



## 업무용 건물 환기시스템의 CO<sub>2</sub> 농도 설정 조건 변화에 따른 에너지 성능 분석

### *Analysis of Energy Performance According to Changes in CO<sub>2</sub> Setpoint Conditions in Ventilation Systems of Office Buildings*

성남철\* · 김대웅\*\*

Namchul Seong\* · Daeung Kim\*\*

\* Main author, Researcher, CJU Industry-Academic Cooperation Foundation, Cheongju Univ., South Korea (inamchul@cju.ac.kr)

\*\* Corresponding author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Cheongju Univ., South Korea (dkim@cju.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** This study aims to quantify the impacts of CO<sub>2</sub> concentration setpoint selection in demand-controlled ventilation (DCV) systems on indoor air quality (IAQ) and energy performance in office buildings. Although CO<sub>2</sub>-based DCV has been widely applied to reduce ventilation energy, the effects of different setpoints and deadband ranges on pollutant reduction capability and overall HVAC energy consumption have not been sufficiently clarified. **Method:** A coupled simulation approach integrating CONTAM and EnergyPlus was employed to analyze CO<sub>2</sub> concentration behavior, ventilation demand, and HVAC energy consumption. A medium office reference building consisting of four perimeter zones and one core zone was modeled under Seoul climate conditions. Four ventilation control scenarios were evaluated: a baseline constant ventilation case, a fixed CO<sub>2</sub> setpoint of 1000ppm, and two deadband-based DCV strategies of 900~1000ppm and 800~1000ppm. Zone-level CO<sub>2</sub> concentrations, ventilation airflow rates, and annual cooling, heating, and fan energy consumption were assessed. **Result:** The results indicate that all CO<sub>2</sub>-based DCV strategies maintained indoor CO<sub>2</sub> concentrations within acceptable limits. Lower CO<sub>2</sub> setpoints resulted in improved air quality, with the 800~1000ppm strategy achieving the best IAQ performance. From an energy perspective, the fixed 1000ppm control achieved the largest reduction in total HVAC electricity, saving approximately 5.9% compared to the baseline. This was primarily driven by a 46.7% decrease in fan energy, while heating energy was reduced by 2.7~4.1%. In contrast, cooling energy exhibited only marginal changes within ±1%. This study highlights the need to select CO<sub>2</sub> control criteria based on building operation.

#### KEYWORD

수요제어환기  
이산화탄소 기반 환기제어  
HVAC 에너지 성능  
CONTAM-EnergyPlus 연계 시뮬레이션

Demand-Controlled Ventilation (DCV)  
CO<sub>2</sub>-Based Ventilation  
HVAC Energy Performance  
Coupled CONTAM-EnergyPlus Simulation

#### ACCEPTANCE INFO

Received Jan. 20, 2026  
Final revision received Jan. 30, 2026  
Accepted Feb. 5, 2026

© 2026. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

에너지 손실을 최소화하기 위한 현대 건축 기술은 고단열 및 고기밀화를 지향하고 있으며, 이러한 추세는 대규모 업무용 건물에서 더욱 두드러지게 나타나고 있다. 그러나 건물 외피의 기밀 성능이 강화됨에 따라 실내에서 발생하는 오염물질의 자연적인 배출이 제한되면서 실내공기질(IAQ, Indoor Air Quality) 악화 문제가 주요한 이슈로 대두되었다. 특히 업무용 건물은 장시간 재실과 높은 인원 밀도로 인해 실내 환경 관리의 중요성이 강조되는 건축 유형으로, 많은 재실 인원과 긴 체류 시간은 실내 공기 오염 가능성을 증가시킨다. 이에 따라 재실자의 건강과 쾌적성 확보에 핵심적인 역할을 수행하는 환기 시스템의 중요성이 증대되고 있으며, 업무 생산성 향상 측면에서도 기계 환기 시스템에 대한 의존도가 지속적으로 증가하고 있다[1].

이러한 배경에서 실내 공기질을 확보하면서도 과도한 외기 도입으로 인한 에너지 손실을 저감하기 위한 환기 제어 전략에 대한 관심이 증가하였다. 그중 실내 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도를 재실 밀도의 대리 지표로 활용하여 외기 도입량을 가변적으로 제어하는 수요제어

환기(Demand-Controlled Ventilation, DCV)는 실내 공기질과 에너지 성능을 동시에 개선할 수 있는 효과적인 방안으로 제시되어 왔으며, 다양한 업무용 및 상업용 건물에 널리 적용되어 왔다[2,3]. 기존 연구에 따르면 CO<sub>2</sub> 기반 DCV는 고정 풍량 환기 방식에 비해 불필요한 과환기를 줄여 환기에너지 및 송풍 에너지를 절감할 수 있는 잠재력을 가지는 것으로 보고되고 있다[4].

최근 해외 연구에서는 CO<sub>2</sub> 기반 DCV의 적용 범위와 해석 관점이 점차 확장되고 있다. 일부 연구에서는 CO<sub>2</sub> 제어 전략의 구조, 센서 구성 및 제어 신뢰성을 중심으로 DCV 시스템의 실무 적용성을 검토하였으며[5], 멀티존 건물에서 제한된 센서 구성 하에서도 DCV를 구현하기 위한 제어 전략이 제안되었다[6]. 또한 실내공기질을 단순한 제약 조건이 아니라 일정 범위 내에서 활용 가능한 유연 자원으로 해석하려는 시도도 보고되고 있다. Nielsen 등은 실내 공기를 일종의 오염 농도 완충재(IAQ buffer)로 간주하여 환기 가동 시점을 지연시키는 부하 전이(load shifting) 전략의 가능성을 제시하였으며, 이를 통해 에너지 최적화 관점에서 CO<sub>2</sub> 기반 환기제어의 확장 가능성을 논의하였다[7]. 이러한 연구들은 CO<sub>2</sub> 기반 환기제어의 개별적 유효성을 강화하였으나, 제어 기준 자체의 설정이 성능에 미치는 영향을 정량적으로 비교하는 데에는 한계를 보이고 있다.

특히 기존 문헌의 다수는 단일 CO<sub>2</sub> 설정농도(setpoint)를 기준으로 DCV의 효과를 평가하거나, 특정 제어 로직 또는 센서 구성의 유효성에 초점을 맞추는 경향이 있다. 이로 인해 CO<sub>2</sub> 설정농도 및 데드밴드 설정 조건의 변화가 실내 오염물질 저감 성능과 냉방·난방·송풍 에너지를 포함한 전체 에너지 성능에 어떠한 영향을 미치는지를 동일한 건물 모델과 경계 조건 하에서 체계적으로 비교·분석한 연구는 충분하지 않다. 또한 환기량 변화에 따른 열적 에너지뿐 아니라 송풍 에너지의 기여도를 분리하여 평가한 정량적 연구 역시 제한적인 실정이다[8].

따라서 본 연구의 목적은 업무용 건물 환기시스템을 대상으로 CO<sub>2</sub> 농도 설정 조건의 변화가 실내공기질과 에너지 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것이다. 이를 위해 CONTAM-EnergyPlus 연계 시뮬레이션을 활용하여 제어 시나리오별 실시간 환기 풍량 및 CO<sub>2</sub> 농도 거동을 산출하고, 이를 에너지 해석에 연동함으로써 환기 제어 시나리오에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 수준과 냉방, 난방, 팬 에너지를 포함한 HVAC 에너지 소비 특성을 비교 평가하였다. 본 연구는 기존 연구들이 단일 제어 기준 또는 특정 제어 기법에 초점을 맞춘 것과 달리, CO<sub>2</sub> 설정 조건(목표농도 및 데드밴드)의 변화가 실내 공기질과 HVAC 에너지 성능에 미치는 영향을 동일한 조건 하에서 체계적으로 비교 분석한다는 점에서 차별성을 가진다.

## 2. CO<sub>2</sub> 농도와 환기제어

### 2.1. 실내 CO<sub>2</sub> 농도 관리 기준

실내 공기질 관리의 주요 지표 중 하나로 이산화탄소 농도가 보편적으로 활용되고 있다. CO<sub>2</sub>는 인체에 직접적인 독성을 유발하는 오염물질이라기보다는, 재실 밀도 및 환기 상태를 간접적으로 반영하는 지표로서 실내 환기 성능을 평가하는 데 널리 사용된다. 이에 따라 국내외 여러 실내 공기질 관리 기준에서는 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 일정 수준 이하로 유지하도록 권고하고 있다.

