas Trends

세계 시장 및 국내 실험동물 사육장치의 대부분을 이탈리아 및 미국의 일부 업체들이 독점하고 있다. 실험동물 사육장치 시스템 공급은 시스템의 전문성으로 인해 이탈리아 업체와 미국 업체가 시장을 주도하고 있다. 이와 같은 시장의 특수성과 기술적 문제 등으로 인해 사물인터넷 기술을 적용한 자동제어기능이나 원격제어, 상태 진단, 악취제거 등의 기능을 실현한 제품은 아직 다양하게 시판되고 있지 않으며 이탈리아 및 미국 기업이 사물인터넷 기술이 적용된 AHU 공조제어 제품을 시판하고 있다. 최근엔 신종 바이러스 및 특수 세균 등의 세계적인 출현 등으로 기초 실험용 생물안전등급(BSL, Biological Safety Level) 1~2등급 시스템을 대체, 고위험 병원체 실험용 BSL 3~4 등급 시스템의 수요가 급증하고 있다[9][10].

1.3 IVC System

IVC 시스템은 밀폐된 개별 케이지 내에서 실험동물을 사육하는 시스템을 말한다. 실험동물에서 발생하는 이산화탄소(CO2)와 배설물에 의해서 발생하는 암모니아(NH3)는 시간당 환기횟수를 통해 적절한 농도로 관리되어야 하며, 직접적인 환기 접촉을 피하기 위하여 급/배기 입구부 밸브에서 최대한 공기 유입력을 분산시켜 케이지 내부로 투입하게 된다[11]. 표 1과 같이 실험동물 관련 동물실험윤리위원회/실험동물운영위원회(IACUC, Institutional Animal Care and Use Committee) 표준운영 가이드라인에 따르면 실험동물 사육시설 풍속은 1.3 ~ 1.8m/sec, 온도 20 ~ 26°C, 시간당 환기횟수 15 ~ 20회, CO2 농도 2,000ppm 이하, NH3 20ppm 이하로 유지하고, 급기 및 배기로 인해 발생하는 차압을 이용하여 양압 사육(>+2.5pa) 및 음압 사육(< -2.5pa) 압력을 지속적으로 유지하여 실험동물이 스트레스를 받지 않도록 하는 것이 중요하다. 양압 사육은 건강한 동물을 사육할 때 케이지 외부의 위험 병원체가 내부로 유입되는 것을 방어할 목적으로 사용되고, 음압 사육은 고위험 병원체를 보유한 동물을 사육할 때 케이지 내부의 고위험 병원균이 외부로 나가는 것을 방어할 목적으로 사용된다. 실험동물 사육이 진행되면 최적의 사육환경 유지를 위한 시간당 환기횟수를 설정하여 급/배기 환기를 실시하고, 기설정된 양압/음압 사육모드에 따라 급기와 배기 차압을 형성하여 사육을 진행하게 된다[12][13].

Table 1. Environmental control of laboratory animal breeding facilities - IACUC

Item	Value
Temperature	20 ~ 26°C
Humidity	40 ~ 60%
ACH	15 ~ 20ACH
Airflow Speed	≤ 1.3 ~ 1.8m/s
CO2	≤ 2,000ppm
NH3	≤ 20ppm

현재 시장에 출시된 제품들에 대한 특징들을 비교분석하여 표 2에 나타내었다. 대부분 온도, 습도, 차압, 시간당 환기횟수, AHU 송풍기 분당 회전수(RPM, Rotations Per Minute) 정보들로만 모니터링하고 있어서 AHU 송풍기 모터(Motor)에 대한 정밀제어, 시간당 환기횟수 정밀제어가 불가능한 상황이다. 따라서, 본 논문에서는 실험동물 케이지 내부의 공기정보에 따른 맞춤형 공조 제어 방법을 적용하여 실험동물 스트레스를 줄이고, 동물실험 연구자의 편의를 위해 온도, 습도, 차압, 시간당 환기횟수, AHU 송풍기 모터 분당 회전수, 고성능 먼지 포집 필터(HEPA-Filter, High Efficiency Particulate Air Filter)/전처리 필터(Pre-Filter) 교체주기, 이산화탄소 농도, 암모니아 농도, 공기속도 사육환경변수 모니터링이 가능한 시스템을 제안하고자 한다.

Table 2. Comparison of IVC Systems

Monitoring Item	Tecniplast-Green Line (Italy)	Allentown-NexGen (USA)	Lab Products-Rair HD (USA)	Three Shine-MVCS (KOR)
Temperature	0	0	0	0
Humidity	0	0	0	0
ACH	0	0	0	0
Blower RPM	X	0	0	0
Breed Mode	0	0	0	0
HEPA/Pre Filter Periods	0	0	X	X
Airflow Speed	X	X	X	X
CO2	X	X	X	X
NH3	X	X	X	X

III. The Proposed System

제안하고자 하는 실험동물 케이지 내부의 공기정보 맞춤형 공조 제어 방법을 적용한 실험동물 사육장치 IVC 시스템은 그림 1과 같이 실험동물 사육공간인 케이지, 케이지 급/배기관 및 급수관이 연결된 랙, 케이지 내부 공기정보 측정이 가능하고, 취득된 공기 정보에 따른 맞춤형 공조가 가능한 AHU 3가지 파트로 구성된다.

