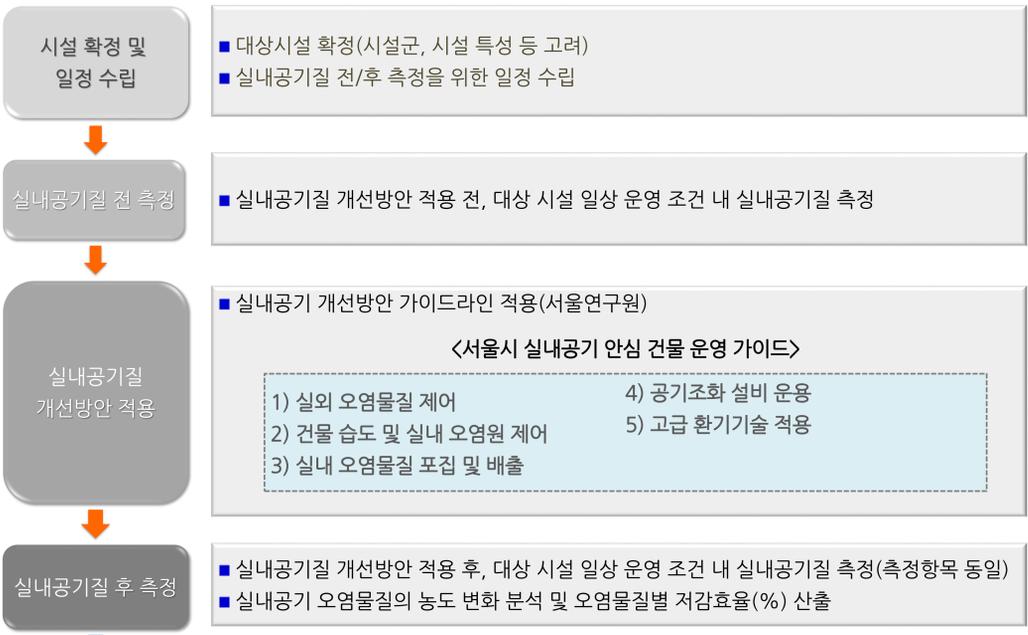


1. Introduction

본 연구는 IoT 기반 환경측정기기와 디지털 트윈 기술을 활용해 개발된 자율운전형 통합관리시스템 iBEEMS를 실제 건물에 적용하고, 그 성능을 검증하고자 한다. 수행 내용으로 첫째, iBEEMS 실증 건물에서 자율운전 알고리즘의 성능을 에너지 관리 및 실내환경적 측면에서 분석하였다. 둘째, 숙박시설, 사무시설, 대규모 점포 등 다양한 유형의 실증 건물에서 실내공기질의 측정을 통해 특성을 파악하였다. 셋째, 측정 결과를 이용한 실내공기 안심건물 평가를 수행하였다. 이를 통해 iBEEMS의 실증 적용 가능성과 제도의 확산 잠재력을 입증하였다.

2. Materials and Methods

2.1. Application of Indoor Air Quality Improvement Guidelines



개선방안 효과 검증 및 iBEEMS 적용할 기초 데이터 확보

- 서울시 실내공기 안심 건물 운영 가이드 적용 → 실내환경 개선 효과 검증
- 대상: 사무시설 23개소, 다중이용시설 201개소
- 방법: 실내공기질 측정 후 기준 초과 지점에 대해 가이드라인 적용 전·후 비교 평가
- 결과: iBEEMS 실증 전 가이드라인 효과 확인 및 iBEEMS 적용을 위한 기초 데이터 확보

