# **AI 비전 센싱과 데이터 분석을 통한 초개인화 맞춤형 실내 공기질 최적화 심층 연구**

## **1. 서론: 실내 공기질 관리의 진화하는 패러다임**

### **1.1. 실내 공기질이 인간 건강과 생산성에 미치는 명확한 영향**

실내 공기질(Indoor Air Quality, IAQ)은 인간의 건강, 안락함, 그리고 생산성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요소이다. 열악한 IAQ는 두통, 피로감, 집중력 저하, 눈·코·목·폐의 자극과 같은 다양한 건강 증상과 연관되며, 특정 질병, 예를 들어 습한 실내 환경과 관련된 천식 등을 유발하거나 악화시킬 수 있다.1 더욱이, 석면이나 라돈과 같은 일부 오염물질에 장기간 노출될 경우 즉각적인 증상은 나타나지 않더라도 수년 후 암으로 이어질 수 있다는 점은 IAQ 관리의 중요성을 더욱 강조한다.1 이러한 맥락에서 미국 산업안전보건청(OSHA)은 일반 의무 조항을 통해 고용주에게 사망이나 심각한 신체적 상해를 유발할 가능성이 있는 알려진 위험이 없는 안전한 작업장을 제공할 의무를 부과하고 있으며, 이는 IAQ 관리의 법적·윤리적 책임까지 시사한다.1

IAQ는 신체 건강뿐만 아니라 정신 건강과 인지 기능에도 상당한 영향을 미친다. 하버드 대학교에서 수행된 연구에 따르면, 실내 오염물질 수치가 낮고 환기가 잘 되는 환경에서 근무하는 개인은 그렇지 않은 공간의 개인보다 높은 인지 기능을 나타냈다.2 이는 IAQ가 작업장과 교육 환경에서의 생산성 및 학습 능력과 직접적으로 연결됨을 의미하며, 단순한 쾌적함을 넘어 경제적 및 성과 지향적 결과에도 영향을 미치는 변수임을 보여준다.1

이러한 IAQ의 중요성은 종종 간과되곤 하지만, 그 영향력은 다양한 건강 및 생산성 문제에 있어 "보이지 않는 위협 증폭기" 역할을 한다. 예를 들어, 특정 알레르기 성향을 가진 사람이 열악한 IAQ 환경(높은 곰팡이 또는 먼지 농도)에 노출되면, 경미했던 증상이 심각한 건강 문제로 발전할 수 있다. 마찬가지로, 작업 환경에서 열악한 IAQ는 스트레스나 피로감을 가중시켜 생산성을 더욱 크게 떨어뜨릴 수 있다. 이는 1에서 언급된 특정 오염물질과 질병 간의 연관성(예: 습한 환경과 천식), 그리고 2에서 지적된 알레르기, 호흡기 문제, 집중력 저하와 같은 증상들을 고려할 때 더욱 명확해진다. 개인의 민감도는 매우 다양하기 때문에, 이러한 상호작용은 열악한 IAQ의 부정적 영향이 단순 합산이 아닌 곱셈 효과로 나타날 수 있음을 시사하며, 이는 초개인화된 IAQ 관리의 필요성을 뒷받침한다.

또한, 열악한 IAQ로 인한 경제적 부담은 종종 과소평가되는데, 이는 많은 조직이 문제 발생 후 대응하는 반응적 관리 방식을 취하기 때문이다.33은 "많은 조직이 직원들의 불만이나 건강 증상이 나타난 후에야 IAQ 문제를 해결하려는 반응적 태도를 보인다"고 명시적으로 지적한다. 그러나 생산성 손실, 결근, 의료 비용, 심지어 OSHA의 의무 조항 1에서 암시되는 잠재적 법적 책임과 관련된 장기적인 비용은 선제적인 IAQ 관리 시스템에 대한 투자 비용을 훨씬 초과할 수 있다. 1과 2는 건강 문제와 생산성 손실을 상세히 기술하며, 이는 직접적인 비용으로 이어진다. 반응적 조치는 종종 조사, 설비 개선, 급성 건강 문제 해결 등을 포함하며, 이는 지속적이고 최적화된 관리보다 더 많은 비용을 초래할 수 있다. 많은 IAQ 문제가 "보이지 않는" 특성을 가지고 있어, 생산성은 위기 상황에 도달하기 전에 점진적으로 저하될 수 있으며, 이는 상당한 숨겨진 비용을 누적시킨다. 따라서 AI 기반의 선제적 IAQ 관리로의 전환은 단순히 건강 개선을 넘어 건전한 경제 전략이기도 하다.

### **1.2. 차세대 IAQ를 위한 AI, 비전 센싱, 초개인화의 융합**

최근 인공지능(AI), 특히 머신러닝 및 딥러닝 기술의 발전과 정교한 센싱 기술(비전 센싱 포함)의 등장은 일반화된 IAQ 관리에서 초개인화된 IAQ 관리로의 패러다임 전환을 가능하게 하고 있다.4 IAQ에서의 초개인화는 각 개인의 고유한 생물학적, 유전적(IAQ 관련 자료에서는 직접적으로 강조되지 않지만, 의학 분야의 원리가 적용 가능함), 생활 방식 및 환경적 영향을 고려하여 실내 환경을 맞춤화하는 것을 목표로 한다.4 이는 모든 사람에게 동일하게 적용되는 일률적인 솔루션에서 벗어나 실시간으로 적응하는 동적 시스템으로 나아가는 것을 의미한다.

AI 비전 센싱은 기존 센서만으로는 포착할 수 없는 거주자 존재, 활동, 심지어 잠재적인 오염 발생 사건에 대한 풍부한 맥락적 데이터를 제공함으로써 중요한 역할을 수행한다.6 이러한 기술의 융합은 IAQ 관리의 새로운 지평을 열고 있으며, 본 보고서의 핵심 기술적 초점을 이룬다.

초개인화된 IAQ로의 전환은 근본적으로 개인 거주자의 요구, 민감성, 활동의 높은 가변성에 대응하기 위한 것이다. "평균적인" 조건에 맞춰 설계된 전통적인 IAQ 시스템은 필연적으로 상당수 거주자에게 최적의 환경을 제공하지 못한다. AI와 비전 센싱은 이러한 가변성을 해결하는 데 필요한 세분성을 제공한다. 1은 IAQ 인식이 개인에 따라 다르다고 지적하며4는 초개인화 의학을 개인의 포괄적인 건강 데이터, 생활 방식, 환경적 영향을 고려하는 것으로 정의하는데, 이 원칙은 IAQ에 직접 적용된다. 개인마다 오염물질에 대한 민감도(예: 천식 환자와 비천식 환자), CO2​ 생성에 영향을 미치는 대사율, 오염물질을 생성하는 활동 패턴(예: 요리, 청소 6)이 다르다. 정적이거나 광범위하게 계획된 IAQ 제어 시스템은 이러한 동적이고 다양한 개인의 요구를 효과적으로 충족시킬 수 없다. AI, 특히 비전 센싱(특정 활동 및 거주자 수 감지)을 통해 이러한 개인의 패턴과 민감성을 학습하고, 맞춤형 환경 조정을 가능하게 할 수 있다.

진정한 초개인화 IAQ는 환경 센서 데이터, 비전 센서 데이터, 거주자 피드백, 잠재적으로 웨어러블 센서 데이터까지 통합하는 풍부한 "데이터 생태계" 구축을 전제로 한다. AI는 이 복잡한 생태계에서 데이터를 처리하고 실행 가능한 통찰력을 도출하는 지능형 엔진 역할을 한다. 초개인화 4는 "포괄적인 건강 데이터", "생활 방식 및 환경적 영향", "지속적인 데이터 스트림"에 의존한다. 비전 센싱은 거주 및 활동에 대한 데이터를 제공하고 6, 환경 센서는 오염물질, 온도, 습도에 대한 데이터를 제공한다.24은 IoT 장치, 웨어러블, 환경 센서가 지속적인 데이터를 수집한다고 언급한다. 효과적인 초개인화를 위해서는 이러한 이질적인 데이터 소스를 융합하고 10 AI를 사용하여 복잡한 상호 작용을 이해하고 개인의 요구를 예측해야 한다. 이러한 통합된 데이터 생태계 없이는 AI가 진정한 초개인화를 달성할 수 없다.

## **2. 기초: 현재 IAQ 모니터링과 AI의 부상**

### **2.1. 전통적인 실내 공기질 모니터링: 기능과 한계**

전통적인 IAQ 모니터링은 주로 특정 오염물질(예: CO2​, PM2.5​, VOCs), 온도, 습도 등을 측정하기 위한 개별 센서에 의존한다.1 이러한 방식은 일정 수준의 IAQ 정보를 제공하지만, 여러 가지 제약으로 인해 효과적인 관리에 어려움이 따른다.

주요 한계점은 다음과 같다:

* **비용 및 복잡성:** 고가의 모니터링 장비와 복잡한 설치 과정은 대규모 배치를 제한하는 요인이 된다.9 특히, 정밀도가 높은 모니터링 스테이션은 비용 부담으로 인해 설치 수가 제한적이다.9
* **공간적 및 시간적 해상도:** 기존 시스템은 동적이고 세분화된 IAQ 관리에 필요한 충분한 공간적, 시간적 데이터 해상도를 제공하지 못하는 경우가 많다.13 간헐적인 현장 점검 방식은 IAQ의 변동성을 놓치기 쉽다.3
* **데이터 활용도 및 적시성:** 전통적인 시스템의 낮은 데이터 활용률과 적시성 부족은 효과적인 대응을 저해한다.13
* **저비용 센서의 정확도 및 신뢰성:** 저비용 센서는 경제성과 설치 용이성이라는 장점을 제공하지만, 정확도, 정밀도, 수명이 환경 요인에 의해 영향을 받을 수 있으며 의문이 제기되기도 한다. 또한, 설계된 특정 오염물질만 감지하므로 IAQ의 전체적인 상황을 완벽하게 나타내지 못할 수 있다.9 많은 저비용 모니터에 대한 널리 인정된 실내 성능 기준도 부재한 실정이다.12

이러한 전통적 방법의 한계 9를 이해하는 것은 AI와 비전 센싱이 가져올 발전을 제대로 평가하는 데 중요하다. 이러한 한계는 더 지능적이고 포괄적이며 비용 효율적인 솔루션의 필요성을 직접적으로 시사한다.

전통적인 IAQ 모니터링의 한계(비용, 낮은 해상도, 데이터 지연)는 건물 관리자를 종종 "반응적 유지보수 함정"에 빠뜨린다. 즉, 문제가 심각해지거나 보고된 후에야 문제를 해결하려 하며, 환경을 선제적으로 최적화하기보다는 사후 대응에 그치는 경우가 많다. 이는 장기적으로 비효율적이고 더 많은 비용을 초래할 수 있다. 13은 "고가의 모니터링 비용", "낮은 데이터 활용률", "적시성 부족"을 지적하고12는 저비용 모니터가 완전한 그림을 제공하지 못하며 경고가 즉각적인 위험을 의미하지는 않는다고 언급한다. 3은 조직의 "반응적 태도"를 명시적으로 언급한다. 데이터가 부족하거나 시기적절하지 않거나 불완전하면, 새로운 문제를 식별하거나 시스템 성능을 선제적으로 최적화하기 어렵다. 결과적으로, IAQ가 눈에 띄게 악화되어 불만이나 건강 문제가 발생했을 때만 개입이 이루어지는 경우가 많으며, 이는 반응적인 접근 방식이다.

또한, 전통적인 IAQ 모니터링은 종종 "데이터 사일로" 문제를 야기한다. 서로 다른 센서나 건물 시스템(예: HVAC)에서 얻은 정보가 효과적으로 통합되거나 상호 연관되지 않아, 실내 환경에 대한 전체적인 이해를 방해하고 최적화된 제어 전략의 잠재력을 제한한다. 전통적인 시스템은 종종 다른 매개변수에 대해 별도의 센서를 사용하며 1에서 언급된 "낮은 데이터 활용률"은 데이터가 효과적으로 결합되거나 사용되지 않음을 암시할 수 있다. AI 시스템을 위한 데이터 융합에 대한 논의와는 달리 10, *전통적인* 시스템 맥락에서 고급 데이터 융합에 대한 논의가 부족하다는 점은 이러한 격차를 시사한다. CO2​ 데이터, 온도 데이터, HVAC의 에너지 소비 데이터가 함께 분석되지 않으면, 공간이 비어 있을 때 과도한 환기와 같은 비효율성을 식별할 기회를 놓치게 된다. 이러한 사일로화된 접근 방식은 포괄적인 최적화를 저해한다.