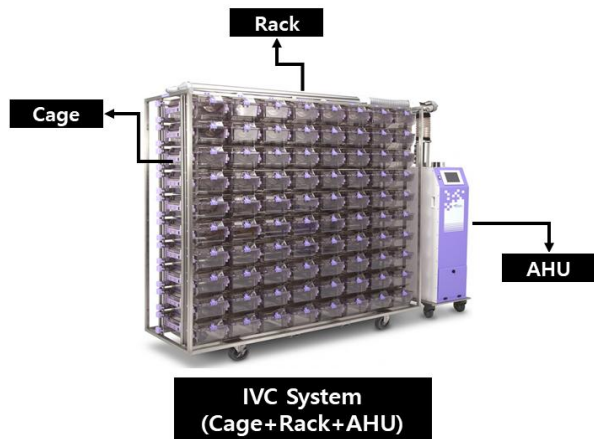


Fig. 1. IVC System Architecture

1. Cage

케이지는 실험동물이 생활하는 공간으로 케이지 내의 기류는 동물이 스트레스를 받지 않도록 1.3 ~ 1.8m/sec으로 유지하도록 IACUC에 규정하고 있으며, 케이지 내의 취기는 케이지 내의 환기량과 케이지 내의 기류 분포도에 따라 달라짐으로 최적의 환기량과 기류 분포도를 이루어 지도록 하였다. 또한, 케이지 내의 무균, 밀폐도는 오염, 감염 차단을 위해 중요하며, 특히 케이지 간의 교차오염은 절대 허용되어서는 안 된다. 이를 위해 내열성 씰(Seal)을 이용한 케이지 설계 디자인 개발과 함께 반복적인 스팀 멸균 작업에 이탈 등이 발생하지 않는 디자인을 개발하였다. 개발한 실험동물 케이지의 소재는 폴리설폰(PSU, Polysulfone) 재질로 고온, 고압의 멸균 소독에 적합한 의료용으로 널리 사용되고 있는 합성수지이다. 폴리설폰은 수지온도가 330 ~ 400°C로 성형이 어렵고 금형의 크기가 대형이며, 정밀해야 하고 높은 금형가공 기술력과 큰 비용이 요구된다. 따라서 그림 2와 같이 폴리설폰 사출을 수행하여 성형해석 특성 및 구매에 따른 사출특성을 파악하고 IACUC에서 규정한 실험용 쥐 사육 권장 공간에 따른 케이지 금형 제작 기술력을 확보하였으며, 본 논문에서는 이를 이용한 실험동물 케이지 내부의 공기정보 맞춤형 공조 제어 방법을 제안한다.

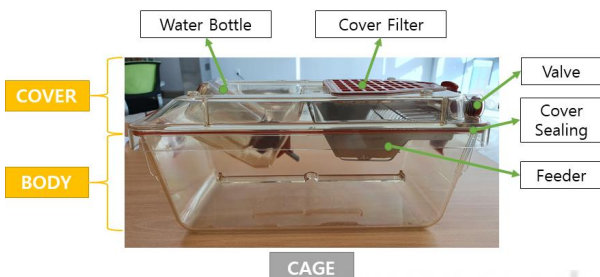


Fig. 2. Cage Development Products

2. Rack

랙은 여러 케이지의 환기 통로, 보관 역할을 수행하며, 경량 구조, 고정 및 이동식 겸용 복합 구조로 설치 및 이동의 편의성을 갖춰야 하고 공기이동 통로가 되는 덕트(Duct)부에는 용접을 줄이고 실리콘 결합을 통해 완전히 밀폐하여야 한다. 또한, 실리콘 마감 적용으로 인해 쉽게 랙 내부소독 및 청소가 가능한 구조여야 하며, 연구자의 실험 및 사육을 위해 정확하고 교환이 편리한 탈부착 구조를 적용하여 케이지 안착 조립의 편의성을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 환기통로라는 특성상 실험실의 각종 산과 실험동물의 배설물 등에 쉽게 노출되므로 내부식성이 뛰어나고, 주기적인 세척 및 멸균소독으로 인한 내열성이 우수하며, 기계적 성질이 우수하여 랙 제작 편의성이 좋은 재료인 스테인리스 스틸 304(STS304, Stainless Steel 304)를 선정하여 그림 3과 같이 밀폐용접을 통해 랙을 개발하였다. 특히, 케이지의 급/배기 밀폐가 가능한 체크(Check)형 노즐(Nozzle)을 적용하였기 때문에 차압으로 인한 공조기의 모터 전력소모 낭비를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

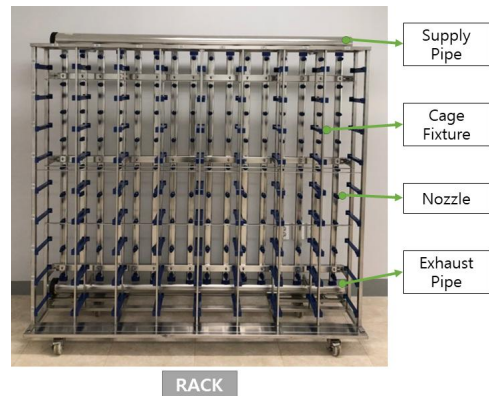


Fig. 3. Rack Development Products

3. AHU

3.1 System Design

본 논문에서 제안하는 실험동물 케이지 내부의 공기정보 맞춤형 공조 제어 방법을 적용한 실험동물 사육장치를 구현하기 위한 핵심인 공조기 역할을 담당하는 AHU는 그림 4와 같이 급기부, 배기부, 제어부로 구성되게 설계하였다.

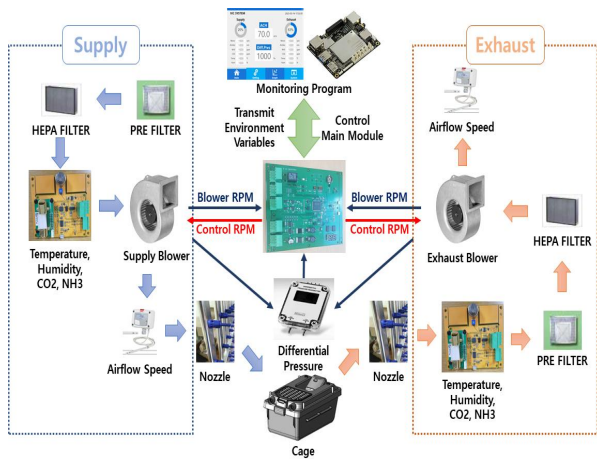


Fig. 4. AHU Architecture

3.1.1 Supply Department

실험동물 케이지로 외부 공기를 급기하며 전처리 필터, 고성능 먼지 포집 필터, 센서모듈(Sensor Module), 급기 송풍기, 공기속도 센서(Sensor)로 구성되어 있다. 그림 4와 같이 외부 공기는 전처리 필터, 고성능 먼지 포집 필터에서 정확되고 센서모듈을 통해 급기 공기정보를 측정한다. 측정된 공기는 급기 송풍기를 통하여 덕트 및 노즐을 거쳐 케이지에 공급된다.

