

## 디지털 트윈 기반 지능형 공기질 측정 및 제어 시스템

이승화, 권순호, \*윤수연  
국민대학교 \*국민대학교

backkom@kookmin.ac.kr, soon3626@kookmin.ac.kr, \*1104py@kookmin.ac.kr

### A Digital Twin-Based Intelligent Air Quality Measurement and Control System

Seung Hwa Lee, Soon Ho Gwon, Soo Yeon Yoon\*  
Kookmin Univ., \*Kookmin Univ.

#### 요 약

본 연구는 라즈베리파이 기반의 자동 공기질 관리 시스템을 소규모 공간(20m<sup>3</sup>)에서 평가하였다. CO<sub>2</sub> 및 PM2.5 농도를 기준으로 총 4 가지 상황을 설정하여 15 분간 측정한 결과, 본 시스템은 상시 팬 가동과 유사한 공기질 개선 효과를 보이면서도 팬 가동량은 52% 낮게 나타났다. 주기적 제어 방식과 비교해도 CO<sub>2</sub> 는 평균 24%, PM2.5 는 18% 낮아 더 효과적이었다. 이는 본 시스템이 공기질 변화에 능동적으로 반응함으로써 효율성과 성능을 모두 확보함을 시사한다. 향후에는 고성능 장치와의 연계를 통해 대규모 공간에서도 성능을 검증할 필요가 있다.

#### I. 서 론

실내공기질은 많은 시간을 실내에서 보내는 현대인의 건강과 직결된 중요한 요소이다. 미세먼지로 인한 대기오염 문제가 심화되면서 환기만으로는 실내공기질을 효과적으로 관리하기 어려워지고 있어, 공기 정화를 위한 제품을 구매하는 수요가 꾸준히 증가하고 있다.[1]

다중이용시설의 경우 공기 정화 시스템을 설치하여 실내공기질 관리에 노력하고 있으나 군중의 잦은 이동으로 오염 유발 원인이 많아 관리에 어려움을 겪고 있다. 따라서 현재의 실내공기질 관리 시스템을 보완할 수 있는 보다 정밀하고 지능적인 시스템의 필요성이 대두되고 있다.[2]

본 연구에서는 이러한 요구에 대응하고자 개선된 공기 정화 시스템으로써 디지털 트윈 기술을 기반으로 실내공기질을 실시간으로 모니터링하고, AI 모델로 공기질을 분석하여 공기 정화 작업을 수행하는 지능형 공기질 관리 시스템을 구현하여 제안한다.

#### II. 본론

##### 2.1. 시스템 설계

###### 2.1.1 디지털 트윈 기반 모니터링

실내 공기질 관리의 효율성을 높이기 위해 디지털 트윈 기반의 모니터링 시스템이 구축되었다. iPhone 의 LiDAR 센서를 활용해 실내 공간의 3D 데이터를 수집하고, 이를 기반으로 Blender 에서 보정 및 모델링하여 Three.js 를 통해 웹 기반의 디지털 트윈 환경을 구현하였다. 해당 모델은 공기 정화 장치, 센서 보드, 환기 장치 등의 위치와 상태를 반영하며, 사용자는 이를 통해 장치의 동작 상태를 원격으로 확인 및 제어할 수 있다. 또한 공기 흐름과 오염물질 유입에 따른 변화를 시뮬레이션 형태로 시각화하여 직관적인 이해를 지원한다. 아울러, React 기반의 실시간 대시보드를 통해 공기질 변화 추이와 상태 정보를 사용자에게 제공함으로써 능동적 대응이 가능하도록 하였다.

본 연구에서는 실내 공기질 관리에 있어 공간 인식 기반의 디지털 트윈 기술과 실시간 데이터 시각화의 효과적 결합 가능성을 제시하고자 한다.