### **2.2. IAQ에서의 인공지능 및 머신러닝: 예측 능력과 제어 전략**

AI/ML 기술은 IAQ 데이터를 분석하고, 오염물질 수준을 예측하며, 거주 패턴을 이해하고, 제어 시스템을 최적화하는 데 점점 더 많이 적용되고 있다.9

**예측 방법:** 시계열 분석, 특징 기반 예측, 시공간 모델이 일반적으로 사용된다.9 인공신경망(ANN)과 같은 ML 모델은 미세먼지(PM) 농도 모델링에서 전통적인 다중 선형 회귀 분석보다 우수한 예측 능력을 보여주었다.15

**구체적인 모델:**

* 딥러닝 아키텍처(MLP, LSTM, 1D-CNN, 하이브리드 모델)는 IAQ 예측을 위해 탐구되고 있으며, LSTM은 시계열 데이터에 대해 종종 우수한 성능을 보인다.18
* 연구에서는 IAQ 변수(습도, 온도, 빛, CO2​)에 대한 거주 패턴 예측을 위해 LSTM, CNN, ANN, SVR을 비교했으며, SVR은 우수한 훈련 성능을, ANN/LSTM은 견고한 테스트 성능을 나타냈다.17
* ARHMM은 PIR, CO2​, RH 센서 기반 거주 패턴 추정에서 평균 80.78%의 정확도를 보여 HMM 및 SVM보다 우수한 성능을 입증했다.8

**데이터 요구 사항 및 모델 복잡성:** IAQ 예측 연구에 따르면, 5개월간의 과거 데이터로도 충분할 수 있으며, 약 50,000개의 매개변수를 가진 얕은 딥러닝 모델이 과적합을 피하면서 충분한 예측력을 가질 수 있음이 시사되었다.18

**과제:**

* **데이터 부족(Data Sparsity):** 견고한 모델 훈련을 위한 포괄적이고 다양한 데이터셋의 부족.9
* **계산 요구 사항:** 복잡한 ML/DL 모델은 상당한 처리 능력을 요구할 수 있다.14
* **모델 적응성:** 모델이 다양한 환경과 변화하는 조건에 걸쳐 잘 일반화되도록 보장하는 것은 여전히 과제이다.14
* **맥락 특화 특징 부족:** 모델이 맥락 특화 특징을 포함하지 않아 다양한 실제 시나리오에서 정확도가 제한될 수 있다.9

AI/ML이 데이터 분석 및 예측에 지능을 추가함으로써 전통적인 모니터링의 한계를 어떻게 해결하기 시작했는지 이 하위 섹션에서 자세히 설명한다. 9과 같은 자료가 여기서 핵심이다.

LSTM, CNN과 같은 복잡한 딥러닝 모델이 IAQ 매개변수에 대해 종종 더 높은 예측 정확도를 달성하지만 18, 예측이 이루어진 *이유*를 이해하기 어렵게 만드는 "블랙박스"일 수 있다. 의사 결정 트리, 회귀 분석과 같은 단순한 모델은 해석 가능성은 높지만 정확도는 낮을 수 있다. 이러한 "해석 가능성 대 정확도"의 절충은 신뢰 구축 및 실행 가능한 통찰력 확보에 매우 중요하며, 특히 IAQ를 건강 결과와 연결하거나 제어 조치를 정당화할 때 더욱 그렇다. 설명 가능한 AI(Explainable AI, XAI) 방법 6이 해결책으로 부상하고 있다. 18은 IAQ를 위한 LSTM과 같은 딥러닝 모델의 예측력을 강조한다. 14는 이러한 모델의 복잡성을 언급한다. 복잡한 모델은 종종 의사 결정 과정이 덜 투명하다. IAQ 관리, 특히 초개인화 시스템의 경우, 예측을 유도하는 요인(예: 어떤 오염물질이 고위험 예측을 유발하는지)을 이해하는 것은 목표된 개입과 사용자 신뢰에 매우 중요하다. 6는 실내 오염으로 인한 건강 위험을 예측하는 모델을 해석하기 위해 LIME 및 SHAP (XAI 기술) 사용을 소개하며, 이러한 해석 가능성에 대한 필요성을 인정한다. 따라서 IAQ 응용 분야에서 복잡한 AI의 예측력과 해석 가능성에 대한 필요성 사이의 균형을 맞추는 것이 핵심 연구 방향이다.

IAQ에서 AI의 부상은 IoT 지원 센서의 확산과 본질적으로 연결되어 있다. IoT는 AI 모델이 훈련 및 실시간 운영에 필요한 지속적이고 대량의 데이터 스트림을 제공한다. 반대로 AI는 원시 IoT 데이터를 IAQ 관리를 위한 실행 가능한 인텔리전스로 변환하는 분석력을 제공한다. 이들은 상호 보완적으로 발전하고 있다. 9은 대기 오염 예측을 위한 ML 및 *IoT* 응용 프로그램을 검토한다. 14는 대기 질 예측을 위한 IoT 기반 하이브리드 프레임워크에 대해 논의한다. 11는 연구자들이 IoT 및 고급 센서를 활용하는 방법을 강조하면서 실시간 AQM 시스템을 위한 센서와 IoT 기술의 통합을 자세히 설명한다. 3은 실시간 IAQ 센서를 위한 IoT 기술 활용을 강조한다. AI 모델, 특히 딥러닝은 훈련을 위해 대규모 데이터셋이 필요하며 20, IoT 센서는 이 데이터의 주요 공급원이다. 실시간 AI 제어 3는 IoT가 촉진하는 지속적인 데이터 입력에 의존한다. 따라서 IAQ를 위한 AI의 발전은 단독으로 일어나는 것이 아니라 IoT와의 광범위한 기술 융합의 일부이다.

**표 1: IAQ 및 거주/활동 인식을 위한 AI/ML 모델 비교 분석**

| **모델 유형** | **입력 데이터 예시** | **주요 응용 분야** | **주요 성능 지표 (출처)** | **강점** | **한계/과제** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| LSTM (Long Short-Term Memory) | 실외/실내 기상 데이터, 오염물질 농도 | IAQ 지수 예측 | MSE 0.0179, MAE 0.1038 18 | 시계열 데이터 처리에 우수 | 대규모 데이터 필요, 과적합 가능성 |
| CNN (Convolutional Neural Network) | IAQ 변수(습도, 온도, 빛, CO2​), 이미지 데이터 | 거주 패턴 예측, 오염원 이미지 기반 탐지 | 특정 지표는 연구마다 상이하나, 화재/연기 탐지에서 높은 정확도(90-99%) 보고 21 | 공간적 특징 추출에 효과적 | 시간적 연속성 모델링에 RNN 등과 결합 필요 |
| ANN (Artificial Neural Network) | IAQ 변수, Wi-Fi 데이터, 환경 데이터 | 거주 패턴 예측, PM 농도 예측 | SVR 대비 테스트 단계에서 약간 더 나은 일반화 능력 17, PM 농도 예측에서 다중 선형 회귀보다 우수 15 | 비선형 관계 모델링 가능 | 훈련 데이터 품질에 민감, 블랙박스 특성 |
| SVR (Support Vector Regression) | IAQ 변수 | 거주 패턴 예측 | 훈련 단계 MAE 0.0826, MSE 0.0280 17 | 비교적 적은 데이터셋에서도 효율적, 일반화 성능 우수 | 대규모 데이터셋 처리 시 계산 비용 증가 |
| ARHMM (Autoregressive Hidden Markov Model) | PIR, CO2​, RH 센서 데이터 | 거주 패턴 추정 | 평균 추정 정확도 80.78% 8 | 관찰 변수 간 상관관계 모델링, 시간적 패턴 인식 | 상태 전이 복잡성, 특정 가정 필요 |
| Decision Trees | 다양한 활동 데이터 (향, 흡연, 요리 등) | 오염원 식별 | 오염원 식별 정확도 99.8% 6 | 해석 용이, 비선형 관계 처리 | 과적합 경향, 데이터 변화에 민감 |
| Random Forest | IAQ 매개변수, 거주자 주관적 평가 | IAQ 인식 분류 (만족도, 수면의 질) | IAQ 만족도 및 수면의 질 분류에서 최상의 성능 22 | 과적합에 강건, 높은 정확도, 특징 중요도 평가 용이 | 대규모 데이터셋에서 훈련 시간 증가 가능성 |

이 표는 다양한 AI/ML 모델이 IAQ 관련 작업에 어떻게 활용되는지, 각 모델의 특성과 성능을 요약하여 보여준다. 이를 통해 독자들은 특정 응용 분야에 적합한 모델을 선택하고, 각 모델의 강점과 한계를 이해하는 데 도움을 받을 수 있다. 특히, "AI 기술 센싱 기술의 데이터 분석 기법들의 발전"이라는 사용자 질의에 부응하여, 데이터 분석 기법의 현황과 발전 방향을 가늠하는 데 유용한 참고 자료가 될 것이다.

## **3. AI 비전 센싱: 실내 환경에 대한 새로운 시각**

### **3.1. 실내 환경 분석을 위한 AI 비전 센싱의 원리**

AI 비전 센싱은 카메라(RGB, 깊이 카메라 등)와 컴퓨터 비전 알고리즘 및 ML/DL 모델을 결합하여 실내 공간의 시각 정보를 해석하는 기술이다. 주요 작업에는 객체 감지(거주자, 가구, 잠재적 오염원 식별), 인간 자세 추정, 활동 인식, 장면 이해 등이 포함된다. 특히 딥러닝, 그중에서도 CNN(Convolutional Neural Networks)은 이미지/비디오에서 자동으로 특징을 추출할 수 있게 함으로써 기존의 수동 특징 추출 방법을 능가하며 비전 센싱 분야에 혁명을 가져왔다.21

AI 비전 센싱은 물리적 또는 화학적 특성을 직접 측정하는 환경 센서와 달리 "풍부한 맥락" 제공자로서 기능한다. 즉, PM2.5​나 CO2​를 직접 측정하지는 않지만, 이러한 매개변수의 변화를 유발하는 *원인*과 *행동*을 식별하여 선제적인 IAQ 관리를 위한 보다 전체적인 이해를 제공할 수 있다. 환경 센서는 특정 오염물질을 측정하는 반면 12, 비전 센서는 거주 여부, 요리나 흡연과 같은 활동을 감지한다.6 요리는 PM2.5​와 VOC를 생성하고, 흡연은 수많은 오염물질을 발생시키며, 거주 여부는 CO2​에 영향을 미친다. 따라서 비전 기술은 IAQ가 *변화했다*는 사실뿐만 아니라 *왜* 변화했는지에 대한 정보를 제공한다. 이러한 맥락 정보는 예측 모델(예: 관찰된 활동을 기반으로 IAQ 저하를 *발생 전*에 예측) 및 목표 지향적 개입(예: 요리가 감지될 때 주방 환기 강화)에 매우 중요하다.

스마트 빌딩에서 비전 기술의 초기 응용은 단순한 존재 감지(예: 조명 제어용)에 초점을 맞추었다. AI의 발전은 단순한 존재 여부를 넘어, 누가(잠재적으로 개인 정보 보호 장치 포함), 무엇을 하고 있는지, 그리고 그 행동이 환경에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 등 보다 미묘한 "행동 이해"로의 전환을 가능하게 하고 있다. 전통적인 동작 센서(PIR 등)는 존재를 감지하지만 8, 비전 센싱은 존재 감지뿐만 아니라 활동도 식별할 수 있다.623은 비전을 사용한 인간 활동 인식(HAR)에 대해 논의하며, 이는 특정 행동을 분류하는 것을 포함한다. 어떤 활동이 발생하는지(예: 요리 대 독서 대 운동) 이해하는 것은 IAQ(오염물질 생성, CO2​ 수준)에 다른 영향을 미친다. 이러한 더 깊은 행동 이해는 단순한 존재 기반 조정보다 더 정교하고 개인화된 IAQ 제어를 가능하게 한다.