3.1.2 Exhaust Department

실험동물 케이지 내부 공기를 배기하며 전처리 필터, 고성능 먼지 포집 필터, 센서모듈, 배기 송풍기, 공기속도 센서로 구성되어 있다. 그림 4와 같이 케이지 내부 공기는 노즐 및 덕트를 통해 배기부로 전달되고 배기부 센서모듈은 배기 공기정보를 측정한다. 그 후 배기 공기는 전처리 필터, 고성능 먼지 포집 필터, 배기 송풍기를 거쳐 외부로 배출된다.

3.1.3 Control Department

제어부는 메인모듈(Main Module), 차압센서, 소형 컴퓨터인 LattePanda SBC(Single Board Computer), 10.4인치 터치모니터(Touch Monitor) 구성되어 있다. 케이지 내부의 공기정보에 따라 급기부, 배기부 송풍기 모터 속도를 조절하며, 센서모듈로부터 공기정보를 전달받는다. 급/배기 송풍기 분당 회전수, 급/배기 덕트의 공기속도, 차압 정보를 수신하고 어플리케이션이 실행중인 SBC로 전송한다. SBC에서는 사용자가 터치모니터로 공기정보를 모니터링할 수 있도록 표시하며, 데이터베이스(Database)에 정보들을 저장한다.

3.2 Hardware Implementation

3.2.1 Sensor

실험동물 케이지 내부 공기정보 취득 및 환기를 위한 송풍기, 온/습도 센서, 암모니아 센서, 이산화탄소 센서, 공기속도 센서, 차압 센서, 전처리 필터, 고성능 먼지 포집 필터 정보를 표 3에 나타내었다.

Table 3. AHU Sensors

Sensor	Function
Blower (G1G140-AV17-02)	- RPM : 0~1750RPM, Speed adjustable by PWM (1~10kHz) - Measure motor RPM with Tacho pin
Temperature & Humidity (SHT75)	- Humidity : 0~100% - Temperature: -40~100°C
NH3 (MQ-137)	- NH3 : 5~500ppm
CO2 (MH-Z14A)	- CO2 : 0~10,000ppm
Airflow Speed (CTV110)	- Airflow Speed : 0~30m/s
Differential Pressure (DPUH)	- DP : -50~+50Pa
HEPA-Filter	- ≥ 0.3µm particle size - H-13 Grade : 99.75~99.95%
Pre-Filter	- ≥ 50µm particle size

3.2.2 Supply/Exhaust Sensing Module

케이지 내부 상태를 확인하기 위한 온도, 습도 정보뿐만 아니라 실험동물의 호흡에 의해 발생하는 이산화탄소와 배설물에 의해 발생하는 암모니아가 케이지 내부 주요 오염 원인이기 때문에 온/습도 센서, 이산화탄소 센서, 암모니아 센서를 급기부, 배기부에 부착할 수 있도록 센서모듈 회로도를 설계하였다. 온/습도 센서는 데이터(Data) 통신을 위한 선 하나(SDA, Serial Data), 타이밍 동기화를 위한 선 하나(SCL, Serial Clock)로 이루어져 있는 TWI(Two Wire Interface, 혹은 I2C, Inter-Integrated Circuit) 통신을 이용하고 이산화탄소 센서는 직렬 통신, 암모니아 센서는 ADC(Analog to Digital Converter)를 이용하여 측정값을 읽을 수 있도록 하였다. 메인모듈과는 직렬 통신을 할 수 있도록 Receive Data, Transmit Data 포트(Port)를 탈부착 가능하게 설계하였으며, 센서모듈 메인 칩(Main Chip)은 ATmega328P-AU를 선정하여 접근성을 높였다. 그림 5와 같이 점퍼(Jumper)를 활용하여 센서들이 선택적으로 메인모듈과 통신이 가능하도록 개발하였기 때문에 센서모듈 메인 칩 고장, 직렬 통신 이상에 대비할 수 있다.

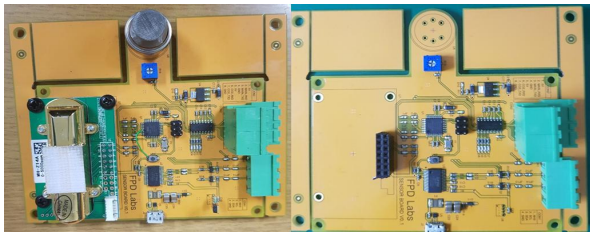


Fig. 5. Supply/Exhaust Sensing Module



Fig. 6. SBC(Left) & Main Module(Right)

3.2.3 SBC & Main Module

SBC는 사용자에게 케이지 내부 공기정보를 모니터링할 수 있는 화면을 제공하고, 공기정보 데이터를 데이터베이스에 저장하는 역할을 수행한다. 또한, 사용자가 용이하게 사용환경을 설정할 수 있도록, 본 논문에서는 사용자 친화적인 화면 개발이 가능한 윈도우 10 운영체제가 적용된 SBC로 그림 6 왼쪽과 같이 LattePanda 제품을 적용하였다. 메인모듈에서는 송풍기 모터 제어와 통신이 핵심이며, 세부적으로는 송풍기 모터 분당 회전수 측정, 송풍기 모터 PWM(Pulse Width Modulation) 듀티 사이클(Duty Cycle) 조절, 공기속도 센서 ADC, 차압 센서 ADC, 센서 모듈 통신, SBC 통신을 중심으로 고려하여 메인모듈 메인 칩으로 SAM3X8E ATMEL을 선정하였다. 24V(Volt) 파워를 이용하여 송풍기 모터, 공기속도 센서, 차압 센서의 전원을 공급하며, 릴레이 모듈(Relay Module)을 이용하여 센서모듈 전원 리셋(Reset)이 가능하도록 설계하였다. 그림 6 오른쪽과 같이 센서모듈에서는 5V 전원을 공급받도록 설계가 되어있기 때문에 센서모듈 5V 전원과 5V 전원이상으로 필요한 센서들에 대하여 메인모듈에서 전원을 공급받을 수 있도록 개발하였다. 또한, SBC와 메인모듈은 USB(Universal Serial Bus) 통신을 하며, 송풍기 모터는 디지털 I/O(Digital Input/Output), PWM으로 제어하고 공기속도 센서와 차압 센서는 ADC를 이용하여 측정값을 읽어오거나 설정할 수 있도록 개발하였다. 센서모듈에서 직접적으로 센서 측정값을 읽을 경우를 대비하여 각 통신 포트를 점퍼를 이용하여 설정할 수 있게 하였다. PWM 제어를 위하여 트랜지스터(Transistor) 회로를 적용하였고, 마찬가지로 송풍기 모터 타코미터(Tachometer) 센서를 통해 측정되는 분당 회전수 정보도 트랜지스터 회로를 이용하여 메인 모듈에서 값을 읽을 수 있게 개발하였다.

