

BSPE19500-047-12

사물인터넷과 빅데이터를 활용한 청정실험실  
댐퍼 자동화

Automation of damper system at the cleanroom using IoT  
and Big data technology



2020년 11월 30일

한국해양과학기술원  
부설 극지연구소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 사물인터넷과 빅데이터를 활용한 청정실험실 댐퍼 자동화”  
과제의 최종 보고서로 제출합니다.



연구책임자 : 백종민  
참여연구원 : 박창근,  
박상범,  
한승희

보고서 초록

과제관리번호	PE19500	해당단계 연구기간	2019.12.01 ~ 2020.11.30	단계 구분	총단계
연구사업명	중 사업명				
	세부사업명	신진연구원 지원사업			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	사물인터넷과 빅데이터를 활용한 청정실험실 댐퍼 자동화			
연구책임자	백 종 민	해당단계 참여연구원수	총 : 4 명 내부 : 4 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	정부: 21,000 천원 기업: 0 천원 계: 21,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소 지권연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약 (연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
<p>o. 청정실험실은 남극 지질 시료의 오염을 방지하고 동위원소 연구를 위한 필수 설비지만 사람에 의해 수동적으로 운용되어 왔음</p> <p>o. 사람에 전적으로 의존하는 기존 시스템에서는 불필요한 운용비용 발생 및 잠재적 오염의 위험성이 있어 이런 문제를 해결하기 위하여 4차 산업혁명 기반 기술인 사물인터넷, 3D 프린팅, 빅 데이터 기술을 활용하여 실험실을 디지털화하고, 외기 댐퍼를 자동화하는 과정을 진행하였음</p> <p>o. 청정 실험실 내부에 총 5기의 데이터 측정 장비를 제작, 설치하여 청정실험실 내부 상황을 수치화 하였고 모니터링이 가능하게 하였음</p> <p>o. 청정 실험실 외부의 정보는 정부에서 관리하는 빅 데이터 API 서비스(data.go.kr)을 통해 기상청과 한국환경공단에서 주기적으로 필요한 정보를 가지고 오는 프로그램을 제작하였음</p> <p>o. 자체 데이터 베이스 서버 시스템을 구축하여 청정실험실 내외부의 정보를 저장하여 빅데이터화 시 키고 이 정보를 통계분석 프로그램(Minitab19)을 이용하여 처리하여 자동 댐퍼 적용이 필요한 시점을 파악하였음</p> <p>o. 수집한 Data를 바탕으로 외기 댐퍼의 조정량을 결정하고 먼지 유입량을 계산하는 프로그램을 제작 했으며 제어 지시 정보를 무선 송신(MQTT)하도록 하였음</p> <p>o. 3D 프린팅 기반으로 기존 수동 댐퍼에 호환되는 댐퍼 제어 액츄에이터를 맞춤 제작하고 무선으로 제어 지시를 수신하고 외기 댐퍼의 개도를 자동 조절하도록 하였음</p> <p>o. 제어 결과는 지도학습 방식으로 피드백 되어 제어 결과에 따라서 학습 계수가 결정되고 추후 제어 시 반영되도록 구성 하였음</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	청정실험실, 댐퍼 제어, 사물인터넷, 빅데이터, 자동화			
	영 어	Clean laboratory, Damper actuator, Internet of Things, Big data, Automation			

# 요 약 문

## I. 제 목

사물인터넷과 빅데이터를 활용한 청정실험실 댐퍼 자동화

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 2014년 장보고 기지의 완공을 계기로 남극, 빅토리아랜드 일대에서 활발한 지질 연구 활동을 전개하고 있으며, 이러한 남극 탐사 활동을 통하여 다수의 지질 시료를 확보하고 있음
- 확보된 지질 시료들은 시료 처리 과정 중에 발생하는 오염을 방지하기 위하여 청정실험실에서 전처리를 진행하고 있음
- 남극에서 어렵게 확보한 시료가 오염되면 연구 활동 전반에 커다란 손실이 발생할 수 있기에 청정실험실의 안정적 유지는 연구과정의 필수적 요소라고 할 수 있음
- 청정실험실은 오염원의 침투를 방지하기 위하여 일정한 양압(Positive pressure)을 유지하고 환기횟수(number of air changes)를 제공하는 공조시스템들로 구성되는데 현재는 관리자 능력에 전적으로 의존하는 수동적인 시스템이 채택되어 있음
- 최근 외부 미세먼지가 급격하게 증가함에 따라 미세먼지의 양에 연동하여 외부에서 들어오는 공기의 양을 조정하고 소모성 필터의 주기를 결정해야 함
- 현재의 수동 시스템에서는 풍량을 결정하는 댐퍼(damper)의 설정을 바꾸기 어렵고 이로 인하여 필요 이상의 풍량을 공급하여 전력 손실, 필터 수명 감소의 문제를 야기하게 됨
- 또한 수동 시스템 하에서는 관리자의 운영 노하우가 부족하면 이런 댐퍼 조정 과정들을 이해하지 못하여 청정실험실 운영의 가장 큰 잠재 위험인자가 됨
- 이에 4차 산업혁명 기반 기술인 사물인터넷, 빅 데이터, 3D 프린팅 기술을 활용하여 자동화 기술을 개발할 필요성이 있음
- 사물인터넷 기술을 이용하여 청정실험실 내 외부 상황을 자동으로 감지하고 빅데

이터 분석을 통하여 최적 운전 모델을 도출하며 3D프린터로 제작한 액츄에이터 (actuator)를 실제 연구현장에 설치하여 자동화 할 필요성이 있음

### Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 사물인터넷 기능을 가진 데이터 획득 장치 제작 : 온도, 습도, 미세먼지, 전류, 거리, 압력 측정 및 무선 송신기능을 가진 데이터 측정 장치를 제작
- 외부 데이터 수집 프로그램 및 제어 프로그램 제작 : 데이터 베이스를 가진 서버와 연동된 외부 데이터 자동 수집 프로그램과 데이터 베이스의 정보를 이용하여 제어 시기와 제어량을 결정하는 프로그램을 제작
- 3D 프린팅 기반의 댐퍼 제어 액츄에이터 개발 : 기존 수동 댐퍼에 맞춰 3D 프린터로 출력한 하드웨어를 사용하고 무선 송수신 기능을 가지는 댐퍼 조절 액츄에이터 개발

### Ⅳ. 연구개발 결과

- 사물인터넷 기능을 가진 데이터 획득 장치 제작 완료
  - 온도, 습도, 전류, 풍속, 차압, 미세먼지 측정 및 결과 전송이 가능한 데이터 획득 장치를 자체 제작하고 청정실험실 내 외부에 설치
  - 데이터 획득 장치를 통하여 청정실험실 상태 정보를 실시간으로 사용자가 확인 가능하도록 구축
- 외부 데이터 수집 프로그램 및 제어 프로그램 제작
  - 국가 운영 빅데이터 플랫폼(data.go.kr)을 이용하여 기상청와 한국환경공단에서 청정실험실 외부 환경 정보를 주기적으로 수집하는 프로그램을 제작
  - 데이터베이스에 저장된 수집정보를 바탕으로 청정실험실 외기 댐퍼 제어 프로그램 제작
- 3D 프린팅 기반의 댐퍼 제어 액츄에이터 개발
  - 청정실험실에서 사용하던 수동 댐퍼 장치에 호환되는 하드웨어를 3D 모델링을

- 통하여 설계하고 3D 프린터로 제작
- 무선으로 제어지시를 수신하고 결과를 송신 할 수 있는 댐퍼 제어 액추에이터를 청정실험실 외기 댐퍼에 설치하여 자동 조절이 가능하도록 구축

## V. 연구개발 결과의 활용계획

- 청정실험실 외기 댐퍼를 자동으로 조절하고 내부로 유입되는 공기량을 감소시켜 소모되는 에너지와 먼지의 양을 줄여 실험실 운용 손실을 줄이는데 활용하고자 함
- 청정실험실 내외에 구축한 데이터 획득 장치를 이용하여 남극 지질시료 전처리 가 진행되는 실험실의 운용 환경을 모니터링 하고 적합하지 않은 환경을 사전에 감지하는 등 실험 환경 모니터링 용도로 활용하고자 함
- 개발 기술을 응용하여 청정실험실 내부에서 활용하는 연구 장비들에 추가적으로 사물인터넷 기능을 부여하고 하나의 시스템으로 만들어 '스마트 청정실험실'으로 구축하고자 함. 이를 통해 청정실험실 내에 사람에 의한 오염원 유입을 최소화하고자 함
- 3D 프린팅 기반의 연구 실험장비 제작 경험을 바탕으로 극지 지질 시료 분석에 활용하는 연구 장비를 추가적으로 고도화 하고 유지 보수용 부품을 3D 프린터로 생산하여 효율적인 실험실을 구축하는데 활용하고자 함

# 목 차

제출문.....	1
보고서 초록.....	2
요약문.....	3
목차.....	6
제 1 장 서론.....	7
제 1 절 연구개발의 목적.....	7
제 2 절 연구개발의 필요성.....	9
1. 기술적 측면.....	9
2. 경제·산업적 측면.....	10
3. 사회·문화적 측면.....	10
제 3 절 연구의 내용 및 범위.....	11
제 2 장 국내외 기술개발 현황.....	12
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과.....	13
제 1 절 청정실험실 외기댐퍼 자동 제어 시스템 개요.....	13
제 2 절 시스템 구성.....	14
1. 외부 DATA 수집 모듈.....	14
2. 내부 DATA 수집 모듈.....	15
3. Data 계산 및 제어 모듈.....	19
4. 제어 실행 모듈.....	27
5. 제어 모니터링 모듈.....	33
제 4 장 연구개발 결과 및 활용계획.....	35
제 5 장 참고문헌.....	37

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구개발의 목적

극지연구소에서는 남극에서 획득한 지질시료의 전처리를 위하여 청정실험실(Clean laboratory)을 운영하고 있다.(그림 1) 청정실험실은 미량의 동위원소 분석을 위하여 클린 룸 기능을 부여해 설계된 특수 실험 구역을 말하는데 연구 목적에 부합하는 미량 성분을 정밀 분석하기 위해서는 시료 처리 과정에서 발생하는 오염을 최소화하고 낮은 바탕값(blank)을 확보해야만 한다. 이를 위해 청정실험실은 오염을 제어할 수 있도록 외부 오염물은 들어오지 못하게 하고 내부에서 발생 한 오염물은 외부로 신속히 배출하는 공조 장치들이 설치되어 있다. 외부 오염물은 전치 필터(Pre filter), 미디움 필터(Medium filter), HEPA 필터(HEPA filter), 울파 필터(ULPA filter)를 조합한 먼지포집용 필터 시스템을 통과하며 0.1 $\mu$ m 크기를 기준으로 99.99% 이상이 제거 되고 양압(Positive Pressure) 상태를 언제나 확보할 수 있도록 청정실험실 상부로 공급된다. 청정실험실 천장에 설치된 FFU(Fan Filter Unit)는 이런 깨끗한 공기를 받아 풍속 0.4m/s 이상의 상하 이동 층류(Laminar flow)를 형성하게 되고 실험실 내부에서 발생한 오염물은 이 층류 흐름에 의해 외부로 빠르게 배출 된다. 이 과정에서 실내 열 부하가 발생하면 오염물이 주변으로 확산 될 수 있기에 온도제어가 필요하며 낮은 습도로 정전기가 발생하면 주변물체에 달라붙어 배출 시간의 증가를 초래하기 때문에 청정실험실엔 높은 빈도로 향온향습기가 가동되고 있다. 이처럼 청정실험실 본연의 목적인 청정도 확보를 위해서는 필터 시스템과 향온향습기 운용이 필수적이다.

필터시스템과 향온향습기 제어를 거쳐 청정실험실에 공급된 공기 중 일부는 향온향습기로 다시 보내져(Air Return) 외부 공기와 섞여 재순환되지만 대부분은 후드, 릴리프 댐퍼, 출입 장치와 같은 배기 지점에서 소실되는데 양압 상태를 유지하기 위해선 소실된 공기량 이상을 외부에서 보충해야만 한다. 외부 공기량은 향온향습기에 연결된 수동 댐퍼를 통해 조절 할 수 있는데 수동 댐퍼의 조절은 대다수 소규모 청정실험실에선 제작사가 설정한 최대치를 그대로 사용하기 때문에 필요 이상의 외부공기를 사용해서 손실이 지속

발생하게 된다. 외부공기의 유입이 늘면 온습도를 유지하는 향온향습 설비의 가습-제습기와 냉난방기의 가동 빈도가 늘어 전기 소모가 증가하고 관련 부품의 수명이 감소하게 되며 외부 오염물질을 내부로 더 많이 유입시켜 먼지제거 시스템의 필터 수명을 감소시키고 청정실험실 자체엔 청정도 하락의 원인이 될 수 있다.

