



## 에너지 효율을 고려한 열회수 환기설비 통합제어 알고리즘 개발 및 성능평가

### *Performance Evaluation of an Integrated Control Algorithm for Energy-Efficient Energy Recovery Ventilation Systems*

배상환\* · 유정연\*\*

Sanghwan Bae\* · Jungyeon Yu\*\*

\* Corresponding author, Senior Researcher, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea (sanghwan@kict.re.kr)

\*\* Postdoctoral Researcher, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea (starry1005@kict.re.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** Energy recovery ventilation (ERV) systems commonly include a bypass function, but its application has been limited to avoiding heat exchange when the indoor-outdoor temperature difference is small. Consequently, its potential as an outdoor-air-based energy-saving strategy has not been fully utilized. This study proposes an improved bypass control method that actively uses outdoor air for thermal advantage and evaluates its energy-saving performance experimentally. **Method:** Unlike conventional passive bypass operation, the proposed method determines whether outdoor air introduction supports achieving the indoor set-point temperature using real-time indoor CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and temperature data. This enables the bypass function to operate as an outdoor air economizer. Energy-saving performance was tested in a controlled climatic chamber under intermediate-season conditions across six cases combining ventilation modes and mechanical heating/cooling. Power consumption and indoor temperature responses were continuously measured. **Result:** The proposed method achieved approximately 15% heating and 31% cooling energy savings compared with heat recovery operation. In addition, bypass-only operation demonstrated clear potential for pre-heating and pre-cooling. These findings confirm the method's effectiveness in reducing mechanical conditioning energy while maintaining acceptable indoor thermal conditions.

#### KEYWORD

바이패스 제어  
열회수 환기설비  
실내공기질  
에너지 절감  
실험적 성능평가

Bypass Control  
Energy Recovery Ventilation, ERV  
Indoor Air Quality  
Energy Saving  
Experimental Performance Evaluation

#### ACCEPTANCE INFO

Received Dec. 12, 2025  
Final revision received Dec. 23, 2025  
Accepted Dec. 30, 2025

© 2026. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

우리나라 공동주택은 2006년 이후 「공동주택 환기설비 설치기준」에 따라 환기설비 설치가 의무화되면서, 주거공간의 실내공기질 개선을 위한 기계환기 시스템의 보급이 본격화되었다[1]. 이후 2016년 개정된 「건강친화형 주택건설 기준」에서는 열회수형 환기장치 적용 시 바이패스(Bypass) 기능을 포함한 시스템 구성이 요구되면서, 공동주택 환기설비는 열회수 환기모드, 공기청정(내부순환) 모드, 바이패스 기능을 갖춘 복합 운전 체계로 구조적으로 발전하게 되었다[2].

현재 국내 공동주택에 적용되는 대부분의 환기설비는 열회수 환기모드, 공기청정 모드, 바이패스 기능을 기본적으로 구비하고 있으나, 실제 운전은 여전히 거주자의 수동 선택에 의존하는 방식이 주를 이루고 있다. 이로 인해 실내 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도 및 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 농도 변화에 능동적으로 대응하지 못하거나, 불필요한 환기 운전으로 인한 냉·난방 에너지 손실이 반복적으로 발생하는 문제가 지속적으로 지적되고 있다[3].

한편, 기존 환기설비에서의 바이패스 운전은 주로 실내외 온도차

가 작아 열교환 효율이 낮은 조건에서 열교환 소자를 우회하여 송풍 동력을 절감하는 보조 기능 수준으로 운용되어 왔다. 즉, 바이패스 기능이 외기를 적극적으로 활용한 외기난방 및 외기냉방 관점의 능동적 에너지 절약 제어기술로까지 확장·활용되는 사례는 매우 제한적인 실정이다.

이러한 기술적 한계를 배경으로, 본 연구에서는 실내 CO<sub>2</sub> 농도, PM<sub>2.5</sub> 농도, 실내외 온도 조건 및 냉·난방 상태를 동시에 고려하여 환기설비의 운전모드를 자동으로 전환하는 자율운전형 환기설비 제어기술을 개발하고, 그 성능을 실험적으로 평가하는 것을 목적으로 한다. 특히 본 연구는 기존의 단순 바이패스 제어 개념을 확장하여, 중간기 조건에서 외기를 적극적으로 활용하는 외기난방 및 외기냉방 기반 에너지 절약형 환기제어 전략의 실효성을 검증하는 데 연구의 초점을 둔다.

### 1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 공동주택 및 소형 건축물에 적용되는 열회수 환기설비를 대상으로, 실내공기질 및 에너지 효율을 동시에 고려하는 자율운전형 환기설비 통합제어 알고리즘을 개발하고, 그 제어 성능을 실험적으로 검증하는 것을 연구의 범위로 설정하였다. 이를 위해 본 연구는 제어 알고리즘 설계, 실험 환경 구축, 성능 평가의 세 단계로 구성하여 수행하였다.