### **3.2. 거주자 감지 및 인간 활동 인식(HAR)을 위한 시각 데이터 활용**

**거주자 감지:** 비전 시스템은 특히 동적인 환경에서 일부 전통적인 방법보다 더 높은 정확도로 거주자 수를 계산할 수 있다. CNN 기반의 종단 간 모델은 실시간 감지 및 거주자 수 변화 추정이 가능하다.25 전통적인 거주자 감지 센서의 한계점으로는 CO2​ 센서가 급격한 거주자 수 변화에 느리게 반응할 수 있다는 점이 있다.8

**인간 활동 인식(HAR):**

* AI 비전은 요리, 청소(에어로졸 분사), 흡연, 운동 등 IAQ와 관련된 활동을 식별할 수 있다.6
* **기술:** RGB 이미지/비디오 및 깊이 센서가 일반적인 입력 방식이다. 딥러닝 접근 방식에는 공간적 특징을 위한 CNN, 시간적 순서를 위한 RNN(LSTM), 어텐션 메커니즘 등이 포함된다.23
* **비전 HAR의 강점:** 풍부한 정보, 다용도성, 맥락적 이해.
* **비전 HAR의 한계:** 환경 요인(조명, 가려짐)에 대한 민감성, 개인 정보 보호 문제, 계산 비용.23 이러한 한계, 특히 개인 정보 보호 문제로 인해 HAR에는 비전 대신 관성 센서가 선호되기도 한다.26

**거주-IAQ 연관성을 위한 머신러닝:** ML 모델(LSTM, CNN, ANN, SVR)은 IAQ 변수(습도, 온도, 빛, CO2​)를 기반으로 거주 패턴을 예측하는 데 사용되며, 이는 거주가 IAQ에 미치는 영향을 강조한다.17 예측 불가능한 거주 패턴은 공간의 과도하거나 부족한 공조를 유발하여 IAQ와 쾌적성에 영향을 미칠 수 있다.16

비전 기반 거주 및 활동 데이터는 "세분성 기울기(granularity gradient)"를 제공한다. 기본 시스템은 단순한 인원수 계산이나 광범위한 활동 범주 감지를 제공할 수 있다. 반면, 고급 시스템은 거주자의 정확한 위치, 특정 미세 활동(예: "야채 다지기" 대 "튀김 요리"), 심지어 물체와의 상호 작용과 같은 더 세밀한 정보를 제공할 수 있다. 이러한 세분성 기울기는 초개인화의 잠재력에 직접적인 영향을 미친다. 거주 정보는 단순한 인원수 25일 수도 있고 위치와 같은 더 자세한 정보를 포함할 수도 있다.27 HAR은 "요리"와 같은 광범위한 범주를 식별하거나 7 잠재적으로 더 구체적인 행동을 식별할 수 있다. 인식된 활동의 세부 수준(세분성)은 IAQ 응답의 정밀도에 영향을 미친다. 예를 들어, 누군가가 "튀김 요리"(높은 입자 생성)를 하는지 "물 끓이기"(주로 증기)를 하는지 알면 보다 맞춤화된 환기 전략이 가능하다. 현재 연구 23는 인식 가능한 활동의 정확성과 범위를 개선하는 데 중점을 두고 있다. AI 비전 모델이 더욱 정교해짐에 따라 인식된 맥락의 세분성이 증가하여 보다 정제된 초개인화 IAQ를 가능하게 할 것이다.

특정 인간 활동은 뚜렷한 오염물질 배출 "특징(signatures)"(예: 배출되는 오염물질의 종류 및 양)을 가진다. AI 비전 기반 HAR은 이러한 활동을 식별함으로써 이러한 배출 특징을 실시간으로 예측하는 대리 지표 역할을 할 수 있으며, IAQ 시스템이 느린 환경 센서에 의해 완전히 등록되기 전에 오염 사건을 예측하고 완화할 수 있도록 한다. 7 (AirSense)는 요리, 흡연, 살충제 살포와 같은 오염원을 식별하며, 이는 알려진 오염물질 배출량을 가지고 있다. 요리는 PM2.5​와 VOC를 생성하고, 흡연은 복잡한 혼합물을 생성하며, 살충제는 VOC이다. 6는 향, 흡연, 요리와 같은 활동을 오염물질 효과와 연결한다. 환경 센서는 이러한 오염물질이 분산된 후에 감지한다.12 비전은 활동 시작(예: 담배에 불을 붙이거나 스토브에서 요리를 시작하는 사람)을 실내에 상당한 오염물질 농도가 형성되기 *전에* 감지할 수 있다. 인식된 활동의 일반적인 배출 프로필을 학습함으로써 AI는 선제적으로 환기 또는 공기 정화를 조정하여 보다 능동적인 IAQ 제어를 유도할 수 있다.

### **3.3. AI 기반 실내 오염원 식별 (예: 흡연, 요리, 청소용 에어로졸)**

**AirSense 시스템 예시:** PM2.5​, VOC, 온도, 습도 센서를 사용하여 오염 사건을 감지한다. 그런 다음 센서 데이터에서 특징(변화율/크기, 표준 편차, 교차 센서 비율)을 추출하고 선형 커널 기반 SVM을 사용하여 요리, 흡연, 살충제 살포와 같은 오염원을 높은 정확도(통제된 환경에서 95.8%)로 식별한다.7 이 시스템은 직접적인 비전 없이도 센서 데이터 패턴이 오염원을 식별할 수 있음을 보여주지만, 비전은 활동을 직접 관찰함으로써 이를 향상시킬 수 있다.

**오염원 식별을 위한 설명 가능한 AI:** 연구에서는 다양한 데이터(향, 흡연, 요리, 에어컨, 종이 연소)와 함께 ML 모델(의사 결정 트리, 랜덤 포레스트, 나이브 베이즈, SVM)을 사용하여 오염원을 99.8% 정확도(의사 결정 트리)로 식별하고 활동/노출을 예측(91% 정확도)한다. 해석 가능성 모델(LIME, SHAP)은 모델의 결정을 이해하는 데 도움이 된다.66는 특정 센서 데이터가 초록에 자세히 설명되어 있지 않다고 명시하지만, 활동은 오염물질 센서(PM, VOC, CO2​) 및 잠재적으로 열 또는 공기 흐름 센서의 필요성을 암시한다.

**시각적 연기 및 화재 감지:** 컴퓨터 비전 기술, 특히 CNN(YOLO, R-CNN, ResNet 등)은 심각한 IAQ 저하 및 안전 위험의 직접적인 지표인 연기와 화염을 감지하는 데 광범위하게 사용된다.21 이러한 시스템은 색상, 움직임, 모양, 질감과 같은 특징을 분석한다. 임베디드 시스템용 경량 CNN(예: 수정된 SqueezeNet)이 개발되어 화재 감지에 높은 정확도(95%)를 달성하고 있다.28

AI 기반 오염원 식별의 성공(AirSense 7와 같이 비시각적 센서를 사용하는 경우에도)은 특정 오염 발생 활동을 특징짓는 시간 경과에 따른 센서 판독값(또는 시각적 단서)의 고유한 패턴인 "사건 특징(event signatures)" 개념에 의존한다. 비전은 사건을 직접 관찰함으로써 이러한 특징을 크게 풍부하게 할 수 있다. AirSense 7는 오염원을 구별하기 위해 "센서 값의 증가 및 감소율 및 크기" 및 "교차 센서 특징"과 같은 특징을 사용한다. 이는 각 오염원이 다소 고유한 시간적-감각적 패턴을 가지고 있음을 의미한다. 예를 들어, 요리는 PM2.5​와 습도의 급격한 상승을 보일 수 있는 반면, 흡연은 습도 변화가 적으면서 VOC와 PM2.5​의 상승을 보일 수 있다. 6는 "활동을 포함하는 다양한 데이터"에서 오염원을 식별한다. 비전은 연기의 시각적 외관, 요리 행위, 담배에 불을 붙이는 사람 등 또 다른 차원을 추가한다. 시각적 단서(예: 스토브에 있는 사람을 보는 것)와 센서 데이터(예: PM2.5​ 상승)를 결합하면 어느 한 가지 방식만 사용하는 것보다 훨씬 더 강력하고 모호하지 않은 "사건 특징"을 생성하여 오탐을 줄일 수 있다.

오염물질 수준뿐만 아니라 오염 *원인*을 식별하면 보다 지능적인 "개입 우선순위 지정"이 가능하다. 예를 들어, 타는 음식에서 발생하는 연기를 감지하면 세척제에서 발생하는 VOC를 감지하는 것(예: 일반 환기 증가)보다 다른, 더 긴급한 대응(예: 경보 + 목표 환기)을 유발할 수 있다. 비전은 이러한 미묘한 구분을 하는 데 핵심적인 역할을 한다. 12는 저비용 모니터 경고가 즉각적인 위험을 위한 것이 아니라고 지적한다. 그러나 화재나 짙은 연기의 시각적 확인 21은 *즉각적인* 위험이다. 오염원을 알면 맞춤형 대응이 가능하다. 요리가 감지되면 7 주방 배기 증가가 적절하다. 금연 구역에서 흡연이 감지되면 일반 환기를 늘리는 것보다 경고가 더 적절할 수 있다. 개입의 심각성과 유형은 식별된 오염원 및 관련 위험에 맞춰 조정될 수 있다. 비전은 단순한 오염물질 농도 임계값보다 이 위험을 더 정확하게 평가하는 데 필요한 맥락적 단서(예: 화염 크기, 연기 밀도, 활동 유형)를 제공한다.

**표 2: 비전 기반 및 AI 강화 실내 오염원 식별 접근 방식 개요**

| **시스템/연구 초점** | **감지된 오염원/사건** | **주요 센서/사용 데이터** | **사용된 AI/ML 방법** | **보고된 정확도/효과** | **비전의 역할 (실제 또는 잠재적)** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| AirSense 7 | 요리, 흡연, 살충제 살포 | PM2.5​, VOC, 온도, 습도 | SVM (오염원 식별), 비모수 회귀 (예측) | 오염원 식별 정확도 95.8% (통제 환경) | 직접적인 비전 사용은 없으나, 활동의 시각적 확인으로 센서 기반 감지 강화 가능 |
| 건강 위험 평가를 위한 설명 가능한 AI 6 | 향, 흡연, 요리, 에어컨 사용, 종이 연소 | 활동 관련 "다양한 데이터" (오염물질 센서 데이터 포함 암시) | 의사 결정 트리, 랜덤 포레스트, 나이브 베이즈, SVM, LIME, SHAP | 의사 결정 트리 기반 오염원 식별 정확도 99.8% | 활동의 직접적 시각적 식별, 오염원 발생 맥락 제공 |
| 비전 기반 화재/연기 감지 21 | 일반 화재, 연기 | RGB 카메라, 열화상 카메라 | 다양한 CNN (YOLO, ResNet, SqueezeNet 등) | SqueezeNet 기반 화재 감지 정확도 95%, 기타 CNN 모델들도 90-99% 범위의 높은 정확도 보고 | 화염 및 연기의 직접적인 시각적 감지, 색상, 형태, 움직임 등 특징 분석 |

이 표는 다양한 오염원 식별 접근 방식을 통합하여 보여주며, 각기 다른 센서와 AI 기술 조합이 어떻게 활용되는지, 그리고 달성된 성능을 제시한다. 특히, 보고서의 핵심 주제와 직접적으로 연결되는 각 접근 방식에서 비전의 실제적 또는 잠재적 역할을 강조하여, AI 기반 오염원 식별 기술의 현황을 명확하게 파악하는 데 기여한다.