2.2. Sampling and analysis



| 측정항목 | 시행방법 | 측정원리 및 분석장비 |
|-------------------------|----------------------|--|
| 미세먼지 | 중량법 | 측정원리: 0.3-10μm 분진양을 0.45μm 이하의 필터에 포집하여 0.1μm 이하의 필터에 포집된 분진양을 0.45μm 이하의 필터에 포집하여 0.1μm 이하의 필터에 포집된 분진양을 0.45μm 이하의 필터에 포집하여... |
| 초미세먼지 | 중량법 | 측정원리: 0.3-2.5μm 분진양을 0.45μm 이하의 필터에 포집하여 0.1μm 이하의 필터에 포집된 분진양을 0.45μm 이하의 필터에 포집하여... |
| 이산화탄소(CO ₂) | 비분산적외선법 | 측정원리: 비분산적외선법 |
| 폼알데하이드(HCHO) | 2,4-DNEH 카트리지와 HPLC법 | 측정원리: 2,4-DNEH 카트리지와 HPLC법 |
| 총부유세균 | 충돌법 | 측정원리: 충돌법 |
| 일산화탄소(CO) | 비분산적외선법 | 측정원리: 비분산적외선법 |

Fig. 1. Measurement Principles and Analytical Instruments

- 「실내공기질 공정시험기준」에 따라 실내공기질 측정 수행
- 측정 항목: - 유지기준 6항목: PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, CO, 폼알데하이드, 총부유세균
- 권고기준 4항목: NO₂, 라돈, TVOC, 곰팡이
- 측정 지점 수: 시설 연면적에 따라 결정
- 대상: 숙박시설, 사무시설, 대규모점포 등 iBEEMS 실증 건물

3. Results and Discussion

3.1. Performance of the Autonomous Control Algorithm

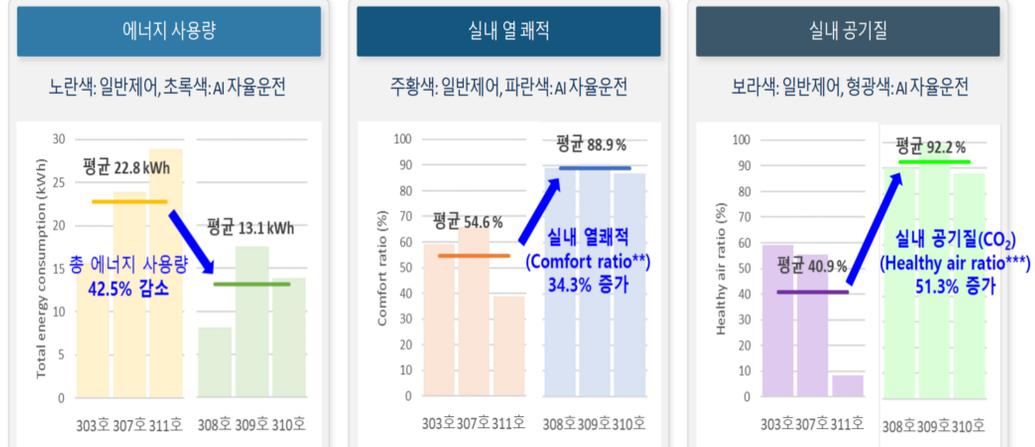


Fig. 2. Results of applying the aiBAC algorithm

- '22년 단국대학교 진리관에 자율운전 알고리즘(aiBAC) 적용 → 일반 제어 방식과 성능 비교
- 정량적 성과: 에너지 사용량 42.5% 감소, 실내 열쾌적 비율 34.3% 증가, 실내공기질 지수(Healthy air ratio, CO₂ 기준) 51.3% 증가
- 결론: 에너지 절약과 동시에 쾌적성·공기질 개선 달성 → 기존 제어 방식의 한계 보완

3.2. iBEEMS Results

Table 1. Results by Facility

| 측정항목 | 미세먼지 | 외기 미세먼지 | 초미세먼지 | 이산화탄소 | HCHO | 총부유세균 | 일산화탄소 | 이산화질소 | 라돈 | TVOC | 부유곰팡이 |
|------|------|---------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-----|------|-------|
| 기준치 | 75 | - | 35 | 1000 | 80 | 800 | 10 | 0.05 | 148 | 400 | 500 |
| 상반기 | 32 | 40 | 21 | 705 | 6.6 | 16 | 0.2 | 0.003 | 55 | 27 | 14 |
| 하반기 | 13 | 7 | 5.4 | 593 | 28 | 92 | 0.4 | 0.007 | 85 | 207 | 177 |