먼저, 제어 알고리즘 개발 단계에서는 실내 CO<sub>2</sub> 농도, PM<sub>2.5</sub> 농도, 실내외 온도 및 냉·난방 운전 상태를 입력 변수로 설정하고, 이를 기반으로 열회수 모드, 공기청정 모드, 바이패스 모드 및 미작동 모드의 4가지 운전모드를 자동으로 전환하는 통합 제어 논리를 설계하였다. 해당 알고리즘은 기존 환기설비의 수동 선택 기반 운전 방식과 달리, 실내공기질 조건과 에너지 효율을 동시에 고려하여 최적 운전상태를 자율적으로 결정하도록 구성하였다.

다음으로, 성능 검증을 위한 실험 단계에서는 공인시험기관의 실험설비를 활용하여 열회수 환기장치, 공기조기(AHU) 및 냉·난방 설비가 연계된 실험 계통을 구축하고, 외기 조건 및 실내 부하 조건을 단계적으로 변화시키는 방식으로 시험을 수행하였다. 특히 간절기 외기 조건을 중심으로, 기존 열회수 환기모드 운전과 본 연구에서 개발한 자율운전 제어모드 적용 조건을 비교·분석하였다.

성능 평가는 환기설비 운전 시 소비전력, 냉·난방 설비 연동 운전 에너지, 운전모드별 전력 소비 특성을 주요 평가 지표로 설정하여 수행하였다. 이를 통해 기존 운전 방식 대비 자율운전 제어 적용 시 에너지 절감 가능성을 정량적으로 비교·분석하였다.

한편, 본 연구의 적용 범위는 열회수 환기설비 자체의 제어기술과 그에 따른 에너지 소비 특성 평가에 한정하며, 건축물 외피 성능, 거주자 재실 스케줄 변화, 장기 실측 데이터 기반의 연간 에너지 소비량 예측 등은 본 연구 범위에 포함하지 않았다. 또한 실험은 표준화된 실내외 환경조건 하에서의 단기 성능 평가를 중심으로 수행되었으며, 실제 공동주택 장기 실측을 통한 계절별 운전 특성 분석은 향후 연구 과제로 남긴다.

## 2. 환기설비 제어기술

### 2.1. 선행연구 고찰

우리나라와 해외에서는 실내공기질 개선과 에너지 절약을 동시에 달성하기 위한 환기설비 제어기술과 관련하여 다양한 연구가 수행되어 왔다. 특히 CO<sub>2</sub> 농도, 실내외 온습도, 재실자 수 등을 이용한 수요제어환기(DCV, Demand Controlled Ventilation)와 열회수형 환기장치(ERV/HRV)의 운전모드(열회수·바이패스 등)를 조합한 제어전략이 주요 연구 주제로 논의되어 왔다.

먼저, 센서 기반 DCV에 대한 기초 연구로 Fisk(1998)는 에너지 절약형 환기제어의 관점에서 센서 기반 DCV 기술을 포괄적으로 검토하고, CO<sub>2</sub> 센서, 휘발성유기화합물(VOC) 센서 등을 이용한 환기량 제어가 팬 에너지 사용량을 현저히 줄이면서도 허용 가능한 실내 공기질을 유지할 수 있음을 정리하였다[4]. 다만, 이 연구에서는 전열교환 환기장치의 모드 전환 보다는 환기량 변조와 센서 신뢰성에 초점이 맞추어져 있어, 열회수형 환기설비의 통합제어 관점에서는 한계가 있다.

국내에서는 정재원·노상태(2008)가 우리나라 다중이용시설 환기량 기준을 대상으로 CO<sub>2</sub> 기반 DCV 및 RFID 기반 DCV를 적용한 모의해석을 수행하여, 현행 기준을 그대로 사용할 경우 CO<sub>2</sub>-DCV 운전 시 환기량의 불안정성이 발생할 수 있음을 지적하였다[3]. 이에 따라 ASHRAE Standard 62.1-2007[5] 형식으로 국내 기준을

재구성하면 다양한 DCV 제어전략에 보다 용이하게 적용될 수 있고, 팬 에너지 저감과 포름알데하이드(HCHO) 농도 관리가 동시에 가능함을 제시하였다. 이 연구는 국내 환기량 기준을 DCV 관점에서 재해석한 중요한 연구이지만, 주로 외기전담 공조기와 다중이용시설을 대상으로 하였고, 공동주택용 열회수 환기설비의 모드 제어까지는 다루지 않았다.

열회수형 환기장치의 운전모드 제어와 관련해서는, 공동주택 전열교환 환기시스템을 대상으로 한 이정재·김석근(2009)의 연구가 중요한 선행연구로 조사되었다[6]. 이 연구에서는 공동주택 전열교환 환기시스템을 대상으로 계절별 운전전략을 제안하였으며, 난방기에는 스케줄 제어에 의한 열교환 모드 운전, 중간기 및 냉방기에는 외기 건구온도 센서를 이용한 바이패스 모드 운전이 가장 큰 연간 에너지 절감 효과(서울 기후 기준 약 16.4%)를 제공하는 것으로 보고하였다. 다만, 제어는 주로 계절·온도 조건에 따른 모드 선택 수준에 머물러 있어, 실내 설정온도 및 실내오염물 농도와 연계된 자율운전형 통합제어는 고려하지 못하였다.