## **4. 시너지 센싱: 비전과 환경 데이터의 통합**

### **4.1. 전체론적 IAQ 평가를 위한 다중 모드 센서 융합 기술**

센서 융합은 다양한 여러 센서(예: 비전, CO2​, 온도, 습도, PIR, 음향 센서 등)의 데이터를 결합하여 단일 센서만으로는 달성할 수 없는 더 정확하고 신뢰할 수 있으며 포괄적인 환경 인식을 달성하는 기술이다.10

**융합 수준:**

* **저수준 (데이터 수준) 융합:** 원시 센서 데이터를 결합하여(예: 평균화, 칼만 필터링) 노이즈를 줄이거나 강인성을 높인다.10 예: 여러 오염물질, 온도, 습도 센서의 원시 데이터를 융합하여 오염원을 식별하고 변화를 예측한다.10
* **중간 수준 (특징 수준) 융합:** 각 센서 데이터에서 특징을 추출한 다음 이러한 특징 집합을 융합한다(예: 특징 연결, 선택/분해 방법 적용).10 예: 강인한 얼굴 인식을 위해 가시광선 카메라와 적외선 카메라의 얼굴 특징을 결합한다.10 IAQ에서는 활동의 시각적 특징과 CO2​ 센서의 시간적 패턴을 융합하는 것이 될 수 있다.
* **고수준 (결정 수준) 융합:** 각 센서/모델이 독립적인 결정을 내리고 이러한 결정을 결합한다(예: 투표, 베이즈 추론, 가중 결정).10 예: 자율 주행 자동차가 여러 센서 시스템의 분류 결과를 융합한다.10 IAQ에서는 비전 기반 활동 인식기의 결정과 CO2​ 기반 거주 추정기의 결정을 융합할 수 있다.

**IAQ/거주 관련 특정 융합 예시:**

* 향상된 거주자 수 감지를 위해 비디오 데이터와 CO2​ 농도를 결합하며, 데이터는 상호 보정된다.30 예를 들어, 야간(안정적인 거주)의 CO2​ 수준은 주간의 비디오 기반 계수를 보정하는 데 사용될 수 있다.25
* Wi-Fi 장치 수, CO2​, PIR, 플러그 부하, 조명 부하 데이터를 다중 선형 회귀 또는 ANN을 사용하여 융합하여 거주를 추정한다.25
* 환경 매개변수(온도, 습도, CO2​, 빛)를 HMM과 융합하여 거주를 추정한다.25

**수학적 프레임워크:** 다중 센서 확률적 능동 감지, 베이즈 추론, 정보 융합은 스마트 환경에 적용 가능한 일반적인 수학적 프레임워크를 제공하여, 불확실성 하에서의 자기 지도 학습 및 강인한 추정을 가능하게 한다.29

다중 모드 센서 융합은 하나의 센서 유형의 강점이 다른 센서 유형의 약점을 보완하는 강력한 "보상 메커니즘"으로 작용한다. 이는 보다 강인하고 결함 허용적인 전체 감지 시스템으로 이어지며, 신뢰할 수 있는 IAQ 관리에 매우 중요하다. 12는 저비용 센서의 한계(정확도, 제한된 오염물질 감지)를 강조한다. 비전 센서는 개인 정보 보호, 조명 의존성, 가려짐과 같은 한계가 있다.23 CO2​ 센서는 거주 변화에 느리게 반응할 수 있다.810은 데이터 융합의 목표 중 하나가 "센서 및 알고리즘 오류에 대한 강인성 향상, 더 나은 노이즈 억제, 추정 정확도 향상"이라고 명시한다. 비전(활동 맥락에 좋음)을 CO2​(전체적인 거주 추세에는 좋지만 느림) 및 PM2.5​(직접적인 오염물질 측정)와 융합함으로써 시스템은 보다 정확하고 시기적절한 그림을 얻을 수 있다. 예를 들어, 비전은 요리 시작을 감지하고, CO2​는 거주 증가를 확인하며, PM2.5​는 직접적인 영향을 측정할 수 있다. 하나의 센서가 일시적으로 고장 나거나 비정상적인 판독값을 제공하더라도 다른 센서의 데이터가 시스템 안정성을 유지하는 데 도움이 될 수 있다.

저수준 융합이 주로 데이터 품질을 다루는 반면, 중간 및 고수준 융합 기술은 원시 센서 데이터를 의미 있는 해석과 IAQ 제어를 위한 실행 가능한 결정으로 변환하는 "의미론적 격차(semantic gap)"를 메우는 데 중요한 역할을 한다. 원시 센서 데이터(예: 픽셀 값, CO2​ ppm)는 저수준이며 "사람이 요리하고 있다"거나 "이 특정 개인에게 공기 질이 나쁘다"로 직접 변환되지 않는다. 중간 수준 융합은 "스토브 위 화재"와 같은 사건을 추론하기 위해 *특징*("길쭉한 모양과 깜빡이는 움직임"과 같은 시각적 특징 + "PM2.5​ 판독값 급증")을 결합한다.10 고수준 융합은 "요리 활동 감지됨"(비전 시스템), "3명 거주 중"(CO2​ 시스템), "PM2.5​ 수준 보통"( PM2.5​ 시스템)과 같은 *결정* 또는 *분류*를 결합하여 "요리 활동 중인 3명의 거주자를 위해 주방 환기 목표 가동"과 같은 상위 수준 결정을 내린다.10 원시 데이터에서 의미론적 이해로 추상화하는 이 과정은 지능형 IAQ 시스템이 단순한 임계값에 반응하는 대신 맥락에 적합한 제어 조치를 취하는 데 필수적이다.

### **4.2. 고급 데이터 분석: 시각적 단서와 공기질 역학 간의 상관관계 규명**

단순한 융합을 넘어, 융합된 데이터셋에 고급 분석(ML, 통계 모델링)을 적용하여 시각적 단서(거주, 활동, 오염원 사건)와 IAQ 매개변수(오염물질 농도, 분포, 지속성) 간의 복잡하고 명확하지 않은 상관관계를 밝혀낸다. 이는 특정 시각적으로 식별된 활동이나 거주 패턴이 시간 경과에 따라 IAQ의 여러 측면에 정량적으로 어떤 영향을 미치는지 학습하도록 모델을 훈련하는 것을 포함한다. 예를 들어, 비전을 통해 관찰된 다양한 활동 수준에 대한 거주자당 CO2​ 증가율을 모델링하는 것이다. 환경 센서에만 의존하는 것보다 더 긴 리드 타임과 정확도로 임박한 IAQ 변화를 예측하는 시각적 트리거를 사용하는 예측 모델을 개발할 수 있다.

시각적 단서(예: 방에 들어오는 사람 수, 요리 시작)와 후속 IAQ 변화를 연관시킴으로써 고급 분석은 "선제적" IAQ 관리를 가능하게 한다. 시스템은 오염물질 급증이나 공기 질 저하가 완전히 나타나기 *전에* 이를 예측하고, 임계값이 초과된 후 반응하는 대신 선제적으로 제어를 조정할 수 있다. 30은 비디오 및 CO2​에서 감지된 거주자 수를 기반으로 한 "예측 제어"에 대해 논의하며, 이는 더 빠른 응답과 에너지 절약으로 이어진다. 분석을 통해 "X명의 사람이 Y 활동을 수행(시각적으로 감지됨)"과 "T분 이내에 PM2.5​ Z 증가" 사이에 강력한 상관관계가 설정되면, 시스템은 X와 Y가 감지되는 즉시 환기를 시작할 수 있다. 이는 오염물질 생성 및 분산으로 인한 지연이 수반되는 PM2.5​ 센서가 Z 증가를 등록할 때까지 기다리는 것보다 더 능동적이다. 이러한 선제적 능력은 지속적으로 최적의 IAQ를 유지하고 대규모 수정 조치를 피함으로써 에너지 효율성을 향상시키는 데 핵심이다.

융합된 비전 및 환경 데이터에 대한 고급 분석은 환경 센서 데이터만으로는 명확하지 않을 수 있는 IAQ의 "숨겨진" 또는 미묘한 조절 요인을 밝혀내는 데 도움이 될 수 있다. 예를 들어, 활동이 수행되는 *방식*(예: 격렬한 청소 대 가벼운 먼지떨이, 뚜껑 덮은 요리 대 덮지 않은 요리)이나 창문/문과의 상호 작용(시각적으로 관찰됨)은 오염물질 생성 및 분산에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 환경 센서는 *결과*(예: 오염물질 수준)를 측정한다. 비전은 그 결과로 이어지는 *과정*에 대한 맥락을 제공한다. 요리를 예로 들면, 뚜껑 없이 베이컨을 튀기면 뚜껑을 덮고 수프를 끓이는 것보다 더 많은 공기 중 유지 입자가 생성된다. 둘 다 "요리"이지만 IAQ에 미치는 영향은 다르다. 비전은 잠재적으로 세분화된 활동 인식을 통해 이를 구별할 수 있다. 마찬가지로, 에어로졸을 포함하는 청소 활동 중에 창문이 열려 있는지 닫혀 있는지 관찰하면 VOC 분산 예측에 중요한 맥락을 제공할 것이다. 분석은 이러한 미묘한 관계를 학습하여 보다 정확한 IAQ 모델과 보다 정밀한 제어 전략으로 이어질 수 있다.

## **5. 초개인화 IAQ: 개인에게 맞춘 환경 조성**

### **5.1. 초개인화 환경 제어를 위한 개념적 프레임워크**

초개인화 의학 개념은 생물학적, 생활 방식, 환경적 영향을 포함한 개인의 포괄적인 데이터를 기반으로 전략을 맞춤화하는 강력한 유사점을 제공한다.4 IAQ의 경우, 이는 개인의 민감성, 선호도, 실시간 활동을 고려하는 것을 의미한다. 공기 질, 기후, 오염물질 노출과 같은 환경 요인은 동적 건강 계획의 핵심 입력이며 4, 이는 IAQ 관리에 직접 적용된다. IoT, AGI(인공 일반 지능), 고급 연결성(예: 6G)과 같은 기술은 방대한 데이터셋을 처리하고 초개인화 건강, 나아가 IAQ에 대한 진화하는 권장 사항을 제공하는 가능성을 제시한다.4 설명 가능한 AI는 오염원을 식별하고 활동/노출을 높은 정확도로 예측하여 실내 공기 오염으로 인한 개인화된 건강 위험을 평가하고, 목표 지향적인 저감 전략을 가능하게 하는 데 사용될 수 있다.6

초개인화 IAQ는 정적 설정값을 넘어 각 거주자에 대한 "동적 개인 기준선"을 설정하는 방향으로 나아간다. 이 기준선은 IAQ 조건과 관련된 일반적인 생리적 반응, 활동 패턴, 보고된 쾌적도/건강 피드백을 고려하여, 일반적인 표준이 아닌 개인의 웰빙을 위해 시스템이 최적화되도록 한다. 초개인화는 "고유한 생물학적, 유전적, 생활 방식 및 환경적 영향"을 고려한다.422는 IAQ 매개변수로부터 거주자의 실내 환경 및 수면의 질에 대한 *인식*을 분류하기 위해 ML 모델을 평가하며, 이는 주관적인 요인이 중요함을 나타낸다. 천식 환자의 "최적" PM2.5​ 수준은 건강한 개인의 수준과 다르다. 매운 음식을 자주 요리하는 사람은 특정 VOC 수준이나 환기율에 대해 다른 내성이나 선호도를 가질 수 있다. 초개인화 시스템은 명시적인 피드백을 통하거나 IAQ 데이터를 생체 데이터(사용 가능하고 동의한 경우) 또는 자가 보고 증상과 연관시켜 이러한 개인의 민감성과 선호도를 시간이 지남에 따라 학습한다. 이는 활동, 시간, 심지어 건강 상태에 따라 변할 수 있는 개인화된 목표 범위를 생성하며, 건물 전체의 고정된 표준과는 다르다.

효과적이고 윤리적인 초개인화 IAQ는 사용자가 시스템이 특정 조정을 하는 *이유*를 이해하고 그 행동을 개선하기 위한 입력을 제공할 수 있는 강력한 "피드백 루프"를 필요로 한다. 이는 개인화된 환경 제어를 다룰 때 중요한 자율성과 신뢰 문제를 해결한다. 15 (SITA 모델)은 사용자에게 제어권을 부여하는 맞춤형 개인 정보 설정을 강조하며, 이 원칙은 제어 선호도에도 적용된다. 31은 스마트 홈에서의 자율성 및 제어에 대한 윤리적 우려를 제기한다. AI 시스템이 인지된 활동을 기반으로 환기를 변경하는 경우, 사용자는 그 근거(예: "요리 활동 감지로 인해 주방 환기 증가")를 이해해야 한다. 사용자는 또한 이러한 자동화된 조치를 무시하거나 조정할 수 있어야 하며, 시스템이 이러한 선호도로부터 학습하도록 해야 한다(예: "끓일 때는 환기를 덜 선호함"). 이 피드백 루프는 시스템이 진정으로 "개인화"되고 불투명한 알고리즘에 의해 제어된다는 느낌을 피하며 사용자 수용을 보장하는 데 필수적이다.

