

Design of multi-sensor system for comprehensive indoor air quality monitoring

TaeHeon Kim*, SungYeup Kim**, Yoosin Kim***, Min Hong*

*Student, Dept. of Computer Software Engineering, Soonchunhyang University, Asan, Korea

**Assistant Professor, Institute for Artificial Intelligence and Software, Soonchunhyang University, Asan, Korea

***Chief Executive Officer, Air Deep, Jeju, Korea

*Professor, Dept. of Computer Software Engineering, Soonchunhyang University, Asan, Korea

[Abstract]

This study aims to design and develop AirDeep-Room, a multi-sensor system for monitoring air quality in various indoor environments. The system measures CO₂, TVOC, particulate matter, temperature, and humidity in real-time. By integrating multiple sensors, AirDeep-Room allows convenient correlation analysis using low data format in real-time. The sensor system was installed in a server room and a classroom. Data analysis showed a negative correlation of -0.24 between temperature and humidity in the server room, and a positive correlation of 0.43 in the classroom, indicating different interactions. A high correlation ($r=0.69$) between the number of students and concentrations of CO₂ and TVOC demonstrated the significant impact of occupancy on air quality. AirDeep-Room effectively manages air quality across various environments and provides essential data for improving air quality in densely populated areas.

▶ **Key words:** Carbon dioxide (CO₂), Total volatile organic compounds (TVOC), Particulate Matter (PM), Temperature, Humidity, Correlation, AirDeep-Room

[요약]

본 연구는 다양한 실내 환경에서 공기질을 모니터링 할 수 있는 다중 센서 시스템인 AirDeep-Room을 설계 및 개발하였다. 이 시스템은 CO₂, TVOC, 미세먼지, 온도, 습도 등을 실시간으로 측정하며, 멀티 센서를 통해 다양한 환경에서의 공기질 변화를 분석할 수 있는 장점을 제공한다. AirDeep-Room 시스템은 low data 형식으로 데이터를 실시간으로 확인할 수 있으며, 실내 환경에서의 공기질에 대한 분석을 진행하였다. 설계한 센서 시스템을 상이한 환경인 서버실과 강의실에 설치해 실험을 수행한 결과, 서버실에서의 온도와 습도는 -0.24의 음의 상관관계를, 강의실에서는 0.43의 양의 상관관계를 보였다. 강의실에서의 실험 결과는 학생 수와 CO₂ 및 TVOC 농도가 $r=0.69$ 로 높은 상관관계를 보였다. 이는 학생 수가 실내 공기질 변화에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 AirDeep-Room 시스템이 다양한 환경에서 공기질을 보다 효과적으로 관리할 수 있는 기반을 제공하며, 인구 밀도가 높은 공간에서 공기질 개선을 위한 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

▶ **주제어:** 이산화탄소, 총 종합 유기화합물, 미세먼지, 온도, 습도, 상관관계, 에어딥-룸

- First Author: TaeHeon Kim, Corresponding Author: Min Hong
- *TaeHeon Kim (taeheon1213@gmail.com), Dept. of Computer Software Engineering, Soonchunhyang University
- **SungYeup Kim (sungyeup.kim@gmail.com), Institute for Artificial Intelligence and Software, Soonchunhyang University
- ***Yoosin Kim (akilleo@naver.com), Air Deep
- *Min Hong (mhong@sch.ac.kr), Dept. of Computer Software Engineering, Soonchunhyang University
- Received: 2024. 05. 07, Revised: 2024. 06. 20, Accepted: 2024. 06. 20.

I. Introduction

현대 사회에서 대부분의 많은 사람들은 하루 중 대다수의 시간을 실내에서 보내고 있다. 주거 공간, 사무실, 학교와 같은 밀폐된 실내 환경은 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5), 이산화탄소(CO2), 총 휘발성 유기 화합물(TVOC)과 같은 다양한 오염 물질의 축적지가 되기 쉽다. 사람들이 이러한 오염 물질에 장기간 노출될 경우, 호흡기 질환, 알레르기 반응, 두통 및 피로감 같은 건강상의 문제가 발생할 가능성이 커진다[1]. 따라서 개인의 건강관리가 점점 중요해지는 현대 사회에서 이러한 실내 공기질(Indoor Air Quality, IAQ)을 잘 관리하는 것은 더욱 중요해지고 있다.

기존의 실내 공기질 분석 방식은 정밀도가 높은 상용 측정기나 단일 기능 센서 모듈에 의존해 왔으며, 이러한 장비들은 대부분 고비용이며, 실생활 환경에 적용하기에는 여러 한계가 있었다. 상용 측정기는 일반적으로 크고 무거워 일상 공간에 설치하기 어렵고, 특정 오염 물질만 측정하는 단일 센서는 종합적인 공기질 관리에 부적합하다. 또한 이러한 장비들은 설치가 복잡하고 유지 관리 비용이 많이 들어 소규모 연구 환경이나 개인 사용자에게는 접근성이 제한적이다[2].

우리는 이러한 문제를 해결하고자 실내 공기질 모니터링을 위한 새로운 해결책으로 AirDeep-Room과 이를 활용한 시스템을 설계하고 이를 활용한 실내 공기질 모니터링 결과를 분석하였다. 본 연구에서 사용된 AirDeep-Room은 기존 장비 대비 휴대성, 저비용, 다중 센서 통합, 무선 연결성 등의 특징을 가진 장치로, 미세먼지, 이산화탄소, 총 휘발성 유기화합물, 온도, 습도 등 주요 실내 환경 지표를 종합적으로 측정가능하다.

본 연구에서는 AirDeep-Room의 설계와 기능을 소개하고, 이를 활용하여 실내 공기질 데이터를 수집 및 분석하는 시스템을 개발하였다. 분석된 데이터는 MQTT 프로토콜을 통해 아마존 웹 서비스(AWS-Amazon Web Services)의 S3로 전송되며, 이후 PostgreSQL 데이터베이스로 저장된다. 우리는 6개월간 축적한 공기질 데이터를 활용해 여러 환경에서의 상관관계 분석을 수행하였다.