따라서 외부 공기 유입량은 양압을 유지하고 청정실험실의 목적이 달성되는 조건에서 최소화 되는 것이 바람직하다. 하지만 외부 공기유입량을 수시로 제어하기에는 어려운 점이 존재하는데 시간이 지남에 따라 필터가 오염물로 막혀 공기의 통과 정도가 변하거나, 외부 바람 세기, 습도의 영향을 받는 것은 일일이 사람이 수동으로 제어하기 불가능하다.

외부공기 오염정도가 낮거나 현재 온습도가 제어 목표치와 거의 일치하는 경우와 같이 외부 공기 유입이 손실을 거의 발생하지 않는 조건에서는 청정실험실 내부 작업여건을 더 감안해야 이득인 경우도 존재한다. 예를 들어 클린룸 내부에 평상시 보다 오염 발생이 많은 작업을 진행하는 경우는 배기장치의 사용량을 늘리고 충분한 외기를 공급하여 환기 횟수를 증가시켜야 하는데 이러한 청정실험실의 운용 상황들을 종합적으로 반영할 수 있는 댐퍼 자동 조절 시스템을 제작할 필요성이 있었다.



그림 1. 남극 지질 시료에서 방사성 동위원소를 분리하는 청정실험실

## 제 2 절 연구개발의 필요성

### 1. 기술적 측면

- 2014년 장보고 기지의 완공을 계기로 남극, 빅토리아랜드 일대에서 활발한 지질 연구 활동을 전개하고 있으며, 이러한 남극 탐사 활동을 통하여 다수의 지질 시료를 확보하고 있음
- 확보된 지질 시료들은 시료처리 과정 중에 발생하는 오염을 방지하기 위하여 청정실험실에서 전처리를 진행하고 있음
- 남극에서 어렵게 확보한 시료가 오염되면 연구 활동 전반에 커다란 손실이 발생할 수 있기에 청정실험실의 안정적 유지는 연구과정의 필수적 요소라고 할 수 있음
- 청정실험실은 오염원의 침투를 방지하기 위하여 일정한 양압(Positive pressure)을 유지하고 환기횟수(number of air changes)를 제공하는 공조시스템들로 구성되는데 현재는 관리자 능력에 전적으로 의존하는 수동적인 시스템이 채택되어 있음
- 최근 외부 미세먼지가 급격하게 증가함에 따라 환경정보에 연동하여 외부에서 들어오는 공기의 양을 조정하고 관리할 필요성이 있음
- 현재의 수동 시스템에서는 풍량을 결정하는 댐퍼의 설정을 바꾸기 어렵고 이로 인하여 필요 이상의 풍량을 공급하여 전력 손실, 필터 수명 감소의 문제를 야기하게 됨
- 또한 수동 시스템 하에서는 관리자의 운영 노하우가 부족하면 이런 댐퍼 조정 과정들을 이해하지 못하여 청정실험실 운영의 가장 큰 잠재 위험인자가 됨
- 이에 4차 산업혁명 기반 기술인 사물인터넷, 빅 데이터 분석, 3D 프린팅 기술을 활용하여 자동화 기술을 개발할 필요성이 있음
- 사물인터넷 기술을 이용하여 청정실험실 내 외부 상황을 자동으로 감지하고 빅데이터 분석을 통하여 최적 운전 모델을 도출하며 3D프린터로 제작한 액츄에이터(actuator)를 실제 연구현장에 설치할 필요성이 있음

## 2. 경제 · 산업적 측면

- 청정실험실은 오염원의 침투를 방지하기 위해 양압(Positive pressure)상태를 항시 유지해야 하며 이를 위하여 수 십대의 FFU(Fan Filter Unit)가 필터링 된 층류 공기를 상부에서 공급 하고 있음.
- 청정실험실은 정전기로 인한 부유입자 부착을 방지하기 위하여 일정 습도 이상을 유지하게 설계되며 이 과정에서 가습기가 높은 빈도로 가동하게 됨
- 청정실험실 내부에서 발생하는 부유입자는 층류 공기에 의해 외부로 빠르게 빠져 나가며 이때 실내 열 부하의 영향으로 주변부로 확산되는 것을 방지하기 위하여 에어컨이 높은 빈도로 가동하게 됨
- 위와 같이 청정실험실에서 FFU(Fan filter Unit), 가습기, 에어컨 같은 공조 설비의 높은 사용 빈도는 청정실험실의 운용비용을 극단적으로 상승시키며 이러한 이유로 에너지 다소비 설비로 지정되어 있음
- 극지연구소에 운용되는 청정실험실은 월간 전기비만 수 백 만원이 발생하고 있어 연구 사업에 부담이 되고 있음
- 청정실험실에 사용하는 소모성 부유먼지 제거 필터는 프리필터(Pre filter), 미디움 필터(Medium filter), 헤파 필터(HEPA filter), 울파 필터(ULPA filter)가 존재하는데 연간 교체 비용이 수 백 만원에 달하고 있어 필터의 수명을 정확하게 예측하고 교환한다면 소요 예산을 절감할 수 있을 것으로 기대됨
- 청정실험실 운용 자동화 기술을 통한 비용 절감은 반도체와 같은 대규모 생산설비에서는 주요 이슈로 간주되고 있으나 규모가 작은 연구현장에선 상대적으로 관심이 없었던 것이 현실임
- 국내 중소기업 및 소규모 연구소에서 가동되고 있는 청정실이 청정제조실을 포함해 다수가 존재하기에 운용 효율화를 목적으로 기술 개발을 진행해볼 필요가 있음.

## 3. 사회 · 문화적 측면

- 최근 정부는 4차 산업혁명 관련 기술의 전파와 도입을 적극 권장하고 있음
- 청정실험실 운용과 같은 전혀 새로운 분야에서 4차 산업혁명 기술을 융합하고 적용하는 것은 정부 권장사항 이기에 적극 시도해 볼 필요가 있음

- 시대의 흐름인 4차 산업혁명 관련 사물인터넷, 3D 프린트, 빅 데이터 기술을 극지연구소 연구실에 실제 적용하고 운용함으로써 추후 다른 분야로의 확산에 대비한 경험을 축적할 필요가 있음

## 제 3 절 연구의 내용 및 범위

### 1. 사물인터넷 기능을 가진 데이터 획득 장치 제작

- 온도, 습도, 미세먼지, 전류, 거리, 압력 등 청정실험실의 작동 상황을 디지털 수치로 표시 가능한 센서를 설치
- 사물인터넷 기능을 가진 데이터 로거를 제작하여 센서의 측정 값을 서버에 무선 전송

### 2. 외부 데이터 수집 프로그램 및 제어 프로그램 제작

- 전송된 데이터를 저장할 수 있는 데이터 베이스와 서버 시스템을 구축
- 외부 데이터 시스템(data.go.kr)에 접속하여 필요한 정보를 수신하는 프로그램 제작
- 내부 데이터를 이용하여 댐퍼의 작동 제어 프로그램을 제작
- 지도학습 방식의 피드백 제어를 이용하여 과거 제어 결과를 학습하고 다음 동일 조건의 제어에 가중치를 부여하는 학습계수 계산 프로그램을 제작

### 3. 3D 프린팅 기반의 댐퍼 제어 액츄에이터 개발

- 기존 수동 댐퍼에 호환이 가능한 연결 부속을 3D 모델링으로 설계하고 적층 제조(3D 프린팅) 기술을 이용하여 출력
- 무선 통신 기능이 있는 MCU를 이용하여 리니어 모터를 원격 제어하는 하드웨어 개발

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

청정실험실은 연구 목적뿐 아니라 제조현장에서도 폭 넓게 사용되고 있으며 보통 오염물 제어가 필요한 반도체 설비와 제약사에서 활용되고 있다. 이런 제조현장의 대규모 산업시설에서는 ‘스마트 팩토리’라 불리는 자동화 생산 설비 구현을 위해 무선 센싱, PLC-HMI-MES 시스템, 그리고 이에 연동된 모니터링 및 생산 장비가 도입되어 공정에서 발생하는 정보를 기반의 품질과 원가가 자동 관리되고 개선활동에 사용되고 있다.(그림 2) 하지만 이런 시스템들은 구축에 소요되는 비용이 높아 대기업 위주의 산업 현장에만 선도적으로 도입, 운용되어 왔으며 최근에서야 중소기업 경쟁력 강화를 목적으로 정부 주도의 기술 전파가 이뤄지고 있다. 그럼에도 불구하고 제조현장이 아닌 소규모 연구 목적의 청정실험실에서는 기대효율 대비 설치비용이 높은 점과 규격화 된 산업 현장과는 다르게 맞춤 제작이 필요한 경우가 많은 점 때문에 관련 시스템 적용 사례가 거의 없다. 이번 과제 의 최종 목표인 청정실험실의 외기 댐퍼 자동 제어는 스마트 팩토리 기술이 적용된 산업시설에서는 기존 시스템을 활용한다면 비슷한 기능의 구현이 가능 할 것으로 보이지만 스마트 팩토리가 구현되지 않은 소규모 청정실험실엔 댐퍼 제어 목적만으로 상업화되어 출시된 물품이 존재하지 않기에 본 목적에 부합하는 합리적 비용의 맞춤 설계 시스템을 제작하여 적용하였다.

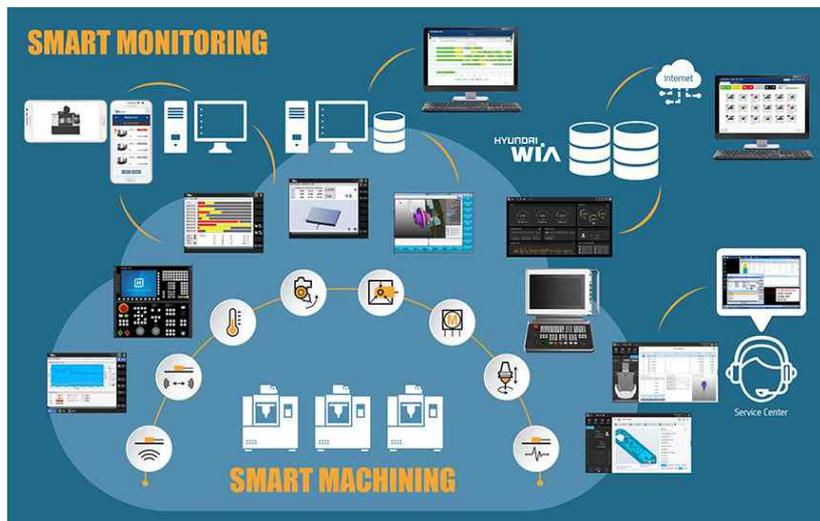


그림 2. 대규모 생산 현장에 쓰이는 스마트 팩토리 관련 기술

## 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제 1 절 청정실험실 외기 댐퍼 자동 제어 시스템 개요

청정실험실 외기 댐퍼 자동 제어 시스템은 데이터를 수집하는 'Data 수집 모듈', 수집된 정보를 바탕으로 적절한 제어 위치를 누적 계산하고 정보를 저장하는 'Data 계산 및 제어 모듈' 그리고 실제 댐퍼(Damper)의 위치를 제어하는 '제어 실행 모듈', 마지막으로 제어 내용을 확인하는 '제어 모니터링 모듈'로 이루어진다. 'Data 수집 모듈'을 통해 수집한 정보들을 기반으로 댐퍼 개도 제어값을 결정하는 수식 기반의 프로그램이 실행되고 그 계산 값을 댐퍼 제어 액추에이터로 무선 송신하여 댐퍼 개도를 조절하게 된다. 제어 결과는 '제어 모니터링 모듈'에 표시하고 제어 과정에 이상이 없는 지 확인하는 것이 시스템의 전체 구성이다.(그림 3)