Cho et al.(2020)은 공동주택을 대상으로 열회수형 환기설비(HRV)의 바이패스 운전과 룸 제어(Room control) 전략이 환기설비의 에너지 소비에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다[7]. 해당 연구에서는 열회수 모드와 바이패스 모드, 공간별 환기 제어 조건을 비교하여 환기팬 소비전력 감소 효과를 정량적으로 평가하였으며, 이를 통해 불필요한 환기 운전을 줄이는 제어 전략이 환기 에너지 절감에 효과적임을 제시하였다.

그러나 이 연구는 환기설비 자체의 팬 에너지 절감 효과에 초점을 두고 있으며, 외기 도입이 실내 열환경 및 냉·난방 설비의 운전에 미치는 영향은 고려하지 않았다. 또한 실내 설정온도 기반의 외기냉방·외기난방 제어 개념이나, 환기설비와 기계식 냉·난방 설비를 연계한 에너지 절감 효과에 대한 분석은 수행되지 않았다는 한계가 있다.

최근에는 실내 습도 및 열쾌적과 소음, 에너지 소비를 동시에 고려한 환기·배기시스템 운전전략 연구도 수행되고 있다. 광병창 등(2021)은 공동주택 실증 시험동을 대상으로 ERV, 주방후드, 욕실 배기팬 등을 조합한 다양한 운전 케이스를 비교하여, 실내 절대습도 제어 성능과 소음, 소비전력 특성을 분석하고, 이를 기반으로 기존 습도제어 알고리즘을 수정한 자동제어 전략을 제안하였다[8]. 수정된 알고리즘은 ERV와 국부배기장치를 병용한 후, 재실자의 쾌적성과 소음을 고려하여 ERV만으로 전환 운전하는 방식으로, 실내 습도 제어 성능과 에너지 효율, 소음 저감 측면에서 개선 효과가 있음을 보여주었다. 그러나 이 연구에서도 ERV의 운전모드는 주로 풍량·운전시간 제어에 집중되어 있으며, 열회수 모드와 바이패스 모드, 내부순환 모드 간의 통합적인 모드 전환 알고리즘은 제시되지 않았다.

국외에서는 스마트 환기(Smart Ventilation)와 고급 제어 알고리즘을 활용한 연구가 활발하다. 미국 NREL의 Smart Ventilation Controls 연구(2020)는 실외 기상조건, 시간대별 에너지요금, 실내 오염물질 농도 등을 고려하여 환기량과 운전시간을 동적으로 조절하는 스마트 제어개념을 제시하고, 기존 고정식 환기에 비해 에너지 절감과 실내공기질 개선을 동시에 달성할 수 있음을 보고하였다[9]. 다만 이 연구에서의 스마트 환기 제어는 주로 환기량·운전시간 최적화에 집중되어 있고, 국내 공동주택에 보급된 소형 열회수 환기장치

의 열회수/바이패스/내부순환 모드 전환까지 구체적으로 다루지는 않는다.

종합하면, 기존 선행연구들은 (1) CO<sub>2</sub> 센서 기반 DCV 및 국내 환기기준의 DCV 적용성 평가 연구, (2) 공동주택을 포함한 멀티존 환기시스템의 센서기반 환기량 제어 연구, (3) 열회수형 환기시스템의 외기냉방·바이패스 운전을 통한 에너지 절감 방안, (4) 습도·소음·에너지 소비를 복합적으로 고려한 환기제어 알고리즘 및 스마트 환기 개념 제시 등으로 구분할 수 있다. 그러나 실내 CO<sub>2</sub> 및 미세먼지 (PM<sub>2.5</sub>) 농도, 실내·외 온도 및 온도차, 외기 품질 등을 동시에 고려하여 열회수 모드, 공기청정(내부순환) 모드, 바이패스 모드를 자율적으로 전환·운전하는 공동주택용 열회수 환기설비 통합제어 알고리즘을 제안하고, 이를 국내 표준 중간기 환기조건에서 실규모 시험장치를 통해 성능을 정량적으로 평가한 연구는 아직 제한적인 실정이다. 따라서 본 연구는 이러한 연구 공백을 보완하고자, 실내공기질 개선과 에너지 절약을 동시에 달성하기 위한 열회수 환기설비 통합제어 알고리즘을 제안하고, 실험실 시험을 통해 그 성능을 검증하는 데에 연구의 초점을 두고자 한다.