3.2.4 AHU Cover

랙 크기 및 사용자의 눈높이를 고려하여 급기부, 배기부, 제어부가 위치하도록 AHU 커버(Cover)를 설계하였다. 터치모니터 위치를 고려하여 제어부-급기부-배기부 순으로 배치하였으며, 랙과 같은 재질인 스테인리스 스틸 304를 이용하여 조립식 AHU 커버를 제작하였다. 또한, 랙 급/배기 덕트와 유연하게 연결하기 위하여 플렉시블 튜브(Flexible Tube)와 플랜지(Flange)를 이용하였으며, 스테인리스 호스 클램프(Stainless Steel Hose Clamp)를 적용하여 밀폐 조립하였다. 급기부 및 배기부는 교차오염 방지를 위해 씰을 부착하여 밀폐구조를 구성하였으며, 그림 7과 같이 AHU 시스템을 개발하고 본 논문에서 제안하는 실험동물 케이지 내부의 공기정보 맞춤형 공조 제어 방법을 연구하였다.

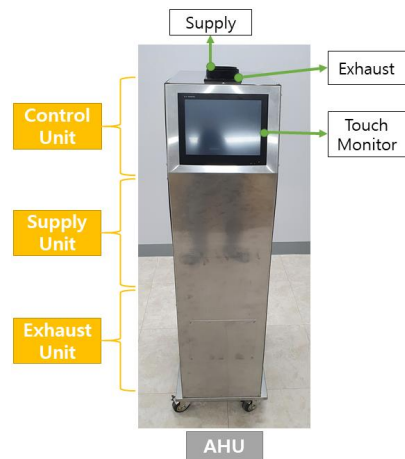


Fig. 7. AHU Development Products

3.3 Software Implementation

3.3.1 Air Conditioning Control Algorithm for Cage

본 논문에서 제안하는 실험동물 케이지 내부의 공기정보 맞춤형 공조 제어를 위해 그림 8과 같이 흐름도를 나타내었다. 사용자가 먼저 요구하는 시간당 환기횟수를 설정하고, 설정된 시간당 환기횟수 값에 따라 요구하는 유량을 계산한다. 유량 값에 따라 급/배기 송풍기의 요구 분당 회

전수를 계산하고, 분당 회전수 값에 따른 PWM 듀티 사이클을 계산한다. 그 후 사육모드에 따라 측정된 차압 값을 비교하여 급/배기 송풍기 분당 회전수를 자동 조절하여 양압 및 음압 사육을 구현한다. 급/배기부 환경변수를 측정하여 사용자가 설정한 상한값을 비교하고, 이상이 있다면 에러 리스트(Error List)에 추가하여 사용자에게 알린다.

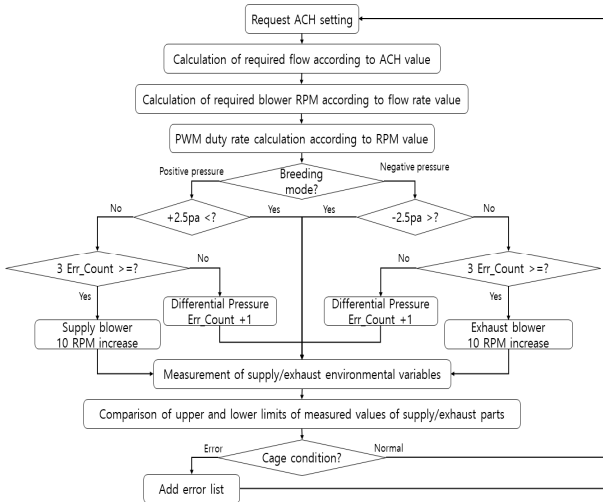


Fig. 8. Air Conditioning Control Flowchart

먼저 AHU 시스템 사용자가 실험동물 사육 케이지 개수와 시간당 환기횟수(ACH) 값을 설정한다. 요구 유량(F_{air})을 계산하기 위하여 AHU 시스템에서는 식 (1)과 같이 케이지 부피(V_{cage})와 케이지 개수(n)를 이용하여 AHU 시스템이 적용될 최종 실내 체적을 계산한다.

$$ACH = \frac{F_{air}}{n \times V_{cage}} \quad (1)$$

계산된 실내 체적을 바탕으로 식 (2)와 같이 시간당 환기횟수 값에 따른 요구 유량을 계산한다.

$$F_{air} = ACH \times n \times V_{cage} \quad (2)$$

송풍기(G1G140-AV17-02) 데이터 시트(Data Sheet)의 유량-정압 그래프(Graph)를 참고하여 그림 9와 같이 정압이 0일 때 유량 및 송풍기 분당 회전수를 이용하여 식 (3)과 같이 유량에 따른 송풍기 분당 회전수 계산식을 도출하였으며 이를 적용하여 요구 유량에 따른 송풍기 분당 회전수를 계산한다. 본 논문에서 제안한 방식은 송풍기에서 케이지까지 거리가 짧아 덕트 내에 부하가 없는 것으로 간주하여 정압이 0일 때의 송풍기 유량과 분당 회전수를 이용하였다.