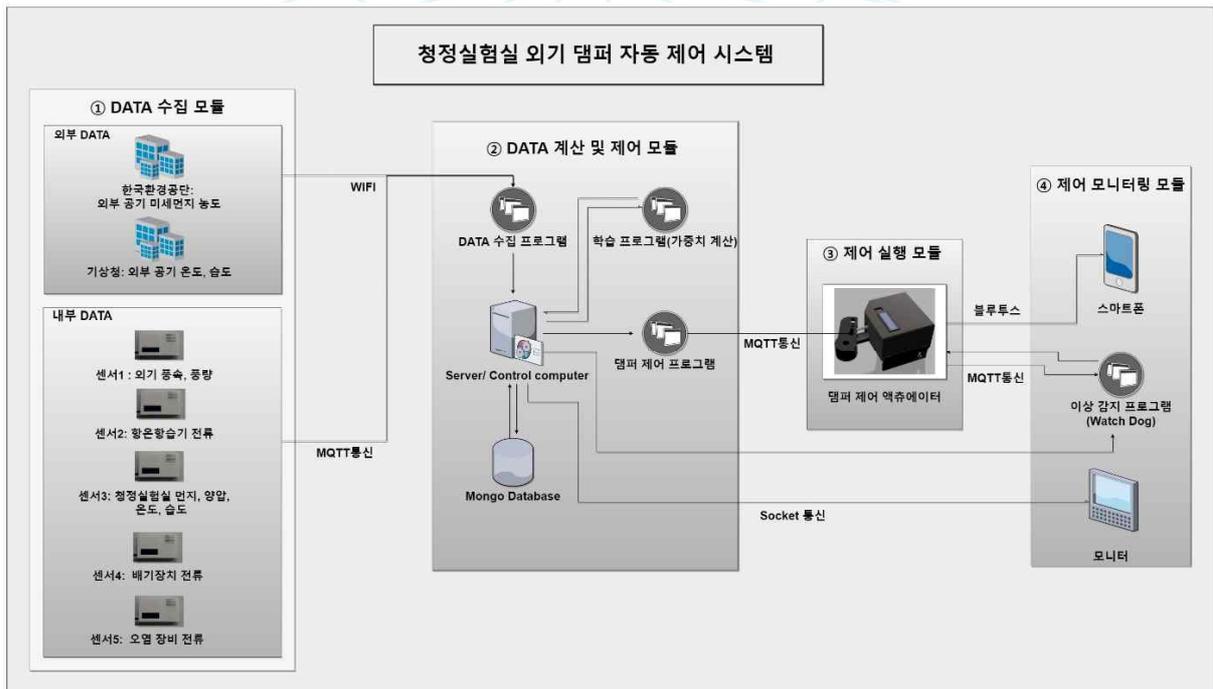


그림 3. 청정실험실 외기 댐퍼 자동 제어 시스템의 구성도

## 제 2 절 시스템 구성

### 1. 외부 DATA 수집 모듈

외부 Data 수집 모듈은 청정실험실이 가동 중인 장소의 외부 환경 계측 결과를 전송 받는 프로그램이다. 청정실험실이 설치된 건물 외부의 공기 상태를 알 수 있는 환경 지표들로, 건물 외부에 센서를 설치 시 지속적으로 관리하는 것이 까다롭고 가격이 상대적으로 고가인 점을 고려하여 정부에서 운영하는 빅데이터 API 서비스(data.go.kr)를 이용하여 한국환경공단과 기상청에 주기적으로 접속하여 청정실험실이 설치된 장소의 외부 미세먼지 농도(PM2.5), 온도, 습도 등의 정보를 받아오도록 파이썬으로 프로그램을 제작하였다. 사용한 API서비스는 두 종류로 대기오염 수치를 지역별로 제공하는 'AirKorea\_openapi'와 지역별 날씨 정보를 제공하는 '기상청 동네예보 조회서비스'를 이용하였으며 총 30여개의 환경 지표를 받아 계산에 필요한 일부 수치만 사용하고 있다. 프로그램은 짧은 주기(현재 5분)로 무한 반복하여 DATA를 수집하고 자체 데이터 베이스로 전송하게 되며 get전송 방식으로 JSON(Javascript Object Notation) 형태의 파일을 받아 에러 처리 과정을 거쳐 서버에 저장하도록 하였다.(그림 4)

```
def first_job(): # 기상청, 환경공단의 Data를 가지고와서 DB에 저장해주는 함수

    print("first : Gathering program working-----")
    # 현재 날짜 가져오기, datetime 함수이용
    now = datetime.now()
    nowMinus40 = now - timedelta(minutes = 40) # 기상청 API DATA 전송기준시간을 고려하여 40분이후로 설정
    tday=[ '월', '화', '수', '목', '금', '토', '일' ]
    rday = datetime.today().weekday()
    tdaycheck = tday[rday] # 오늘 요일
    yearmonth = "%04d%02d" % (now.year, now.month, now.day) # 년월일 8자리
    time = "%02d%02d" % (nowMinus40.hour, nowMinus40.minute) # 시간분 4자리
    nowtime = "%04d%02d%02d%02d" % (now.year, now.month, now.day, now.hour, now.minute) #년월일시간분
    print("41[Gathering program]:", "년월일=", yearmonth, "시간분=", time, "년월일시간분=", nowtime )
    #print(time)
    #print(nowtime)

    #기상청 동네예보 조회기상청 API에 접속하여 정보를 받아오는 부분(날짜정보의 결실이 필요하여 후로문 안에 넣음, 기상청 일일포레캐스트100000)
    weather_req_url = 'http://apis.data.go.kr/1360000/VilageFcstInfoService/getIdnFcst?serviceKey=%5CnumOfRows=10&pageNo=1&base_date=%&base_time=%&nx=54&ny=123&dataType=JSON' % (gov_api_key, yearmonth, time)

    #몽고DB 접속
    client = MongoClient('localhost', 27017) # 현재컴퓨터의 27017포트에 있는 몽고DB에 접속하기
    db=client['lot'] # Database : lot
    collection = db['python'] # Collection : python (없으면 자동 생성됨)

    # 미세먼지 Data 처리부분 (한국환경공단)
    dustdatatext = requests.get(microdust_req_url).text # url에 접속해서 text로 받아오기
    print("56[Gathering program]:한국환경공단 대기환경 Data",dustdatatext)
    dust_data = json.loads(dustdatatext) # test를 JSON형태로 변환
    dust_data@minus = {} # 딕셔너리로 선언

    try: # IndexError 발생에 따른 예외처리 구분
        # IndexError가 발생하면 dust_data@minus를 이용하여 메러니지 알계 DUSTERR 메러니드의 데이터를 넣어줌
        dust_data@minus = { "_returnType": "DUSTErr", "cityName": "연수구", "cityNameEng": "Yeonsu-gu", "coValue": "0.6", "dataGubun": "", "dateTime": "2020-04-01 09:00", "districtCode": "032", "districtNumSeq": "008"
        my_city_data = dust_data["list"][7] #연수구의 json 데이터가 list 7이라 수정함
        print("연수구 대기환경 정보", my_city_data)

        # pm10 = my_city_data["pm10@value"]
```

그림 4. 외부 DATA 수집 프로그램 일부분의 예시 (기상청 접속 부분)

## 2. 내부 DATA 수집 모듈

### ① 적층가공 방법(3D 프린팅)을 활용한 하드웨어 제작

청정실험실의 장착 위치에 알맞은 형태로 센서와 로거기능을 담은 케이스를 적층 가공 방법(3D 프린팅)으로 출력하였다. 사용한 모델링 프로그램은 캐디안쓰리디(CADian3D 2015)와 퓨전360(Fusion360)이며 출력한 프린터는 하이비전 시스템의 큐비콘(Cubicon Single plus) 제품을 이용하였다. 큐비크리에이터(Cubicreator) 3.6.8 버전을 이용하여 캐드파일을 슬라이싱하여 출력에 적합한 지코드(Gcode) 형태로 변환하였으며 필라멘트 소재는 ABS의 강화 버전인 ABS-A100 1.75mm를 사용하였다. (그림 5, 6)



그림 5. 적층가공(3D 프린팅)을 이용하여 제작한 부품

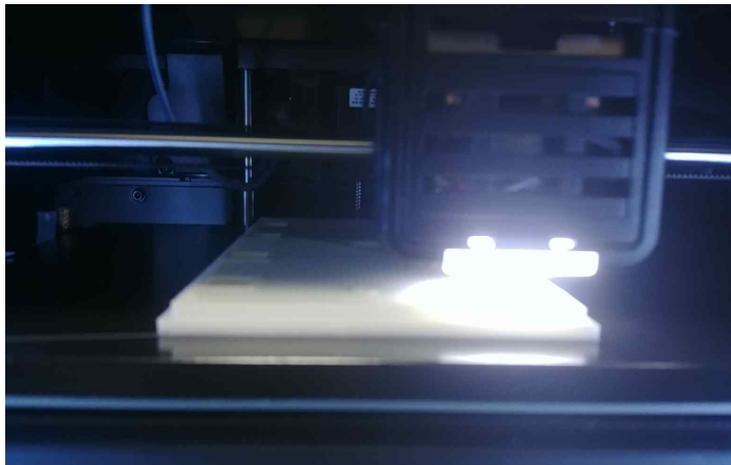


그림 6. 적층가공(3D 프린팅)을 이용한 부품 제작 과정

## ② Data 측정 로거 제작을 위한 전자 부품의 구성

하드웨어는 와이파이 기능이 내장된 아두이노 계열의 임베디드 보드인 위모스(Wemos D1)를 메인 컨트롤러로 사용하였고 여기에 풍속-풍량(KIMO, CTV210-BOS), 전류(디웰, TU12P100A-RC5), 온습도(DHT22/AM2302), 미세먼지(PMS7003), 양압(KIMO, CP210) 센서 들을 배선하여 연결하였다.(그림 7)

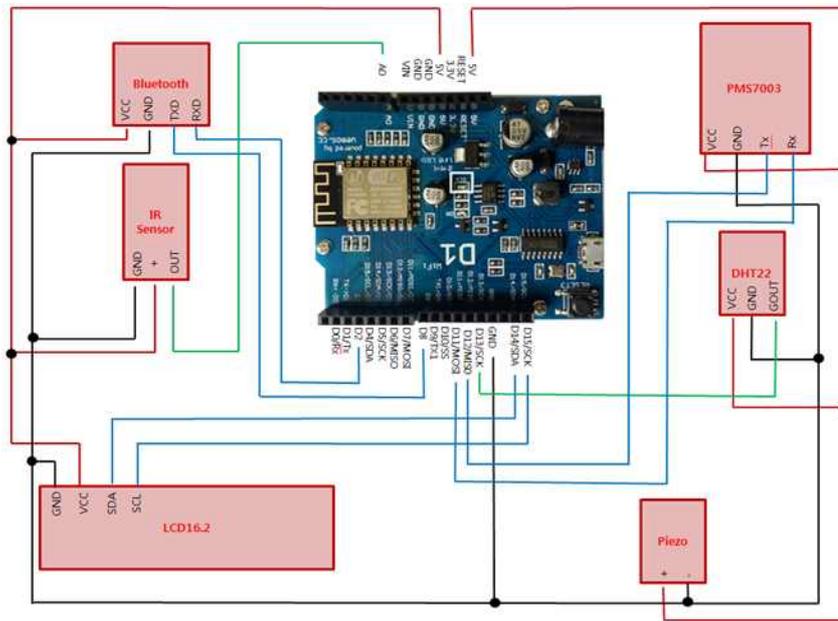


그림 7. 위모스(Wemos)와 연결된 각 센서의 결선 예시

메인 컨트롤러인 위모스 보드는 ESP8266이라는 와이파이 통신 기능을 지닌 칩을 내장하고 있어 사물인터넷 구현에 적합하며 디지털 입출력 포트를 11개, 아날로그 입력 포트를 1개 가지고 있어서 다양한 센서와 연동하기 쉬운 특징을 지닌다. 크기 및 기능에 따라 종류가 달라지지만 가장 많이 사용하는 D1 R1 시리즈인 경우에 가격이 6 달러 미만으로 형성되어 있기 때문에 측정하고자 하는 센서 별로 컨트롤보드를 부착해도 비용에 부담이 없는 것이 장점이다.

풍속과 풍량을 측정하는 CTV210은 열선 풍속계(hot wire anemometer)와 연결하는 방식인데, 가열된 니켈선에 기류가 흐를 때 발생하는 냉각 작용이 전기 저항을 감소시키는 것을 이용하여 풍속을 계산하게 된다. 이렇게 측정된 풍속은 사용 장소의 배관 직경을 이용하여 풍량으로 다시 환산하게 된다.

전류 측정 센서인 TU12P100A-RC5는 클램프 방식의 센서로, 전류가 흐르면서 발생하

는 자기장을 측정하고 이를 다시 출력 전압으로 변환하는 방식이다. 자기장에 비례적으로 증가하는 전압이 나오게 되는데 이를 환산하여 전류로 재계산 하게 된다. 최대 측정 전류에 따라 다양한 모델을 제공하고 있기 때문에 측정하는 장치의 부하에 따라 종류를 선택하여 설치하기 용이하다.