본 논문의 제2장에서는 실내 공기질 분석에 관한 기존 연구 동향을 비롯하여, 미세먼지, 이산화탄소, 총 휘발성 유기화합물(TVOC, Total Volatile Organic Compounds), MQTT 프로토콜, HTTPS 통신 및 통계적 방법론 중 하나인 Pearson Correlation Coefficient에 대한 내용을 설명한다. 제3장에서는 AirDeep 장치의 설계

및 구현 과정을 설명하고 수행된 데이터 수집 및 분석 과정을 자세히 기술하였다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Particulate Matter(PM)

미세먼지(PM)란, 종종 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)로 구분되는 이 입자들은 대기 중에 떠다니는 매우 작은 고체 또는 액체 입자들이다. 'PM'은 'Particulate Matter'의 약자로, 미세먼지를 가리키는 용어이다. PM10은 지름이 10 micrometer 이하의 입자를, PM2.5는 지름이 2.5 마이크로미터(μm) 이하의 더욱 작은 입자를 의미한다. 이러한 입자들은 자연적인 원인(예: 화산활동, 사막의 모래바람 등)과 인위적인 원인(예: 자동차 배기가스, 공장에서의 배출물 등)에 의해 발생한다[3]. 이외에도 실내 환경에서는 건축 자재, 내장재, 요리, 환기 등 여러 가지 환경적인 요인에 의해서 미세먼지가 발생할 수 있다[4].

미세먼지는 인체 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있으며, 특히 PM2.5는 그 작은 크기로 인해 호흡기를 통해 깊숙이 들어가 폐 조직에 도달하고, 심지어 혈류로 들어갈 수 있다. 이는 다양한 호흡기 및 심혈관 질환의 원인이 될 수 있다. 미세먼지의 구성은 그 출처에 따라 다양하며, 황산염, 질산염, 유기화합물, 중금속 등 다양한 화학 물질을 포함할 수 있다[5].

1.2 Carbon dioxide (CO2)

이산화탄소(CO2)는 화학식 CO2로 표현되는 무색, 무취의 가스로, 지구 대기의 중요한 구성요소 중 하나이다. 이는 탄소와 산소 두 원자로 구성되며, 연소 과정, 유기물의 분해, 호흡 과정 등을 통해 자연적으로 생성되고, 식물에 의해 광합성 과정에서 소비된다. 일반적으로 인간 활동, 특히 화석 연료의 연소와 산업 공정으로 인해 최근에는 대기 중 CO2 수준이 증가하고 있다. CO2는 대기 중에서 자연스럽게 존재하는 가스이지만, 고농도로 노출되었을 때 인간 건강에 다양한 영향을 미칠 수 있다. 실내에서 높은 CO2 농도는 두통, 집중력 저하, 졸음 등을 유발할 수 있으며, 장기간 고농도에 노출될 때 호흡기 질환의 위험을 증가시킬 수 있다[6].

1.3 Total Volatile Organic Compounds (TVOC)

총 휘발성 유기화합물(TVOC)은 대기 중에서 쉽게 증발하는 다양한 유기화합물들의 총합을 의미한다. 일상적인

생활환경에서 페인트, 가정용 청소제, 살충제, 건축 재료, 사무용 기기 등에서 배출될 수 있으며, 자동차 배기가스와 산업 공정에서도 발생한다. TVOC는 주로 탄화수소를 기반으로 하며, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌과 같은 구체적인 화합물을 포함한다. TVOC의 높은 농도는 인간의 건강에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 단기적 노출은 눈, 코, 목의 자극, 두통, 피로감, 알레르기 반응 등을 일으킬 수 있으며, 장기적 노출은 더 심각한 건강 문제인 신경계 손상, 호흡기 질환으로 이어진다. 심지어 일부 유기화합물에 대한 노출은 암을 유발할 수도 있다[7].

1.4 MQTT Communication Protocol

MQTT(Message Queuing Telemetry Transport)는 제한된 자원 환경에서의 효율적인 데이터 전송을 목표로 하는 경량의 메시징 프로토콜로, IoT (Internet of Things) 및 M2M 통신의 핵심 기술로 자리 잡고 있다. 발행/구독 모델을 채택하여, 다양한 클라이언트가 주제 기반으로 메시지를 교환할 수 있도록 설계된 이 프로토콜은, 낮은 대역폭 사용과 높은 메시지 전달 신뢰성을 특징으로 한다. 작은 코드 풋 프린트와 세 가지 서비스 품질 레벨(QoS)을 제공하는 MQTT는 제약된 환경에서 신뢰성 있는 통신을 보장하며, 클라이언트와 트래픽 수에 제한이 없는 확장성을 통해 대규모 IoT 시스템에서도 효율적인 데이터 교환을 가능하게 한다.

이러한 특성은 IoT, 원격 모니터링 시스템, 센서 네트워크, 모바일 애플리케이션 등 다양한 분야의 활용 사례를 통해 입증됐다. 특히, 스마트 홈 시스템과 같은 IoT 애플리케이션에서는 MQTT의 낮은 전력 소비와 빠른 메시지 전달이 중요한 요소로 작용하며, 이는 향후 더욱 다양한 분야에서 적용 가능성이 기대되고 있다. 따라서, MQTT는 제한된 자원을 가진 네트워크 환경에서 요구되는 비용 효율성, 확장성, 그리고 신뢰성을 제공함으로써, 현대 통신 기술의 발전에 있어 중요한 역할을 담당하고 있다[8].

1.5 HTTPS Protocol

데이터 보안은 현대 사회에서 갈수록 중요성을 더해가는 분야이며, 이러한 맥락에서 HTTPS (Hyper Text Transfer Protocol Secure)가 수행하는 역할은 매우 중요하다. HTTPS는 웹 기반 통신에 있어서 데이터의 무결성과 기밀성을 확보하는 주요한 프로토콜로 자리 잡고 있다. SSL (Secure Sockets Layer) 또는 TLS (Transport Layer Security) 프로토콜을 통한 데이터 암호화를 기반으로, 사용자와 서버 간의 모든 데이터 전송을 보호한다.