국내의 경우 「실내공기질 관리법」 및 관련 고시에 따라 업무용 건물과 같은 다중이용시설에서는 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 1000ppm 이하로 유지하도록 규정하고 있으며, 이는 일반적인 재실 조건에서 외기 공급이 적절히 이루어지고 있는지를 판단하기 위한 관리 기준으로 활용된다[9]. 국외 기준으로는 미국의 ASHRAE Standard 62.1과 유럽의 EN 16798이 대표적이며, 이들 기준 역시 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 환기 성능을 간접적으로 평가하기 위한 보조 지표로 활용하고 있다[10,11].

기존 연구들에 따르면 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 상승할 경우 재실자는 졸음, 집중력 저하 및 인지 능력 감소와 같은 쾌적도 저하 현상을 경험하는 것으로 보고되고 있다[4]. 이러한 결과는 CO<sub>2</sub> 농도의 유지관리가 단순히 실내공기질 확보 차원을 넘어 재실자의 업무 효율 및 실내 환경 만족도와도 밀접한 관련이 있음을 시사한다. 따라서 업무용 건물에서 적절한 CO<sub>2</sub> 농도 관리는 안전하고 쾌적한 실내 환경을 확보함과 동시에 에너지 성능을 고려한 환기 전략 수립의 핵심 요소라 할 수 있다.

### 2.2. CO<sub>2</sub> 기반 수요제어환기(DCV)의 개념

일반적인 환기시스템은 설계 단계에서 산정된 필요 환기량을 기준으로 운전되며, 재실 인원의 최대치를 고려하여 일정한 외기량을 지속적으로 도입하는 방식이 주로 적용된다. 이러한 고정 환기 방식은 재실 인원이 감소하거나 공실 상태가 발생하는 경우 불필요한 외기 도입으로 에너지 낭비를 초래할 수 있으며, 반대로 재실 인원이 증가하는 경우에는 환기량 부족으로 실내공기질이 악화될 가능성이 있다.

수요제어환기(Demand-Controlled Ventilation, DCV)는 실내 환경 상태 또는 재실 특성을 반영하여 환기량을 가변적으로 제어하는 방식으로, 대표적인 제어 변수로 CO<sub>2</sub> 농도가 활용된다[12]. CO<sub>2</sub> 기반 DCV에서는 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 센서를 통해 실시간으로 모니터링하고, 설정된 기준 농도와의 차이에 따라 외기 도입량 또는 급기 풍량을 조절함으로써 필요 환기량을 동적으로 증가 또는 감소시킨다. 이러한 제어 방식은 재실 인원 증가에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 상승 시 환기량을 증가시키고, 재실 인원 감소 시 환기량을 감소시키는 운전을 가능하게 한다.

이와 같은 CO<sub>2</sub> 기반 DCV는 외기 도입에 따른 냉·난방 부하를 효과적으로 저감할 수 있으며, 결과적으로 HVAC 시스템의 에너지 소비 감소로 이어질 수 있다. 실제로 다수의 선행 연구에서는 CO<sub>2</sub> 기반 DCV 적용 시 고정 환기 방식과 비교하여 유의미한 에너지 절감 효과가 나타난다고 보고하고 있다[13]. 따라서 CO<sub>2</sub> 기반 DCV는 적절한 실내 공기질을 유지하면서 동시에 건물 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 대표적인 환기 제어 방법으로 평가된다.

### 2.3. CO<sub>2</sub> 기반 DCV 제어 설정 및 제어 방법의 특성

CO<sub>2</sub> 기반 DCV의 성능은 설정된 기준 농도(setpoint)에 의해서만 결정되는 것이 아니라, 제어 응답 범위를 정의하는 제어 설정 조건에 따라라도 크게 달라질 수 있다. 실제 건물의 환기 제어에서는 센서 오차, 제어 지연 및 잦은 기동 및 정지에 따른 설비 부담을 고려하여 단일 목표농도 설정의 즉각적인 제어보다는 일정 범위 내에서 제어 응답을 허용하는 일정한 데드밴드(deadband)의 설정이 일반적으로 적용된다. 이러한 데드밴드는 평균적인 CO<sub>2</sub> 농도 수준뿐만 아니라 환기량의 시간적 분포와 변동 특성에 직접적인 영향을 미치며, 이는 환기시스템의 에너지 소비 및 제어 안정성과 밀접하게 연관된다.

DCV 제어에서 데드밴드가 좁게 설정된 경우, 설정 상한과 하한이 가까워 실내 CO<sub>2</sub> 농도의 작은 변화에도 환기량이 빈번하게 조절된다. 이 경우 실내 CO<sub>2</sub> 농도는 비교적 안정적으로 유지될 수 있으나, 잦은 환기량 변화는 팬의 반복적인 기동과 정지를 유발하고 HVAC 시스템의 부하 변동을 증가시킬 가능성이 있다. 반대로 데드밴드가 넓게 설정된 경우에는 환기량 조절 빈도가 감소하여 에너지 소비 측면에서는 유리할 수 있으나, 실내 CO<sub>2</sub> 농도의 변동 폭이 상대적으로 커질 수 있다.

기존 연구들은 주로 CO<sub>2</sub> 기반 DCV의 에너지 절감 가능성과 그 효과를 분석하는 데 초점을 두어 왔으며, 대부분 단일 CO<sub>2</sub> 설정농도 조건을 중심으로 평가가 수행되어 제어 범위 설정에 따른 성능 차이에 대한 체계적인 비교는 충분히 이루어지지 않았다[13]. 따라서 CO<sub>2</sub> 기반 DCV의 성능을 평가하기 위해서는 목표농도 설정에 따른

에너지 절감 효과뿐만 아니라, 데드밴드 범위를 고려한 제어 설정 조건에 따른 환기량 거동, 실내 CO<sub>2</sub> 농도 특성 및 에너지 성능을 종합적으로 분석할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 단일 CO<sub>2</sub> 설정값을 적용한 환기 제어와 서로 다른 데드밴드 범위를 적용한 CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어 시나리오를 설정하고, 이러한 제어 설정 조건의 차이가 총 환기량, 실내 CO<sub>2</sub> 농도 거동 및 HVAC 에너지 소비에 미치는 영향을 비교 분석하고자 한다.

### 3. 연구 방법

#### 3.1. 해석 대상 건물 및 시뮬레이션 개요

##### 1) 해석 대상 건물 개요

본 연구에서는 업무용 건물에서 CO<sub>2</sub> 기반 수요제어환기(DCV) 제어 조건의 변화가 환기량 및 에너지 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 미국 에너지부(U.S. Department of Energy, DOE)에서 제시하는 Commercial Reference Building 중 Medium Office 모델을 해석 대상 건물로 선정하였다[14]. 해당 모델은 업무용 건물의 에너지 성능 평가 및 공조 제어 분석을 위해 선행 연구에서 널리 활용되고 있는 표준 건물 모델이다.

해석 대상 건물은 총 3개 층으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 중간층(Mid Floor)을 대표층으로 적용하였다. 해당 층은 외부에 위치한 4개의 페리미터 존(perimeter zones)과 중앙부에 위치한 1개의 코어 존(core zone)으로 구성된 총 5개의 존으로 구분된다. 이러한 존 구성은 DOE Reference Building에서 제시하는 구조를 따르며, 방위에 따른 일사 유입 및 외피 조건 차이를 반영할 수 있도록 설정된 것이다[14]. 모든 존에는 동일한 재실 스케줄을 적용하였으며, 존별 바닥 면적 차이에 따라 체적 및 재실 인원은 상이하게 산정되었다. 재실 인원은 인원당 점유 면적을 적용하여 각 존의 바닥 면적과의 곱으로 산출하였다.

환기량 변화에 따른 에너지 소비 특성을 국내의 현실에 맞도록 반영하기 위해, 건물의 외피 성능은 국내 「건물에너지절약설계기준」에서 제시하는 서울 지역(중부 2지역)의 기준 열관류율을 적용하였다[15]. 기존 Reference Building 모델의 외피 구성에 단열 성능을 보완하여 외벽, 바닥 및 지붕의 열관류율이 해당 기준 이하가 되도록 모델링하였다.

건물의 운전시간 및 재실 스케줄은 「건축물 에너지효율등급 인증제도」에서 제시하는 대규모 사무실(30m<sup>2</sup> 초과) 용도 프로필을 참고하여 설정하였다[16]. 냉난방 설비 및 조명기기의 운전시간은 건물 사용 시간과 동일하게 9시부터 18시까지로 설정하였다.

건물의 냉난방은 VRF (Variable Refrigerant Flow)시스템이 담당하는 것으로 가정하였으며, 환기는 전열교환기가 설치된 별도의 환기시스템(Heat Recovery Ventilator, HRV)이 적용된 것으로 모델링하였다. 해석 대상 건물의 외형은 Fig. 1.에 나타내었으며, 주요 시뮬레이션 입력 조건은 Table 1.에 요약하였다.