온도와 습도를 측정하는 AM2302 센서는 DHT22라고도 칭하며 온도와 습도를 동시에 측정할 수 있는 센서 이다. 습도는 0% ~ 100% RH까지 2% RH의 정확도로 측정이 되는데 박막 폴리머의 표면에 부착되는 수분의 양에 따라서 전극 사이의 저항이 변하면 이를 측정하고 습도로 환산하게 된다.(그림 8) 온도는 0.5℃의 측정 정확도로 -40℃~ 80℃의 측정 범위를 가지고 있는데 세라믹으로 이루어진 반도체가 온도에 따라서 소재 자체 저항이 변하는 특성을 이용하여 온도 값을 계산하게 된다.

미세먼지 센서인 PMS7003은 레이저가 조사되는 영역에 공기가 흘러가면 부유입자에 의해서 산란되는 레이저의 패턴을 전기 신호로 출력해서 먼지의 양으로 환산하게 된다. 5V 라는 비교적 낮은 전압에서 작동이 가능하고 최소 0.3μm까지의 부유 입자 측정이 가능하다는 특징이 있다. 실제 청정실험실에서 사용하는 고가의 레이저 소스 측정 장비에 비하여 측정 신뢰성과 정밀도가 상대적으로 떨어지지만 반복적으로 측정이 요구되는 시스템의 특성상 센서의 수명과 가격적인 부분을 고려해야 했기에 이 센서를 0.3μm입자를 관리하는 청정실험실에 사용하게 되었다.

Model	AM2302	
Power supply	3.3-5.5V DC	
Output signal	digital signal via 1-wire bus	
Sensing element	Polymer humidity capacitor	
Operating range	humidity 0-100%RH;	temperature -40-80Celsius
Accuracy	<b>humidity +2%RH</b> (Max +-5%RH);	temperature +-0.5Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH;	temperature 0.1Celsius
Repeatability	humidity +-1%RH;	temperature +-0.2Celsius
Humidity hysteresis	+-0.3%RH	
Long-term Stability	+-0.5%RH/year	
Interchangeability	fully interchangeable	

그림 8. AM2302 온/습도 센서의 성능표

소프트웨어의 구성은 위모스(Wemos D1) 보드의 메모리 영역에 C언어 기반의 스케치 프로그램을 이용하여 센서 측정, 제어 처리 및 통신 소스코드를 구성하여 무한 반복하며 수행하도록 하였다.(그림 9) 해당 프로그램 수행에 따라 위모스 보드는 센서들의 측정 결과를 처리하여 약 5초~ 20초에 한번 서버 컴퓨터에 전송하게 된다.

```

mpd_project_for_radroomAmetr_3_phase_20200424_v5_reconnect | 1주후이름 1.8.12
mpd_project_for_radroomAmetr_3_phase_20200424_v5_reconnect

void loop() {
  mqttClient.loop(); // mqtt 연결을 계속 확인하고 즉시 재연결이 필요하면 led를 꺼줘 줘
  // Blynk 실행
  if(mqttClient.connected()) // mqtt가 재연결이 되었지만 다시 연결해 주는 부분의 함수 reconnect() 호출함
  {
    reconnect();
  }

  sensor_data = analogRead(sensor); // 아날로그 data, 간혹전서
  PDS_0 = (PDS_0 + sensor_data) * (1 - PDS_0);
  //Serial.println (Serial_Sensor);
  //Serial.println ("sensor_data");
  //Serial.println ("sensor_data");

  //Analog 센서 0-200까지의 범위를 읽을 0-1023으로 변환한다. 변환에 사용되는 0-200을 0-100까지 변환하게 된다. 즉 0.2V당범위 0-100A
  float sensor = (sensor_data - 0) / 1023 * 100; // 0-100A가 0-1023으로 표현되기에 먼저 100을 (100/1023) 곱함 (100을 100으로 나눈다)
  float sensor_PDS = (PDS_0 + sensor) * (1 - PDS_0); // 0-100A가 0-1023으로 표현되기에 그 100의 배수를 나눈 (baseline인 0을 빼고 사칙연산)
  Serial.println ("sensor");
  Serial.println ("sensor_PDS");
  Serial.println (sensor_PDS);

  float ammeter = ((sensor_data - 100) / 24.1) * 100; // 0-100A가 0-1023으로 표현되기에 24.1을 나눈뒤에 100을 곱함, 센서와 100의 차이가 발생하더라도 기준 base가 100이므로 출력
  float ammeter_PDS = ammeter * (1 - ammeter); // 100
  // PDS 값을 출력, Data가 작으면
  if (PDS_0 < 100) {
    // (0-100)은 PDS7003 사용자 data를 처리하는 부분으로 만들었다
  }

  // PDS를 온도, 습도 값을 출력해 줘고 및 연시 상태 체크
  float t = dht.readTemperature();
  float h = dht.readHumidity();
  if (isnan(t) || isnan(h)) {
    Serial.println ("Failed to read from DHT sensor!");
    delay(500);
  }
  // PDS를 온도, 습도 값을 출력해 줘고 및 연시 상태 체크
  delay(1000); // 1초 대기시간이 필요
  char message[40] = "";
  sprintf(message, "%f", PDS_0);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // LED를 켜고
}

```

그림 9. 데이터 측정 장치의 소스코드 예시

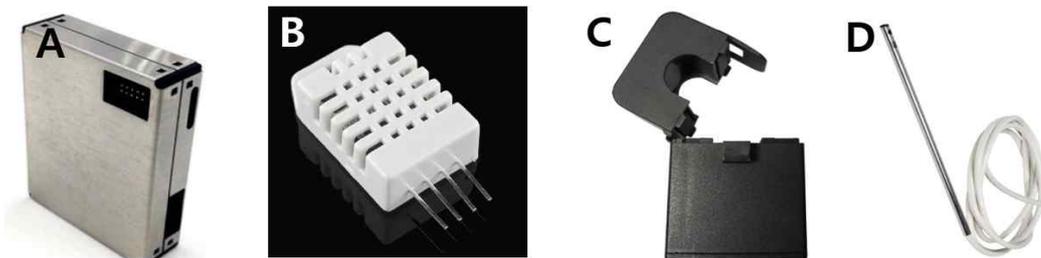


그림 10. A) 먼지 센서 PMS7003 B) 온습도 센서 AM2302 C) 전류 센서 D) 풍속 센서

최종적으로 센서들은(그림 10) 만능기판을 이용하여 위모스 보드에 배선작업을 진행하여 결합되며 이런 내부 Data 측정 장치 5기가 제작되어 측정에 적합한 청정실험실의 내부 장소에 배치되었다. (그림 11)



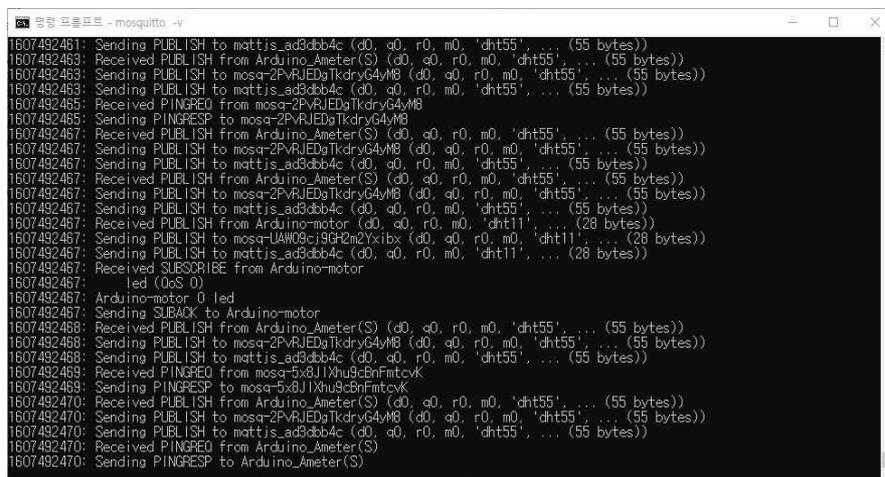
그림 11. 내부 Data 측정 장치

### 3. DATA 계산 및 제어 모듈

DATA 계산 및 제어 모듈에서는 DATA 수집 프로그램, 서버 역할을 수행하는 컨트롤 컴퓨터(Control computer), 데이터베이스, 가중치를 계산하는 학습 프로그램, 댐퍼 제어 시기와 양을 결정하는 프로그램으로 이루어진다. 수집한 DATA를 이용하여 연산하도록 프로그래밍 되어 있는데 언제 댐퍼를 제어할 것인지, 얼마나 댐퍼를 제어할 것인지를 계산하게 된다.

#### ① Data 수집 프로그램

내부 Data 측정 장치는 MQTT(Message Queuing Telemetry Transport) 방식을 이용하여 Data 수집 프로그램 측으로 정보를 전달한다. MQTT는 IBM에서 만들어진 메시지 전송 프로토콜의 일종으로 TCP/IP기반의 네트워크에서 작동하며 낮은 전력에서도 구동되기 때문에 최근 사물인터넷 환경에서 널리 사용되고 있다. 기본적으로 메시지 브로커(Broker)라고 불리는 중간 서버에서 발행자(Publisher)가 특정 주제(Topic)와 함께 메시지 형태의 정보를 전달하면 브로커는 해당하는 주제(Topic)의 구독자(Subscriber)들에게 정보를 전달해 준다. 이번 과제에서는 Mosquitto Broker Server(그림 12)라는 오픈 소스 기반의 메시지 브로커를 이용하였는데 이 브로커로 전달된 메시지 정보는 Node.js를 기반으로 작동하는 자바스크립트 소스 프로그램을 통하여 처리되어 제어/서버 컴퓨터로 최종 전달된다.



```
1607492461: Sending PUBLISH to mattjs_ad3abb4c (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492463: Received PUBLISH from Arduino_Ameter(S) (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492463: Sending PUBLISH to mosq-2PvRJEDgTkdryG4vM8 (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492463: Sending PUBLISH to mattjs_ad3abb4c (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492465: Received PINGREQ from mosq-2PvRJEDgTkdryG4vM8
1607492465: Sending PINGRESP to mosq-2PvRJEDgTkdryG4vM8
1607492467: Received PUBLISH from Arduino_Ameter(S) (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492467: Sending PUBLISH to mosq-2PvRJEDgTkdryG4vM8 (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492467: Sending PUBLISH to mattjs_ad3abb4c (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492467: Received PUBLISH from Arduino_Ameter(S) (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492467: Sending PUBLISH to mosq-2PvRJEDgTkdryG4vM8 (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492467: Sending PUBLISH to mattjs_ad3abb4c (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492467: Received PUBLISH from Arduino-motor (d0, a0, r0, m0, 'dht11', ... (28 bytes))
1607492467: Sending PUBLISH to mosq-UAW09cj9GH2m2Yxibx (d0, a0, r0, m0, 'dht11', ... (28 bytes))
1607492467: Sending PUBLISH to mattjs_ad3abb4c (d0, a0, r0, m0, 'dht11', ... (28 bytes))
1607492467: Received SUBSCRIBE from Arduino-motor
1607492467: led (on 0)
1607492467: Arduino-motor 0 led
1607492467: Sending SUBACK to Arduino-motor
1607492468: Received PUBLISH from Arduino_Ameter(S) (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492468: Sending PUBLISH to mosq-2PvRJEDgTkdryG4vM8 (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492468: Sending PUBLISH to mattjs_ad3abb4c (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492469: Received PINGREQ from mosq-5x8JlXhu9cBnFmfcvK
1607492469: Sending PINGRESP to mosq-5x8JlXhu9cBnFmfcvK
1607492470: Received PUBLISH from Arduino_Ameter(S) (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492470: Sending PUBLISH to mosq-2PvRJEDgTkdryG4vM8 (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492470: Sending PUBLISH to mattjs_ad3abb4c (d0, a0, r0, m0, 'dht55', ... (55 bytes))
1607492470: Received PINGREQ from Arduino_Ameter(S)
1607492470: Sending PINGRESP to Arduino_Ameter(S)
```