이는 중간 공격 (Man-in-the-Middle Attack) 등의 보안 위협으로부터 사용자 정보의 안전을 지키는 것에 핵심적인 기능을 한다.

HTTPS의 중요성은 단지 통신의 안전을 넘어서 데이터의 무결성 보장에도 기여한다. 변조 없는 데이터 전송을 보증함으로써 수집된 정보의 정확성과 신뢰도를 유지하고, 이는 특히 데이터 정확성이 요구되는 분야에서 결정적이다.

또한 HTTPS 프로토콜에 내장된 인증 메커니즘은 서버의 신뢰성을 사용자에게 인증한다. 디지털 인증서를 통해 서버의 실제 정체성을 검증하므로, 사용자는 자신이 접속하고 있는 서비스가 신뢰할 수 있는지를 알 수 있다. 이러한 검증 과정은 피싱 공격과 같은 온라인 보안 위협으로부터 사용자를 보호하는 데 중요한 역할을 수행한다[9].

1.6 Pearson Correlation Coefficient

피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient)는 두 변수 간의 선형 관계의 강도와 방향을 측정하는데 사용되는 통계적 방법이다. 이 계수는 -1에서 +1 사이의 값을 가지게 되며, 값이 -1에 가까울수록 완벽한 부의 선형 관계를, +1에 가까울수록 완벽한 양의 선형 관계를, 0은 두 변수 간에 선형 관계가 없음을 나타낸다[10]. 피어슨 상관 계수 공식은 Fig 1과 같다. 여기서 X_i 와 Y_i 는 각 변수의 관측값이며, \bar{X} 와 \bar{Y} 는 해당 변수들의 평균값이다.

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Fig. 1. Pearson Correlation Coefficient official

피어슨 상관계수는 주로 정규 분포를 이루는 연속적인 양 데이터에 적합하며, 과학 연구, 경제학, 의료 연구 등 다양한 분야에서 두 변수의 관계를 분석하는 데 활용된다. 예를 들어, 이산화탄소와 TVOC와의 관계, 학생 수와 이산화탄소 농도 사이의 관계 등을 분석할 때 이 상관계수를 사용할 수 있다. 상관계수의 절댓값이 클수록 변수 간의 관계는 강해지며, 0.00에서 0.19는 매우 약한 상관관계, 0.20에서 0.39는 약한 상관관계, 0.40에서 0.59는 중간 정도의 상관관계, 0.60에서 0.79는 강한 상관관계 0.80에서 1.00은 매우 강한 상관관계를 나타낸다.

1.7 Correlation Matrix

상관관계 행렬(Correlation Matrix)은 다변량 데이터 분석에서 두 변수 간의 상관도를 피어슨 상관계수를 활용

하여 수치로 나타낸 행렬이다. 이 행렬의 각 셀은 두 변수 사이의 상관계수를 표시한다. 상관계수는 -1에서 +1 사이의 값을 가지며, 이 값은 두 변수 간의 선형 관계의 방향과 강도를 나타낸다. Correlation matrix의 주요 특징은 Table 1과 같다.

Table 1. Correlation Matrix

Features	Content
Range	The correlation coefficient ranges from -1 (perfect negative linear relationship) to 0 (no linear relationship) to +1 (perfect positive linear relationship).
Diagonal	The diagonal elements of a matrix always have a value of 1, which indicates that a variable has a perfect positive linear relationship with itself.
Symmetry	The correlation matrix is symmetric. In other words, it is symmetric around the diagonal of the matrix.

보통 상관관계 수의 절댓값이 0.8 이상이면 강한 상관관계, 0.4 초과 0.8 미만이면 중간 정도의 상관관계, 0.4 이하이면 약한 상관관계이다. 본 연구에서는 절댓값이 0.4를 초과하는 경우 상관관계가 있다고 판별하였다[11].

2. Existing research methods

실내 공기질 모니터링을 위한 다양한 기존의 연구 방법들이 존재하며, 이들 방법은 각기 다른 기술적 접근을 통해 실내 환경의 공기질을 효과적으로 모니터링하고 분석하려는 목적을 가진다. 본 논문에서는 이러한 연구 방법들을 아두이노 기반의 센서 모듈 활용, API를 통한 데이터 접근성, 그리고 공공 데이터의 활용 등의 세 가지 주요 측면으로 나누어 설명하고자 한다.

2.1 Utilization of Arduino-based sensor modules

실내 공기질 모니터링을 위한 초기 연구 방법 중 하나는 아두이노와 같은 마이크로 컨트롤러를 기반으로 하는 센서 모듈의 활용이다. 아두이노는 다양한 환경변수를 측정할 수 있는 센서와 연결하기 위한 유연하고 개방적인 플랫폼을 제공하며, 이는 DIY 프로젝트나 교육 목적으로 널리 사용됐다. Fig 2.는 미세먼지 측정에 활용할 수 있는 아두이노 키트이다. 이러한 시스템의 구축은 개별 센서를 구매하고 아두이노 보드에 연결하는 복잡한 과정을 포함하며, 데이터 수집 및 처리를 위한 프로그래밍 작업이 필수적이다. 이 과정은 특히 비전문가에게는 상당한 진입 장벽을 형성할 수 있다.



Fig. 2. Fine Dust Measurement Arduino Kit

아두이노를 사용하는 시스템은 고유의 유연성과 개방성에도 불구하고, 여러 센서를 동시에 관리하고 유지해야 하는 번거로움이 있다. 설치 후에도 지속적인 유지 관리가 요구되며, 특히 센서의 정확도를 보장하기 위해 정기적인 보정이 필요할 수 있다. 실제 생활환경에서의 지속적인 공기질 모니터링을 위해서는 이러한 유지 관리 작업이 매우 중요하다. 그러나 아두이노 기반 시스템은 이러한 요구사항을 충족시키는 데 있어서 어려움을 가지고 있다[12].