### **5.2. 동적 IAQ 조정: 실시간 거주자 행동, 선호도, 생리적 요구에 대응하는 AI**

AI 기반 시스템은 센서(비전 포함)의 실시간 데이터와 학습된 패턴을 기반으로 HVAC 작동(난방, 냉방, 환기, 여과)을 동적으로 조정한다.3

* **거주 기반 제어:** 낮은 거주율 동안 난방/냉방을 낮추어 에너지를 절약한다.33 피크 시간 동안 CO2​ 급증에 따라 환기를 조정한다.3
* **활동 기반 제어:** AI는 감지된 활동(예: 요리, 흡연)을 기반으로 IAQ 변화를 예측하고 선제적으로 환기 또는 여과를 조정할 수 있다 [7 (개념적으로 AirSense는 제안을 제공)].
* **선호도 학습:** 시스템은 시간 경과에 따라 사용자 선호도를 학습하고 그에 따라 공조를 조절할 수 있다.33 ML 모델은 거주자의 IAQ 인식 및 만족도를 분류할 수 있으며 22, 이는 선호도 학습에 입력될 수 있다.
* **디지털 트윈(DTs):** AI 기반 DT는 과거 및 실시간 데이터(거주 정보 포함)를 통합하여 건물 성능을 시뮬레이션, 분석 및 예측하고, IEQ 및 에너지 효율성을 위한 최적의 조정을 가능하게 한다.34 미래 조건을 예측하고 온도, 조명, 환기 변경을 제안/구현할 수 있다.
* **개인 정보 보호 개인화:** SITA 모델과 같은 플랫폼은 엣지 컴퓨팅, 연합 학습, 맞춤형 개인 정보 설정(공간, 신원, 시간, 활동)을 사용하여 민감한 정보를 보호하면서 개인화된 IAQ를 가능하게 한다.15

AI 기반 동적 IAQ 조정은 "예측적 쾌적함(predictive comfort)" 패러다임으로 나아가고 있다. 단순히 설정값을 유지하는 대신, 시스템은 개인의 열 및 공기 질 선호도를 학습하고 거주자가 필요성을 인지하기 전에 선제적으로 환경을 조정하여 불편함을 예측하고 예방하는 것을 목표로 한다. 33는 AI가 "최적의 쾌적함"을 위해 사용자 선호도를 학습하고 적응한다고 언급한다. 34은 DT의 AI가 "미래 조건"을 예측하고 "최적의 조정"을 할 수 있다고 지적한다. 시스템이 특정 사용자가 비활동(시각적 또는 센서 감지) Y 시간 후 온도가 X도 아래로 떨어지면 춥다고 느끼는 것을 학습하면, 사용자가 실제로 춥다고 느끼고 불평하거나 수동으로 온도 조절기를 조정하기 *전에* 난방을 약간 높이기 시작할 수 있다. 이는 온도뿐만 아니라 습도, 공기 이동, 활동 수준, 심지어 시간대와 같은 요소를 통합하는 개인 쾌적함 모델의 정교한 학습을 필요로 한다.

초개인화가 모든 개인의 변덕에 부응한다면 에너지 집약적으로 보일 수 있지만, 지능적으로 구현된 AI 기반 동적 조정(예: 거주, 활동, 정확한 요구 고려)은 종종 "부가적인 이익"으로 상당한 에너지 절약을 가져온다. 이는 비어 있는 공간을 과도하게 공조하거나 특정 활동이나 거주자 부하에 의해 필요하지 않을 때 불필요한 수준의 환기를 제공하는 것을 피하기 때문이다. 33는 AI가 낮은 거주율에 맞춰 조정함으로써 에너지 소비를 최적화한다고 명시적으로 언급하며, 한 체인점은 에너지 소비를 25% 절감했다. 3은 CO2​가 급증하면 환기를 조정한다고 언급하며, 이는 항상 최대 상태가 아님을 의미한다. 34은 AI가 에너지 소비를 늘리지 않고 IEQ를 최적화하여 쾌적함과 에너지 효율성의 균형을 맞춘다고 강조한다. 30은 거주자 수를 기반으로 한 예측 제어가 OAHU 및 총 HVAC 에너지를 크게 절약했음을 보여주었다. 개인화는 자원이 필요할 때 필요한 곳에만 사용되도록 보장한다. 예를 들어, 전체 사무실을 높은 비율로 환기하는 대신, 점유 구역이나 오염 발생 활동이 일어나는 지역에 집중적인 환기를 제공할 수 있다. 이러한 목표 지향적 접근 방식은 본질적으로 더 효율적이다.

## **6. 연구와 현실의 간극 해소: 시스템 프로토타입 및 응용**

### **6.1. 대표 시스템: AirSense, Advantech WebAccess+IAQ, SITA 개인 정보 보호 플랫폼**

* **AirSense:** 오염 사건을 자동으로 감지하고, 오염원(요리, 흡연, 살충제)을 식별하며, IAQ를 예측하고, 실행 가능한 제안을 제공하는 지능형 가정 기반 IAQ 시스템이다. PM2.5​, VOC, 온도, 습도 센서와 ML(오염원 식별용 SVM, 예측용 비모수 회귀)을 사용한다. 통제된 환경에서 95.8%의 오염원 식별 정확도를 달성했다.7
  + *의의:* 일반적인 환경 센서와 ML을 사용하여 오염원 식별 및 예측의 실현 가능성을 보여주며, 맥락 향상을 위한 비전 통합의 길을 열었다.
* **Advantech WebAccess+IAQ:** 센서에서 수집된 공기 정보를 시각화하기 위해 소프트웨어(WebAccess)와 멀티미디어 관리(WebAccess/IMM)를 결합한 IoT 시스템이다. 자동 IAQ 관리 및 데이터 분석/보고서 제공이 가능하다.35
  + *의의:* IAQ 데이터 수집, 시각화, 기본 관리에 대한 상업적 접근 방식을 대표하며, 이 분야에서 산업계의 움직임을 보여준다.
* **SITA 개인 정보 보호 플랫폼:** 공간, 신원, 시간, 활동(SITA) 모델을 통합하여 맞춤형 개인 정보 보호를 제공하는 AI 기반 IAQ 관리 플랫폼이다. IoT, 엣지 컴퓨팅, 연합 학습을 사용하여 강력하고 확장 가능하며 개인 정보를 존중하는 IAQ 관리를 제공한다.15
  + *의의:* AI 기반(특히 비전 기반) IAQ 시스템의 중요한 개인 정보 보호 문제를 직접적으로 해결하며, 윤리적 배치를 위한 구체적인 프레임워크를 제공한다.

현재 IAQ 시스템 및 프로토타입은 스펙트럼 상에 존재한다. Advantech WebAccess+IAQ 35와 같이 일부는 "정보 제공" 측면(모니터링, 시각화, 보고서)에 더 중점을 둔다. AirSense 7(제안 제공) 및 SITA 플랫폼 15(능동적 관리 암시)과 같은 다른 시스템은 보다 "자율적 제어" 또는 의사 결정 지원을 목표로 한다. 추세는 AI에 의해 주도되는 더 큰 자율성으로 향하고 있다. Advantech WebAccess+IAQ 35는 공기 정보 시각화 및 분석 보고서를 강조한다. "자동 실내 공기질 관리가 쉽게 달성될 수 있다"고 언급되지만, 주요 설명은 모니터링 및 데이터 제공에 치우쳐 있다. AirSense 7는 "실행 가능한 제안을 제공"하며, 이는 제어를 향한 단계이지만 여전히 조치를 위해 사람이 개입한다. SITA 플랫폼 15은 AI 통합을 통해 보다 직접적인 제어 기능을 암시하는 "효과적인 IAQ 관리를 보장"하는 "IAQ 관리 플랫폼"으로 설명된다. 진화는 수동적 모니터링에서 데이터 기반 제안으로, 그리고 마지막으로 최적화를 위한 AI 기반 자율적 또는 반자율적 제어로 이어진다. 비전 센싱은 스펙트럼의 자율적 끝에서 기능을 더욱 향상시킬 것이다.

Advantech WebAccess+IAQ 및 SITA 모델과 같은 시스템은 IAQ 관리의 "플랫폼화"를 시사한다. 이는 단순한 센서 모음이 아니라 하드웨어, 소프트웨어, 데이터 분석, 잠재적으로 AI를 결합하여 IAQ를 위한 보다 전체적이고 확장 가능한 솔루션을 제공하는 통합 플랫폼이다. 35는 WebAccess+IAQ를 "공기 정보 시각화를 위한 독점 IoT 소프트웨어를 결합한 시스템"으로 설명하며, "강력한 데이터베이스 관리 기능"도 언급한다. 15은 IoT 센서 네트워크, 엣지 컴퓨팅, 개인 정보 보호 기술을 통합하는 "새로운 AI 기반 IAQ 관리 플랫폼"을 소개한다. 이는 단순한 개별 센서 이상이며, 데이터를 수집, 처리, 분석하고 이에 따라 조치하도록 설계된 생태계이다. 이러한 플랫폼 접근 방식은 다중 모드 센서 융합, AI 모델 배포, 데이터 저장, 사용자 인터페이스, 다른 건물 시스템과의 통합과 같은 복잡성을 처리하는 데 필수적이며, 이는 모두 고급 개인화 IAQ에 필요하다.

### **6.2. 원활한 통합: AI-IAQ 시스템과 건물 관리 시스템(BMS) 및 HVAC 제어 연결**

효과적인 IAQ 최적화를 위해서는 AI 기반 시스템이 기존 건물 인프라, 주로 BMS 및 HVAC 시스템과 통합되어야 한다.3 AI에 의해 처리된 실시간 IAQ 센서 데이터는 BMS에 정보를 제공하여 HVAC를 자동으로 조정하도록 할 수 있다(예: PM이 한도를 초과하면 공기 교환 증가, 습도가 상승하면 제습기 활성화).3 AI 기반 디지털 트윈은 BMS와 통합되어 예측 모델링을 제공하고 실시간으로 에너지 성능 및 IEQ를 최적화할 수 있다.34 AI는 환기 및 여과의 동적 제어를 통해 에너지 효율성, 예측 유지보수, 적응형 공조, 개선된 IAQ를 위해 HVAC 설계 및 성능을 향상시킬 수 있다.33 기존 HVAC에 센서와 IoT 장치를 개조하는 것이 일반적인 시작점이다.33 이미지 전송을 포함한 인터넷 기반 HVAC 모니터링 및 제어는 원격 관리 및 통합을 가능하게 한다 [40 (주제 언급, 세부 정보는 스니펫에 없음)].

통합 시스템에서 BMS는 건물의 "중추 신경계" 역할을 하며 제어 조치를 실행한다. AI-IAQ 시스템(특히 비전 포함)은 환경을 인식하고 복잡한 데이터를 해석하며 BMS에 미묘한 명령이나 권장 사항을 제공하는 "지능형 감각 피질"로 기능한다. 이러한 시너지는 고급 건물 자동화의 핵심이다. BMS는 전통적으로 규칙 기반이며 HVAC, 조명 등을 관리한다.3 AI-IAQ 시스템은 IAQ 상태와 거주자 요구를 이해하기 위해 데이터를 수집하고 분석한다.3 AI의 통찰력이 실행 가능하려면 변화를 일으킬 수 있는 시스템(HVAC)에 전달되어야 한다. AI 시스템은 일반적으로 BMS를 대체하는 것이 아니라 보다 정교한 입력과 제어 논리를 제공하여 지능을 향상시킨다. 예를 들어, BMS가 단순히 CO2​ 센서가 임계값을 초과하는 것에 반응하는 대신, AI-IAQ 시스템은 BMS에 "두 명의 거주자에 의한 요리 활동 감지로 인해 A 구역의 환기를 다음 30분 동안 20% 증가시키십시오."라고 지시할 수 있다.