##### 2) 연계 시뮬레이션(Coupled-Simulation)

실내 CO<sub>2</sub> 농도 및 환기량 변화에 따른 에너지 소비 특성을 분석하기 위하여, 본 연구에서는 공기 흐름 및 오염물질 확산 해석이 가능

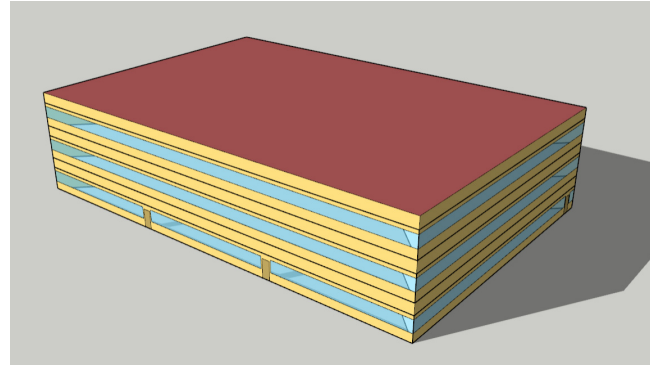


Fig. 1. A modeling of medium office building

Table 1. Simulation condition of reference building (the medium office building)

Component	Features
Building type	Medium office
Total building area	4982 (m <sup>2</sup> )
Weather data and Site location	TRY Seoul (latitude: 37.57°N, longitude: 126.97°E)
Operation schedule	09:00~18:00
Internal gain	Lighting 6.0 (W/m <sup>2</sup> ) People 18.58 (m <sup>2</sup> /person), 1 met Plug and Process 8.0 (W/m <sup>2</sup> )
Envelope	Wall 0.168, Roof 0.131, Floor 0.189 (W/m <sup>2</sup> ·K) Window 1.29 (W/m <sup>2</sup> ·K) SHGC 0.581
SetPoint	Cooling 26 Heating 20 (°C)
Infiltration	0.3 ACH
HVAC	VRF, HRV
Simulation period	1/1~12/31

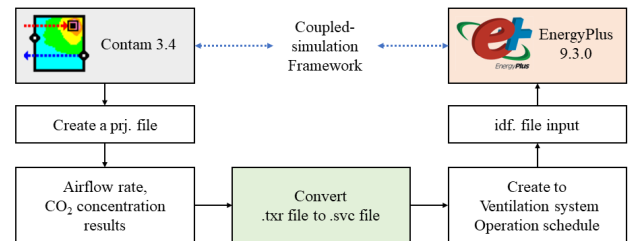


Fig. 2. Coupling framework between CONTAM and EnergyPlus for CO<sub>2</sub>-based ventilation control and energy simulation

한 CONTAM 3.4와 동적 에너지 시뮬레이션 프로그램인 EnergyPlus를 연계하여 사용하였다. CONTAM을 통해 CO<sub>2</sub> 기반 DCV 제어에 따른 존별 환기량 및 실내 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 산출하고, 해당 환기량 데이터를 EnergyPlus의 입력값으로 활용하여 냉방, 난방 및 팬 에너지 소비량을 계산하였다.

두 프로그램은 연계 시뮬레이션(coupled-simulation) 방식으로 구성되며, 동일한 시간 간격(timestep)을 기준으로 결과 데이터가 연동된다[17]. 본 연구에서 적용한 CONTAM-EnergyPlus 연계 시뮬레이션의 구성은 Fig. 2.에 제시하였다. 연계 시뮬레이션 방법은 다음과 같다.

우선, CONTAM이 실행되고 .prj 파일을 생성하면 시뮬레이션 과정을 거쳐 그 결과값으로 CO<sub>2</sub> 농도와 각 존의 공급 풍량이 산출된다.

CONTAM은 .txr (Transient Result) 형태의 파일로 결과를 출력하는데, 이를 EnergyPlus의 입력(input)으로 변환하기 위해 먼저 .csv 형식의 파일로 변환하였다. CONTAM의 결과 데이터는 데이터의 양이 방대하고 시간 해상도가 높아 EnergyPlus의 ‘Schedule:Compact’ 객체로 직접 처리하는 데 어려움이 있다. 그러므로 외부 파일의 내용을 참조하여 입력으로 변환이 가능한 ‘Schedule:File’ 객체를 이용하여 EnergyPlus의 입력 중 ‘ZoneVentilation:DesignFlowRate’ 등과 같이 환기량을 입력할 수 있는 환기 관련 객체와 연결하는 방법을 사용하였다. 이때 CONTAM과 EnergyPlus의 시간 간격(timestep)은 동일하게 유지해야 시간 스케줄의 오류를 줄일 수 있다.

### 3.2. CONTAM을 이용한 CO<sub>2</sub> 농도 변화 및 환기량 산출 방법

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 기반 DCV 제어 조건에 따른 실내 CO<sub>2</sub> 농도 변화 및 환기량 산출을 위해 멀티존 공기질 해석 프로그램인 CONTAM을 사용하였다. CONTAM은 존 간 공기 이동, 외기 유입 및 오염물질의 발생 및 제거 과정을 질량수지 기반으로 해석할 수 있어 재실자 발생 CO<sub>2</sub>에 따른 실내 농도 변화를 정밀하게 모사하는데 적합한 도구이다[17].

해석 대상 건물의 중간층은 총 5개의 존(4개 페리미터 존, 1개 코어 존)으로 정의하였으며, 각 존은 ‘Airflow Path’를 통해 상호 연결되도록 구성하였다. 존의 면적과 층고를 입력하여 체적을 자동으로 산정하였으며, 각 존의 면적 및 체적 정보는 Table 2,와 같다.

각 존에는 재실 인원에 따른 CO<sub>2</sub> 발생원이 ‘Source/sink’로 설정되었다. 단위 재실 인원당 CO<sub>2</sub> 발생률은 사무실 업무 수준인 1.0met 조건에서의 호흡 발생량을 고려하여 0.005L/s·인으로 적용하였다[12]. 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 발생률이 시간에 따라 변화하지 않는 것으로 가정하였으며, 실내 CO<sub>2</sub> 농도 변화가 재실 인원 규모 및 환기량 제어에 의해 결정되도록 설정하였다. 외기의 CO<sub>2</sub> 배경 농도는 400ppm으로 설정하였으며, 시뮬레이션 초기 실내 농도 역시 동일한 값으로 가정하였다.

재실 인원당 환기량에 해당하는 풍량을 급기인 ‘Supply’와 배기인 ‘Return’을 배치한다. 환기시스템에 해당하는 ‘Supply’와 ‘Return’의 풍량을 산출하기 위해서는 3.1절의 Table 1,의 재실 밀도를 이용한다. 재실 밀도와 존의 면적을 곱해서 각 존의 인원을 산출할 수 있다. 재실 인원에 따른 환기량 산정은 인당 환기량 기준과 재실 인원수의 곱으로 계산하였으며, 이는 ASHRAE Standard 62.1에서 제시하는 환기량 산정 방식과 동일하다[5,10]. 해당 방식은 다음의 Eq. 1로 표현된다.

$$Q_i = N \times q_p \tag{Eq. 1}$$

여기서,  $Q_i$  : 총 환기량 또는 환기 요구량 (m<sup>3</sup>/h)

$N$  : 재실 인원수 (person)

$q_p$  : 인당 환기량 기준 (m<sup>3</sup>/h·person)

국내 「건축물의 설비기준 등에 관한 규칙」에 따라 일정 규모 이상의 업무용 건축물에는 기계 환기설비 설치가 의무화되어 있으며 [18], 업무용 건축물의 경우 인당 약 29m<sup>3</sup>/h 수준의 환기량이 확보되어야 하는데, 이는 EN 13779 표준의 IDA 3등급을 기준을 활용하여, 많은 에너지 시뮬레이션 연구에서 ‘Baseline’으로 활용된다[19]. 이에 본 연구에서는 인당 환기량 기준을 29m<sup>3</sup>/h·인으로 적용하였다. 기술된 내용과 위의 Eq. 1을 이용하여 각 존의 재실 인원수, 인당 환기량, 총 환기량, 설계 풍량을 산정한 결과는 다음 Table 3,과 같다.