2.2 Importance of data accessibility via API

API(Application Programming Interface)의 중요성에 관한 연구는 실시간 데이터의 접근성과 관리 측면에서 중요한 기여를 하고 있다. API는 다양한 애플리케이션과 시스템에서 필요한 데이터를 실시간으로 요청하고 수집할 수 있는 프로그래밍 인터페이스를 제공함으로써, 사용자가 언제든지 필요한 정보에 접근할 수 있도록 한다.

이러한 접근성은 특히 실내 공기질 모니터링 시스템과 같은 분야에서 효율성을 크게 향상시킬 수 있다. 그러나 현재 시장에서 출시된 대부분의 공기질 측정기가 low Data API 제공에 있어서 제한적이거나 전혀 제공하지 않은 상황이다. 이러한 부분은 데이터를 원활하게 수집하고 실시간으로 분석 및 반응하는 데 있어 중대한 어려움이 되고 있다. 이는 실시간 데이터 관리의 중요성을 강조하는 동시에, 기술 개발자들에게 사용자의 데이터 접근성을 높이는 것의 중요성을 상기시킨다[13]. 따라서 API 기술의 활용은 실시간 데이터 접근 및 관리의 향상을 위한 연구와 개발에 있어서 중요한 방향이다.

2.3 Limitations of Public Data Utilization

소규모 연구 환경에서 실내 공기질에 관한 연구를 수행하는 데 있어 공공 데이터의 활용은 중요한 자원 중 하나이다. 그러나 이러한 공공 데이터의 활용에는 몇 가지 결정적인 한계가 존재한다. 대부분의 공공 데이터는 광범위한 지역을 대상으로 수집되며, 특히 외부 공기 질에 초점을 맞추는 경우가 대부분이다. 이는 강의실, 교실, 사무실

등과 같은 특정 실내 공간에 상세한 데이터 제공에 한계가 있음을 의미한다[14].

공공 데이터의 이러한 제한성은 특히 소규모 연구팀이나 개인 연구자가 실내 공간의 공기 질 변화를 세밀하게 분석하고자 할 때 큰 어려움으로 다가온다. 실내 공간에서의 공기 질은 외부 환경뿐만 아니라 실내에서 발생하는 활동, 환기 시스템의 효율성, 건물 재료에서 발생할 수 있는 오염 물질 등 다양한 요소에 의해 영향을 받는다. 따라서 이러한 특정 조건에 대한 데이터가 부족함은 연구의 정확도와 신뢰성을 저하하며, 공간 특유의 공기질 문제에 대한 효과적인 해결책 모색을 어렵게 만든다.

더욱이, 공공 데이터는 대부분 일정 시간 간격으로 업데이트되며 실시간 데이터 제공에 한계가 있다. 이는 실내 공기질이 단시간 내에 급격히 변할 수 있는 상황에 대한 모니터링을 어렵게 만들며, 연구자가 적시에 데이터를 활용하여 분석하고 해석하는 데 제약을 준다. 특히, 실내 공간에서의 특정 이벤트나 활동에 따른 공기질의 변화를 실시간으로 모니터링하고 분석하기 위해서는 지속적이고 세밀한 데이터 수집이 필수적이다.

이와 같은 공공 데이터 활용의 한계는 소규모 연구 환경에서 실내 공기질 연구를 진행하는 데 있어 큰 도전과제로 작용한다.

III. The Proposed Scheme

1. AirDeep-Room

기존의 실내 공기질 모니터링 장치는 아두이노와 같은 모듈 형식의 센서를 사용하거나 고가의 상용 측정기를 활용하여 공기 질을 측정하는 방식이 일반적이었다. 그러나 이러한 방식은 사용자에게 복잡성을 초래하고, 고가의 비용과 프로그래밍 요구를 갖는 등 진입장벽이 높았다. 또한 공공 데이터의 한계로 인해 소규모 연구자나 개인이 공기 질 모니터링에 어려움을 겪는 경우가 있었다.

이러한 한계들을 극복하고자 우리는 AirDeep-Room을 설계 및 개발하였다. AirDeep-Room은 실내 공기질 모니터링을 위한 장치로, 다중 센서를 통합하여 온도, 습도, 이산화탄소(CO₂), 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}), 총휘발성유기 화합물(TVOC) 실내 공기의 주요 지표들을 실시간으로 측정한다. 이러한 기능은 사용자가 강의실, 연구실, 사무실 등 다양한 실내 환경에서 공기 질의 변화를 즉각적으로 파악하고 효과적으로 관리 할 수 있도록 지원한다. 또한 IR(Infrared Sensor) 리모컨을 통해 쉽게 냉난방

기 제어도 가능하다. Fig 3. 는 AirDeep-Room의 모습이 대[15].



Fig. 3. Air Deep - Room

Air Deep - Room의 상세 사양은 Table 2와 같다. Air Deep - Room 시스템은 PM(10,2.5) 센서(PMSA003C, PLANTOWER), TVOC 센서(SGP40, Sensirion), CO₂ 센서(SCD40, Sensirion), 온도 및 습도 센서(SHT40-AD1B, Sensirion)를 포함하고 있으며, 이 센서들은 ESP32-WROOM-32E 칩셋을 기반으로 통합되었다. 이 칩셋은 무선 통신 모듈이 내장되어 있어, 실내 공기질 데이터를 실시간으로 전송하고 원격으로 모니터링할 수 있는 기능을 제공한다.

아두이노와 비교하여 ESP32-WROOM-32E는 여러 측면에서 차별화된다. ESP32는 듀얼 코어 프로세서를 갖추고 있어 더 빠른 데이터 처리와 멀티태스킹이 가능하며, 이는 복잡한 센서 데이터의 실시간 분석과 빠른 반응을 요구하는 애플리케이션에 적합하다. 아두이노는 다양한 센서와 모듈을 쉽게 연결할 수 있는 유연한 플랫폼을 제공한다. 하지만 아두이노 보드들은 ESP32에 비해 프로세싱 파워가 낮고, 무선 통신 기능이 내장되어 있지 않아 별도의 통신 모듈이 필요하다는 단점이 있다.