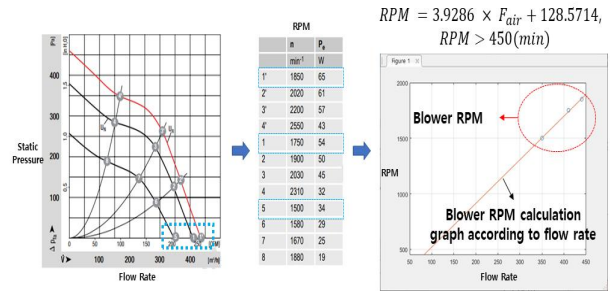


Fig. 9. Blower RPM Equation for Air Flow Rate

$$RPM = 3.9286 \times F_{air} + 128.5714, \quad RPM > 450 \quad (3)$$

그림 10과 같이 PWM 듀티 사이클을 증가시키며 송풍기 분당 회전수를 타코미터 센서를 통해 측정된 실험결과를 바탕으로 식 (4)와 같이 송풍기 분당 회전수에 따른 PWM 듀티 사이클 계산식을 도출하였으며 이를 적용하여 요구 송풍기 분당 회전수에 따른 PWM 듀티 사이클을 계산한다.

$$Duty_{cycle} = 2.6289 \times e^{-5} \times RPM^2 - 0.0015 \times RPM + 5.4931$$

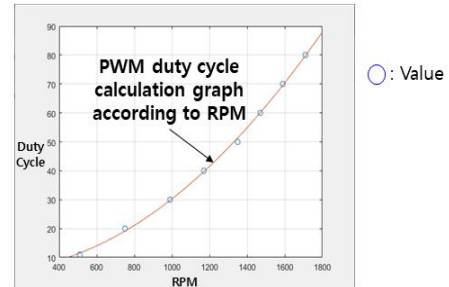


Fig. 10. PWM Duty Cycle Equation for RPM

$$Duty_{cycle} = 2.6289 \times e^{-5} \times RPM^2 - 0.0015 \times RPM + 5.4931 \quad (4)$$

급/배기부 센서모듈(온도, 습도, 이산화탄소, 암모니아)과 메인모듈(공기속도, 송풍기 분당 회전수, 차압)에서 환경변수를 측정 후 SBC로 전송하고 SBC는 환경변수를 데이터베이스에 저장한다. 현재 시간당 환기횟수를 측정하기 위해서 그림 11과 같이 정압이 0일 때 유량 및 송풍기 분당 회전수를 이용하여 식 (5)와 같이 송풍기 분당 회전수에 따른 유량 계산식을 도출하였으며 이를 적용하여 타코미터 센서를 통해 측정된 송풍기 분당 회전수를 유량으로 계산한다.

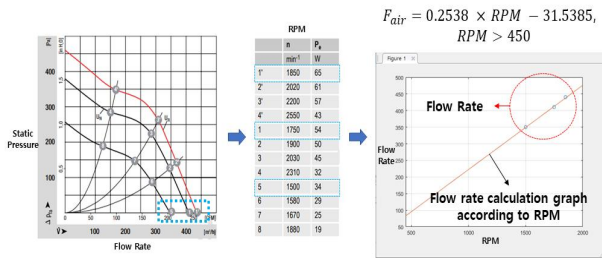


Fig. 11. Air Flow Rate Equation for Blower RPM

$$F_{air} = 0.2538 \times RPM - 31.5385, \quad (5)$$

$$RPM > 450$$

계산된 유량으로 시간당 환기횟수를 계산하고, 계산된 시간당 환기횟수 값과 사용자가 정한 시간당 환기횟수 값을 비교하여 오차범위 ±10회 확인하며, 만약 오차범위를 초과할 경우 에러 리스트에 추가한다. 또한, 예측된 케이지 환경변수 값을 상한값과 비교하여 오차범위를 초과할 경우 에러 리스트에 추가한다.

3.3.2 Main Module & Sensor Module Algorithm

메인모듈 및 센서모듈 알고리즘 개발을 위해 표 4와 같이 통신 규약을 설계하였다. STX(Start of Text)는 1바이트(Byte) 0x02로 패킷 시작을 나타내고, Opcode (Operation code)는 1바이트 0x01 ~ 0x04로 패킷종류를 나타내고, DataLen(Data Length)는 1바이트 0x00 ~ 0xFF로 데이터 바이트 수, Data는 n바이트 데이터이다. ChkSum(Check Sum)은 1바이트 0x00 ~ 0xFF로 패킷에 대한 오류를 검사하는 순환 중복 검사이고, ETX(End of Text)는 1바이트 0x03로 패킷 끝을 나타낸다. 그림 12는 메인모듈 및 센서모듈에 대한 흐름도이며, 메인모듈에서는 패킷(Packet)이 수신될 때까지 대기하다가 패킷이 오면 송풍기 모터를 제어한 후 급기부, 배기부 센서모듈로부터 데이터를 수신하고 공기속도, 송풍기 모터의 분당 회전수, 차압을 측정 후 모든 데이터를 패킷화하여 SBC로 전송한다.

Table 4. Packet Architecture

STX	Opcode	Data Len	Data	Chk Sum	ETX
0x02	0x01~0x04	n	n	n	0x03
- Opcode					
(1) 0x01 : Data acquisition start & RPM duty rate transmission					
(2) 0x02 : Start sensor module data acquisition					
(3) 0x03 : Sensor module data packet					
(4) 0x04 : Main controller & sensor module data packet					