그림 12. Mosquitto MQTT Broker를 이용한 정보 교환

## ② Server/ Control Computer

Node.js 기반으로 작동하는 웹서버 컴퓨터(그림 13)를 구축하였으며 Data 계산 및 제어 모듈에 속하는 프로그램들은 이 서버 컴퓨터에서 항상 구동된다. 서버 프로그램들과 데이터 베이스 관련 프로그램들은 모두 이곳에 설치되었다.

```
71 client.on("message", function(topic, message){
72   var obj=JSON.parse(message);
73   var moment = require('moment');
74   // moment 모듈 불러옴(시간 계산용)
75   require('moment-timezone');
76   // moment-timezone 모듈 불러옴
77   moment.tz.setDefault("Asia/Seoul");
78   var date=moment().format('YYYY-MM-DD HH:mm:ss');
79
80   obj.created_at=date;
81   // obj.created_at=new Date();
82   console.log(obj);
83   // mongodb의 dht11 센서 정보를 저장하는 부분
84   /**
85   if(topic=="dht77"){
86     var dht11=dbObj.collection("dht77");
87     //스레드2, Mongo DB의 dht77 collection 항목에
88     dht11.save(obj, function(err, result){
89       // dht77 collections에 저장하기
90       if(err) { console.log(err);
91         //저장실패하면 그 값을 바꿔주기
92         console.log("DB disconnected.....");
93       }
94       else console.log(JSON.stringify(result));
95       // 저장이 성공하면 결과(result)를 가져와서 콘솔에 출력 {"n":1, "ok": 1}
96     });
97   }
98   **/
99
100   if(topic=="dht66"){
101     var dht11=dbObj.collection("dht66");
102     //스레드2, Mongo DB의 dht66 collection 항목에
103     dht11.save(obj, function(err, result){
104       // dht11 collections에 저장하기
105       if(err) { console.log(err);
106         //저장실패하면 그 값을 바꿔주기
107         console.log("DB disconnected.....");
108       }
109       else console.log(JSON.stringify(result));
110       // 저장이 성공하면 결과(result)를 가져와서 콘솔에 출력 {"n":1, "ok": 1}
111     });
112   }
113
114   else if(topic=="dht55"){
115     var dht11=dbObj.collection("dht55");
```

그림 13. Node.js 기반의 웹서버



## ③ Mongo Database

몽고 데이터베이스(Mongo Database)는 NoSQL에 해당하는 비관계형 데이터베이스 시스템으로 테이블로 정해지는 관계를 설정하지 않기 때문에 비교적 자유롭게 새로운 데이터를 추가 할 수 있는 장점이 있다. 기존 마이애스큐엘(MySQL)과 같은 관계형 데이터베이스(RDBMS)에서는 설정된 테이블과 관계에 따라 자료를 저장해야만 하여 확장성이 떨어지고 유연한 수정이 어려웠지만, 최근 사물인터넷을 활용한 빅 데이터 영역에서는 대용량의 측정 수치를 유연하게 확장해야 하는 경우가 많아 몽고 데이터베이스와 같은 NoSQL 방식이 많이 사용되고 있다. 이번 과제에서는 오픈 소스 기반의 몽고 데이터베이스를 설치하여 활용하였으며 GUI(graphic user interface) 기반의 관리도구인 Robo 3T와 Studio 3T 프로그램(그림 14)의 라이선스를 발급하여 사용하였다.

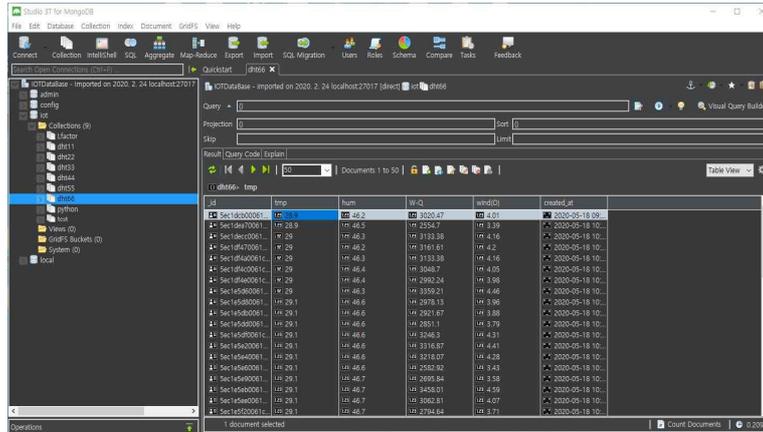


그림 14 . NoSQL 방식의 MongoDB 관리 툴, Studio 3T

#### ④ 댐퍼 제어 프로그램

댐퍼 제어 프로그램에서는 댐퍼 개도의 제어가 필요한 상황인지 확인하고 제어해야 하는 양을 계산하는 기능을 수행한다.

내 외부 센서 측정값들은 MongoDB에 저장되는데 이 데이터들의 일부(3월 2주간)를 전처리하여 히스토그램으로 그려보니 유독 전기 부하가 증가하는 그룹(group2)이 확인되었다.(그림15) 외부에서 들어오는 공기의 온습도가 항온항습기의 목표 수치 보다 일정 범위 이상을 벗어난 등고선도의 초록색 영역일 경우에 group2가 집중적으로 분포하였는데 외부에서 들어오는 공기의 온습도가 목표온도 대비하여 이 범위까지 벗어나는 경우에 공기 유입량을 최소화하여 공조 장치 사용(가습기, 제습기, 냉난방기)을 줄일 필요가 있다고 판단하였다.

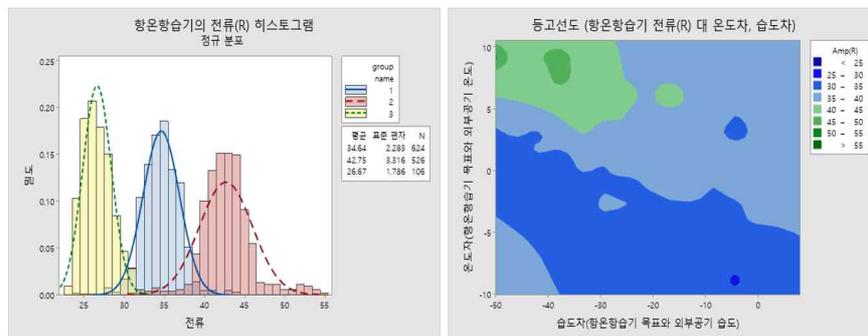


그림 15. 전류 사용 히스토그램, 등고선도(전류 대 온도차, 습도차)

또한 먼지제거 시스템의 수명 증가를 위하여 외부 공기의 먼지 농도가 높은 날은 공기 유입량을 최소화 해주어야하기 때문에 한국환경공단(data.go.kr)에서 제공하는 PM2.5 수치를 기반으로 환경부 기준으로 ‘나쁨’에 해당하는  $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 경우 댐퍼 제어 대상에 포함하였다.

이 외에 청정실험실 사용자가 요구하는 오염물질 발생이 많거나 위험물을 취급하는 경우와 같이 빠르게 배기해야 유리한 경우는 제어대상에서 제외하였고 릴리프 댐퍼에서 빠져나온 공기의 청정도( $0.3\mu\text{m}$  크기 이상 부유입자수를 계측)가 기준치에 미달하거나 양압이 낮고 릴리프 댐퍼가 닫혀 청정실험실 본연의 기능에 제약이 있는 것으로 의심되는 상황은 대상에서 제외하였다.

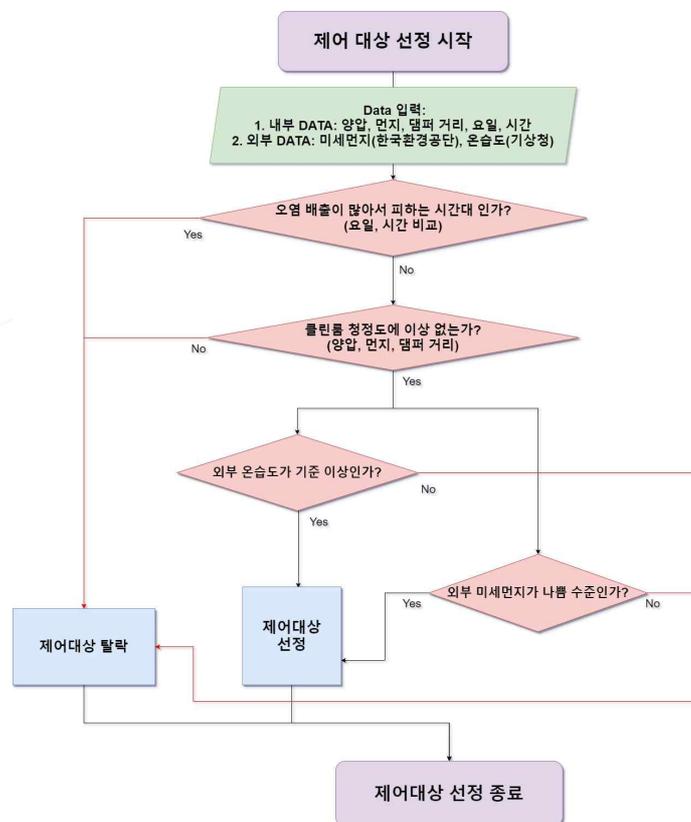


그림 16. 댐퍼 제어 대상 선정 플로우 차트

댐퍼 개도에 대한 제어량 결정은 다음의 순서로 진행되었다. 청정실험실과 청정실험실 전실 사이에 양압(차압) 측정 센서를 설치하고 최소 기준 양압인 6 Pascal을 만족 할 때까지 조금씩 댐퍼를 조정하며 양압 변화량을 측정하였다. 6 Pascal이라는 수치는 청정실

험실과 전실 사이에 유지 해야하는 양압 기준인 4.8 Pascal에서 제어 장치가 설치될 청정 실험실의 출입문 개폐에 따른 외부 공기 역유입이 발생하지 않는 안전계수(1.25)를 반영 하여 결정하였다.

댐퍼를 완전 개방한 상태(외부 공기 최대화)에서 조금씩 리니어 모터가 달린 액츄에이터로 댐퍼를 닫으면서 각도를 체크하고 청정실험실 내부의 양압 변화, 외부공기 풍량 변화, 재순환 공기 풍량을 측정하였다.(그림 17) 이를 총 풍량과 함께 그래프(그림 18)로 그려보면 외부 공기의 풍량이 감소하고 이를 보충하기 위하여 내부에서 리턴되는 풍량이 점차적으로 증가하지만 리턴의 증가량만으로는 총 풍량의 감소를 막을 수 없어 양압의 감소가 발생하며 총 풍량이 6500 m<sup>3</sup>/h보다 작아지면 기준 양압으로 설정한 6 Pascal에 도달하기 때문에 총 풍량 6500 m<sup>3</sup>/h 이상을 확보하는 한에서 댐퍼의 각도가 조절이 되어야 하는 것을 알 수 있다. 이때 측정된 댐퍼 각도는 39도와 36도 사이에서 보통 6 Pascal에 도달하고 35도가 되면 안전계수를 고려하지 않는 기준인 4.8 Pascal에도 미치지 않게 된다. 따라서 35도보다 아래로 제어가 되면 청정실험실의 최소 양압에 도달하지 못 하게 되기 때문에 리니어 모터를 제어 할 때는 이를 최소치로 삼도록 하였다.

모터 position	각도	최소Pascal(수동측정)	외기평균 풍량	외기평균 풍속	리턴평균 풍량	리턴평균 풍속	전체 풍량
4080	75	16	4064.5	6.71	2958.1	3.93	7022.6
3600	67	15	4030.1	6.65	2989	3.97	7019.1
3185	60	14	3996.9	6.6	3009.4	3.99	7006.3
2725	53	13	3892.6	6.43	2996.6	3.98	6889.2
2275	50	12	3811.4	6.29	3049.3	4.05	6860.7
1820	45	10	3684.8	6.08	3084	4.09	6768.8
1365	42	9	3526.4	5.82	3149.9	4.18	6676.3
910	39	8	3348.5	5.53	3230	4.29	6578.5
455	36	6	3143.9	5.19	3308.2	4.39	6452.1
5	32	3	2867.3	4.73	3412.8	4.53	6280.1

그림 17. 댐퍼 개도 TEST에 따른 풍량, 양압 변화

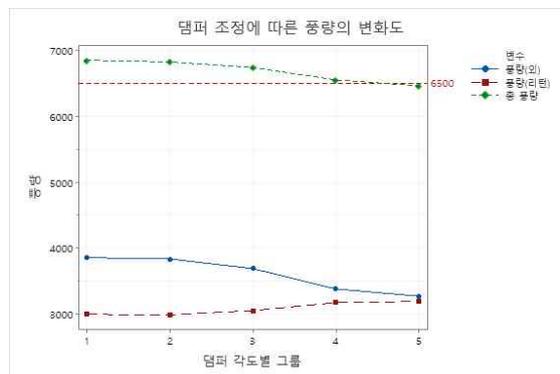


그림 18. 댐퍼 개도에 따른 총 풍량, 외기 풍량, 리턴 풍량 결과

앞서 측정된 결과를 바탕으로 댐퍼를 여닫는 리니어 모터의 위치와 양압 변화량에 대하여 회귀식을 만들었다.(그림 19) 양압 변화량은 초기 양압 대비 댐퍼가 닫힐 때 발생하는 양압의 변화 수치를 이르는데 특정 양압 변화량을 만들어 내기 위해 리니어 모터가 얼마나 이동해야 하는지 이 식을 이용하여 계산 할 수 있으며 이를 이용하여 청정실험실에 목표하는 양압 변화량이 산출되면 리니어 모터 위치를 계산 하도록 하였다.(그림 20)

필터가 시간이 흐름에 따라 막히면 계산 결과가 달라지게 되는 것을 고려하여 총 5개의 수식으로 만들었지만 그 효과가 크지 않음을 확인하여 대표 수식 1개만 사용하고 영향인자들에 대하여 그룹화하여 지도학습 방식으로 실제 제어 결과를 평가하여 스스로 보정치를 설정하도록 하였다. 그러한 보정치를 학습계수라 칭하였으며 회귀식에서 계산된 값을 과거 제어 결과를 반영한 보정치를 적용하여 다시 한번 계산해 사용하는 방식이 적용되었다.