이러한 차이점으로 인해 연구 측면에서는 ESP32-WROOM-32E의 높은 성능과 다양한 기능이 실내 공기질 모니터링 시스템의 요구사항을 더 잘 충족시킬 수 있다. 특히, 실시간 데이터 처리와 무선 통신 기능의 통합은 복잡한 연구 환경에서 큰 이점을 제공한다.

Table 2. Air Deep - Room

Sortation		Content
Sensor	PM(10,2.5)	PMSA003C
		PLANTOWER
	TVOC	SGP40
		Sensirion
	CO2	SCD40
		Sensirion
Temperature	SHT40-AD1B	
	Sensirion	
Humidity	SHT40-AD1B	
	Sensirion	
Mainboard	Wireless module	ESPRESSIF (ESP32-WROOM-32E)Wifi
Device	Color	White
	Size	86x63x25
	Weight	99g
Power	Method/Voltage	USB (5V)
	Line connection method	one-size-fits-all
	Line length	1,500mm
	battery	X
IoT Device control	IR	0
certification	KC	0
	PM	0

2. System Architecture

Fig 4. 는 본 연구에서 제안된 시스템 구조를 나타낸다. 제안된 시스템은 실시간 데이터의 수집, 저장, 처리 및 모니터링을 위한 통합 플랫폼으로 구현되었다. 이 구조는 특히 공기질 분석이라는 맥락에서 IoT 장치의 대규모 배치와

데이터의 무결성을 중심으로 설계하였다. MQTT 프로토콜을 사용하여 신뢰성 있는 메시지 전달을 보장하며, HTTPS를 통해 통신 데이터 보안을 강화하였다.

시스템의 핵심 구성요소로는 IoT Gateway가 있으며, 이는 AirDeep-Room 장치들로부터 수집된 데이터의 집중점으로 작용한다. 예를 들어, 여러 개의 AirDeep Room 장치가 실내 곳곳에 배치되어 CO2, TVOC, 미세먼지, 온도, 습도 등의 환경변수를 실시간으로 모니터링 한다. 게이트웨이는 PostgreSQL 데이터베이스에 연결되어 있으며, 이는 모든 데이터 요청과 응답의 로깅을 담당한다. 이 데이터베이스는 수집된 데이터의 장기 저장, 추세 분석, 그리고 역사적 데이터 활용의 기반이 된다.

시스템은 데이터 처리 서비스를 포함하고 있으며, 이 서비스는 수집된 공기질 데이터를 분석하고, 분석 결과를 사용자에게 전달한다. 이 서비스는 특히 실시간 데이터 스트림을 관리하며, 복잡한 이벤트 처리(CEP) 모듈을 통해 환경 모니터링에서 중요한 특정 이벤트를 실시간으로 감지한다. 예를 들어, 다른 IoT 장치를 활용하여 강의실의 CO2 수준이 일정 수치를 초과하면 자동으로 환기 시스템이 작동하도록 설정할 수 있다. API는 실내 공기질에 대한 정보를 사용자에게 실시간으로 low data 형식으로 제공되며, 이는 데이터의 접근성과 관리 효율성을 높일 수 있다.

시스템은 또한 문의 응답 서버를 포함하는 웹 프록시와 연결되어 있다. 이 서버는 사용자로부터의 HTTP(S) 요청을 받아 클라우드 내의 적절한 서비스로 전달하며, 이에는 공기질 데이터 분석, 예측 및 모델링을 담당하는 AQS(Air

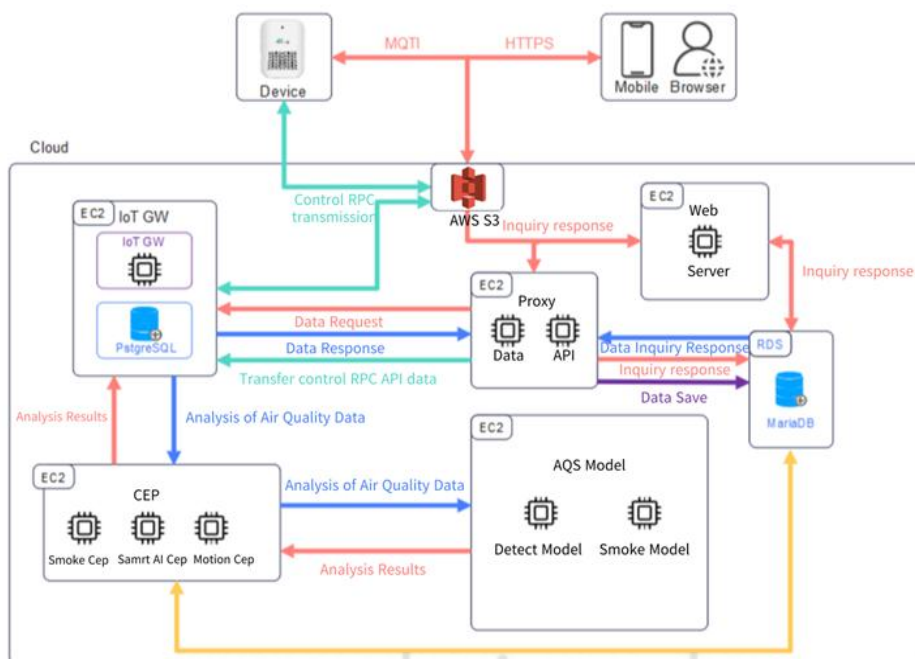


Fig. 4. AirDeep-Room System Architecture

Quality System) 모델이 포함된다.

양방향 통신을 위해, 시스템은 클라우드에서 제어 RPC(Remote Procedure Call)를 통해 IoT 장치의 설정을 조정할 수 있는 기능을 제공한다. 이는 사용자가 원격으로 장치를 관리할 수 있게 함과 동시에, 장치들이 실시간으로 클라우드에 상태 업데이트와 경고를 전송할 수 있도록 한다.