###### 2.1.2 냄새 측정

불쾌한 냄새는 사람이 즉각적으로 인식할 수 있는 요인이므로, 이를 탐지하고 제거하는 것이 공기질 개선에 있어 중요하다. 냄새는 단일 성분에 의해 발생하지 않기 때문에 다중 센서의 측정값을 조합한 후 인공지능 모델을 이용해 냄새 정도를 분류하는 기법을 사용하였다.[3]

냄새 데이터 수집을 위해 다양한 상황별로 공기질 수치를 측정하고, 이를 3 단계의 냄새 강도(강함, 보통, 약함) 태그와 함께 데이터셋에 기록하였다. 수집한 약 1 천여 개의 데이터셋을 RandomForest 모델로 학습시켜 냄새 분류 모델을 생성하였다.[4] 생성한 모델을 시스템에 적용하여 실시간으로 공기질을 측정함과 동시에 냄새 강도를 출력하여 사용자가 냄새 상태를 모니터링할 수 있도록 구현하였다.

###### 2.1.3 공기질 분석 및 자동 제어

센서로 측정한 공기질 수치와 냄새를 데이터로 수집한 후 RNN 의 LSTM 모델로 분석하여 변화 추세 및 일정 타임스텝 후에 측정될 것으로 예상되는 수치를 계산하도록 하였다. 예상한 공기질 수치와 이후 실제 측정된 수치를 비교하여 R<sup>2</sup> Score 를 측정하도록 하였고, 시스템 실행 중에 주기적으로 R<sup>2</sup> Score 를 확인하여 0.7 미만으로 하락할 경우에는 재학습을 진행해 예측의 정확성을 높이도록 설정하였다.

예측한 수치를 바탕으로 공기질의 악화 가능성을 조기에 파악하여 자동으로 시스템을 가동하고, 분석한 추세에 따라 공기 정화 팬의 작동 강도를 조절하도록 설정하였다. 이러한 자동 제어 시스템을 통해 사용자의 특별한 제어가 없더라도 최적의 공기질을 유지할 수 있도록 설계하였다.

### III. 실험 및 결과

#### 3.1 실험환경 구성

##### 3.1.1 하드웨어

시스템의 하드웨어는 공기질 측정을 위한 센서와 공기 정화를 위한 장치로 구성했다. 라즈베리파이 4 와 호환되는 통합 센서 보드를 제작하여 미세먼지, CO<sub>2</sub>, VOC, CO, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, 알코올, 벤젠과 같은 성분을 측정할 수 있도록 하였다. 측정한 공기질 데이터를 바탕으로 팬과 필터를 구동하여 실내 공기를 순환·정화시키고, 디퓨저 용액에 초음파 진동 모듈을 장착하여 향기 분사 기능을 수행한다.

##### 3.1.2 기능별 환경 설정

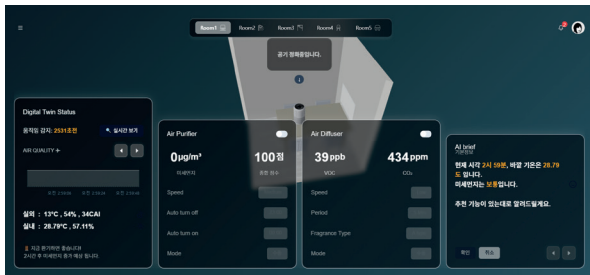


그림 1. 시스템 웹 페이지

웹 또는 모바일 환경에서 시스템에 접속하여 중앙에는 디지털 트윈 모델과 하단에는 대시보드가 표시되는 것을 확인하였다. 디지털 트윈 모델에서 하드웨어와 주변 상황이 시뮬레이션으로 보여지고, 대시보드에는 측정한 공기질 수치 및 분석 결과가 실시간으로 표출된다. 공기 정화 장치의 전원·강도 제어, 모드 변경 등 각 기능별 버튼을 통한 원격 하드웨어 제어 또한 정확하게 이루어져 시스템과 하드웨어가 정상적으로 연동됨을 검증하였다.

#### 3.2 성능 평가 및 개선방안

시스템의 공기질 개선 성능을 확인하기 위해 CO<sub>2</sub> 와 PM2.5 수치가 증가하는 20m<sup>2</sup> 규모의 환경을 조성하였다. 본 시스템의 하드웨어를 기반으로 (1) 공기 정화 팬을 가동하지 않은 경우, (2) 팬을 50% 세기로 지속 가동한 경우, (3) 팬을 100% 세기로 5 분 간격으로 1 분씩 주기적 가동한 경우, (4) 본 시스템에 따라 자동으로 공기질을 관리한 경우 총 네 가지 상황을 가정하여 15 분간 CO<sub>2</sub> 및 PM2.5 측정 수치와 누적 팬 가동량(팬 작동 세기\*시간[초])을 기록하였다.