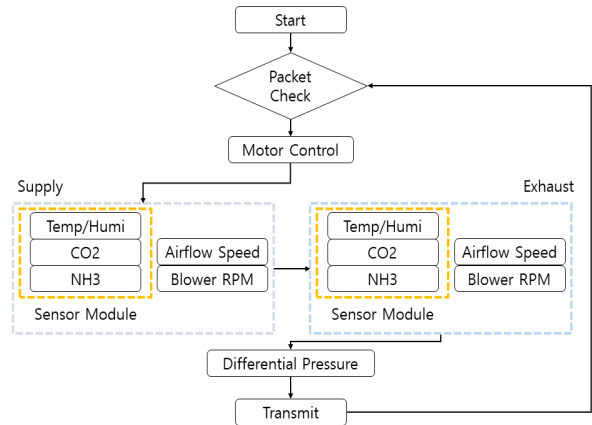


Fig. 12. Main Module & Sensor Module Flowchart

3.3.3 SBC Algorithm

SBC에서는 C#을 이용하여 그림 13과 같이 취득 프로그램(Acquisition Program)과 모니터링 프로그램(Monitoring Program) 2개로 나누어서 모니터링 프로그램 오류 발생 시 케이지에 대한 정보를 지속적으로 취득할 수 있도록 설계하였다. 센서모듈과 메인모듈에서 취득된 케이지에 대한 모든 정보는 취득 프로그램을 통해 데이터베이스에 저장되고 모니터링 프로그램에서는 저장된 데이터를 조회하여 사용자에게 케이지 정보를 가시화하도록 하였다. 취득 프로그램은 메인모듈과 USB 직렬 통신 연결한 후 시스템 초기설정 데이터베이스 값을 읽어서 요구하는 시간당 환기횟수 값에 따라 송풍기 모터 분당 회전수 제어를 위해 PWM 듀티 사이클을 계산한다. 시스템 초기설정 데이터베이스에 설정된 사육모드에 따른 급/배기 송풍기 모터 PWM 듀티 사이클을 계산하고 급/배기부 환경변수 정보를 확인하여 상태에 따라 급/배기 송풍기 모터 PWM 듀티 사이클을 재계산한다. 계산된 송풍기 모터 듀티 사이클 값을 포함한 패킷을 만들고 메인모듈에 데이터 취득을 시작하라는 패킷을 전송한다. 취득 프로그램은 데이터 취득 패킷을 수신할 때까지 대기하다가 수신되면 급/배기부 현재 상태를 확인하고 데이터를 데이터베이스에 저장한다. 모니터링 프로그램은 데이터베이스에서 환경변수 값을 읽어서 사용자가 지속적으로 모니터링할 수 있게 하며, 각 탭에 따라 사용자에게 기능을 제공한다.

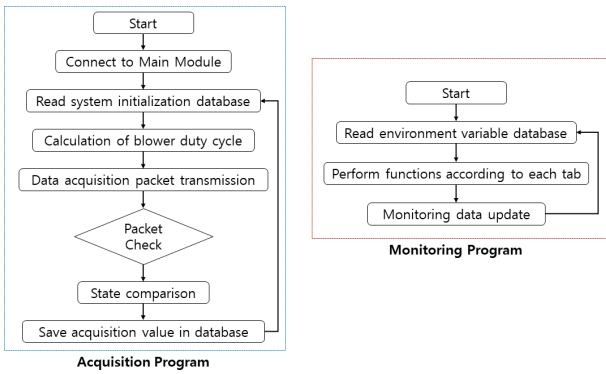


Fig. 13. Acquisition Program & Monitoring Program Flowchart

3.3.4 Monitoring Program

SBC에서 구동되는 모니터링 프로그램은 사용자가 사육 환경 변수를 모니터링하고, 센서 상한값 설정, 시간당 환기횟수 값 설정을 위해 사용되기 때문에 사용자 편의성을 고려한 UI(User Interface)를 설계하였으며, 그림 14와 같이 메인 화면, 설정 화면, 그래프 화면, 시스템 화면 총 4개의 화면으로 구현하였다.



Fig. 14. Monitoring Program User Interface

메인 화면에서는 현재 설정한 시간당 환기횟수 값과 계측된 차압, 급/배기 송풍기 분당 회전수, 공기속도, 암모니아, 이산화탄소, 온도, 습도 값을 확인할 수 있으며, 가장 최신에 취득된 값들을 나타낸다. 또한, 송풍기 모터 최대 속도를 100% 기준으로 현재 속도를 백분율로 나타내며, 송풍기가 동작중이면 원형 그래프가 회전하도록 시각적 효과를 추가하였다. 설정 화면에서는 양압/음압 사육모드 선택, 시간당 환기횟수 계산을 위한 케이지 개수, 차압 상한 값, 시간당 환기횟수 설정 값, 급/배기 환경변수 센서 상한 값을 설정할 수 있다. 그래프 화면에서는 각 사육환경 변수별로 시간 흐름에 따른 추세를 알 수 있게 꺾은선

그래프가 표시되며, 실시간으로 현재 취득된 변수 값들도 업데이트(Update) 된다. 시스템 화면에서는 현재까지 에러 리스트 내역을 확인할 수 있으며, 전처리 필터 교체주기(90일), 고성능 먼지 포집 필터 교체주기(120일)를 시각적으로 알려주며, 필터 교체주기를 초기화 할 수 있다.

IV. Experiments and Results

1. Experiment Environment

실험동물 케이지 내부의 공기정보 맞춤형 공조 제어 방법을 적용한 실험동물 사육장치 IVC 시스템에 대한 성능을 확인하기 위해 그림 15와 같이 개발 시스템을 통합하고 동작유무 테스트를 진행하였으며, 동작상태 이상 없음을 확인하였다.



Fig. 15. IVC System Development Products

본 논문에서 제안한 실험동물 케이지 내부의 공기정보 맞춤형 공조 제어 방법 성능을 테스트하기 위해 그림 16과 같이 실험용 쥐 2마리를 1개의 케이지에 넣은 후 약 6시간 동안(2023-04-03 2:25:02 PM ~ 2023-04-03 8:25:59 PM) 개발 시스템에서 사육하고 사육환경 변수들을 측정 및 상한값을 비교하였다. 표 5와 같이 사육기간 평균 배기부 이산화탄소 농도가 2,000 ppm 이하, 암모니아 농도가 20 ppm 이하, 공기속도가 1.3 m/s 이하, 음압 사육모드에 따른 차압(음압기준 < -2.5 pa)이 유지되는지 확인하였으며, 실험동물 사육환경은 대부분 항온항습실로 구성되기 때문에 온도 및 습도에 대한 환경변수 측정 실험은 제외하였다. 또한, 시간당 환기횟수 값은 급/배기 고성능 먼지 포집 필터, 전처리 필터로 인한 압력손실이 약 70% ~ 80% 일어나기 때문에 시간당 환기횟수 70회로 초기 값을 설정하였고, 사육기간 동안 해당 시간당 환기횟수 계측 값을 ±10회 오차범위 내에서 유지되는지 확인하였다.