각 존에는 실내오염물질인 CO<sub>2</sub> 농도를 읽을 수 있는 검출부인 ‘Zone sensor’를 입력하고 배치하였으며, seonsor로부터 전달된 농도에 맞춰 급기와 배기를 조절할 수 있게 제어부 객체인 ‘Controls’를 연결한다. 본연구에서는 CONTAM에서 제공하는 ‘Control’ 중 에서 일정 농도의 범위를 벗어나면 명령이 바뀌는 ‘Lower Band Switch’를 사용하였다. ‘Lower Band Switch’에서 설정된 농도에 따라 급기와 배기에 ‘Control’을 ‘Split input’으로 연결하면 프로그램 내에서 제어가 완성된다. Fig. 3.은 본연구에서 사용된 해석 대상 건

Table 3. Calculated occupancy, ventilation rate per person, required ventilation rate, and design airflow rate for each zone

Case	Number of people	Ventilation rate per person (m <sup>3</sup> /person.h)	Required ventilation rate (m <sup>3</sup> /h)	Design airflow rate (m <sup>3</sup> /h)
Core zone	53	29	1537	1600
Perimeter zone 1	12	29	348	350
Perimeter zone 1	8	29	232	250
Perimeter zone 1	12	29	348	350
Perimeter zone 1	8	29	232	250

Table 2. Floor area, ceiling height, and calculated volume of each zone used in the CONTAM simulation model

Case	Area (m <sup>2</sup> )	Height (m)	Volumm (m <sup>3</sup> )
Core zone	983.54	2.74	2697.8
Perimeter zone 1	207.34	2.74	568.73
Perimeter zone 1	131.26	2.74	360.04
Perimeter zone 1	207.34	2.74	568.73
Perimeter zone 1	131.26	2.74	360.04

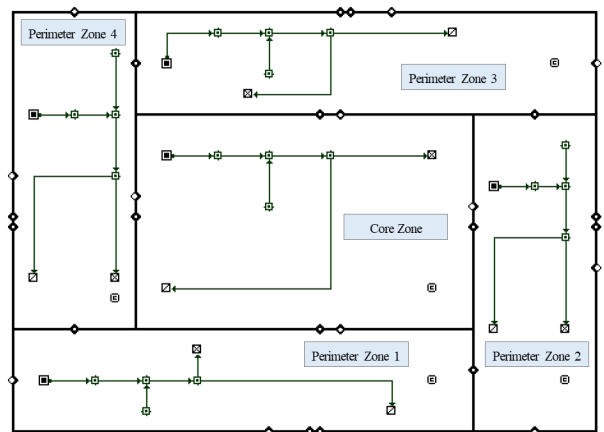


Fig. 3. Schematic of the building layout and integrated CO<sub>2</sub>-based ventilation control sensors in the CONTAM simulation model

물의 1개 층의 평면을 이용하여 각 층의 센서, 급배기, 콘트롤 및 제어 연결을 모델링한 결과를 보여준다.

### 3.3. EnergyPlus 연결 및 에너지 해석 방법

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 농도 제어 조건에 따라 CONTAM에서 산출된 환기량이 건물 에너지 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여, 동적 에너지 시뮬레이션 프로그램인 EnergyPlus를 활용하였다[20]. CONTAM을 통해 산출된 환기량(m<sup>3</sup>/h)은 앞서 설명한 연계 시뮬레이션 방법을 통해 EnergyPlus의 입력값으로 변환되었다. 외부 프로그램에서 산출된 환기량 데이터를 EnergyPlus 에너지 해석에 연동하는 방식은 기존 연구에서도 일반적으로 활용되고 있는 방법이다[13].

HVAC 시스템은 업무용 건물에서 일반적으로 적용되는 공조 시스템 구성을 참고하여 설정하였으며, 모든 분석 시나리오에서 환기 제어 조건을 제외한 HVAC 시스템 사양은 동일하게 유지하였다. 이를 통해 환기 제어 조건 변화에 따른 에너지 소비 차이가 시스템 설정 차이로부터 발생하지 않도록 하였다.

에너지 성능 평가는 CO<sub>2</sub> 제어 시나리오별 냉방 에너지, 난방 에너지 및 팬 에너지 소비량을 중심으로 수행하였다. 본 연구는 CO<sub>2</sub> 기반 DCV 제어 조건 변화에 따른 상대적 에너지 성능 차이를 분석하는 데 목적이 있으므로, 건물 형상, 외피 성능, 내부 발열 조건 및 기상 데이터는 모든 시나리오에서 동일하게 적용하고, 환기량 입력 조건만을 변화시켜 에너지 해석을 수행하였다.

### 3.4. 분석 시나리오 설정

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 농도 제어 조건 중 데드밴드의 설정 변화가 환기량 및 에너지 소비에 미치는 영향을 비교 분석하기 위하여 다음과 같이 총 4가지 환기 제어 시나리오를 설정하였다.

Case 1은 환기 제어를 적용하지 않은 기준 시나리오로, 일정한 외기량이 지속적으로 도입되는 일반 환기 방식이다. Case 2는 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 1000ppm의 단일 기준값(setpoint)으로 유지하는 고정 농도 제어 방식이다. 해당 방식은 국내외 기준에서 일반적으로 활용되는 CO<sub>2</sub> 관리 기준을 반영한 것으로, 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 기준값을 초과하지 않도록 환기량이 즉각적으로 조절된다. Case 3은 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 900~1000ppm 범위의 좁은 데드밴드(narrow deadband) 내에서 유지하는 제어 방식이며, Case 4는 800~1000ppm 범위의 넓은 데드밴드(wide deadband)를 적용한 제어 방식이다. 데드밴드가 넓어질수록 환기시스템의 작동 빈도는 감소하나, 목표농도를 유지하기 위해 요구되는 최대 환기량은 증가할 수 있다.

CO<sub>2</sub> 설정 농도 변화에 따른 최대 환기량 변화는 정상상태 질량수지(steady-state mass balance) 모델을 이용하여 산정하였다[21]. 해당 모델은 다음 Eq. 2로 표현된다.

$$Q_m = \frac{G}{C_{in} - C_{out}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Table 4. Summary of CO<sub>2</sub>-based ventilation control scenarios

Case	CO <sub>2</sub> setpoint (ppm)	Deadband (ppm)	Control strategy	Maximum airflow rate (%)
Case 1	N/A	N/A	Not control	-
Case 2	1000	0	Fixed setpoint control	-
Case 3	900~1000	100	Narrow deadband control	20
Case 4	800~1000	200	Wide deadband control	50

여기서,  $Q_m$  : 실내로 도입되는 외기량(m<sup>3</sup>/h)

$G$  : 실내 오염물질 발생량(m<sup>3</sup>/h)

$C_{in}$  : 실내 목표 농도(ppm)

$C_{out}$  : 외기 배경 농도(ppm)

각 제어 시나리오에 대해 CONTAM을 이용하여 준별 시간별 실내 CO<sub>2</sub> 농도 및 환기량을 산출하였으며, 해당 환기량 데이터를 EnergyPlus에 입력하여 시나리오별 에너지 소비 특성을 분석하였다. 본 연구에서 설정한 CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어 시나리오의 개요는 Table 4.에 정리하였다.

## 4. 결과분석

### 4.1. CO<sub>2</sub> 제어 시나리오별 실내 농도 분석

Fig. 4.부터 Fig. 7.은 일반 환기 조건과 CO<sub>2</sub> 설정 농도 기반 환기 제어 시나리오에 따른 Case 1부터 Case 4의 실내 CO<sub>2</sub> 농도의 시간별 변화를 나타낸 것이다. 모든 시나리오에서 재실 이전 시간대에는 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 외기 농도 수준으로 점진적으로 감소하였으며, 재실이 시작되는 오전 9시 이후에는 재실자에 의한 CO<sub>2</sub> 발생으로 인해 농도가 급격히 상승하는 경향을 보였다. 재실 종료 이후에는 CO<sub>2</sub> 발생이 중단됨에 따라 실내 농도가 다시 감소하는 패턴이 공통적으로 나타났다. 또한 모든 시나리오에서 코어존은 외기에 직접 접하는 페리미터존에 비해 상대적으로 높은 CO<sub>2</sub> 농도를 유지하였는데, 이는 외기 유입이 제한된 공간 특성과 재실 밀도 차이에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 4.의 일반 환기 조건인 Case 1의 결과에서는 재실 시간 동안 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 지속적으로 상승하여 최대 약 900ppm 이상에 도달하였으며, 환기량이 재실 변화나 실내 농도에 연동되지 않아 준별 농도 편차가 비교적 크게 나타났다. 이는 일정 환기량 기반 운전이 실내 공기질을 수동적으로 관리하는 방식임을 보여주며, 재실 변화에 따른 능동적인 공기질 제어에는 한계가 있음을 시사한다.