## 2.2. 환기설비 제어알고리즘 개발

본 연구에서 제안된 환기설비 제어알고리즘은 실내공기질 유지와 에너지 절약을 동시에 고려하는 통합제어 알고리즘으로, 열회수 모드, 바이패스 모드, 공기청정 모드 및 가동중지 모드의 4가지 운전 모드를 자동으로 전환하도록 구성되었다. 기존 환기설비의 바이패스 제어는 주로 실외 미세먼지 농도가 낮거나 실내외 온도차가 작아 열교환 효율이 저하되는 조건에서 송풍 소비전력을 절감하는 목적으로 제한적으로 적용되어 온 반면, 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘은 실내 설정온도를 기준으로 외기 도입이 설정온도 달성에 유리한 조건인지를 우선적으로 판단하고, 외기를 적극적으로 도입하여 냉·난방 에너지를 직접적으로 저감하는 것을 핵심 제어 개념으로 한다. 즉, 바이패스 운전이 단순한 열교환 회피 수단이 아니라, 외기냉방 및 외기난방 기능을 수행하는 능동적 에너지 절약 제어 수단으로 확장하였다.

제어 알고리즘은 실내 CO<sub>2</sub> 농도와 PM<sub>2.5</sub> 농도를 이용하여 실내 공기질 상태를 평가하고 환기 필요 여부를 1차적으로 판단한 후, 실

내 설정온도와 실내·외 온도 관계를 이용하여 외기 도입이 설정온도 달성에 유리한 조건인지를 추가적으로 판단한다. 예를 들어 실내 온도가 설정온도보다 높고 실외 온도가 낮은 경우에는 바이패스 기반 외기냉방 운전, 반대로 실내 온도가 설정온도보다 낮고 실외 온도가 더 높은 경우에는 외기난방 효과를 활용한 바이패스 운전이 적용된다(Fig. 2.).

Fig. 1은 전형적인 온도 조건에서 기존 바이패스 운전과 제안된 제어모드의 적용 범위를 개념적으로 비교한 것이다. 그림에서 기존 바이패스 적용 구간은 주로 실내외 온도차가 작아 열교환 효율이 낮은 제한적인 범위(약 3~5°C 이내)에 한정되는 반면, 개선된 바이패스 운전개념은 실내외 온도조건에 따라 외기 도입이 유리한 모든 구간으로 적용 범위가 확장되는 것을 나타낸다.

이와 같은 제어 개념의 확장을 통해, 기존에는 열교환 모드로만 운전되던 구간의 상당 부분을 외기냉방·외기난방 기반 바이패스 운전으로 전환할 수 있으며, 그 결과 실내 설정온도는 유지하면서도 냉·난방기(보일러, EHP 등) 가동 시간과 열원 에너지 소비를 저감할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

## 3. 환기설비 바이패스 운전모드 개선안 성능평가

### 3.1. 성능평가 개요

본 연구에서 제안한 개선된 환기설비 바이패스 제어모드의 에너지 절감 성능을 객관적인 검증을 위해, 한국산업기술시험원(KTL)

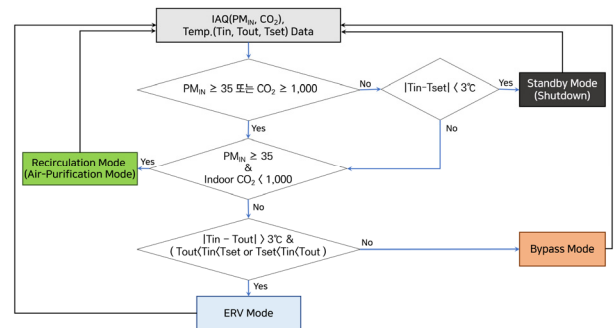


Fig. 2. Ventilation system control algorithm and control process

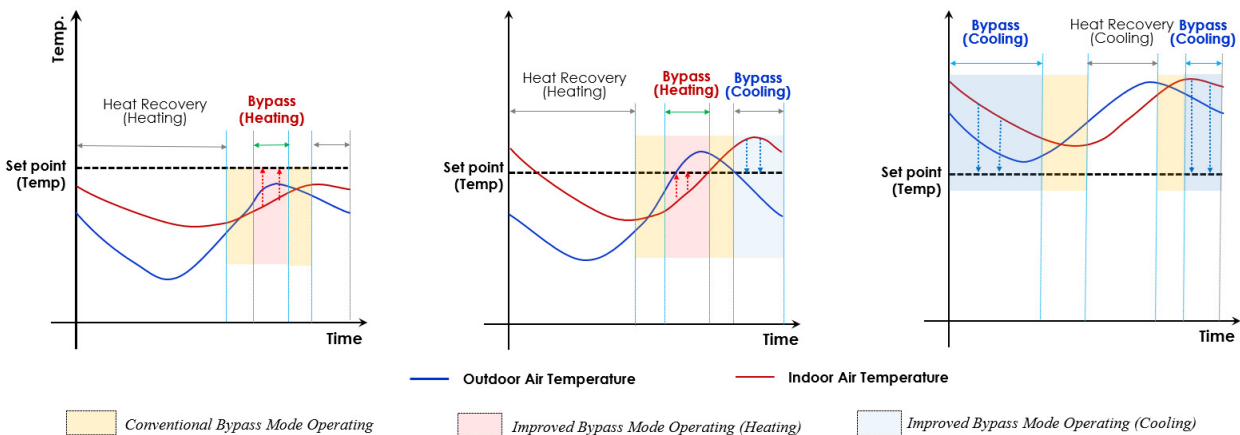


Fig. 1. Conceptual comparison diagram of the bypass operating mode under typical conditions

스마트 HVAC 평가센터에서 평가를 수행하였다. 본 시험은 환기설비 제어모드 개선에 따른 냉·난방 에너지 절감 효과를 정량적으로 평가하기 위한 목적으로 수행되었으며, 시험기간은 2025년 7월 15일부터 7월 25일까지이다.