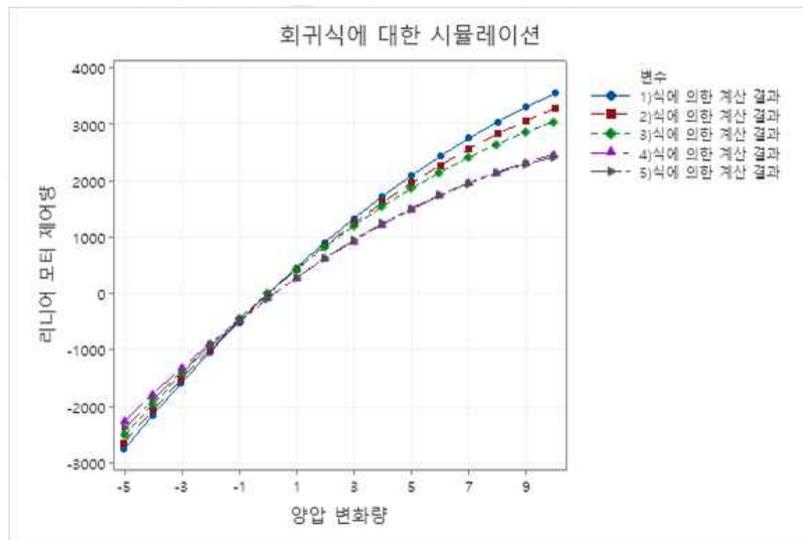


그림 19. 양압 변화량에 대한 리니어 모터 제어량 회귀식

학습계수는 제어 전 초기 양압(9개 그룹)과 외부 습도(9개 그룹), 두 그룹의 조합을 통하여 총 81개 그룹으로 나누어지며 댐퍼 제어를 실행 이후 일정 시간(현재 30초) 뒤에 제어 결과를 피드백 받고 이를 평가하여 기존 학습계수에 가감하도록 만들었다. 학습계수를 만든 이유는 회귀식이 반영하지 못한 영향인자를 제어 결과를 이용하여 보정하기 위함으로 회귀식을 만들었을 때와 조건이 달라지며 발생하는 계산오차를 줄이기 위함이다.

다. 시간이 흘러 필터가 막혀 간다든지, 많은 비가 내려 외부에서 다량의 수증기가 들어 오며 전치 필터가 젖어 양압이 부분적으로 바뀌는 것을 경험했기 때문이다. 양압, 습도에 대한 보정 뿐 아니라 시간이 경과함에 따라 웬의 노후화로 분당 회전수가 변하며 발생하는 오차 역시 지속적으로 가변되는 학습계수의 반영으로 보완하고자 하였다. 제어 결과를 피드백 받고 학습 계수를 변경하는 과정은 아래 그림 21과 같은데 최초 목표 양압인 6 Pascal에 근접하는지를 평가하여 해당 그룹에서 추가 제어가 필요한지 여부를 판단하고 학습계수를 가감시켰다.(그림 21) 필요에 따라 학습계수 그룹은 추가 할 수 있기 때문에 추후 더 많은 조건을 부여한다면 수식의 오차를 줄이는데 도움을 줄 것으로 보인다.

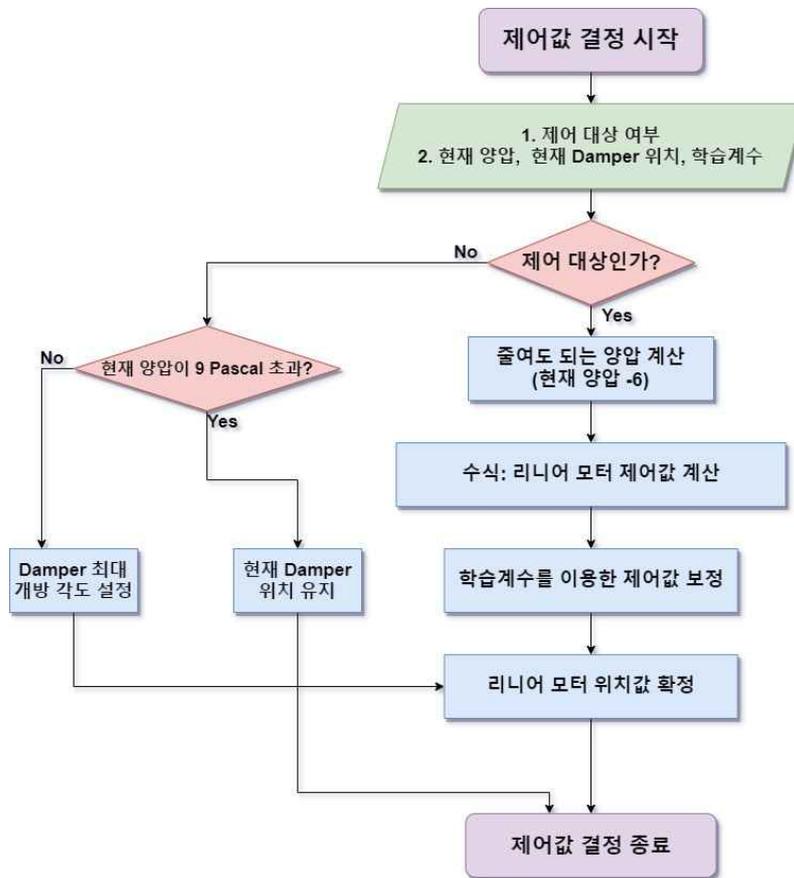


그림 20. 댐퍼 개도 제어값 계산 플로우 차트

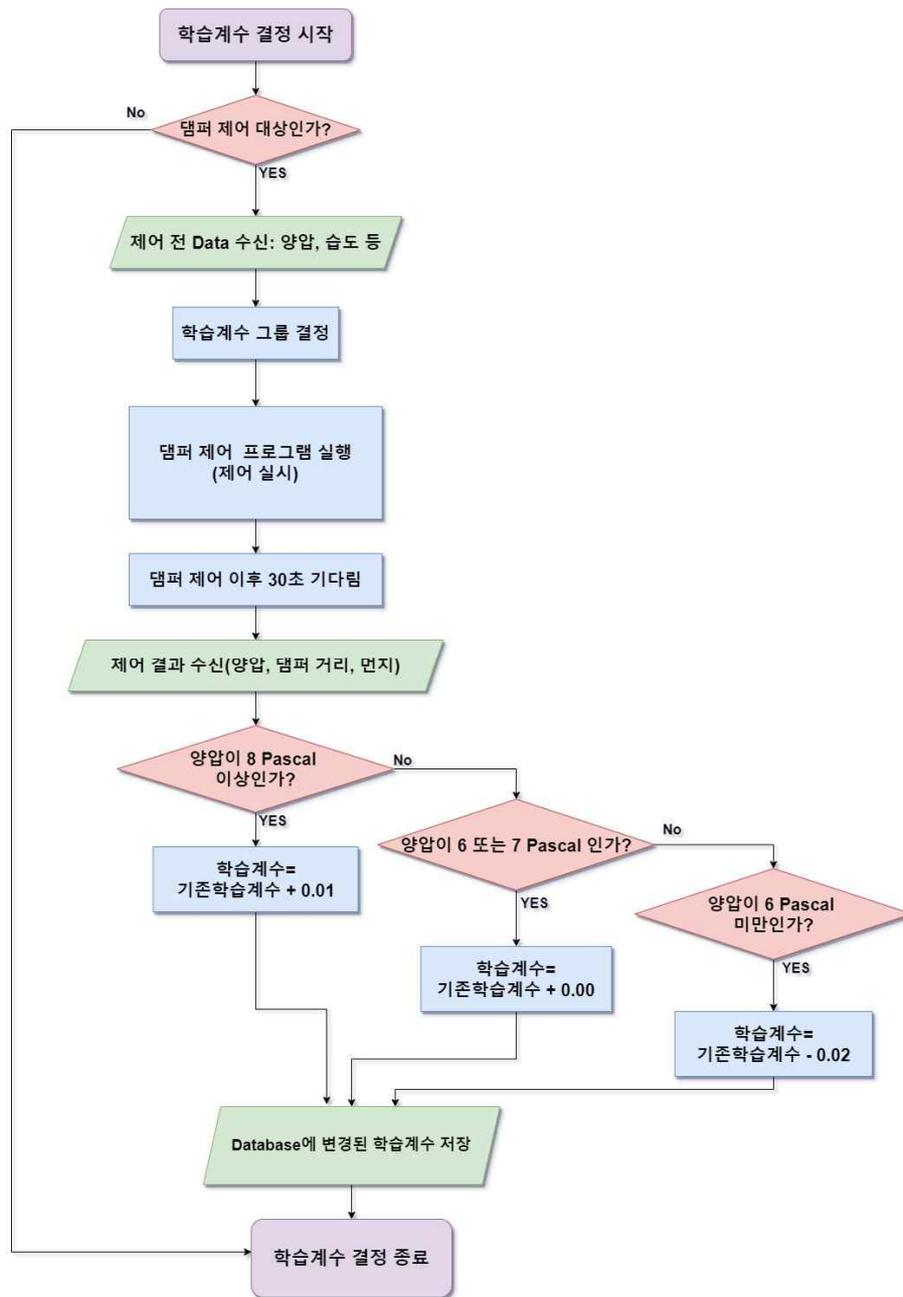


그림 21. 댐퍼 개도 제어값에 활용하는 학습계수 결정 플로우 차트

#### 4. 제어 실행 모듈

제어 실행 모듈에서는 'Data 계산 및 제어 모듈'에서 제어 신호를 무선 수신하면 댐퍼의 개도를 조절 할 수 있도록 댐퍼 제어 액츄에이터가 실제 움직이게 된다. 기존 사용 중인 수동 댐퍼의 조절부를 있는 그대로 대체하기 위하여 그림 22 ~ 29와 같이 3D프린터로 맞춤형 부속품들을 출력하여 사용하였다. 사용되는 부품의 역할에 따라 강도, 마모도, 탄성과 같은 특성을 반영하여 ABS, TPU, 나일론 총 3가지 재료를 사용하였고 허용 공차와 재료를 고려하여 FDM(Fused Deposition Model), SLA(Stereo Lithography Apparatus), SLS(Selective Laser Sintering) 3가지 적층가공 방식으로 출력하였다.