반면, 설정 농도 1000ppm을 적용한 CO<sub>2</sub> 기반 환기제어 시나리오 Case 2의 결과인 Fig. 5.에서는 재실 시작 이후 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 빠르게 목표농도에 수렴한 후 근무시간 동안 일정 농도 부근에서 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다. 이 경우 농도 진동은 거의 관찰되지 않았으며, 환기시스템이 요구 환기량을 효과적으로 조절함으로써 목표 CO<sub>2</sub> 농도를 만족시키는 것으로 확인되었다. 이는 고정 설

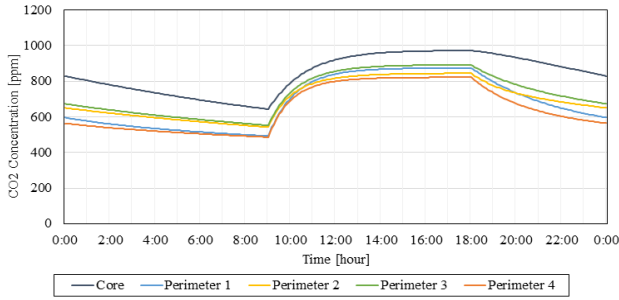


Fig. 4. Time-series variations of indoor CO<sub>2</sub> concentrations in the core and perimeter zones under general ventilation without CO<sub>2</sub>-based control

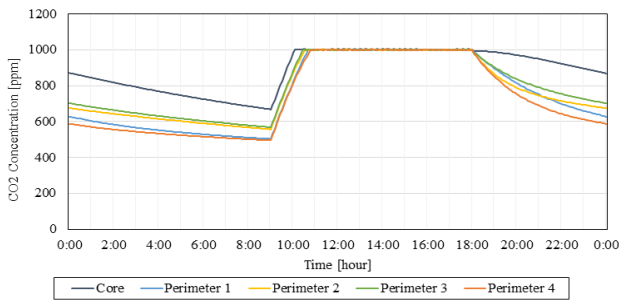


Fig. 5. Time-series variations of indoor CO<sub>2</sub> concentrations in the core and perimeter zones under CO<sub>2</sub>-based ventilation control with a fixed setpoint of 1000ppm

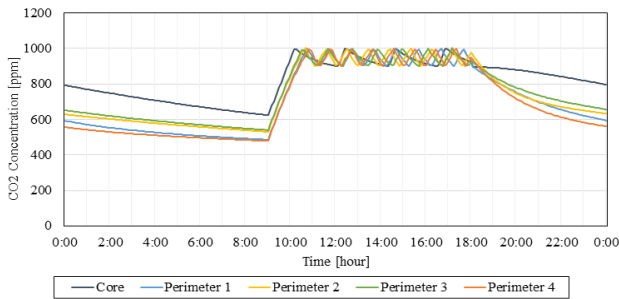


Fig. 6. Time-series variations of indoor CO<sub>2</sub> concentrations in the core and perimeter zones under CO<sub>2</sub>-based ventilation control with a narrow deadband (900~1000ppm)

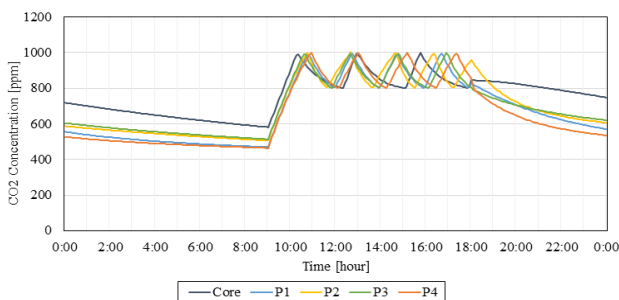


Fig. 7. Time-series variations of indoor CO<sub>2</sub> concentrations in the core and perimeter zones under CO<sub>2</sub>-based ventilation control with a wide deadband (800~1000ppm)

정 농도 제어가 제어 안정성 측면에서는 가장 보수적이고 안정적인 운전 특성을 갖는 조건임을 보여준다.

설정 농도 범위를 900~1000ppm으로 설정한 Case 3의 결과인

Table 5. Zone-averaged daily mean CO<sub>2</sub> concentrations under different ventilation control scenarios

Zone	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Core	842.61	889.91	824.48	765.30
Perimeter 1	684.27	758.17	718.29	678.64
Perimeter 2	703.03	783.63	743.36	706.25
Perimeter 3	732.76	800.05	753.98	703.62
Perimeter 4	650.68	737.41	704.26	663.37
<b>Mean</b>	<b>722.67</b>	<b>793.83</b>	<b>748.87</b>	<b>703.44</b>

Table 6. Zone-averaged CO<sub>2</sub> concentrations during occupied periods under different ventilation control scenarios

Zone	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Core	915.80	984.36	927.14	861.62
Perimeter 1	824.28	959.72	913.92	860.11
Perimeter 2	806.24	967.77	921.37	872.60
Perimeter 3	844.64	969.98	920.40	866.50
Perimeter 4	783.71	957.58	912.85	865.46
<b>Mean</b>	<b>834.93</b>	<b>967.88</b>	<b>919.14</b>	<b>865.26</b>

Fig. 6.의 경우, 실내 CO<sub>2</sub> 농도는 전반적으로 해당 범위 내에서 유지 되었으나, 좁은 데드밴드와 함께 근무시간 동안 비교적 빈번한 농도 진동이 발생하였다. 이는 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 상하한 경계에 도달할 때마다 환기량이 반복적으로 조절되기 때문으로, 환기시스템의 운전 빈도가 증가하는 특성을 보였다.

한편, 설정 농도 범위를 800~1000ppm으로 확대한 Case 4의 결과인 Fig. 7.의 경우에는 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 보다 낮은 수준에서 유지 되었으나, 데드밴드 확대에 따라 농도의 변동 폭이 증가하고 주기적인 진동이 뚜렷하게 나타났다. 특히 일부 시간대에서는 CO<sub>2</sub> 농도가 하한값에 근접하는 현상도 관찰되었으며, 이는 환기량의 변동 폭이 크게 증가한 것으로 판단된다. 이는 실내공기질 측면에서는 가장 유리한 조건이나, 환기량 증가로 인한 에너지 소비 및 제어 안정성 측면에서는 불리할 수 있음을 시사한다.

이상의 결과를 종합하면, CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어에서 설정 농도 및 데드밴드 폭은 실내공기질뿐만 아니라 제어 안정성과 환기시스템의 운전 특성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수임을 확인할 수 있다. 좁은 데드밴드는 제어 응답성을 좋은 반면 제어 빈도를 증가시키는 경향을 보였으며, 넓은 데드밴드는 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 낮게 유지할 수 있으나 농도 변동 폭이 커져 제어 안정성이 저하될 수 있다. 따라서 CO<sub>2</sub> 설정 농도의 선택은 실내 공기질 개선과 에너지 소비, 제어 안정성 간의 균형을 고려하여 결정될 필요가 있다.

Table 5.는 CO<sub>2</sub> 기반 환기제어 시나리오별 존 평균 CO<sub>2</sub> 농도를 일평균(Daily)으로 비교한 결과이고, Table 6.은 CO<sub>2</sub> 기반 환기제어 시나리오별 존 평균 CO<sub>2</sub> 농도를 재실시간 평균(Occupied Hours) 기준으로 비교한 결과를 나타낸다. 모든 시나리오에서 재실 시간 평균 CO<sub>2</sub> 농도가 일평균보다 높게 나타났으며, 이는 재실 시간 동안 인체 CO<sub>2</sub> 발생이 지속되는 반면 비재실 시간에는 환기 및 확산에 의해 농도가 회복되는 특성이 반영된 결과이다.

재실시간 평균 CO<sub>2</sub> 농도는 CO<sub>2</sub> 하한을 적용한 시나리오에서 두

렷하게 감소하는 경향을 보였으며, Case 4가 모든 존에서 가장 낮은 평균 농도를 나타내어 실내 공기질 측면에서 가장 우수한 성능을 보였다. 반면 Case 2는 평균 농도가 상대적으로 높게 나타났으나, 모든 존에서 설정된 농도인 허용 기준 1000ppm 이내로 안정적으로 유지되었다.

존별로는 외기와의 직접적인 접촉이 제한적인 Core 존에서 CO<sub>2</sub> 농도가 다른 존들에 비해 상대적으로 높게 나타났으며, CO<sub>2</sub> 제어의 데드밴드가 클수록 존 간 농도 편차가 감소하는 경향을 보였다. 이는 CO<sub>2</sub> 기반 환기제어가 실내공기질의 공간적 균일성 향상에도 기여할 수 있음을 시사한다. 이러한 실내공기질 성능 개선 효과는 에너지 분석 결과와 함께, CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어 적용 시 에너지 절감과 실내 공기질 개선 간의 상호 트레이드오프(trade-off) 관계를 종합적으로 고려할 필요가 있음을 보여준다.

#### 4.2. 환기량 결과 해석

Fig. 8.부터 Fig. 11.까지는 제어 시나리오에 따른 모든 존에 공급된 통 환기량의 변화를 하루 중 재실 시간인 9시부터 18시까지의 시간대에 한정하여 분석한 결과를 나타낸다.