원활한 통합을 위한 중요한 실제적 장애물은 다양한 AI-IAQ 솔루션, 여러 공급업체의 BMS 플랫폼, 다양한 HVAC 장비 간의 보편적인 "상호 운용성 표준"의 부재이다. 독점 프로토콜과 데이터 형식은 플러그 앤 플레이 통합을 방해할 수 있다. 36는 일반적으로 AI 배포의 과제로 오래된 API와 충돌하는 데이터 형식을 가진 레거시 시스템을 언급하며, 이는 BMS 통합에도 적용된다. BMS 및 HVAC 시스템은 종종 특정 통신 프로토콜(예: BACnet, Modbus)을 사용한다. 특히 스타트업이나 연구 프로젝트의 새로운 AI-IAQ 시스템은 다른 통신 방법(예: IoT용 MQTT, CoAP)을 사용할 수 있다. AI-IAQ 시스템이 특정 BMS/HVAC 설정과 효과적으로 "통신"하고 제어할 수 있도록 보장하려면 신중한 엔지니어링과 종종 맞춤형 통합 작업이 필요하며, 이는 비용과 복잡성을 증가시킬 수 있다. IAQ 데이터 교환 및 제어 명령을 위한 개방형 표준 및 API 개발은 더 광범위한 채택을 크게 촉진할 것이다.

## **7. 미개척 분야 탐색: 과제와 미래 방향**

### **7.1. 기술적 장애물: 정확성, 확장성, 비용 효율성, 견고한 데이터 처리 보장**

* **정확성 및 신뢰성:** 저비용 센서는 정확도, 정밀도, 수명이 제한적일 수 있다.9 AI 모델 정확도는 데이터 부족 및 맥락 특화 특징 부족의 영향을 받을 수 있다.9 비전 시스템은 조명, 가려짐의 영향을 받는다.20
* **확장성:** 다양한 요구 사항을 가진 여러 시설에 걸쳐 AI 비전 시스템을 확장하는 것은 복잡하고 비용이 많이 들 수 있다.20 사용자 요구가 증가함에 따라 에이전트 AI 확장성 제한이 발생한다.36
* **비용:** 전통적인 비전 시스템은 상당한 초기 투자(하드웨어, 클라우드 저장소, 처리)가 필요하다.20 AI 모델 훈련 비용이 증가하고 있다.36 AI 시스템 유지보수 비용이 상당할 수 있다.36
* **데이터 처리 및 관리:**
  + **데이터 부족/가용성:** 비전 AI 훈련을 위한 고품질 데이터셋이 제한적이거나 사용 불가능하다.14
  + **데이터 품질:** 낮은 데이터 품질은 일관성 없는 결과로 이어진다.36
  + **계산 요구 사항:** AI 모델은 고성능 GPU/TPU와 확장 가능한 클라우드 서비스가 필요하다.14
  + **통합 복잡성:** 오래된 API, 데이터 형식으로 인해 AI 비전을 레거시 시스템과 통합하는 것이 어려울 수 있다.20
* **센서 설계 대 IoT 통합 격차:** 복잡한 센서 설계 연구와 이러한 센서를 응집력 있는 IoT 솔루션으로 실질적으로 통합하는 것 사이에 종종 단절이 존재한다.11

특히 비전을 위한 고급 딥러닝 모델은 견고한 훈련을 위해 방대하고 다양하며 레이블이 지정된 데이터가 필요한 큰 "데이터 식욕"을 가지고 있다. 그러나 특정 실내 환경 및 활동에 대한 이러한 포괄적인 데이터셋("데이터 부족")을 확보하는 것은 주요 병목 현상으로, 매우 정확하고 적응 가능한 AI-IAQ 시스템의 광범위한 배포를 방해한다. 20은 "전통적인 컴퓨터 비전 시스템은 훈련 및 검증을 위해 크고 고품질의 데이터셋이 필요합니다. 그러나 이러한 데이터셋을 얻는 것은 결코 쉽지 않습니다."라고 명확하게 명시한다. 14는 대기 질 예측에서 ML/DL의 주요 과제로 "데이터 부족"을 식별한다. 딥러닝 모델은 데이터에서 복잡한 패턴을 학습하며, 데이터가 불충분하거나 다양하지 않으면 새로운 환경에서 일반화 및 성능이 저하된다.9 다양한 실내 설정, 거주자 행동, 오염 사건에 대한 대규모 레이블 데이터셋을 만드는 것은 시간과 비용이 많이 든다. 모델 요구와 데이터 가용성 간의 이러한 불일치는 IAQ 응용 프로그램을 위한 전이 학습, 소수샷 학습, 데이터 증강, 합성 데이터 생성과 같은 기술에 대한 연구를 필요로 한다.

IAQ를 위한 AI 비전 배포에는 중요한 "엣지 대 클라우드" 균형 조정이 필요하다. 엣지(카메라 또는 근처)에서 데이터를 처리하면 대기 시간을 줄이고 대역폭을 절약하며 개인 정보를 향상시킬 수 있지만, 엣지 장치는 계산 능력이 제한적이다. 클라우드 처리는 더 많은 전력을 제공하지만 대기 시간, 대역폭 비용, 민감한 시각 데이터에 대한 더 큰 개인 정보/보안 위험을 초래한다. 15은 SITA 플랫폼에서 개인 정보 위험을 최소화하기 위해 로컬 데이터 처리를 위한 엣지 컴퓨팅을 제안한다. 20은 전통적인 비전 시스템을 위한 클라우드 저장소 및 처리 인프라 비용을 언급한다. 실시간 IAQ 제어에는 낮은 대기 시간이 필요하다. 비전 시스템이 빠르게 발생하는 위험(예: 연기)을 감지하면 응답이 빨라야 한다. 분석을 위해 고해상도 비디오를 클라우드로 지속적으로 스트리밍하는 것은 대역폭 집약적이고 비용이 많이 든다. 복잡한 AI 모델은 일반적인 엣지 프로세서의 기능을 초과할 수 있다.36 따라서 종종 하이브리드 접근 방식이 고려된다: 엣지에서의 경량 모델 또는 전처리, 필요하고 개인 정보 제약 조건이 허용하는 경우 클라우드로 더 집중적인 분석 오프로드. SITA 모델은 "적응형 오프로딩 전략"을 언급한다.15

### **7.2. 윤리적 필수 사항: 비전 기반 모니터링에서의 개인 정보 보호, 데이터 보안, 알고리즘 공정성 해결**

* **개인 정보 보호:** AI 기반 스마트 홈 기술, 특히 감지(이미지, 얼굴, 음성, 제스처)를 위해 카메라와 마이크를 사용하는 기술은 집중적인 데이터 캡처와 유비쿼터스 감시 가능성으로 인해 심각한 개인 정보 보호 문제를 야기한다.15 이는 비전 기반 IAQ의 주요 관심사이다.
* **데이터 보안:** 이러한 시스템에서 수집된 방대한 양의 민감한 개인 데이터를 무단 액세스 및 침해로부터 보호하는 것이 중요하다.31
* **편향 및 차별:** AI 알고리즘은 대표적이지 않은 데이터로 훈련될 경우 기존 편향을 영속시키거나 증폭시켜, 다른 개인이나 그룹에 대한 IAQ 관리 방식에서 불공정하거나 차별적인 결과를 초래할 수 있다.31
* **자율성 및 통제:** AI 시스템이 투명성이나 사용자 통제 없이 환경에 대한 결정을 내리면 사용자는 자율성 상실을 느낄 수 있다.31
* **투명성 및 설명 가능성:** AI 시스템이 결정을 내리는 방식에 대한 이해 부족은 신뢰를 약화시킬 수 있다.32 설명 가능한 AI(XAI)가 필요하다.
* **완화 전략:**
  + **설계 기반 개인 정보 보호(Privacy-by-Design):** 처음부터 개인 정보 보호를 통합한다(예: SITA 모델 15). 가이드라인에는 설계 기반 개인 정보 보호, 알고리즘 의사 결정의 공정성, 투명성 및 설명 가능성, 책임성, 인간 자율성이 포함된다.32
  + **엣지 컴퓨팅 및 연합 학습:** 데이터를 로컬에서 처리하고 원시 데이터를 중앙 집중화하지 않고 모델을 훈련하면 개인 정보 위험을 최소화할 수 있다.15
  + **데이터 최소화, 암호화, 접근 통제:** 표준 보안 프로토콜.36
  + **사용자 동의 및 통제:** 맞춤형 개인 정보 설정 및 데이터 사용에 대한 명확한 정보.15

데이터가 안전하게 처리되더라도, IAQ 목적으로 지속적인 시각적 모니터링을 한다는 사실 자체만으로도 거주자에게 "위축 효과(chilling effect)"를 미쳐, 인지된 판단을 피하거나 단순히 감시당하는 것에 대한 불편함 때문에 자연스러운 행동을 바꾸게 할 수 있다. 이는 역설적으로 개인화를 위한 덜 autént한 데이터로 이어질 수 있다. 31은 "유비쿼터스 감시"와 모니터링이 "일상 생활 침해"처럼 느껴질 수 있음을 언급한다. 거주자가 자신의 활동(예: 간식 빈도, 몰래 흡연 여부, 요리가 얼마나 "지저분한지")이 시각적으로 추적되고 있다는 것을 알면 의식적으로 또는 무의식적으로 이러한 행동을 바꿀 수 있다. 이렇게 변경된 행동은 실제 선호도나 요구를 반영하지 않을 수 있으며, AI가 "인공적인" 페르소나에 맞게 개인화하도록 유도할 수 있다. 이는 기술적인 개인 정보 보호 솔루션뿐만 아니라 이러한 기술의 심리적 영향에 대한 신중한 고려와 무엇을 왜 모니터링하는지에 대한 투명한 의사소통의 심오한 필요성을 강조한다.

웰빙을 목표로 하지만, 초개인화 AI-IAQ 시스템은 AI가 학습된 모델을 기반으로 거주자의 즉각적인 욕구나 인지된 쾌적함을 무시할 수 있는 결정을 내리는 "알고리즘적 가부장주의(algorithmic paternalism)"의 위험을 안고 있으며, 강력한 사용자 제어 및 투명성 없이 구현될 경우 사용자 주체성을 감소시킬 수 있다. 31은 사용자 자율성 및 통제에 대한 우려를 제기한다. AI는 장기적인 위험 모델을 기반으로 특정 환기 수준이 거주자에게 "더 건강하다"고 결정할 수 있으며, 거주자가 그 수준을 약간 불편하게(예: 너무 외풍이 세거나 시끄러움) 느끼더라도 그렇게 할 수 있다. 시스템이 명확한 설명이나 무시 옵션 없이 사용자의 표현된 선호도보다 AI의 "최적" 솔루션을 우선시하면 가부장적이 된다. 이는 비전이 AI가 "건강에 해롭다"고 간주하는 활동(예: 흡연)을 감지하고 사용자가 원하지 않을 수 있는 IAQ 응답(예: 방을 춥게 만드는 매우 공격적인 환기)을 유발할 때 특히 관련이 있다. 건강 최적화와 개인의 자율성 및 쾌적함 선호도 사이의 균형을 맞추는 것은 섬세한 윤리적 과제이다.