대학교 기숙사(숙박시설)

| 측정항목 | 미세먼지 | 외기 미세먼지 | 초미세먼지 | 이산화탄소 | HCHO | 총부유세균 | 일산화탄소 | 이산화질소 | 라돈 | TVOC | 부유곰팡이 |
|---------|------|---------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-----|------|-------|
| 기준치 | 75 | - | 35 | 1000 | 80 | 800 | 10 | 0.05 | 148 | 400 | 500 |
| 오전(혼잡) | 4.7 | 30 | 4.3 | 647 | 16 | 0 | 0.6 | 0.013 | 55 | 28 | 28 |
| 오후(비혼잡) | 20 | 38 | 16 | 453 | 15 | 0 | 0.6 | 0.012 | 37 | 19 | 19 |

HDC빌딩(사무시설)

| 측정항목 | 미세먼지 | 외기 미세먼지 | 초미세먼지 | 이산화탄소 | HCHO | 총부유세균 | 일산화탄소 | 이산화질소 | 라돈 | TVOC | 부유곰팡이 |
|------|------|---------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| 기준치 | 100 | - | 50 | 1000 | 100 | - | 10 | 0.1 | 148 | 500 | - |
| 측정값 | 34.7 | 20.5 | 22.2 | 870 | 26.8 | 271 | 1.9 | 0.008 | 18.4 | 92.1 | 150 |

롯데마트(대규모점포)

- iBEEMS 실증사이트: 숙박시설, 사무시설, 대규모점포 대상 실내공기질 측정·분석
- 결과: 기준치 초과 항목 없으나 외기, 온·습도, 인구밀집도 등 외부 요인 영향 확인
- 시설별 특성
 - 숙박시설: 겨울철 미세먼지, 여름철 HCHO·TVOC·곰팡이·세균 높음 → 온·습도 관리 필요
 - 사무시설: 전반적으로 양호, 혼잡 시간대 CO₂ 상대적 상승
 - 대규모점포: CO₂ 농도 높음 → 다중이용시설 특성(이용객 활동) 영향
- 결론: 시설 특성과 이용 행태 고려한 맞춤형 관리 방안 필요

3.3. Indoor Air Safety Building Evaluation

Table 2. Indoor Air Safety Building Evaluation Table

| 분 야 | 배 점 | 기준점수 |
|-----------------|--------|--------|
| 총 점 | 100점 | 80점 이상 |
| 실내공기 오염물질별 수준 | 55점 | 33점 이상 |
| 실내공기 환기시설 운영상태 | 30점 | 18점 이상 |
| 실내공기 유지관리체계 | 15점 | 9점 이상 |
| 가점 | 5점 | |
| 감점(전년도 유지기준 초과) | 황색당-5점 | |

Table 3. Indoor Air Safety Building Evaluation Results

| 연번 | 평가대상 | 평가점수 | 안심건물 적합여부* |
|----|--------------------|------|------------|
| 1 | 대학교 기숙사 개별호실(상반기) | 86.5 | 적합 |
| 2 | 대학교 기숙사 개별호실(하반기) | 90.5 | 적합 |
| 3 | 대학교 기숙사 체력단련실(상반기) | 86.5 | 적합 |
| 4 | 대학교 기숙사 체력단련실(하반기) | 90.5 | 적합 |
| 5 | HDC 타워 9층 사무실 | 94.5 | 적합 |
| 6 | HDC 타워 11층 사무실 | 90.5 | 적합 |

* 80점 이상 적합

- 실내공기 안심 건물 통합평가지수를 iBEEMS 실증사이트에 적용
- 평가 항목
 - 실내공기 오염물질 수준(55점)
 - 환기시설 운영 상태(30점)
 - 실내공기 유지관리체계(15점)
 - 가점 항목 포함 총점 산출
- 결론
 - 모든 시설 안심건물 기준 적합(80점 이상)
 - 기숙사·사무시설 관리 수준 양호, 환기·청소·관리 체계 양호
 - 통합평가지수를 통해 iBEEMS 실내 공기질 수준 및 관리체계 진단 가능
 - 향후 개선 방향 제시 자료로 활용 가능

4. Acknowledgements

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2021-KP002461)