외부 웹 서버는 사용자 인터페이스를 제공하여, 사용자가 웹 브라우저를 통해 시스템과 상호 작용할 수 있도록 한다. 이를 통해 사용자는 데이터 요청, 분석 결과 확인, 장치 설정 조정 등의 작업을 수행할 수 있다. 시스템은 사용자의 편의성을 고려하여 설계되었으며, 사용자가 시스템과 상호작용하는 방식에 따라 맞춤형 데이터 보고 및 경고를 설정할 수 있다. 예를 들어, 사용자는 특정 환경변수의 임계값을 설정하여 해당 값이 초과하였을 때 알림을 받을 수 있다.

3. Data collection & Pre-processing

본 연구에서는 다양한 환경에서 데이터 수집과 분석을 위해 총면적 30.4m²(약 9평) 크기의 연구실 3개, 155m(약 47평) 크기의 강의실 5개 그리고 서버실에 1개에 AirDeep-Room을 설치하였다. 연구실과 강의실에는 각각 입구 쪽과 내부 총 두 개씩 설치하였다. 공간의 다양한 지점에서 환경 데이터를 수집할 수 있도록 하였다. 장비는 각각 문 옆과 문을 기준으로 일정 거리 이상 떨어진 공간 내부에 설치하였으며, Fig 5 와 Fig 6은 각각 입구 측, 내부 지점에 장비를 설치한 모습이다.



Fig. 5. Internal installation



Fig. 6. Entrance side installation

본 연구에서 사용한 데이터셋은 30초 간격으로 수집된 환경 모니터링 정보로 구성되었다. 데이터 수집은 연구실 및 강의실, 서버실 등 장비를 설치한 실내 공간에서 진행되었다. 각 데이터 포인트에는 수집된 정확한 날짜와 시간이 기록되어 있어, 시간에 따른 환경 변화를 세밀하게 추

적할 수 있도록 하였다. 포함된 변수들에는 상대습도('humidity'), PM2.5와 PM10의 수치('pm2.5', 'pm10'), 온도('temperature'), 이산화탄소 농도('co2'), 총 휘발성 유기 화합물 수치('tvoc') 등의 변수가 포함됐다.

```
{
  "no": "1",
  "device_name": "SCH_공학관_9209_학부연구실_IN",
  "pm10": "17",
  "pm2.5": "15",
  "co2": "489",
  "tvoc": "214",
  "temperature": "15",
  "humidity": "59",
  "check_date": "2024-02-15 00:00:06.875999"
}
```

Fig. 7. API Data Format

이러한 데이터는 환경 변화에 따른 영향을 정확히 평가하고 예측하기 위해 수집되었다. 아래 Fig 8. 은 위 API Data Format을 통해 받은 수집 데이터를 .csv파일 형식으로 받은 데이터의 모습을 나타낸다.

A	B	C	D	E	F	G	H	I
no	device_name	pm10	pm2.5	co2	tvoc	temperature	humidity	check_date
1	SCH_공학관	6	6	414	93	24	70	2023-09-24 0:00
2	SCH_공학관	9	8	404	93	24	70	2023-09-24 0:00
3	SCH_공학관	8	7	402	93	24	70	2023-09-24 0:01
4	SCH_공학관	6	6	403	93	24	70	2023-09-24 0:01
5	SCH_공학관	7	6	405	93	24	70	2023-09-24 0:02
6	SCH_공학관	6	6	419	93	24	70	2023-09-24 0:03
7	SCH_공학관	6	6	417	93	24	70	2023-09-24 0:03
8	SCH_공학관	4	4	417	92	24	70	2023-09-24 0:04
9	SCH_공학관	9	9	413	92	24	70	2023-09-24 0:04
10	SCH_공학관	7	7	409	92	24	70	2023-09-24 0:05
11	SCH_공학관	7	6	405	92	24	70	2023-09-24 0:06
12	SCH_공학관	4	4	406	92	24	70	2023-09-24 0:06
13	SCH_공학관	5	5	407	92	24	70	2023-09-24 0:07
14	SCH_공학관	6	5	422	92	24	70	2023-09-24 0:07
15	SCH_공학관	6	6	420	92	24	70	2023-09-24 0:08
16	SCH_공학관	9	8	417	92	24	70	2023-09-24 0:08
17	SCH_공학관	5	5	417	91	24	70	2023-09-24 0:09
18	SCH_공학관	6	6	416	91	24	70	2023-09-24 0:10
19	SCH_공학관	7	7	418	91	24	70	2023-09-24 0:10
20	SCH_공학관	6	6	417	91	24	70	2023-09-24 0:11
21	SCH_공학관	9	7	419	91	24	70	2023-09-24 0:11
22	SCH_공학관	8	7	414	91	24	70	2023-09-24 0:12
23	SCH_공학관	9	9	417	91	24	70	2023-09-24 0:13
24	SCH_공학관	6	6	419	91	24	70	2023-09-24 0:13

Fig. 8. API Data Result

4. Analysis methods & Results

4.1 Correlation between Server Room and Lecture Room

본 연구에서는 AirDeep-Room을 활용하여 두 가지 구별되는 실내 환경인 서버실과 강의실의 환경변수 간 상관관계를 분석하였다. 이 시스템을 통해 정밀하게 수집된 데이터는 각각의 공간에서 다양한 환경 조건에 대한 깊이 있는 이해를 가능하게 하였으며, 이는 상응하는 상관관계 행렬을 통해 시각적으로 보여주고 있다. Fig 9. 는 강의실에서 환경변수의 상관관계 결과를 나타내며 Fig 10. 은 서버실에서 환경변수의 상관관계 결과를 나타낸다.

CO2와 TVOC간의 상관관계에서 서버실(0.52)이 강의실(0.46)에 비해 다소 높게 나타나, 장비의 사용 빈도와 실내

활동이 총 휘발성 유기화합물 변동에 더 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 서버실에서의 온도 습도는 음의 상관관계(-0.24)를, 강의실에서는 양의 상관관계(0.43)를 보임으로써, 서로 다른 환경에서 다른 상호작용이 나타난다는 것을 알 수 있다.