성능평가 대상은 열회수 환기설비에 개선된 바이패스 기반 제어모드가 적용된 환기시스템의 효율성을 검증하기 위하여, 전형적인 중간기 실내·외 환경조건을 설정하여 실험을 수행하였다.

본 연구에 사용된 열회수형 환기설비는 공동주택용 상용화된 제품(모델명 HRD-EF250IBC)으로 시험실 체적을 고려하여 열회수 모드와 바이패스 모드 모두에서 동일한 정격 풍량 200m<sup>3</sup>/h, 열교환 효율 난방 72% 및 냉방 58%의 사양의 환기설비를 적용하였다. 이를 통해 두 운전모드 간 풍량 차이에 따른 변수를 배제하고, 열교환 경로 변화에 따른 에너지 소비 특성 및 온도 변화 효과를 직접적으로 비교할 수 있도록 시험조건을 표준화하였다.

시험 환경은 실내챔버(12m×6m×3m)와 실외챔버를 이용한 이중 챔버 구조로 구성되었다. 실내챔버에는 급기(SA) 및 환기(RA) 디퓨저가 설치되었으며, 실내 공기 상태를 정밀하게 측정하기 위하여 실내 높이 방향 다점 위치(IA\_1m, IA\_2.98m 등)에 온도 센서가 설치되었다. 실외챔버에는 외기 건구온도(OA<sub>DB</sub>) 및 외기 습구온도(OA<sub>WB</sub>)를 측정하기 위한 센서가 설치되었다. 또한 실내 열부하 제거를 위해 냉·난방 설비(EHP 2대)가 환기설비와 연동되어 운전되었다. 시험 계통의 전체 구성은 실험 계통도 Fig. 3.과 같다.

시험 조건은 Table 1.과 같이, 외기난방 조건(Case 1)과 외기냉방 조건(Case 2)으로 구분하였으며, 각 조건에서 열회수 모드, 기존 바이패스 모드, 개선된 바이패스 제어모드, 냉·난방 설비(EHP) 운전여부의 조합에 따라 총 6개 운전 Case로 구성되었다. 모든 시험은 실내 설정온도 24℃를 기준으로 유지하도록 제어되었으며, 이를 통해 외기 도입만으로 설정온도 달성이 유리한 조건이 형성되는 구간과 그렇지 않은 구간에서의 에너지 소비 특성을 명확히 비교할 수 있도록 시험 조건을 구성하였다.

실내외 온도 조건설정에 있어 온도조건에 따라 냉·난방 에너지 절감량에는 차이가 발생할 수 있으나, 본 연구에서는 제안된 환기설비 제어전략의 효과를 비교·검증하기 위해 중간기를 대표하는 실내외 온도 조건을 설정하여 실험을 수행하였다. 외기난방 조건은 외기온도가 실내 설정온도보다 높은 경우를 가정하여 외기 도입에 따른 실내 온도 상승 효과를 확인하고자 하였으며, 외기냉방 조건은 외기온도가 실내 온도보다 낮은 경우를 설정하여 외기 도입에 따른 실내 온도 하강 효과를 평가하고자 하였다.

에너지 소비량은 교류 전력계(HIOKI PW3337)를 이용하여 환기설비와 냉·난방 설비의 실시간 소비전력을 개별적으로 측정하였으며, 시험 시간 동안의 누적 소비전력(Wh)을 기준으로 에너지 소비 특성을 비교·분석하였다. 또한 실내·외 온도 측정은 산업용 저항온도계(CHINO NR901-0), 온·습도 측정은 VAISALA HMP120, 데이터 기록에는 YOKOGAWA GM90PS가 사용되었다. 모든 측정 데이터는 2초 단위로 자동 기록되어 후처리 분석에 활용되었다.

이와 같은 시험 환경 및 측정 체계를 바탕으로, 본 연구에서는 중간기 조건에서 외기냉방 및 외기난방 효과를 적극 활용하는 개선된 바이패스 제어모드 적용 시와 기존 열회수 및 기존 바이패스 운전 조

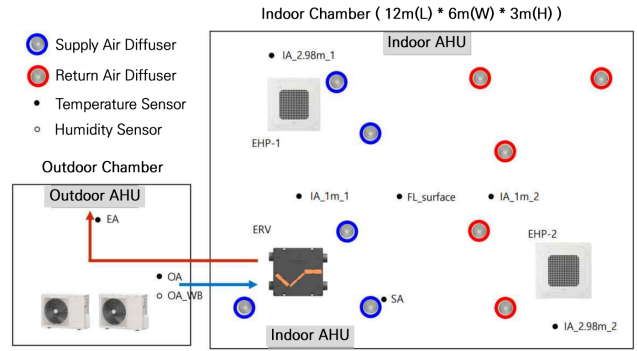


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup

건 간의 냉·난방 에너지 소비 특성을 정량적으로 비교 평가하였으며, 이를 통해 제안된 제어알고리즘의 에너지 절감 효과와 실질적인 적용 가능성을 객관적으로 검증하고자 하였다.