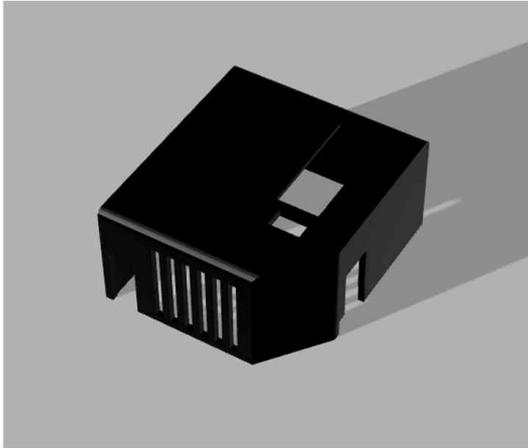


그림 23. 커버, ABS 소재, Stereo Lithography Apparatus 방식 프린팅

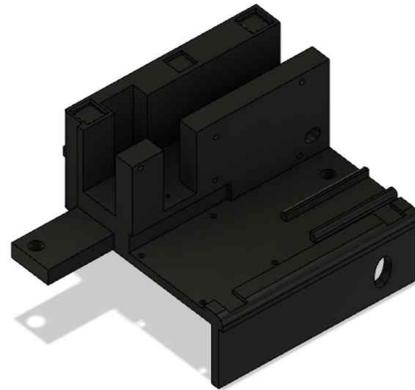
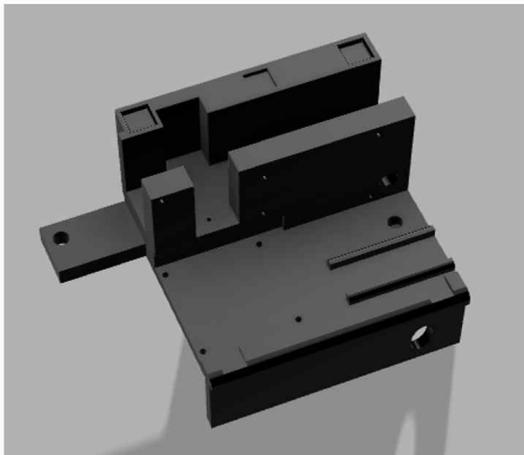


그림 22. 본체, ABS 소재, Fused Deposition Model 방식 프린팅

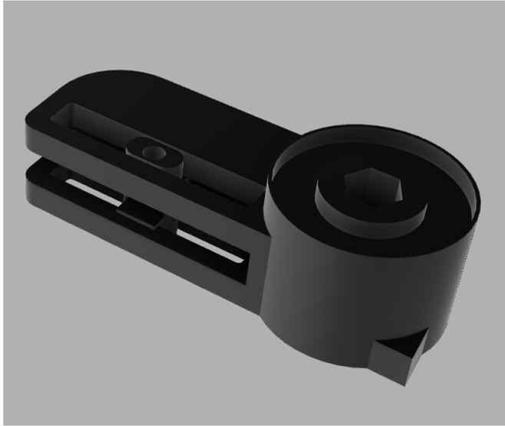


그림 24. 조정 지지대, 나일론 소재, Selective Laser Sintering 방식 프린팅

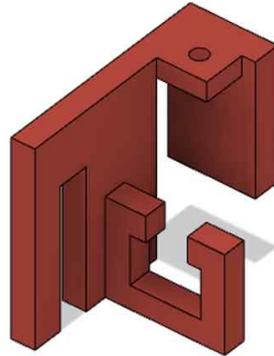
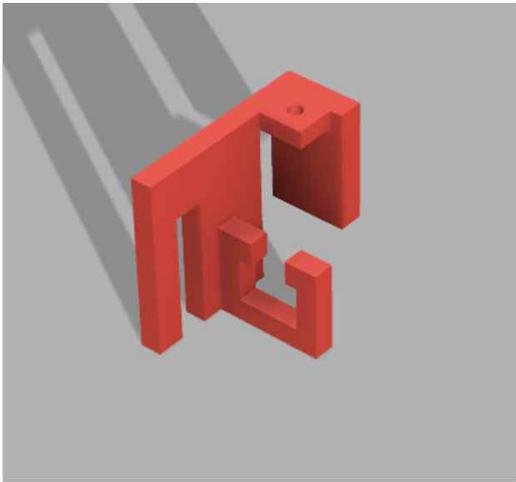


그림 25. 배선 지지대, TPU 소재, Fused Deposition Model 방식 프린팅

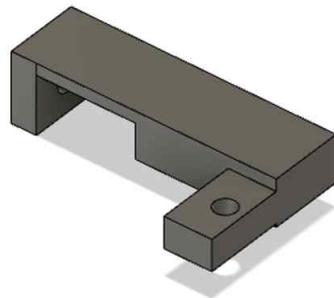
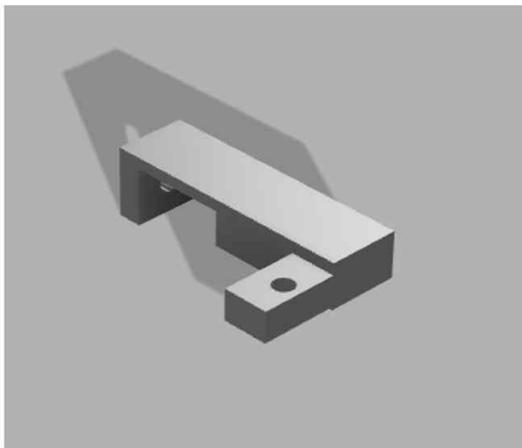


그림 26. LCD 지지대, ABS-A100 소재, Fused Deposition Model 방식 프린팅



그림 27. 댐퍼 제어 액츄에이터 완성도 1

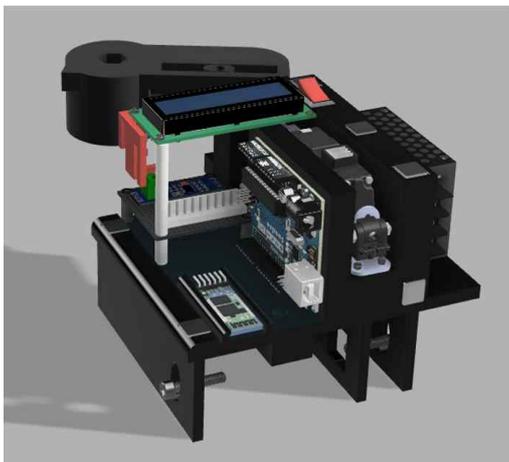


그림 28. 댐퍼 제어 액츄에이터 완성도 2

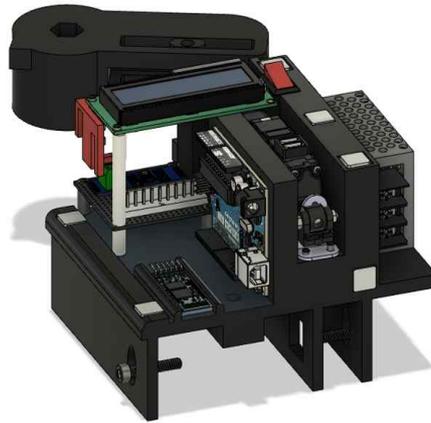


그림 29. 댐퍼 제어 액츄에이터 완성도 3



액츄에이터 제작에 사용한 부품은 약 20여 가지로(그림 30) 개별 부품을 조립하고 기능을 구현하기 위하여 배선의 연결은 만능기판과 몰렉스 커넥터를 이용하여 제작하였다. (그림 31) 3D 프린터로 출력한 부품들에 리니어모터와 전자 부품들을 조립하였고(그림 32, 33) C언어 기반의 스캐치 프로그램으로 코딩하여 기능을 부여하였다. 조립된 전자 부품은 Wemos D1(컨트롤러), 1602 LCD(디스플레이), HC-05 Bluetooth(블루투스), MAX485(TTL 통신), Mighty Zap L12-80F-6 (리니어 서보 모터), 12V SMPS를 사용하였다. 커버와 본체엔 Nd 자석을 마주보게 디자인하여 커버의 탈착을 편하게 하였으며 만약을 대비하여 리니어 모터의 전원을 차단하는 스위치를 달았다. 조정 지지대는 각도를 읽기 쉽도록 맨 앞 일부분을 돌출시켰고 리니어 서보 모터 연결부는 홀더 본체 좌우로 슬라이딩 되도록 만들었다.

기존에 사용하던 육각형 모양의 수동 댐퍼 손잡이 부분에 그대로 끼울 수 있으며 댐퍼 하단부에 본체를 고정할 수 있도록 설계하여 수동 댐퍼에 장착하였다. 리니어 모터가 전진, 후진을 함에 따라 슬라이딩 형태의 조정 지지대가 움직이게 되고 회전 운동으로 바뀌어 댐퍼의 개도가 조정된다. (그림 34)



그림 30. 댐퍼 제어 액츄에이터 제작에 사용된 부품류

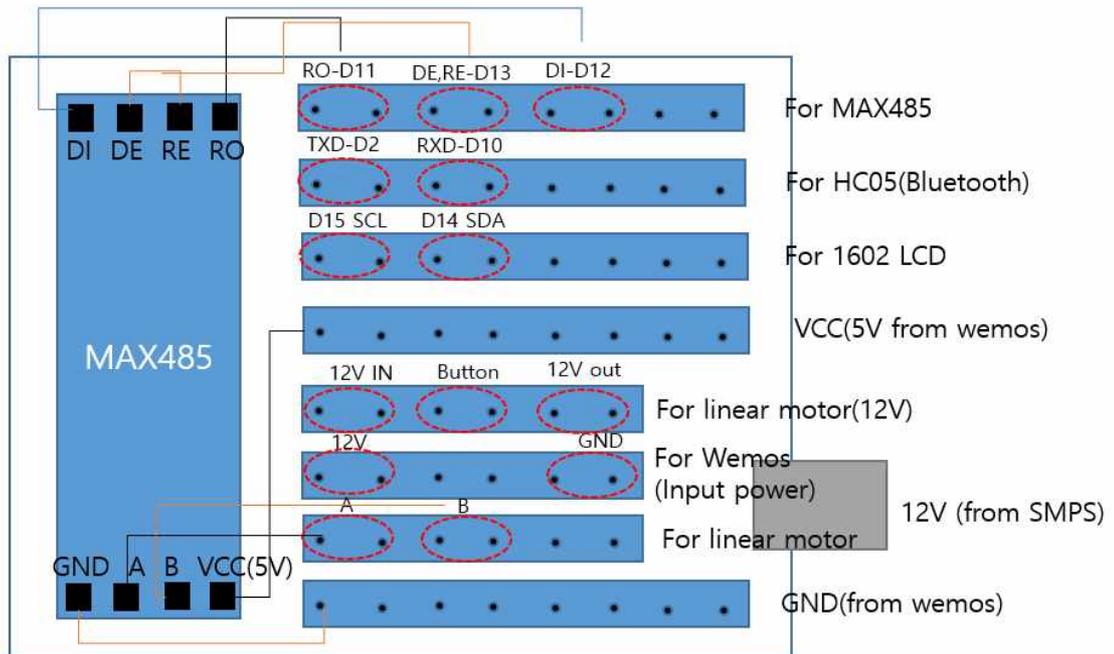


그림 31. 만능기판에 몰렉스(Molex) 커넥터를 이용하여 만든 배선도

# 극지연구소

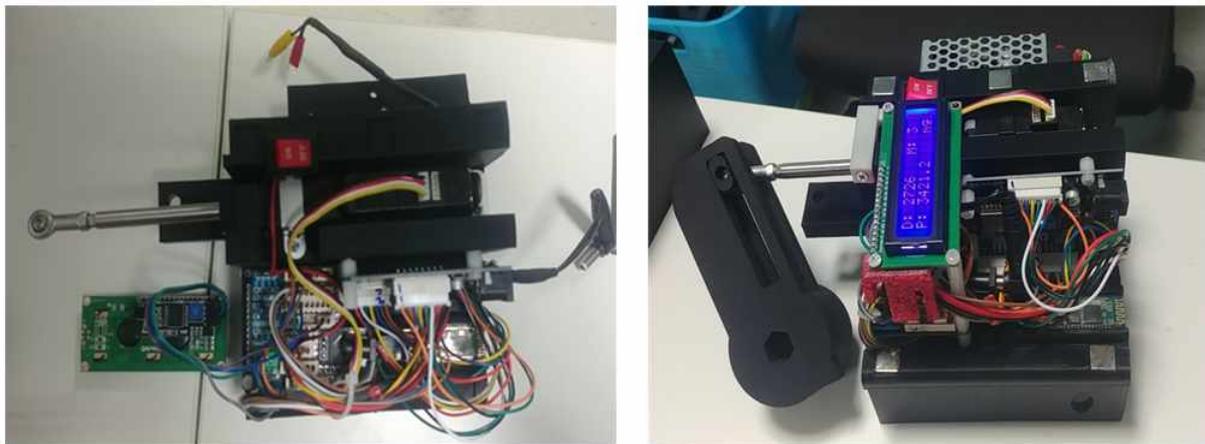


그림 32.댐퍼 제어 액츄에이터 부품 조립 과정 1



그림 33. 댐퍼 제어 액츄에이터 부품 조립 과정 2



그림 34. 댐퍼 제어 액츄에이터를 기존 수동 댐퍼에 결합한 모습

## 5. 제어 모니터링 모듈

제어 모니터링 모듈에서는 제어 과정의 이상 상황을 감시하며 청정실험실의 환경 측정값들을 운영자가 쉽게 확인할 수 있도록 돕는 역할을 수행한다. 청정실험실 본연의 오염 방지 기능을 수행하는데 있어서 유지되어야 하는 최소한의 기준인 양압, 릴리프 댐퍼 개방 여부, 먼지 측정값을 짧은 주기로 확인하고 조건을 벗어나면 즉시 제어를 멈추고 댐퍼 개도를 최대치로 확보하여 환기횟수를 증가시키도록 하였다.(그림 35) 이를 통하여 외조기나 항온항습기의 송풍기가 고장 나는 경우와 같이 비상 상황에서 대비할 수 있도록 하였다.