Fig. 8.은 일반 환기 조건인 Case 1의 재실 시간 동안의 환기량 변화를 나타낸 것이다. 해당 조건에서는 9시부터 18시까지 환기량이 2800m<sup>3</sup>/h 수준으로 일정하게 유지되었으며, 재실 인원 변화나 실내 CO<sub>2</sub> 농도 변동과 무관하게 정풍량 운전이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 일반 환기 방식이 환기시스템의 운전 제어 측면에서는 단순하지만 실내공기질 변화에 능동적으로 대응하지 못하는 구조적 한계를 가짐을 보여준다.

Fig. 9.는 CO<sub>2</sub> 설정 농도를 1000ppm으로 적용한 환기제어 조건인 Case 2의 환기량 결과를 나타낸 것이다. 재실 시작 이후 바로 환기시스템은 운전되지 않았고, 10시부터 CO<sub>2</sub> 농도 상승 기간에 따라 단계적으로 증가하였으며, 근무시간 동안 약 1800~2800m<sup>3</sup>/h 범위에서 큰 편차 없이 움직이는 변동 특성을 보였다. 이는 고정 설정 농도 제어가 각 존의 요구 환기량을 충족하면서도 과도한 환기량 증가를 억제하는 운전 특성을 갖고있는것을 의미한다.

Fig. 10.은 설정 농도 범위를 900~1000ppm으로 설정한 좁은 데드밴드 제어 조건인 Case 3의 환기량 변화를 보여준다. 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 900ppm까지 낮추기 위해 좀더 큰 환기량이 공급되는 것을 확인할 수 있었다. 해당 제어에서는 환기량이 크게 조절되면서, 환기량의 단기적인 증감이 반복적으로 나타났다. 이러한 환기량 변동 특성은 제어 응답성이 향상된 결과로도 해석될 수 있으나, 환기시스템의 운전에 따른 에너지 부하 변동 가능성을 내포한다.

한편, Fig. 11.은 설정 농도 범위를 800~1000ppm으로 확대한 넓은 데드밴드 제어 조건인 Case 4의 재실 시간 동안의 환기량 변화를 나타낸 것이다. 이 경우 환기량은 근무시간 동안 최대 4200m<sup>3</sup>/h까지 증가하는 구간이 관찰되었으며, 데드밴드 확대로 인해 환기량 변동 폭이 가장 크게 나타났다. 이는 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 낮출 수준으로 유지하기 위해 더 많은 외기 도입이 요구되었기 때문으로, 환기 성능 측면에서는 유리하나 에너지 소비 증가 가능성이 가장 큰 조건임을 시사한다.

Table 7.은 CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어 시나리오별 하루 누적 외기량, 평

균 외기 도입량, 그리고 최대 외기 도입량을 비교한 결과이다. 고정 풍량 방식인 Case 1의 경우, 환기시스템이 재실 시간 동안 일정 풍량으로 운전됨에 따라 누적 외기량이 25,200m<sup>3</sup>/day로 가장 크게 나타났으며, 평균 및 최대 외기량 또한 동일하게 2,800m<sup>3</sup>/h로 유지되었다. 이는 재실 인원 변화나 실내 오염 수준과 무관하게 외기가 지속적으로 도입되는 기존 환기 방식의 특성을 잘 보여준다.

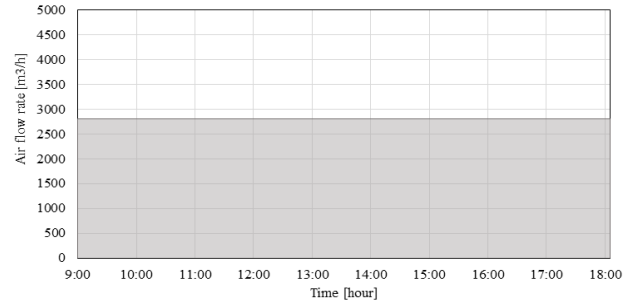


Fig. 8. Time-series variation of air flow rate under general ventilation with a constant air flow rate during the occupied period

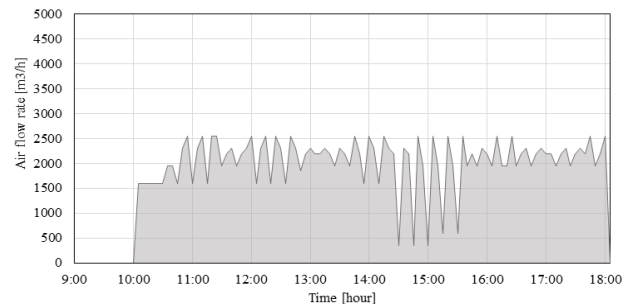


Fig. 9. Time-series variation of air flow rate under CO<sub>2</sub>-based ventilation control with a fixed setpoint of 1000ppm

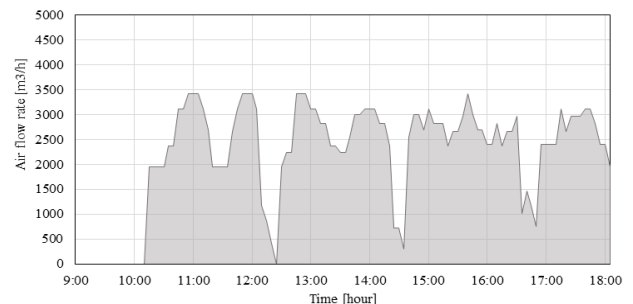


Fig. 10. Time-series variation of air flow rate under CO<sub>2</sub>-based ventilation control with a narrow deadband (900~1000ppm)

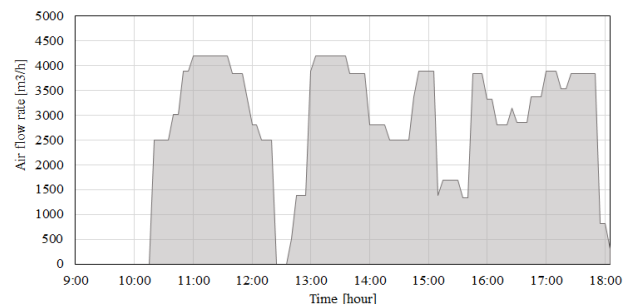


Fig. 11. Time-series variation of air flow rate under CO<sub>2</sub>-based ventilation control with a wide deadband (800~1000ppm)

Table 7. Comparison of cumulative, average, and maximum outdoor air flow rates under different CO<sub>2</sub>-based ventilation control scenarios

Zone	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Cumulative ventilation air volume (m <sup>3</sup> /day)	25200	17408.3	19827.5	23675.8
Average ventilation air flow rate (m <sup>3</sup> /h)	2800	1934.3	2185	2627.9
Maximum ventilation air flow rate (m <sup>3</sup> /h)	2800	2800	3420	4190

반면, CO<sub>2</sub> 기반 DCV가 적용된 Case 2부터 Case 4에서는 고정 환기 방식 대비 누적 외기량이 현저히 감소하는 경향을 보였다. 특히 좁은 데드밴드를 적용한 Case 2에서는 하루 누적 외기량이 17,408m<sup>3</sup>/day로 Case 1 대비 약 31% 감소하였으며, 평균 외기량 또한 1,934m<sup>3</sup>/h로 가장 낮게 나타났다. 이는 CO<sub>2</sub> 농도가 하한값 이하로 유지되는 구간에서 환기 운전이 억제되면서 불필요한 외기 도입이 효과적으로 감소했기 때문이다.

데드밴드 범위를 적용한 Case 3과 Case 4에서는 평균 환기량이 각각 2,185m<sup>3</sup>/h와 2,628m<sup>3</sup>/h로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 최대 풍량은 Case 3에서 3,420m<sup>3</sup>/h, Case 4에서 4,190m<sup>3</sup>/h까지 증가하였다. 이는 목표 CO<sub>2</sub> 농도를 더 낮은 수준으로 유지하기 위해 환기시스템이 단시간에 더 큰 풍량으로 응답하도록 설정되었기 때문에, 데드밴드 확대가 평균 환기량 감소에는 기여할 수 있으나, 동시에 최대 환기량 및 순간적인 풍량 변동을 증가시키는 특성을 가진다는 점을 보여준다.

종합적으로, 환기량 분석 결과는 CO<sub>2</sub> 기반 DCV 제어에서 설정 농도 및 데드밴드 범위가 단순히 총 환기량뿐만 아니라 환기시스템의 운전 패턴과 피크(peak) 풍량 특성에도 중요한 영향을 미친다는 것을 보여준다. 즉, 데드밴드의 적용은 평균 환기량 절감과 실내공기질 유지에는 유리하나 제어 문제와 동시에 순간 최대 풍량 증가라는 트레이드오프(trade-off)를 수반한다. 이러한 환기량의 특성 차이는 다음에서 분석하는 냉방, 난방, 송풍 에너지 소비 특성에 직접적인 영향을 미치는 요인으로 작용한다.