Fig. 9. Correlation Matrix For Server

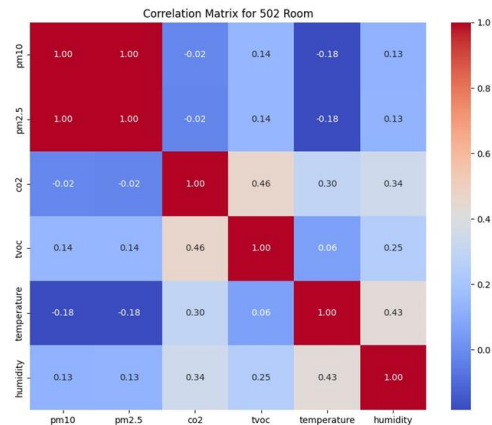


Fig. 10. Correlation Matrix For lecture room

이러한 분석을 통해 두 환경에 대한 심층적 이해뿐만 아니라, AirDeep-Room 시스템 설계 내의 통신 모듈의 성능

을 실제 운영 환경에서 검증하는 중요한 기회를 제공하였다. 기술 장비의 연속적인 상용이 일반적인 서버실과 대조적으로, 높은 인간 활동과 자주 이루어지는 환기가 특징인 강의실 환경에서 모두 안정적인 데이터 전송을 확인할 수 있었다. 이는 통신 모듈이 다양한 실내 환경에 효과적으로 적응하며, 데이터 전송이 원활하게 이뤄짐을 입증하였다.

4.2 Changes in air quality according to the number of students

본 연구에서는 AirDeep-Room 장치를 이용해 대학교 강의실에서 공기질 (TVOC & CO2)과 학생 수 사이의 상관관계를 분석하였다. Fig 11은 AirDeep-Room을 통해 수집된 데이터(이산화탄소, TVOC)를 한 시간 간격으로 시각화한 그래프이다. Table 3은 수업 일시와 학생 수를 나타낸다. 수업이 진행되는 시간과 그렇지 않은 시간을 비교하여 실내 공기질을 분석하였고, 피어슨 상관관계 수치를 통해 이를 분석하였다. Fig 12는 학생 수에 따른 환경변수의 상관관계를 보여준다.

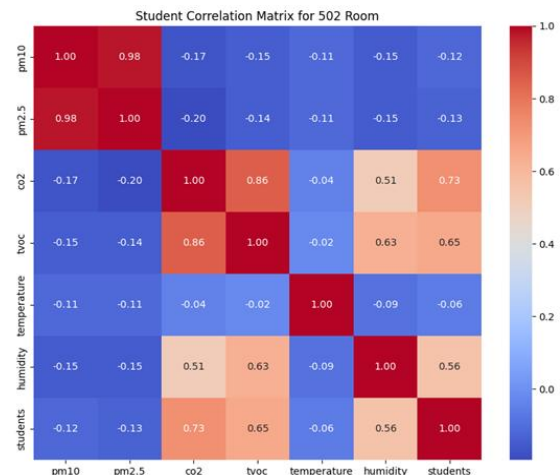


Fig. 12. Student Correlation Matrix



Fig. 11. Changes in air quality For lecture room

Table 3. Test lecture room Timetable

Date	Time	Course Name	Count
2024.04.11	13:30 ~ 15:00	Computer Architecture	67
2024.04.11	15:00 ~ 16:30	Java Programming	76
2024.04.15	10:00 ~ 12:30	Computer Network	63
2024.04.15	12:00 ~ 13:30	Computer Architecture	67
2024.04.15	15:00 ~ 16:30	Java Programming	76
2024.04.16	10:30 ~ 12:00	Computer Network	63
2024.04.16	14:00 ~ 17:00	Discrete mathematics	17
2024.04.17	12:00 ~ 14:00	Preliminary start-up design(A)	36
2024.04.17	14:00 ~ 16:00	Preliminary start-up design(B)	37

결과적으로 학생 수가 많을수록 이산화탄소와 TVOC 수치가 각각 0.73과 0.65로 나타나며, 이는 강한 양의 상관관계를 보여준다. 이 연구 결과는 교실 환경에서 학생 수를 고려한 적절한 공기질 관리의 필요성을 강조한다. 특히 환기 시스템의 개선과 공기 정화기의 사용이 학생들의 학습 능력과 건강에 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 제시한다. 또한 정기적인 공기질 모니터링과 데이터 기반의 환경 조정의 중요성을 강조한다.

IV. Conclusions

본 연구에서는 다중 센서 시스템인 AirDeep-Room의 설계 및 구현을 통해, CO₂, TVOC, 미세먼지, 온도, 습도를 포함한 다양한 실내 환경변수들을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 종합적인 실내 공기질 모니터링 시스템을 개발하였다. 수집된 데이터를 바탕으로 상관관계 분석을 진행한 결과, 서버실과 강의실에서 얻은 데이터는 각 환경의 특성과 활용성에 따라 서로 다른 상관관계를 나타내는 것으로 관찰되었다. 특히 온도와 습도의 변화는 서버실에서는 -0.24로 음의 상관관계를 강의실에서는 0.43으로 양의 상관관계 패턴을 보였다.

본 시스템은 서버실과 인구 밀도가 높은 강의실 등과 같이 다양한 환경 조건에서 데이터 수집 및 전송에 있어 효과적임을 입증하였다. AirDeep-Room의 활용은 공기질 측정을 기존 방식에 비해 쉽고 정확하게 수행할 수 있게 하며, 연구 환경을 신속하게 조성할 수 있는 중요한 발전으로 평가된다. 또한 학생 수와 공기질 간의 상관관계 분

석을 통해, 높은 학생 밀도가 CO₂ 및 TVOC 수준의 상승과 관련이 있음을 확인할 수 있다. 이는 점유율 데이터를 활용한 환기 및 공기 정화 시스템의 자동화 가능성을 탐색하는데 기여할 수 있으며, 학생들에게 쾌적한 교육 환경을 조성하는 방안을 제공할 것으로 기대한다.