Fig. 16. Experiment Environment

Table 5. Experiment Goal

Item	Goal
ACH	60 ~ 80ACH
Airflow Speed	≤ 1.3 ~ 1.8m/s
CO2	≤ 2,000ppm
NH3	≤ 20ppm
Differential Pressure (Negative Pressure)	< -2.5pa

2. Experiment Results

2023-04-03 2:25:02 PM 부터 2023-04-03 8:25:59 PM까지 배기부에서 취득된 환경변수는 그림 17 ~ 21과 같다. 그림 17은 계측된 시간당 환기횟수 변수 시계열 그래프이며, 최댓값은 78.36회, 최솟값은 66.79회로 실험시간에 취득된 시간당 환기횟수 값이 사용자가 설정한 값 대비 ±10회 오차범위 내 유지함을 확인하였다. 그림 18은 계측된 공기속도 변수 시계열 그래프이며, 최댓값은 0.39 m/s, 최솟값은 0.10 m/s로 실험용 쥐가 스트레스 받지 않는 풍속을 유지함을 확인하였다. 그림 19는 계측된 이산화탄소 변수 시계열 그래프이며, 최댓값은 500 ppm, 최솟값은 200 ppm으로 실험용 쥐가 스트레스 받지 않는 농도를 유지함을 확인하였다. 그림 20은 계측된 암모니아 변수 시계열 그래프이며, 최댓값은 14.52 ppm, 최솟값은 7.51 ppm으로 실험용 쥐가 스트레스 받지 않는 농도를 유지함을 확인하였다. 그림 21은 계측된 차압 변수 시계열 그래프이며, 최댓값은 -0.66 pa, 최솟값은 -4.26 pa으로 취득된 모든 값이 음압 사육모드에 필요한 차압을 유지하지 않는 부분을 확인하였는데, 이는 차압센서 측정오차 및 ADC 오차가 있기 때문에 시스템 평균값이 -2.5 pa으로 유지되도록 개발하였기 때문이다.

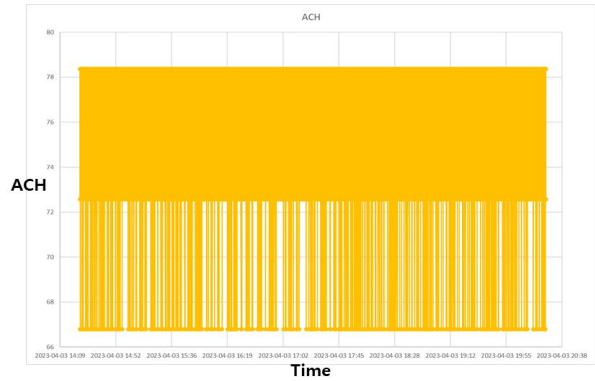


Fig. 17. Experiment Results – ACH Graph

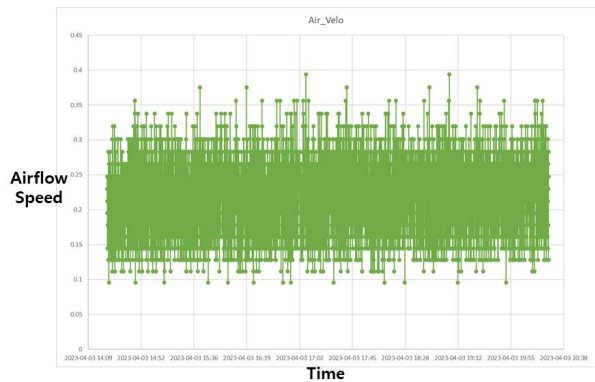


Fig. 18. Experiment Results – Airflow Speed

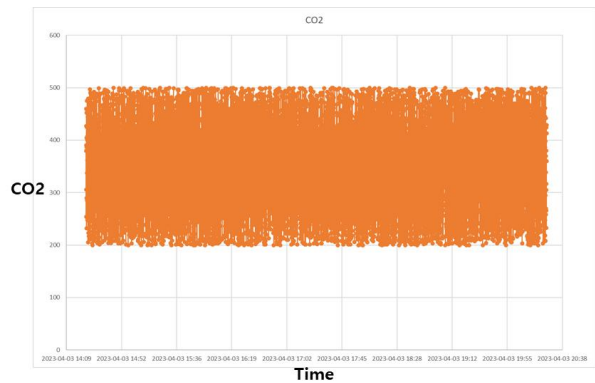


Fig. 19. Experiment Results – CO2

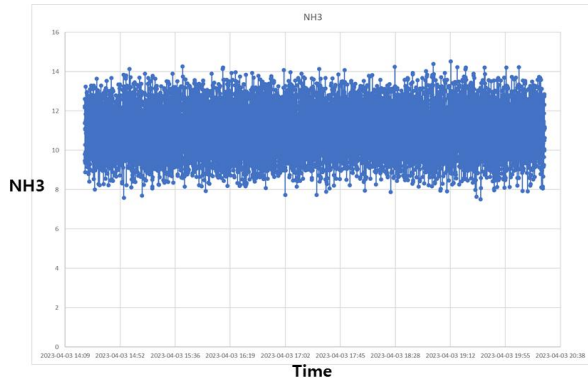


Fig. 20. Experiment Results – NH3

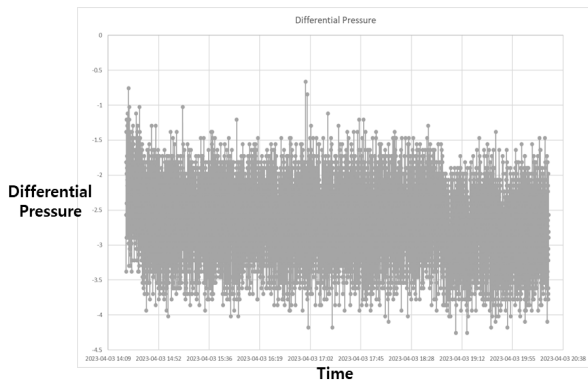


Fig. 21. Experiment Results – Differential Pressure

또한, 약 6시간 동안 취득된 환경변수 실험평균은 표 6과 같으며, 실험결과 시간당 환기횟수는 74.79 회, 공기속도 0.23 m/s, CO₂ 농도 349.90 ppm, NH₃ 농도 10.99 ppm으로 각각 목표수치를 달성하였다. 또한, 음압 사육모드로 동작하기 위해 평균 -2.67 pa 유지함을 확인하였다.