### 4.3. 에너지 소비 결과분석

#### 1) 냉방 에너지

Table 8.은 제어 시나리오에 따른 월별 냉방 에너지 소비량과 감소 비율을 나타낸다. 냉방 운전은 주로 5월부터 9월까지 발생하였으며, 3월과 11월에는 계절 제어 조건에 따라 모든 시나리오에서 냉방 운전이 발생하지 않았다. 연간 냉방 에너지 소비량은 기준 Case 1 대비 평균 환기량 절감과 농도 1000ppm으로 제어한 Case 2에서 약 0.15% 감소한 반면, 하한 농도를 900ppm 및 800ppm으로 설정한 Case 3과 Case 4에서는 각각 0.12%와 0.55% 증가하였다. 다만 시나리오 간 냉방 에너지 차이는 ±1% 이내로 제한적이었다.

가장 외기온이 높은 기간인 7월과 8월에는 전체 환기량이 감소하여, 외기 도입량이 적어짐으로 인한 냉방 에너지 감소 효과가 아주 적게 나타났다. 나머지 다른 월의 냉방 에너지 결과를 살펴보면 오히려

Table 8. Monthly and annual cooling energy consumption under different CO<sub>2</sub>-based ventilation control scenarios

Month	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Jan	0.00	0.00	0.00	0.00
Feb	0.00	0.00	0.00	0.00
Mar	0.00	0.00	0.00	0.00
Apr	0.00	0.00	0.00	0.00
May	3081.96	3135.30	3135.22	3127.88
Jun	5543.81	5555.15	5559.46	5574.62
Jul	7437.48	7392.04	7424.91	7480.54
Aug	10439.07	10348.36	10390.74	10449.78
Sep	5072.77	5095.56	5101.87	5116.74
Oct	0.00	0.00	0.00	0.00
Nov	0.00	0.00	0.00	0.00
Dec	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	31575.08	31526.41	31612.20	31749.57
Percentage (%)	-	-0.15%	0.12%	0.55%

Unit: kWh

Table 9. Monthly and annual heating energy consumption under different CO<sub>2</sub>-based ventilation control scenarios

Month	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Jan	6379.90	6176.31	6198.02	6254.53
Feb	3858.54	3708.17	3723.58	3758.92
Mar	1214.00	1117.64	1125.80	1144.11
Apr	327.50	301.19	302.85	307.22
May	0.00	0.00	0.00	0.00
Jun	0.00	0.00	0.00	0.00
Jul	0.00	0.00	0.00	0.00
Aug	0.00	0.00	0.00	0.00
Sep	0.00	0.00	0.00	0.00
Oct	0.40	0.27	0.28	0.29
Nov	1029.19	944.31	950.19	964.36
Dec	4685.93	4523.46	4541.59	4587.76
Total	17495.44	16771.35	16842.29	17017.18
Percentage (%)	-	-4.14%	-3.73%	-2.73%

Unit: kWh

증가하는 결과가 나타나는데, 환기량을 최소화하는 과정 중 실내에 발생한 열이 냉방부하로 작용하면서, 외기도입에 의한 냉각 효과가 상실되기 때문인 것으로 판단된다. 이는 본 연구에서 Economizer (외기 냉방)를 적용하지 않은 VRF+ERV 시스템 구성 하에서 냉방 에너지가 환기량 변화보다는 외기 기상조건 및 내부 발열의 영향에 더 크게 지배되기 때문으로 해석된다.

#### 2) 난방 에너지

Table 9.은 제어 시나리오에 따른 월별 난방 에너지 소비량과 감소 비율을 나타낸다. 난방에너지는 주로 1~4월과 10~12월에 발생하였으며, 모든 CO<sub>2</sub> 기반 환기제어 시나리오에서 기준 시나리오 대비 일관된 감소 경향을 보였다. 연간 난방 에너지 소비량은 Case 2에서 약 4.14% 감소하여 가장 큰 절감 효과를 나타냈으며, Case 3과

Table 10. Monthly and annual ventilation fan energy consumption under different CO<sub>2</sub>-based ventilation control scenarios

Month	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Jan	440.82	234.89	249.53	311.73
Feb	400.74	213.54	226.85	283.40
Mar	460.86	245.57	260.87	325.90
Apr	400.74	213.54	226.85	283.40
May	460.86	245.57	260.87	325.90
Jun	440.82	234.89	249.53	311.73
Jul	420.78	224.22	238.19	297.57
Aug	460.86	245.57	260.87	325.90
Sep	420.78	224.22	238.19	297.57
Oct	440.82	234.89	249.53	311.73
Nov	440.82	234.89	249.53	311.73
Dec	400.74	213.54	226.85	283.40
Total	5189.64	2765.35	2937.65	3669.97
Percentage (%)	-	-46.71%	-43.39%	-29.28%

Unit: kWh

Case 4에서도 각각 3.73%와 2.73%의 감소가 확인되었다. 이는 난방 기간 동안 외기 온도가 실내 온도보다 낮은 조건에서 CO<sub>2</sub> 기반 환기제어를 통해 불필요한 외기 도입이 억제됨에 따라 외기로 인한 열 손실이 감소한 결과로 해석된다. 한편 CO<sub>2</sub> 하한 농도를 낮게 설정한 시나리오일수록 평균 환기량과 최대 환기량이 증가하여 난방 에너지 절감 효과가 일부 감소하는 경향을 보였다.

### 3) 팬 에너지

Table 10.은 제어 시나리오에 따른 월별 팬 에너지 소비량과 감소 비율을 나타낸다. 팬 에너지에서는 CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어에 의한 가장 뚜렷한 차이가 나타났다. 연간 팬 에너지 소비량은 Case 2에서 기준 대비 46.71% 감소하였으며, Case 3과 Case 4에서도 각각 43.39%와 29.28%의 감소가 확인되었다. 팬 에너지는 환기 풍량 및 운전 시간에 직접적으로 비례하는 특성을 가지므로, CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어를 통해 재실자 요구량을 초과하는 환기 풍량이 효과적으로 억제되는 경우 에너지 절감 효과가 누적되어 크게 나타난 것으로 판단된다. 반면 CO<sub>2</sub> 하한 농도를 낮게 설정하면 환기 개시 빈도와 평균 풍량이 증가하여 팬 에너지 절감 효과는 감소하였다.

### 4) 총 HVAC 에너지

Fig. 12.는 연간 총 HVAC 전기에너지 소비량을 종합적으로 비교한 결과이다. 모든 CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어 시나리오인 Case 2~Case 3에서 기준 시나리오 Case 1과 대비 총에너지 소비가 감소하는 것으로 나타났다. 총에너지 감소율은 Case 2에서 5.89%로 가장 컸으며, Case 3과 Case 4에서는 각각 5.29%와 3.36%의 감소가 확인되었다. 냉방 에너지는 전체 에너지에서 가장 큰 비중을 차지하였으나 시나리오 간 변화 폭은 제한적이었으며, 난방 에너지는 중간 수준의 절감 효과를 보였다. 반면 팬 에너지의 대폭적인 저감이 전체 HVAC 에너지 절감의 핵심 요인으로 작용하는 것을 확인하였다.

종합하면, CO<sub>2</sub> 기반 환기제어는 냉방 에너지보다는 난방에너지

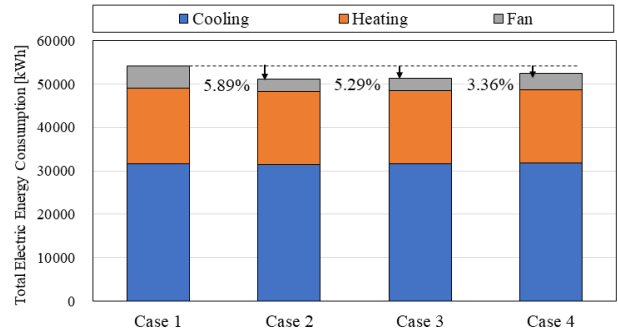


Fig. 12. Comparison of annual total HVAC electric energy consumption by end use under different CO<sub>2</sub>-based ventilation control scenarios

의 절감효과가 더 컸고, 특히 팬 에너지에서 더 큰 절감 효과를 나타냈다. 전체 연간 HVAC 에너지 절감의 주요 요인은 환기량 감소에 따른 송풍 에너지 저감에 있음을 확인할 수 있다. 이는 CO<sub>2</sub> 기반 DCV가 원하는 수준의 적절한 실내공기질을 유지하면서도 에너지 효율을 동시에 개선할 수 있는 운전 방법임을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 업무용 건물을 대상으로 CO<sub>2</sub> 농도 설정 조건 변화에 따른 수요제어환기(DCV) 전략이 실내공기질 및 건물의 에너지 성능에 미치는 영향을 CONTAM-EnergyPlus 연계 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 이를 위해 일반 환기 조건을 기준 시나리오로 설정하고, CO<sub>2</sub> 농도를 1000ppm으로 고정되게 설정한 제어와 900~1000ppm, 800~1000ppm의 데드밴드를 갖는 제어 시나리오를 각각 구성하여 환기량의 변화 실내 CO<sub>2</sub> 농도 변화, 그리고 냉방, 난방, 팬 에너지를 포함한 HVAC 에너지 소비 특성을 종합적으로 비교 분석하였다.