### 3.2. 성능평가 결과

외기냉방 및 외기난방 효과가 나타나는 중간기 조건에서 수행된 6개 Case 시험 결과를 종합한 결과(Table 1.), 기존 열회수 운전 대비 개선된 바이패스 제어모드 적용 시 냉·난방 에너지 소비 특성이 뚜렷하게 개선되는 것으로 나타났다. 난방 조건에서 기존 운전조건인 Case 1-1 (ERV+EHP)의 경우, 환기설비 소비전력은 431.80Wh, 난방설비 소비전력은 1,286.63Wh로 측정되었으며, 총 소비전력은 1,718.43Wh로 나타났다. 본 조건을 난방 에너지 소비의 비교 기준(100%)으로 설정하였다.

동일한 외기 조건에서 바이패스 운전과 난방을 병행한 Case 1-3에서는 환기설비 소비전력 217.76Wh, 난방설비 소비전력 1,240.94Wh로 총 1,458.70Wh가 소비되어, Case 1-1 대비 약 84.9% 수준의 에너지 사용량을 보였다.

냉방 조건에서도 유사한 경향이 확인되었으며, Case 2-1 (열회수 모드+냉방 운전)에서는 환기설비 소비전력 632.66Wh, 냉방설비 소비전력 716.84Wh로 총 소비전력은 1,349.50Wh로 나타났으며, 이를 냉방 에너지 소비의 비교 기준(100%)으로 설정하였다. 동일 외기 조건에서 바이패스 운전과 냉방을 병행한 Case 2-3에서는 환기설비 318.33Wh, 냉방설비 597.59Wh로 총 925.92Wh가 소비되어, Case 2-1 대비 약 68.6% 수준으로 에너지 사용량이 감소하였다.

실험조건에서의 EHP 가동상황을 살펴보면, 난방 조건(Fig. 4. d), Fig. 4. f)에서 기존 열회수 운전(Case 1-1)은 실내온도가 설정값(24℃)을 유지하기 위해 EHP가 짧은 주기로 반복 가동하는 패턴을 보인 반면, 개선된 바이패스 제어모드(Case 1-3)에서는 외기난방 효과로 인해 실내온도 상승속도가 빨라지고 열손실이 감소함에 따라, EHP의 가동 간격이 기존 대비 뚜렷하게 증가하였다. 또한 각 가동단계의 운전 지속시간도 짧아지는 경향을 보였는데, 이는 설정온도 도달에 필요한 부하가 감소하여 EHP가 빠르게 정지하기 때문이다.

냉방 조건(Fig. 5. j), Fig. 5. l) 역시 유사한 경향을 보였다. 기존 열회수 운전(Case 2-1)에서는 실내열부하를 제거를 위해 EHP 소비전력 그래프는 짧은 주기의 반복적인 가동 패턴을 나타낸 반면, 개선된 바이패스 운전(Case 2-3)에서는 실외 공기가 실내보다 낮은

Table 1. Evaluation conditions and experimental results of energy consumption by ventilation control strategy

Conditions	Test conditions		Outdoor air temp. (°C)	Indoor air temp. (°C)	Results (energy consumption, Wh)			Percentage (%)
					EHP***	ERV	Total	
Heating	CASE 1-1	ERV+EHP (Heating)	25	20.0 → 24.0	1,287	432	1,719	100.0
	CASE 1-2*	Bypass**			-	388	388	22.6
	CASE 1-3	Bypass***+EHP (Heating)			1,241	218	1,459	84.9
Cooling	CASE 2-1	ERV+EHP (Cooling)	20	28.0 → 24.0	717	633	1,350	100.0
	CASE 2-2*	Bypass**			-	400	400	29.6
	CASE 2-3	Bypass***+EHP (Cooling)			598	318	926	68.6

\* In Cases 1-2 and 2-2, the EHP was completely turned off, and only the ventilation system operated in the improved bypass mode.

\*\* Proposed Bypass Control Mode

\*\*\* Total Energy Consumption of the two EHP Units Applied in the Experiment

간절기 조건을 활용하여 외기냉방 효과가 실내온도 하강에 기여함에 따라, EHP가 설정온도에 도달하기까지의 시간이 크게 단축되었다. 이에 따라 EHP의 기동 간격은 길어지고, 기동하더라도 운전시간이 짧아지는 특성이 나타났다.