Table 6. Experiment Results(in average)

Item	Results(Average)
ACH	74.79ACH
Airflow Speed	0.23m/s
CO ₂	349.90ppm
NH ₃	10.99ppm
Differential Pressure	-2.67pa

V. Conclusions

본 논문에서는 실험동물 케이지 내부의 공기정보 맞춤형 공조 제어 방법을 제시하고, 이를 적용하여 실험용 쥐를 직접 사육하였으며, 최적의 사육환경 구현을 위한 환경변수 모니터링 개발 목표치를 달성하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해, 사용자는 시간당 환기횟수, 사육모드, 센서

상한값을 설정하면 자동으로 케이지 내부의 공기정보에 따라 급/배기 송풍기 모터를 제어하기 때문에 실험용 쥐를 원격 관리할 수 있으며, 미생물학적 오염감소를 기대할 수 있다. 또한, 아파트형 시스템 구조를 통해 저장공간 효율적 확보, 사용자와 동물과의 기류동선 비효율성 문제를 해결할 수 있다는 장점이 있다. 기존 상용화 제품들 대비 AHU 송풍기 모터 분당 회전수, 전처리 필터 교체주기, 고성능 먼지 포집 필터 교체주기, 이산화탄소 농도, 암모니아 농도, 공기속도에 대한 사육환경 변수 모니터링이 가능하기 때문에 사용자가 편리하게 연구할 수 있다. 또한, 데이터베이스 구축으로 인해 과거 이력을 확인할 수 있기 때문에 실험동물 사육환경 변수에 대한 추적관리가 가능하다는 장점이 있다. 하지만, 사용자와 실험동물 사육장치 간의 완전한 원격 사육 시스템은 아니기 때문에 향후 사물인터넷 네트워크를 적용한 원격 실험동물 사육장치로 본 연구를 확대하고자 한다. 또한, 사육에 대한 내용뿐만 아니라 사용자의 연구를 위해 실험동물 행동패턴분석 보조장치를 추가적으로 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Korea Innovation Foundation and the Ministry of Science and ICT the Republic of Korea (No. 1711178124).

REFERENCES

- [1] Zrinka Matic, and Maja Santak, "Current view on novel vaccine technologies to combat human infectious diseases," *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 106, pp. 25-56, December 2021. DOI: 10.1007/s00253-021-11713-0
- [2] Moon-Sook Park, "A Study on the Legal Acceptance of New Biotechnologies - Focusing on Biosafety Protocol and Regulatory Trends in Each Country," *The Journal of Legal Studies*, Vol. 28, No. 2, pp. 21-43, April 2020. DOI: 10.35223/GNULAW.28.2.2
- [3] Kong-Woo La, "A Study on the International Competitiveness Analysis of the Korean Medical Device Industry - Focusing on Comparison with the US, China, Japan, and EU -," *International Commerce and Information Review*, Vol. 24, No. 3, pp. 265-289, September 2022. DOI: 10.15798/kaici.2022.24.3.265
- [4] Ho-Jun Yeom, Hyun-Woo Jeong, and Sang-Soo Park, "A Study on the History of the Korean Medical Device Industry and its Global Competitiveness," *The journal of Convergence on Culture*

Technology, Vol. 8, No. 5, pp. 1-7, September 2022. DOI: 10.17703/JCCT.2022.8.5.1

- [5] Gwang-Hoon Lee, Kil-Soo Kim, and Woori Jo, "Stress Evaluation of Mouse Husbandry Environments for Improving Laboratory Animal Welfare," *Animals*, Vol. 13, No. 2, pp. 249-259, January 2023. DOI: 10.3390/ani13020249
- [6] Lars Lewejohann, Kerstin Schwabe, Christine Hager, and Paulin Jirkof, "Impulse for animal welfare outside the experiment," *Laboratory Animals*, Vol. 54, No. 2, pp. 150-158, April 2020. DOI: 10.1177/0023677219891754
- [7] Jong-Ran Kim, and Han-Hae Kim, "Trends in Sharing and Utilization of Laboratory Animals," *Korea Institute of Science & Technology Evaluation and Planning Technology Trend Brief*, No. 15, pp. 1-36, 2019.
- [8] Won-Seok Kang, and Sang-Myung Lee, "Success Factors for Localization In the Healthcare Medical Device Industry: Focusing on Blood Glucose Monitoring System Industry," *Korea Business Review*, Vol. 25, No. 2, pp. 33-52, May 2021. DOI: 10.17287/kbr.2021.25.2.33
- [9] Esther Mahabir, Stephanie Durand, Kenneth S Henderson, and Patrick Hardy, "Comparison of two prevalent individually ventilated caging systems for detection of murine infectious agents via exhaust air particles," *Laboratory Animals*, Vol. 53, No. 1, pp. 84-88, February 2019. DOI: 10.1177/0023677218785929
- [10] Fabio Iannello, "Non-intrusive high throughput automated data collection from the home cage," *Heliyon*, Vol. 5, No. 4, pp. 1-22, April 2019. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01454
- [11] Ho-Kyuung Kang, "Functional testing of IVC(Individual Ventilated Cage) system for Rat breeding," *Doctoral Dissertation, Department of Pharmacy Graduate School Kyungsung University*, pp. 1-88, August 2014.
- [12] Animal and Plant Quarantine Agency, and Ministry of Food and Drug Safety, "Institutional Animal Care and Use Committee(IACUC) Standard Operating Guidelines," *Gwangmundang Inc.*, pp. 1-252, December 2020.
- [13] Johanna Ahlgren, and Vootele Voikar, "Housing mice in the individually ventilated or open cages-Does it matter for behavioral phenotype?," *Genes, Brain and Behavior*, Vol. 18, No. 7, pp. 1-12, September 2019. DOI: 10.1111/gbb.12564

Authors



Yu-Hyun Kim received the B.S. and M.S. degrees in Computer Science and Engineering from Ulsan University, Korea, in 2017 and 2019, respectively. He joined the Patio Inc., Busan, Korea, in 2022.

He is currently a Research in the Department of R&D, Patio Inc.. He is interested in embedded software/firmware, IoT based monitoring system, time series data analysis and artificial intelligence.



Jin-Young Lee received the A.S. degrees in Department of Industrial Management from Yeungnam University College, Korea, in 1981. He founded L&G CO., LTD., in Gimhae, Korea, in 2013.

He has been managing the company ever since. He and the company are engaged in semiconductor-related equipment, factory automation, AGV business, painting business and precision parts processing.