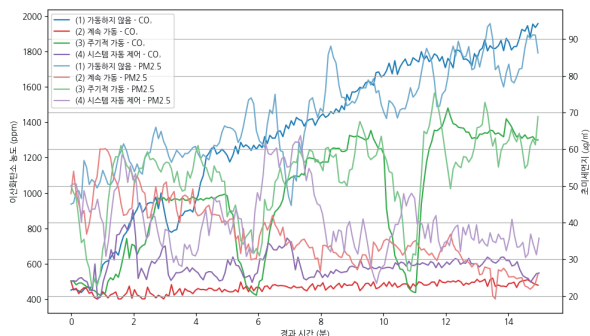


그림 2. 상황별 수치 측정 그래프

(1)	(2)	(3)	(4)
0.0	442.5	180.0	213.75

표 1. 상황별 누적 팬 가동량 비교

실험 결과 본 시스템에 따라 자동으로 공기질을 관리한 경우 팬을 계속 가동했을 때와 종료 시점의 공기질 수치가 유사하게 나타났고, 누적 팬 가동량은 52% 낮게 측정되었다. 일정 주기로 작동을 제어한 경우보다는 평균 CO<sub>2</sub> 수치가 24%, PM2.5 수치는 18% 낮게 기록되었으며 종료 시점의 수치에서는 보다 큰 차이를 보였다. 이는 본 시스템의 자동 공기 정화 성능이 일정 주기마다 인위적으로 제어하는 방식보다 효과적이며, 상시 가동하는 것과는 대등한 성능을 보이면서 가동량 면에서는 더욱 효율적임을 나타낸다.

본 연구에서는 라즈베리파이와 호환되는 소형 부품을 사용하였기 때문에 정화 가능한 범위에 한계가 있을 것으로 예상하고 소규모의 공간에서만 실험을 진행하였다. 향후에는 보다 고성능의 공기 정화 장치에 본 시스템을 적용 후 실험하여 대규모 공간에서의 사용도 보장해야 할 것이다.

### IV. 결론

본 연구에서는 디지털 트윈과 AI 분석 기술을 융합한 지능형 실내공기질 관리 시스템을 개발하였다. 디지털 트윈 기반 모니터링 시스템을 통해 장소의 제약 없이 공기질과 주변 환경에 대한 정보를 확인하고, 장치를 제어할 수 있어 실내공기질 관리의 효율성을 높였다. AI 모델을 이용한 냄새 측정과 공기질 분석을 통해 공기질의 추세를 파악·예측하고, 자동으로 공기 정화 작업을 수행함으로써 보다 정밀한 공기질 관리가 가능하도록 하였다. 실험에서 본 시스템의 공기 정화 성능이 고정된 제어 방식보다 효과적임을 확인하였고, 향후 대형 장치에 본 시스템을 적용함으로써 다중이용시설 등 실내공기질 관리가 필요한 다양한 공간에서 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW 중심대학사업의 연구결과로 수행되었음.(2022-0-00964)

"This research was supported by the MIST(Ministry of Science, ICT), Korea, under the National Program for Excellence in SW, supervised by the IITP(Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation) in 2022"(2022-0-00964)

### 참 고 문 헌

- [1] 이투데이(2025.1.2), "공기청정기 시장만큼은 뜬다... 계절적 수요·반려가구 증가," <https://www.etoday.co.kr/news/view/2434293>
- [2] 최현진,김유미,and 이병권. "실내공기질 관리 및 개선을 위한 기초연구." 한국환경정책평가연구원 기초연구보고서 2019.- (2019): 42-45.
- [3] 유준부,and Yu Jun-Bu. "건강한 실내공기를 위한 냄새관리 - 실내 공기질 감시를 위한 센서 기술 현황." 空氣淸淨技術 29.3 (2016): 21-32.
- [4] 김준민. "설치류 후각구의 혈액학적 반응을 이용한 머신러닝 기반 냄새 분류기의 설명 가능성에 대한 연구." 한국정보기술학회논문지 20.4 (2022): 141-148.