이상의 결과를 종합하면, 개선된 바이패스 제어모드는 기존 열회수 환기모드 대비 냉·난방 설비의 가동 시간과 소비전력을 효과적으로 저감할 수 있으며, 특히 외기냉방 및 외기난방이 가능한 조건에서는 기계식 냉·난방과 병행 운전하더라도 유의미한 에너지 절감 효과가 나타남을 확인할 수 있다. 난방 조건에서는 기존 열회수+난방 병행 운전 대비 약 15% 수준의 에너지 절감 효과(Case 1-3), 냉방 조건에서는 약 31% 수준의 에너지 절감 효과(Case 2-3)가 각각 확인되었다.

한편, Case 1-2 (난방 조건, 바이패스 단독 운전)와 Case 2-2 (냉방 조건, 바이패스 단독 운전)는 냉·난방 설비를 가동하지 않고 환기설비만을 개선된 바이패스 모드로 운전한 조건에서의 실내온도 변화를 평가한 결과이다. 두 조건 모두 약 3시간 내외의 연속 운전 동안 실내온도가 약 2.0~2.5°C 수준으로 개선되는 경향을 나타내었으며, 이는 외기 도입만으로도 실내 열환경을 일정 수준까지 조절할 수 있음을 보여준다.

이러한 결과는 재실 스케줄을 고려하여 냉·난방기 가동 이전에 외기를 활용한 프리쿨링 또는 프리히팅 운전모드를 적용하는 것도 충분히 가능함을 시사하며, 이를 통해 피크 부하 저감, 초기 기동 전력 감소 등 추가적인 에너지 절감 효과도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3. 소결 및 토의사항

본 연구에서는 열회수 환기설비의 기존 바이패스 운전의 제한성을 보완하고, 능동적 외기 활용 전략을 통해 냉·난방 절감 가능성을 실규모 실험을 통해 평가하였다.

시험 결과를 종합하면, 개선된 바이패스 제어모드는 기존 열회수 운전 대비 냉·난방 설비의 가동 부담을 감소시키는 방향으로 작용하였으며, 이로 인해 기계식 냉·난방 설비(EHP)의 기동 간격과 운전 지속시간이 줄어드는 특성이 확인되었다. 이는 단순히 환기 모드의 전환이 아니라, 환기설비의 운전 목적이 공기질 관리에서 에너지 절감형 보조 냉·난방 기능으로 확장될 수 있음을 시사하는 중요한 근거라 할 수 있다.

한편, 바이패스 단독 운전(Case 1-2, 2-2) 결과에서 약 3시간 동

안 실내온도가 ±2.0~2.5°C 변화한 점은, 외기 냉·난방 효과를 사전적으로 적용하는 프리쿨링 및 프리히팅 전략으로의 응용 가능성을 보여준다.

본 연구의 시험 범위는 중간기 외기조건을 중심으로 한 단기 실험에 국한된다는 점에서 한계가 존재하며, 외부 공기질 및 실내공기질에 대한 종합적인 평가는 수행되지 못했다.

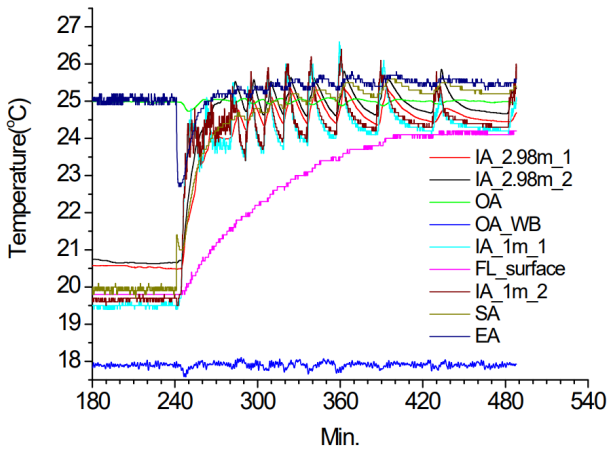
후속연구로 계절별 실외 환경 변화가 반영된 연간 에너지 시뮬레이션이 진행중이며, 실제 공동주택 또는 시험주택을 활용한 장기 실증연구를 준비되고 있다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 외기 활용 기반 바이패스 제어전략이 종합적으로 검증할 예정이다.

## 4. 결론

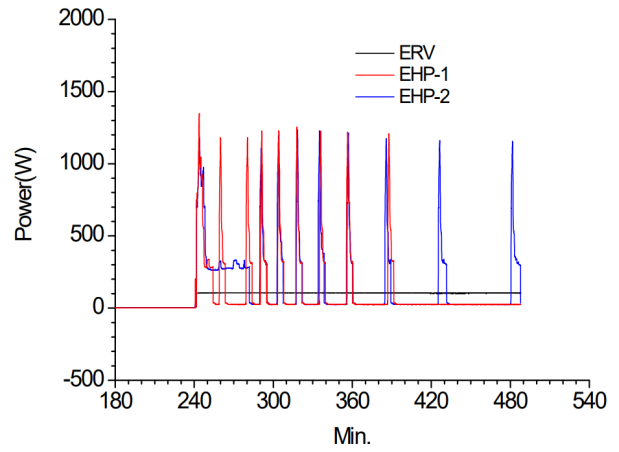
본 연구에서는 실내공기질 유지와 냉·난방 에너지 절감을 동시에 달성하기 위한 열회수 환기설비 통합제어 알고리즘을 제안하고, 중간기 이상적인 실내·외 환경조건에서 실규모 실험을 통해 그 성능을 정량적으로 검증하였다. 기존 환기설비의 바이패스 운전은 실내외 온도차가 작아 열교환 효율이 낮은 특정 구간에서만 적용되는 보조 기능에 머물러 있었으나, 본 연구에서는 이를 설정온도 기준의 능동적 외기 활용 전략으로 확장하여 외기냉방·외기난방 효과를 적극적으로 활용할 수 있는 제어 방식을 제안하였다. 이는 바이패스 모드를 단순한 열교환 회피 개념에서 외기 기반의 에너지 절약 운전모드로 재정의하였다는 점에서 중요한 기술적 의의를 가진다.