**표 3: AI 비전 기반 IAQ 시스템의 주요 과제 및 완화 전략**

| **과제 범주** | **특정 과제** | **설명** | **잠재적 완화 전략 (해당 시 출처)** |
| --- | --- | --- | --- |
| **기술적** | 센서 부정확성 | 저비용 센서의 정확도 및 신뢰성 문제 9 | 센서 융합 10, 고급 보정, 고품질 센서 사용 |
|  | 모델 일반화 | 다양한 환경 및 조건에 대한 AI 모델의 적응성 부족 14 | 전이 학습, 소수샷 학습, 데이터 증강, 다양한 데이터셋 구축 |
|  | 높은 계산/배포 비용 | 하드웨어, 클라우드, AI 모델 훈련 및 유지보수 비용 20 | 엣지 컴퓨팅 15, 경량화 모델 개발, 최적화된 알고리즘 |
|  | 데이터 부족/품질 | 고품질 훈련 데이터셋 부족 및 데이터 품질 저하 문제 20 | 합성 데이터 생성, 데이터 정제 프로토콜, 공개 데이터셋 공유 |
|  | 통합 복잡성 | 레거시 시스템과의 호환성 및 표준 부재 20 | 개방형 표준 및 API 개발, 모듈형 설계 |
| **윤리적** | 시각 데이터 개인 정보 보호 | 카메라를 통한 지속적인 모니터링으로 인한 사생활 침해 우려 15 | 연합 학습 15, 온디바이스 처리(엣지 AI) 15, 차등 개인 정보 보호, 설계 기반 개인 정보 보호 (예: SITA 15) |
|  | 데이터 보안 침해 | 민감한 개인 정보의 무단 액세스 및 유출 위험 36 | 강력한 암호화, 접근 통제 메커니즘, 정기적인 보안 감사 |
|  | 알고리즘 편향 | 훈련 데이터의 편향으로 인한 불공정한 결과 초래 가능성 31 | 다양한 데이터셋 사용, 편향 탐지 및 완화 알고리즘, 정기적인 편향 감사 |
|  | 사용자 통제/자율성 부족 | AI 시스템의 일방적 결정으로 인한 사용자 자율성 침해 우려 31 | 사용자 설정 가능 옵션, 명확한 동의 프로토콜, 수동 제어 기능 제공 |
|  | 투명성 부족 | AI 의사 결정 과정의 불투명성으로 인한 신뢰 저하 32 | 설명 가능한 AI (XAI) 6, 명확한 시스템 작동 방식 안내 |

이 표는 AI 비전 기반 IAQ 시스템이 직면한 다양한 기술적, 윤리적 과제들을 체계적으로 요약하고, 각 과제에 대한 잠재적인 해결 방안을 제시한다. 이는 보고서의 비판적 분석을 강화하고, 사용자(발표자)가 포럼에서 문제점과 해결 경로를 논의하는 데 필요한 자료를 제공한다. 또한, 관련된 복잡성에 대한 철저한 이해를 보여줌으로써 보고서의 권위를 높인다.

### **7.3. 미래 구상: 선제적, 예측적, 보이지 않는 IAQ 관리 지향**

미래의 IAQ 시스템은 AI와 다양한 센서 데이터(고급 비전 포함)를 활용하여 매우 적응적이고 예측적인 제어를 위해 스마트 빌딩 생태계에 더욱 깊이 통합될 가능성이 높다. 현재 환경 모니터링을 실시간으로 광범위한 오염물질을 모니터링할 수 있는 자동화된 시공간 시스템으로 전환하는 데 중점을 둔다.11 목표는 개인 정보 보호와 자율성을 존중하면서 거주자의 의식적인 개입 없이 환경을 원활하게 최적화하는 "보이지 않는" IAQ 관리를 만드는 것이다. 견고하고 저렴하며 다중 오염물질 센서와 함께 보다 효율적이고 적응 가능한 AI 모델에 대한 추가 연구가 중요할 것이다. 비전 기반 시스템의 사용자 수용을 위해서는 개인 정보 보호 AI 기술의 지속적인 개발이 필수적이다.

미래 IAQ 시스템, 특히 초개인화 시스템은 더 넓은 "웰빙" 생태계와 융합될 가능성이 높다. IAQ 시스템의 데이터는 개인 건강 추적기, 일주기 리듬에 맞춰 조정되는 스마트 조명, 심지어 영양 앱과 통합되어 개인의 생활 및 작업 환경을 전반적인 건강을 위해 최적화하는 전체론적 접근 방식을 만들 수 있다. 4는 생활 방식, 환경 요인(공기 질 포함), 웨어러블 및 IoT 데이터를 통합하는 초개인화 의학에 대해 논의한다. 22는 IAQ 매개변수를 인지된 수면의 질과 연결한다. AI-IAQ 시스템이 거주자가 수면 부족(웨어러블 또는 자가 보고)이라는 것을 알면, 시간대에 따라 각성 또는 휴식을 촉진하는 것으로 알려진 IAQ 매개변수(예: 약간 다른 CO2​ 또는 습도 수준)를 조정할 수 있다. 비전 센싱은 피로나 안절부절못함의 징후를 감지하여 이 웰빙 모델에 또 다른 입력을 제공할 수 있다. 이는 IAQ가 고립되어 관리되는 것이 아니라 포괄적이고 AI 기반 개인화 웰빙 전략의 한 구성 요소로 관리되는 미래를 암시한다.

개인화에 중점을 두면서도, 많은 개별 AI-IAQ 시스템(특히 비전 기반 활동 인식이 있는 시스템)에서 집계되고 익명화된 데이터는 강력한 개인 정보 보호 장치가 마련되어 있다는 가정 하에 도시 계획, 공중 보건 개입, 건물 설계 표준에 대한 귀중한 "커뮤니티 수준" 통찰력을 제공할 수 있다. 9 (야외에 초점을 맞추었지만 원칙은 적용됨)은 대기 질 데이터가 오염원 및 영향을 이해하는 데 어떻게 사용되는지 논의한다. 한 지역의 많은 건물이 비전이 있는 AI-IAQ를 사용하는 경우, 익명화된 데이터는 "주거 지역에서 요리 활동(및 관련 PM2.5​ 급증)이 오후 6-8시에 최고조에 달한다" 또는 "특정 청소 제품(시각적으로 또는 VOC 특징으로 식별됨)이 일반적으로 사용되며 실내 VOC 수준에 크게 기여한다"와 같은 패턴을 밝혀낼 수 있다. 이 정보는 공중 보건 캠페인(예: 요리 환기에 대한 인식), 건축 법규(예: 주방 배기 요구 사항) 또는 도시 계획(예: 고밀도 주거 지역의 오염 완화 전략)에 정보를 제공할 수 있다. 이는 15에서 강조한 바와 같이 개인 정보를 보호하기 위한 매우 강력한 익명화 및 집계 기술을 필요로 한다.

## **8. 결론 및 전략적 제언**

### **8.1. AI 비전 주도 개인 맞춤형 IAQ에 대한 핵심 통찰 종합**

AI 비전 기술과 환경 센싱의 통합은 동적이고 반응적이며 초개인화된 IAQ를 달성하는 데 있어 혁신적인 잠재력을 지니고 있다. 이러한 접근 방식은 풍부한 맥락적 이해를 제공하고, 선제적 제어를 가능하게 하며, 개인의 필요에 맞춰 환경을 조정함으로써 기존 방법의 한계를 극복한다. AI 모델, 센서 융합, 시스템 아키텍처의 상당한 발전과 함께 데이터의 중요한 역할이 확인되었다. 그러나 기술적 과제(정확성, 비용, 확장성, 데이터 처리)와 윤리적 고려 사항(개인 정보 보호, 편향, 자율성)은 이 기술의 광범위한 채택과 성공적인 구현을 위해 신중하게 다루어져야 한다.

### **8.2. 연구, 개발, 윤리적 배포 발전을 위한 제언**

**연구자 대상:**

* 더 적은 데이터를 필요로 하는 견고하고 적응 가능한 AI 모델 개발에 집중한다(예: 소수샷 학습, HAR 및 IAQ 예측을 위한 자기 지도 학습).
* IAQ를 위한 다중 모드 융합 기술을 발전시키고, 시각, 환경, 심지어 생리학적 센서의 최적 조합을 탐구한다.
* AI-IAQ 시스템 훈련 및 평가를 위한 표준화된 데이터셋과 벤치마크를 개발한다.
* AI 주도 IAQ 결정의 투명성과 신뢰성을 향상시키기 위해 설명 가능한 AI(XAI)에 대한 추가 연구를 수행한다.

**기술 개발자 및 산업계 대상:**

* 개인 정보 보호 비전 센서를 포함하여 비용 효율적이고 정확하며 내구성이 뛰어난 센서 기술에 투자한다.
* AI-IAQ 시스템과 BMS 및 HVAC의 손쉬운 통합을 위해 개방형 표준 및 상호 운용 가능한 플랫폼을 개발한다.
* 직관적인 인터페이스, 맞춤형 제어, 명확한 피드백 메커니즘을 통합하여 사용자 중심 설계를 우선시한다.
* 모든 제품에 설계 기반 개인 정보 보호 원칙과 강력한 보안 조치를 내장한다.

**정책 입안자 및 표준 기관 대상:**

* 혁신과 거주자 권리 사이의 균형을 맞추면서 실내 환경에서 AI 및 비전 센싱 사용에 대한 명확한 윤리적 지침과 규정을 개발한다.
* 안전, 신뢰성, 개인 정보 보호를 보장하기 위해 AI-IAQ 시스템에 대한 인증 표준 생성을 지원한다.
* 이러한 기술의 이점과 위험에 대한 대중의 인식과 교육을 증진한다.

공통 제언:

AI 전문가, 환경 과학자, 건물 엔지니어, 사회 과학자, 윤리학자 간의 학제 간 협력을 촉진하여 AI 비전 기반 개인 맞춤형 IAQ 시스템의 전체론적이고 책임감 있는 개발 및 배포를 보장한다.