분석 결과, 모든 CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어 시나리오에서 실내 CO<sub>2</sub> 농도는 설정된 제어 범위 내에서 안정적으로 유지되었으며, CO<sub>2</sub> 하한 농도를 적용하여 일정영역의 데드밴드를 적용한 시나리오일수록 재실시간 평균 CO<sub>2</sub> 농도가 낮아져 오염물질 저감 능력이 향상되는 것으로 나타났다. 특히 800~1000ppm의 넓은 데드밴드를 갖는 제어 시나리오는 환기량이 여유가 되는 상황에서 CO<sub>2</sub> 농도를 낮게 유지할 수 있기 때문에 모든 존에서 가장 낮은 재실자 노출 CO<sub>2</sub> 농도를 보였으며, 이는 실내 공기질 측면에서 가장 우수한 성능을 의미한다. 반면 CO<sub>2</sub> 하한을 적용하지 않은 1000ppm 고정 제어 시나리오는 평균 CO<sub>2</sub> 농도가 데드밴드를 갖는 다른시나리오에 비해 상대적으로 높았으나, 모든 존에서 허용 기준 이내로 유지되어 실내 공기질 요구 조건을 만족하였다.

에너지 측면에서 냉방 에너지는 CO<sub>2</sub> 제어 조건 변화에 따라 ±1% 이내의 제한적인 변화를 보였으며, 이는 본 연구에서 외기냉방(Economizer)을 적용하지 않은 VRF+ERV 시스템 구성 하에서 냉방 에너지가 환기량의 변화보다는 외기의 기상조건 및 내부발열의 영향을 더 크게 받기 때문으로 해석된다. 반면 난방 에너지는 모든 CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어 시나리오에서 기준 대비 2.7~4.1% 감소하

여, 동절기의 환기를 위한 외기 도입량 감소에 따른 열손실 저감 효과가 명확하게 확인되었다.

가장 확실하게 나타난 에너지 저감 효과는 팬 에너지 소비량 분석 결과에서 나타났으며, CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어 적용 시 기준 시나리오 대비 최대 약 46.7%의 팬 에너지의 감소가 관찰되었다. 이는 환기 풍량과 운전시간이 CO<sub>2</sub> 농도에 따라 능동적이고 효과적으로 제어됨으로써, 재실자의 환기 요구량을 초과하는 불필요한 송풍량이 억제된 결과로 판단된다. 이러한 팬 에너지 저감 효과는 냉방 및 난방에너지의 상대적으로 작은 변화와 결합되어, 연간 총 HVAC 전기에너지 소비를 최대 약 5.9%까지 감소시키는 핵심 요인으로 작용하였다.

제어 시나리오별 성능을 종합적으로 비교한 결과, CO<sub>2</sub> 하한 농도를 낮게 설정할수록 오염물질 저감 능력은 향상되었으나 평균 환기량 증가로 인해 에너지 절감 효과는 감소하는 경향을 보였다. 즉, CO<sub>2</sub> 기반 DCV 적용 시 실내공기질 개선과 에너지 절약 간에는 명확한 트레이드오프 관계가 존재하며, 두 성능을 동시에 적극적으로 만족하는 방법에는 상당한 어려움이 있음을 확인하였다. 따라서 건물의 용도, 재실 특성, 공간의 사용 용도, 설비시스템의 운영 목표에 따라 적절한 CO<sub>2</sub> 제어 기준을 선택하는 것이 중요하며, 현행 일률적인 환기량 기준에서 벗어나, 재실 인원 변화에 따라 환기량을 능동적으로 조절하는 환기시스템의 설치를 유도하는 제도적 장치가 필요하다.

CO<sub>2</sub> 기반 수요제어환기는 실내공기질을 허용 기준 이상으로 안정적으로 유지하면서도 HVAC 에너지 성능을 개선할 수 있는 효과적인 운전 전략임을 확인하였다. 특히 본 연구의 업무용 건물을 대상으로 하였을 때는 전체 에너지 절감 효과는 냉방보다는 난방 및 송풍 에너지 저감에 의해 주도되었으며, 이는 향후 업무용 건물 환기 제어 전략 수립 시 송풍 에너지의 중요성을 강조한다.

향후 연구에서는 본 연구에서 다루지 못한 문제인 실내공기질을 효과적으로 개선하면서도 에너지를 효과적으로 절약할 수 있는 방안에 대한 깊이 있는 연구가 필요하다. 또한 외기 냉방(Economizer) 적용 여부, 다양한 기후 조건에서의 적용, 그리고 재실 변동성 등을 고려한 추가 분석을 통해 CO<sub>2</sub> 기반 환기 제어의 적용 범위와 방법을 다양화하고, 에너지 저감 잠재력을 보다 확장하여 검토할 필요가 있을 것이다.

## Acknowledgement

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. RS-2023-00248898).

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00522046).

## References

[1] S.J. Emmerich, A.K. Persily, State-of-the-art review of CO<sub>2</sub> demand controlled ventilation technology and application, *ASHRAE Transactions*, 107(2), 2001, pp.1-14.  
 [2] O.A. Seppänen, W.J. Fisk, M.J. Mendell, Association of ventilation rates and CO<sub>2</sub> concentrations with health and other responses in commercial

and institutional buildings, *Indoor Air*, 9(4), 1999, pp.226-252.  
 [3] A.K. Persily, L. de Jonge, Carbon dioxide generation rates for building occupants, *Indoor Air*, 27(5), 2017, pp.868-879.  
 [4] U. Satish et al., Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance, *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 2012, pp.1671-1677.  
 [5] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 62.1: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2019.  
 [6] B. Du et al., Indoor CO<sub>2</sub> concentrations and cognitive function: A critical review, *Indoor Air*, 30(6), 2020, pp.1067-1082.  
 [7] G. Guyot, M.H. Sherman, I.S. Walker, Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review, *Energy and Buildings*, 165, 2018, pp.416-430.  
 [8] W. Zhang, L. Li, Y. Li, Natural ventilation and energy consumption research for dry sports halls within national fitness centers in cold regions—case study of Qingdao, buildings, 15(5), 2025, 734.  
 [9] 환경부, 실내공기질 관리법, <https://www.law.go.kr>, 2023. // (Ministry of Environment, Indoor Air Quality Control Act, <https://www.law.go.kr>, 2023.)  
 [10] ASHRAE, ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2019.  
 [11] European Committee for Standardization, EN 16798-1: Energy performance of buildings – Ventilation for buildings, Brussels: European Committee for Standardization, 2019.  
 [12] W.J. Fisk, The ventilation problem in schools: Literature review, *Indoor Air*, 27(6), 2017, pp.1039-1051.  
 [13] Z.J. Zhai, Q.Y. Chen, Performance of coupled building energy and computational fluid dynamics simulations, *Energy and Buildings*, 37(4), 2005, pp.333-344.  
 [14] M. Deru et al., U.S. Department of energy commercial reference building models of the national building stock, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5500-46861, 2011.  
 [15] 국토교통부, 건물에너지절약설계기준, <https://www.law.go.kr>, 2022. // (Ministry of Land, Infrastructure and transport, building energy conservation design standards, <https://www.law.go.kr>, 2022.)  
 [16] 한국에너지공단, 건축물 에너지효율등급 인증제도 업무용 건축물 용도 프로파일, 2021. // (Korea Energy Agency, building energy efficiency rating system: Office building use profile, 2021.)  
 [17] G.N. Walton, W.S. Dols, CONTAM user guide and program documentation version 3.4, gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2013.  
 [18] 국토교통부, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙, <https://www.law.go.kr>, 2023. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Rules on building facilities standards, <https://www.law.go.kr>, 2023.)  
 [19] European Committee for Standardization, EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, Brussels: European Committee for Standardization, 2007.  
 [20] D.B. Crawley et al., EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings*, 33(4), 2001, pp.319-331.  
 [21] A.K. Persily, Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide, *ASHRAE Transactions*, 103, Pt.2, 1997, pp.193-204.