그럼에도 불구하고, 본 연구에는 몇 가지 한계점이 있다. 첫째, 연구가 특정 기간에 걸쳐 제한된 수의 환경에서 수행되었기 때문에, 다른 계절이나 더 다양한 환경에서의 추가적인 데이터 수집이 필요하다. 둘째, 상관관계 분석의 인과관계를 증명하지 않았으며, 학생 수의 증가가 공기질 저하의 유일한 원인이라고 단정 지을 수 없다. 셋째, 본 연구에서 사용된 센서의 정확도와 측정 범위에 대한 검증이 추가적으로 필요하다. 이러한 한계점을 극복하고자 하는 후속 연구에서는 각 계절별로 데이터 수집 범위를 확대하며, 다변량 시계열 분석과 같은 세분화된 통계적 방법론을 적용하는 것을 목표로 한다.

이를 기반으로 향후 강의실별 최적의 학생 수 결정과 실내 공기질에 따른 전력 소비 최소화를 위한 연구로 확장할 계획이다. 또한 이러한 후속 연구를 통해 AirDeep-Room 시스템이 기존 시스템에 비해 실내 환경을 더 잘 이해하고 관리하는 시스템인지에 대한 입증은 지속적으로 수행할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper was supported by 2023 Sabbatical Year of Soonchunhyang University.

REFERENCES

- [1] Dennis Y. C. Leung, "Outdoor-indoor air pollution in urban environmet: challenges and opportunity", <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2014.00069/full>
- [2] Jin-a Lee, Seung-ju Oak, Seo-yeon Lim, & Young-hye Jo. (2021). IoT automatic ventilation system to block fine dust. Koreanstudies Information Service System, 28(2), 1088-1090., <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3921351#>
- [3] Nabizadeh R, Yousefian F, Moghadam VK, Hadei M. Characteristics of cohort studies of long-term exposure to PM_{2.5}: a systematic review. Environ Sci Pollut Res Int. (2019) 26:30755-71. 10.1007/s11356-019-06382-6
- [4] Kim, Hyungkeun, Kim, Taeyeon. Application of respiratory

deposition model for evaluating inhalation intake fraction of fine-particle from indoor environment. 2015 Oct 29.

- [5] United States Environmental Protection Agency. "Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)." Accessed December 10, 2023, <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>.
- [6] Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, Fisk WJ. Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environ Health Perspect*. 2012 Dec;120(12):1671-7. doi: 10.1289/ehp.1104789. Epub 2012 Sep 20. PMID: 23008272; PMCID: PMC3548274.
- [7] Jiangsu Co-Innovation Center of Efficient Processing and Utilization of Forest Resources, International Innovation Center for Forest Chemicals and Materials, College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu, 210037, China
- [8] S. Lakshminarayana, A. Praseed and P. S. Thilagam, "Securing the IoT Application Layer from an MQTT Protocol Perspective: Challenges and Research Prospects," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, doi: 10.1109/COMST.2024.3372630.
- [9] Cüneyt Bayılmış, M. Ali Ebleme, Ünal Çavuşoğlu, Kerem Küçük, Abdullah Sevin, A survey on communication protocols and performance evaluations for Internet of Things, *Digital Communications and Networks*, Volume 8, Issue 6, 2022, Pages 1094-1104, ISSN 2352-8648.
- [10] Nasir, I.M.; Khan, M.A.; Yasmin, M.; Shah, J.H.; Gabryel, M.; Scherer, R.; Damaševičius, R. Pearson Correlation-Based Feature Selection for Document Classification Using Balanced Training. *Sensors* 2020, 20, 6793.
- [11] Park Yonggyu, "Correlation and Regression analysis", *J Korean Acad Fam Med* Vol.22, No.1 January.
- [12] S Listyarini, L Warlina, & A Sambas. (2021). Air Quality Monitoring System in South Tangerang Based on Arduino Uno: From Analysis to Implementation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1115(1), 012046.
- [13] Maxime Lamothe, Yann-Gaël Guéhéneuc, and Weiyi Shang. 2021. A Systematic Review of API Evolution Literature. *ACM Comput. Surv.* 54, 8, Article 171 (November 2022), 36 pages.
- [14] Jong Il Park, Jung Hyun Kim and Ji hwan Cha. "Measurement and improvement of indoor air quality by university building use." *Journal of the academic presentation conference of the Korean Society of Facilities Engineering* (2017): 1014-1017.
- [15] Tae-Jung Lee, Do-Yoon Kim, Su-Min Lee, Sang-Cheol Kim and Young-Min Jo. (2021). Analysis of Indoor Air Quality Characteristics of Multi-use Facilities in Gyeonggi-do using IoT-based Monitoring Data. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 777-789.

Authors



TaeHeon Kim received the B.S degree in Compute Software Engineering, Soonchunhyang University, in 2024. He is currently studying for a master's degree in software convergence at Soonchunhyang

University. He is interested in deep learning, machine learning, and computer graphics.



SungYeup Kim received his B.S. degree in Computer Science from Boston University, his M.S. degree in Computer Science from George Washington University, and his Ph.D. in Software Convergence from

Soonchunhyang University. His research interests are in ICT-based convergence platforms, cloud systems, healthcare convergence, and machine learning.



Yoosin Kim received the B.S degree in Information Management from Kookmin University in 2000. He received his M.S degree from the Graduate School of Business IT, Kookmin University, in 2009 and his

Ph.D. degree from the same institution in 2013. He was also a Post-doctoral Research Fellow at Texas State University, USA. He is currently the Founder & Chief Data Scientist at AirDeep Co., Ltd. His research interests are in Real-Time Big Data Analytics and AI.



Min Hong received a B.S. degree in Computer Science from Soonchunhyang University in 1995. He received his M.S. degree in Computer Science and a Ph.D. degree in Bioinformatics from the University

of Colorado in 2001 and 2005, respectively. Dr. Hong is a professor at the Dept. of Computer Software Engineering, Soonchunhyang University, Asan, Republic of Korea. His research interests are in Computer Graphics, Mobile Computing, Physically based Modeling, Deep Learning, and Simulation