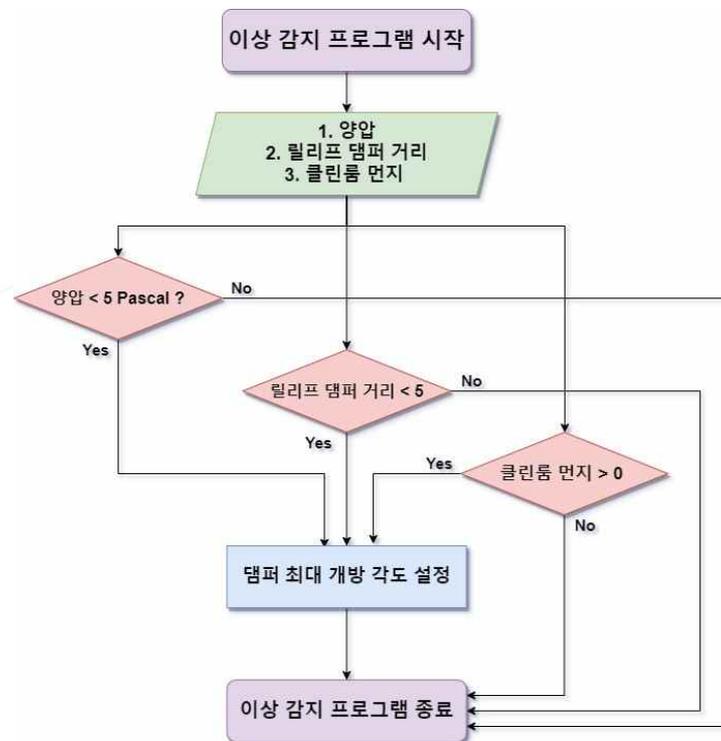


그림 35. 이상 감지 프로그램 플로우 차트

댐퍼 제어 액츄에이터에는 HC-05라는 블루투스 통신칩을 가지고 있어서 블루투스 통신을 이용하여 스마트폰에 제어 과정을 확인 가능하게 하였다.(그림 36) 코딩 프로그램 중간마다 플래그(Flag) 역할을 수행하는 메시지를 출력하게 하고 제어 과정에서 예러가 생기거나 예상하지 못한 상황이 발생하면 플래그를 남겨 원인을 파악하도록 하였다. 이러한

플래그 메시지는 스마트폰의 범용적인 블루투스 앱을 이용하여 확인이 가능하며 만약의 경우를 대비하여 수동으로 댐퍼를 개방하기 쉬운 탈부착 디자인으로 액츄에이터를 설계하였기에 자동 제어 과정에서 이상이 보이면 빠른 대처가 가능하다.

제어 과정에서 상태를 확인 할 수 있는 지표들은 Socket 통신을 통하여 모니터 화면에 그림 36(우)와 같이 실시간으로 표기 되도록 화면을 구성하여 관리자가 손쉽게 정보를 얻을 수 있도록 하였다.



그림36. 블루투스를 이용한 제어 과정 모니터링(좌)  
 소켓통신을 이용한 방사성동위원소 실험실 지표 모니터링 화면(우)

## 제 4 장 연구개발 결과 및 활용계획

### 제 1 절 연구개발 결과

20년 8월 13일부터 업무시간에 한하여 댐퍼 자동제어 시스템의 시범 적용이 실시되어 댐퍼 제어 액츄에이터를 활용한 댐퍼 개도 변경이 진행되었다.(그림 37. A, B) 양압 18 Pascal을 유지하던 청정실험실에 자동 제어를 테스트하니 6 Pascal까지 단계적으로 압력이 떨어짐을 확인하였다.(그림 38. A) 프로그램에서 설정한 내 외부 환경조건에 따라 목표했던 6 Pascal을 유지하게 되며 조건에 부합하지 않거나 이상을 감지하게 되면 환기횟수의 증가를 위하여 개도량이 최대로 바뀌며 양압을 자동으로 조절하게 된다.(그림 38. B) 18 Pascal에서 6 Pascal로 양압이 떨어지면 외부 공기 사용량(풍량)은 25%가 감소하게 되는데 이를 통하여 외부에서 들어오는 먼지의 양도 함께 감소하게 되며 외부 공기의 온습도를 제어하는데 사용하는 에너지 사용도 줄어들게 된다.

해당 시스템의 시범 적용 기간 중에는 개발과정에서 파악하지 못한 에러들을 확인하고 개선을 진행하고 있으며 발견된 에러의 종류는 측정 장치의 오류 건과 무선 통신 문제에 의한 응답 불가 현상이 확인 되었다. 이러한 에러는 하드웨어적으로는 센서의 사용 환경에 따른 노이즈 현상이 원인이거나 소프트웨어 적으로는 MQTT 통신환경의 응답 시간 지연에서 발생하는 것으로 원인을 파악하고 개선하였거나 개선 과정에 있다.

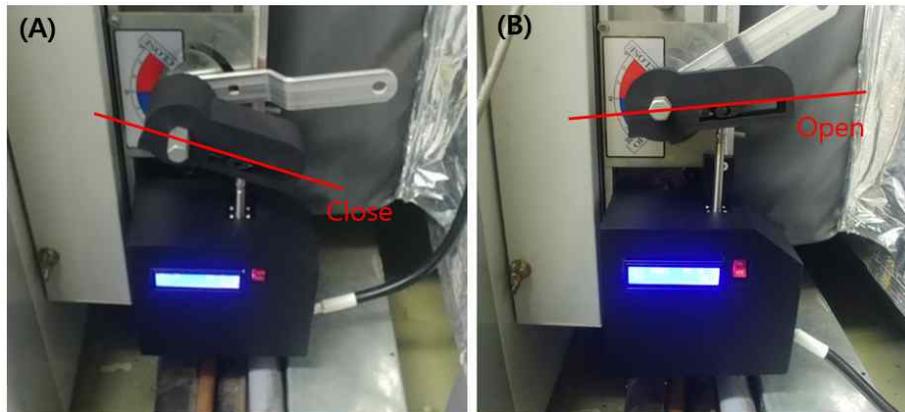


그림 37. 댐퍼 제어 액츄에이터에 의하여 댐퍼의 개도량이 변하는 모습  
(A) 댐퍼의 개도가 Close (B) 댐퍼의 개도가 Open

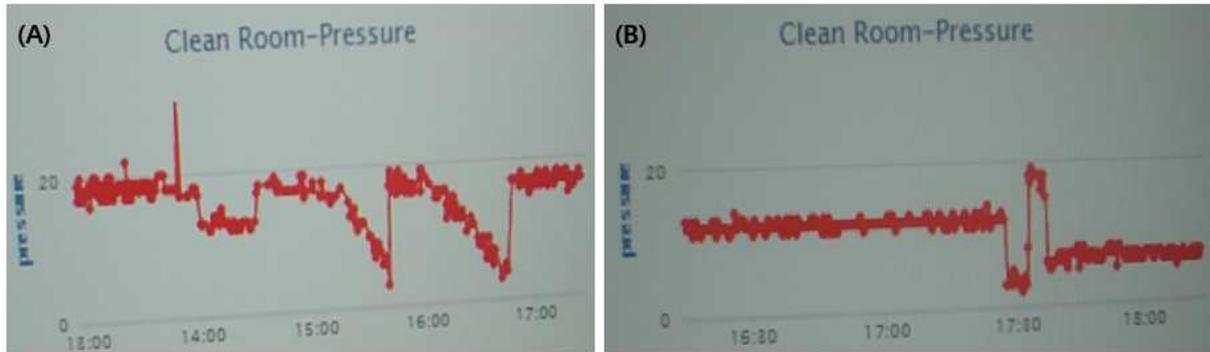


그림 38. 청정실험실 양압에 대한 모니터링 화면

- (A) 댐퍼 자동 제어 테스트 과정의 양압이 18 Pascal에서 6 Pascal로 변하는 모습
- (B) 이상감지 프로그램에 의하여 최소 양압 5 Pascal 미만이 감지되어 최대 개방한 이후 다시 목표 양압인 6 Pascal로 개도량이 자동 설정된 모습

## 제 2 절 활용계획

개발한 댐퍼 자동제어 시스템은 현재 진행 중인 프로그램 소스 코드의 에러 처리 과정을 거쳐 안정적으로 사용하게 되면 청정실험실 운용과정에서 발생하는 운용손실을 감소시킬 것으로 기대하며 이번 연구 개발 결과를 활용하여 청정실험실 내외에 존재하는 수동 장치들을 추가적으로 자동화하여 ‘스마트 청정실험실’로 만들어 나갈 계획이다. 예를 들어 필터 수명 예측을 이용한 필터 자동 교체 장치, 무선 원격 조정이 가능한 시료 드라이브 장치, 자동 바이알 위치 장치 및 스크러버 이상 자동 감지 장치와 같은 실험실 사용자의 업무 효율에 도움이 되는 장치들을 추가적으로 만들고 이를 기존 서버에 사물인터넷 기능으로 묶어 ‘스마트 청정실험실 관리 시스템’로 만들어 활용코자 한다.

다수의 센서로 측정하는 청정실험실의 내부정보는 실험실 내에서 발생하는 오염, 파손, 열화와 같은 설비 이상을 사전에 감지할 수 있으며 청정실험실 외에 고가의 연구 장비가 설치된 정밀 분석실 등에도 데이터 획득 시스템을 도입하고 이상 상태를 모니터링 하는데 적용 가능할 것으로 보인다. 더 나아가 모니터링 과정에서 발생하는 이상 상태는 관리자가 사전에 입력한 대비 절차를 자동으로 수행하도록 시스템 구축이 가능하며 이를 통하여 좀 더 안전하고 스마트한 연구 환경 조성을 통해 연구효율 향상을 기대한다.

## 제 5 장 참고문헌

- 클린룸 시공 매뉴얼: 스즈키 미치오, 일본 공업출판사
- 산업용 클린룸 전문가(Industrial Clean Room): 한국공기청정협회
- 저비용 센서를 이용한 청정 실험실 실시간 감시 : 한영철, 정혜진, 문장일, 백종민, 한창희, 허순도, 지질학회지 제 55권 1호 P141-148



## 연구·정책지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

과제 구분	(신진연구원지원과제)		
과제명	사물인터넷과 빅데이터를 활용한 청정실험실 댐퍼 자동화 (계정번호: PE19500)	연구기간	2019. 12. 01 ~ 2020.11. 30
연구책임자	백 중 민	연구비(직접비)	21,000 천원
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항			
<p>(1) 과제목적</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 청정실험실 내 외부 환경 정보를 기반으로 작동하는 댐퍼 자동 제어 시스템 개발 및 적용</li> <li>◦ 관련 기술의 지식재산권 확보</li> </ul> <p>(2) 최종성과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 방사성동위원소 청정실험실에 환경정보를 기반으로 작동하는 댐퍼 자동 제어 시스템이 적용됨</li> <li>◦ 관련 시스템 특허 출원(엑추에이터 및 이를 이용한 댐퍼 제어 시스템, 10-2020-0157107)</li> </ul> <p>(3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 청정실험실 댐퍼 자동화를 통하여 운용비용 절감을 기대함</li> <li>◦ 성과 기술을 활용하여 청정실험실 내 외부 수동 장치들(필터 교체, 시료 건조장치 등)을 추가적으로 서버와 연결하고 자동화하여 '스마트 청정실험실 구축'을 진행해 나가하고자 하며 이를 통해 실험실 운용 효율 향상을 기대함</li> </ul> <p>(4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항</p>			
평가의견	반영사항	비고	
◦ 자동 시스템을 실제 적용한 연구 결과를 구체적으로 기술요망	◦ 테스트 결과, 적용 내용, 개선 과정을 서술	연구보고서 p.35 참조	
◦ 시스템 오작동이 발생했을 경우 대처 방안 제시	◦ 소프트웨어 중간 단계별 메시지 출력하게 하여 오작동 파악하도록 구성함 ◦ 탈부착이 가능한 액추에이터 디자인 채용을 통하여 오작동시 수동으로 변환이 쉽도록 구성함	연구보고서 p.33 참조	
◦ 본 과제를 통해 창출한 지식재산권을 향후 어떤 연구 주제(과제) 발전 계획 제시	◦ 본 과제 기술개발 내용을 활용하여 향후 '스마트 청정실험실 관리 시스템' 구축을 진행하고자 함	연구보고서 p.36 참조	

※본 양식은 작성하여 최종결과보고서에 포함하여 제출

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