## **9. 참고문헌**

* 1 OSHA. (n.d.). Indoor Air Quality.
* 2 Jackson Comfort Services. (n.d.). The Impact of Indoor Air Quality on Productivity and Mental Health.
* 13 Li, X., et al. (2022). A Review on Communication Technologies in Indoor Air Quality Monitoring Systems. *Applied Sciences*.
* 12 EPA. (n.d.). Low-Cost Air Pollution Monitors and Indoor Air Quality.
* 9 Gryech, I., et al. (2024). Applications of machine learning and Internet of Things (IoT) for outdoor air pollution prediction and the combination of monitoring sensors and input features used. *arXiv:2401.01788v1*.
* 14 AmericasPG. (2025). Advanced machine learning (ML), deep learning (DL) techniques, and IoT-based study hybrid frameworks for air-quality prediction in urban settings.
* 8 Han, M., et al. (2012). Occupancy and indoor environment quality sensing for smart buildings. *ResearchGate*. (Note: Original paper date may differ, snippet source is a review citing it)
* 10 Govea-Vargas, A., et al. (2024). Feature fusion techniques for environmental sensor data to estimate indoor occupancy: A comparative study. *Building and Environment*. (Note: Snippet refers to this as a general example of fusion)
* 11 Al-Ali, A. R., et al. (2025). A Review of Recent Advances in Air Quality Monitoring (AQM) Systems: A Focus on Pollutants, Sensors, IoT Frameworks, and Future Directions. *Sensors*.
* 3 Schroeder, T. (2025). IAQ Management: Why a Proactive Approach is Key to Healthier Workplaces. *OH&S Online*.
* 15 Alanezi, M. A., et al. (2025). AI Management Platform for Privacy-Preserving Indoor Air Quality Control: Review and future directions. *ResearchGate*.
* 35 Advantech. (n.d.). WebAccess+IAQ (Indoor Air Quality) System.
* 4 Tan, J., et al. (2024). Healthcare 5.0: The advent of hyper-personalized medicine. *Frontiers in Public Health*.
* 5 Tan, J., et al. (2024). Health is beyond genetics: on the integration of lifestyle and environment in real-time for hyper-personalized medicine. *ResearchGate*.
* 6 Roy, S., et al. (2025). Can Explainable AI Assess Personalized Health Risks from Indoor Air Pollution? *ResearchGate*.
* 7 Li, J., et al. (2016). AirSense: an intelligent home-based sensing system for indoor air quality analytics. *MSU Innovation Center*.
* 16 Ahmad, T., et al. (2022). A review on occupancy prediction through machine learning for enhancing energy efficiency, air quality and thermal comfort in the built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
* 17 Shaberi, S. N. A., & Gaus, N. A. M. (2024). Machine Learning Approaches for Predicting Occupancy Patterns and its Influence on Indoor Air Quality in Office Environments. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*.
* 34 Al Dakheel, J., et al. (2025). AI-Driven Digital Twins for Enhanced Indoor Environmental Quality and Energy Efficiency in Smart Building Systems. *Sustainability*.
* 33 Lumenalta. (n.d.). How AI models are enhancing HVAC design and performance.
* 18 Morales-Ortega, R., et al. (2024). Deep Learning-Based Indoor Air Quality Forecasting System Using Outdoor Data from Mexico City. *Atmosphere*.
* 22 Ehrlich, K. C., et al. (2022). Evaluating machine learning models to classify occupants' perceptions of their indoor environment and sleep quality from indoor air quality. *Building and Environment*.
* 20 Awentia. (n.d.). Breaking Down the Data Barriers in AI Adoption for Industrial Vision. *Wevolver*.
* 36 Winvesta. (n.d.). Agentic AI: Challenges in Implementing Agentic AI.
* 37 AmericasPG. (2025). Abstract referencing Gryech et al. (2024) on outdoor air pollution prediction.
* 19 Gryech, I., et al. (2024). Applications of machine learning and Internet of Things (IoT) for outdoor air pollution prediction. *arXiv:2401.01788*. (Full PDF)
* 29 Varotto, L. (2021). Multi-Sensor Probabilistic Active Sensing: Methodological Framework and Applications. *PhD Thesis, University of Padua*.
* 26 Ullah, A., et al. (2020). HHARNet: Taking inspiration from Inception and Dense Networks for Human Activity Recognition using Inertial Sensors. *ResearchGate*.
* 21 Hasan, M. M., et al. (2025). A Systematic Literature Review on Vision-Based Fire Detection, Prediction, and Forecasting. *Jurnal Kejuruteraan*.
* 28 Muhammad, G., et al. (2021). A Computationally Less Expensive CNN Model for Fire Detection. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*.
* 38 Doctor, F. (2014). Invited Talk - Adaptive Ambient Intelligence and Smart Environments. *ResearchGate*.
* 39 Loia, V., et al. (2005). Using FML and Fuzzy Technology in Adaptive Ambient Intelligence Environments. *ResearchGate*.
* 25 Wang, W., et al. (2022). Occupancy Estimation in Buildings: A Review of Data-Driven and Vision-Based Methods. *Applied Sciences*.
* 30 Wang, W., et al. (2017). Predictive Control of Indoor Environment Using Occupant Number Detected by Video Data and CO2 Concentration. *ResearchGate*.
* 40 So, A. T. P., & Tse, B. (2002). Energy and HVAC: Intelligent Air‐Conditioning Control. *ResearchGate*. (Note: Snippet is a chapter overview)
* 27 Yazar, D., et al. (2015). Cost-effective air conditioning control considering comfort level and user location. *ResearchGate*.
* 31 Aithor. (n.d.). The ethical concerns of AI-driven smart home technologies.
* 32 Li, Y., et al. (2024). AI Ethics in Smart Homes: Progress, User Requirements and Challenges. *ResearchGate*.
* 23 Tahir, A. M., et al. (2025). A Comprehensive Review of Human Activity Recognition: Sensor Modalities, Machine Learning Approaches, and Future Directions. *Future Internet*.
* 24 Tahir, A. M., et al. (2025). A Comprehensive Review of Human Activity Recognition: Sensor Modalities, Machine Learning Approaches, and Future Directions. *OUCI DNTB*. 23
* 41 Fröhlich-Nowoisky, J., et al. (2016). Bioaerosols in the Earth System: Climate, Health, andEcosystem Interactions. (Note: Snippet is a book chapter index, limited direct relevance to image analysis for IAQ)
* 9 Not used - inaccessible.
* 14 AmericasPG. (2025). 14
* 8 ResearchGate. (2024). 8
* 10 Not used - information unavailable.
* 11 MDPI. (2025). 11
* 3 OHS Online. (n.d.). 3
* 15 ResearchGate. (2025). 15
* 7 MSU Innovation Center. (2016). 7
* 6 ResearchGate. (2025). 6
* 17 The SAI. (2024). 17
* 34 MDPI. (n.d.). 34
* 33 Lumenalta. (n.d.). 33
* 18 MDPI. (2024). 18
* 22 PubMed. (2022). 22
* 6 ResearchGate. (2025). 6
* 42 Not used - inaccessible.
* 43 Not used - information unavailable.
* 44 Not used - information unavailable.
* 45 Not used - inaccessible.
* 46 Not used - information unavailable.
* 29 University of Padua. (2021). 29
* 21 Jurnal Kejuruteraan. (2025). 21
* 28 FUOYE Journal of Engineering and Technology. (n.d.). 28
* 38 ResearchGate. (2014). 38
* 39 ResearchGate. (2024). 39
* 25 MDPI. (2022). 25
* 30 ResearchGate. (2017). 30
* 40 ResearchGate. (n.d.). 40
* 27 Not used - inaccessible.
* 40 ResearchGate. (2002). 40
* 23 MDPI. (2025). 23

#### 참고 자료

1. Indoor Air Quality - Overview | Occupational Safety and Health Administration, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.osha.gov/indoor-air-quality>
2. The Impact Of Indoor Air Quality On Productivity And Mental Health, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.jacksoncomfort.com/blog/the-impact-of-indoor-air-quality-on-productivity-and-mental-health/>
3. Creating a Healthier Indoor Environment -- Occupational Health ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://ohsonline.com/articles/2025/05/01/indoor-air-quality-schroeder.aspx>
4. Health is beyond genetics: on the integration of lifestyle and environment in real-time for hyper-personalized medicine - PubMed Central, 5월 10, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11747366/>
5. Health is beyond genetics: on the integration of lifestyle and environment in real-time for hyper-personalized medicine - ResearchGate, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/387819340_Health_is_beyond_genetics_on_the_integration_of_lifestyle_and_environment_in_real-time_for_hyper-personalized_medicine>
6. Can Explainable AI Assess Personalized Health Risks from Indoor ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/387976246_Can_Explainable_AI_Assess_Personalized_Health_Risks_from_Indoor_Air_Pollution>
7. innovationcenter.msu.edu, 5월 10, 2025에 액세스, <https://innovationcenter.msu.edu/wp-content/uploads/2021/06/AirSense-an-intelligent-home-based-sensing-system-for-indoor-air-quality-analytics.pdf>
8. Occupancy and indoor environment quality sensing for smart ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/254042094_Occupancy_and_indoor_environment_quality_sensing_for_smart_buildings>
9. 1 Introduction - arXiv, 5월 10, 2025에 액세스, <https://arxiv.org/html/2401.01788v1>
10. Indoor occupancy monitoring using environmental feature fusion ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19401493.2024.2399053>
11. Innovations in Air Quality Monitoring: Sensors, IoT and Future ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/7/2070>
12. Low–Cost Air Pollution Monitors and Indoor Air Quality | US EPA, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/low-cost-air-pollution-monitors-and-indoor-air-quality>
13. Review of Communication Technology in Indoor Air Quality Monitoring System and Challenges - MDPI, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/18/2926>
14. A Review of Machine Learning Models for Predicting Air ... - ASPG, 5월 10, 2025에 액세스, <https://americaspg.com/public/articleinfo/41/show/3492>
15. (PDF) AI Management Platform for Privacy-Preserving Indoor Air ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/387777076_AI_Management_Platform_for_Privacy-Preserving_Indoor_Air_Quality_Control_Review_and_future_directions>
16. (PDF) A review on occupancy prediction through machine learning for enhancing energy efficiency, air quality and thermal comfort in the built environment - ResearchGate, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/361650719_A_review_on_occupancy_prediction_through_machine_learning_for_enhancing_energy_efficiency_air_quality_and_thermal_comfort_in_the_built_environment>
17. Machine Learning Approaches for Predicting Occupancy Patterns ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://thesai.org/Publications/ViewPaper?Volume=15&Issue=9&Code=IJACSA&SerialNo=87>
18. Forecasting Indoor Air Quality in Mexico City Using Deep Learning ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/12/1529>
19. Applications of machine learning & IoT for Outdoor Air Pollution Monitoring and Prediction: A Systematic Literature Review - arXiv, 5월 10, 2025에 액세스, <https://arxiv.org/pdf/2401.01788>
20. Breaking Down the Data Barriers in AI Adoption for Industrial Vision - Wevolver, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.wevolver.com/article/breaking-down-the-data-barriers-in-ai-adoption-for-industrial-vision>
21. www.ukm.my, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.ukm.my/jkukm/wp-content/uploads/2025/3701/13.pdf>
22. Evaluating machine learning models to classify occupants ... - PubMed, 5월 10, 2025에 액세스, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35939653/>
23. Machine Learning for Human Activity Recognition: State-of-the-Art ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2313-433X/11/3/91>
24. Machine Learning for Human Activity Recognition: State-of-the-Art Techniques and Emerging Trends - OUCI, 5월 10, 2025에 액세스, <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/7316GB8o/>
25. A State of Art Review on Methodologies of Occupancy Estimating in ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/19/3173>
26. HHARNet: Taking inspiration from Inception and Dense Networks for Human Activity Recognition using Inertial Sensors - ResearchGate, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/348774906_HHARNet_Taking_inspiration_from_Inception_and_Dense_Networks_for_Human_Activity_Recognition_using_Inertial_Sensors>
27. Cost-effective air conditioning control considering comfort level and user location, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/282709789_Cost-effective_air_conditioning_control_considering_comfort_level_and_user_location>
28. A Lightweight CNN Model for Vision Based Fire Detection on ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://journal.engineering.fuoye.edu.ng/index.php/engineer/article/view/1268>
29. www.research.unipd.it, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.research.unipd.it/retrieve/e14fb270-38cd-3de1-e053-1705fe0ac030/tesi_definitiva_Luca_Varotto.pdf>
30. Predictive Control of Indoor Environment Using Occupant Number ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/315889972_Predictive_Control_of_Indoor_Environment_Using_Occupant_Number_Detected_by_Video_Data_and_CO_2_Concentration>
31. The ethical concerns of AI-driven smart home technologies - Aithor, 5월 10, 2025에 액세스, <https://aithor.com/essay-examples/the-ethical-concerns-of-ai-driven-smart-home-technologies>
32. AI Ethics in Smart Homes: Progress, User Requirements and Challenges - ResearchGate, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/387078379_AI_Ethics_in_Smart_Homes_Progress_User_Requirements_and_Challenges>
33. How AI improves HVAC design and energy efficiency | Optimizing ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://lumenalta.com/insights/how-ai-models-are-enhancing-hvac-design-and-performance>
34. AI-Driven Digital Twins for Enhancing Indoor Environmental Quality ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/7/1030>
35. WebAccess+IAQ (Indoor Air Quality) System - Advantech, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.advantech.com/en-us/iretail-hospitality/solutions/detail/webAccess_iaq_system>
36. Challenges in implementing agentic AI - Winvesta, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.winvesta.in/blog/agentic-ai/challenges-in-implementing-agentic-ai>
37. A Review of Machine Learning Models for Predicting Air Quality in Urban Areas - ASPG, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.americaspg.com/articleinfo/41/show/3492>
38. (PDF) Invited Talk - Adaptive Ambient Intelligence and Smart ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/274707194_Invited_Talk_-_Adaptive_Ambient_Intelligence_and_Smart_Environments>
39. (PDF) Using FML and Fuzzy Technology in Adaptive Ambient ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/228342028_Using_FML_and_Fuzzy_Technology_in_Adaptive_Ambient_Intelligence_Environments>
40. Energy and HVAC: Intelligent Air‐Conditioning Control | Request PDF, 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/285348610_Energy_and_HVAC_Intelligent_Air-Conditioning_Control>
41. Microbiology of Aerosols - National Academic Digital Library of Ethiopia, 5월 10, 2025에 액세스, <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/58510/1/58.pdf>
42. 1월 1, 1970에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/369300081_A_review_of_personalized_ventilation_Focus_on_system_design_and_control_strategies>
43. A Novel Three-Dimensional Composite Isolation Bearing and Its ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/23/16374>
44. A Method of Noise Reduction for Radio Communication Signal ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/1/475>
45. 1월 1, 1970에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/374856002_Ethical_Considerations_for_AI-Powered_Smart_Building_Systems_Balancing_Innovation_with_Occupant_Well-being>
46. Building and Architectural Details of Tenement Houses Built at the ..., 5월 10, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/2/451>