실험 결과, 개선된 바이패스 제어모드는 기존 열회수 환기모드 대비 냉·난방 에너지 소비를 유의미하게 저감하는 것으로 나타났다. 난방 조건의 Case 1-3에서는 기존 조건(Case 1-1) 대비 약 1% 수준의 에너지 절감 효과가 확인되었으며, 냉방 조건의 Case 2-3에서는 약 31%의 절감 효과가 나타났다. 이는 외기조건이 설정온도 달성에 유리한 경우, 기계식 냉·난방 설비의 가동 시간을 단축하고 열원 에너지 소비를 직접적으로 저감할 수 있음을 실험적으로 입증한 결과이다. 특히 냉·난방 설비와 바이패스 모드가 병행되는 경우에도 절감 효과가 유지된다는 점은, 제안된 제어전략이 실제 건물 운전에서도 높은 활용성을 가질 수 있음을 시사한다.

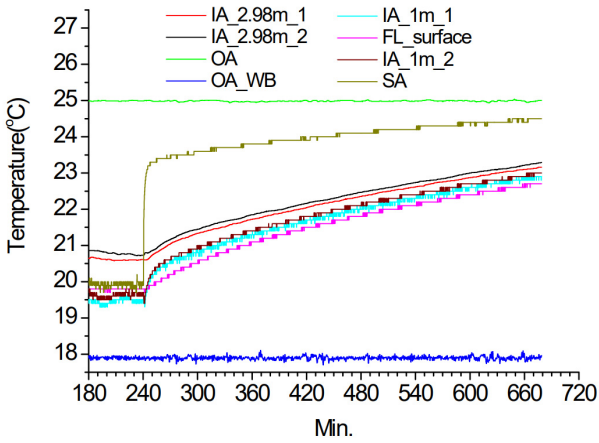
또한 환기설비만을 단독으로 운전한 Case 1-2 및 Case 2-2에서는, 약 3시간 내외의 운전으로 실내온도가 2.0~2.5°C 상승 또는 하강하는 경향이 관찰되었다. 이는 외기 조건이 적절할 경우 환기설비



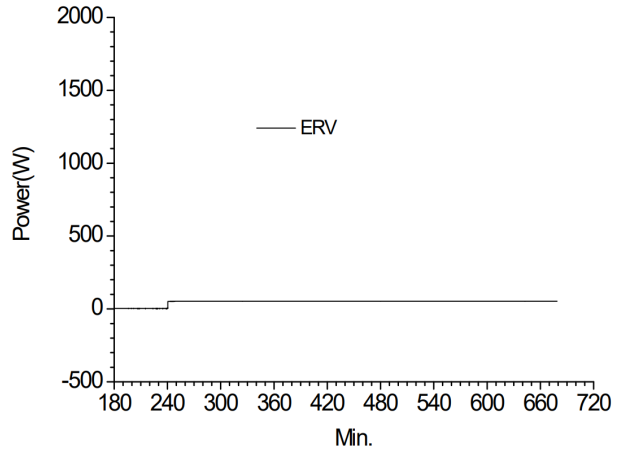
a) Indoor temperature (CASE 1-1)



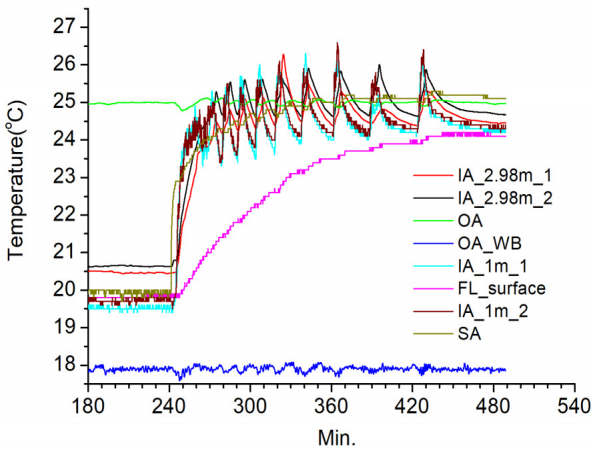
d) Power consumption (CASE 1-1)



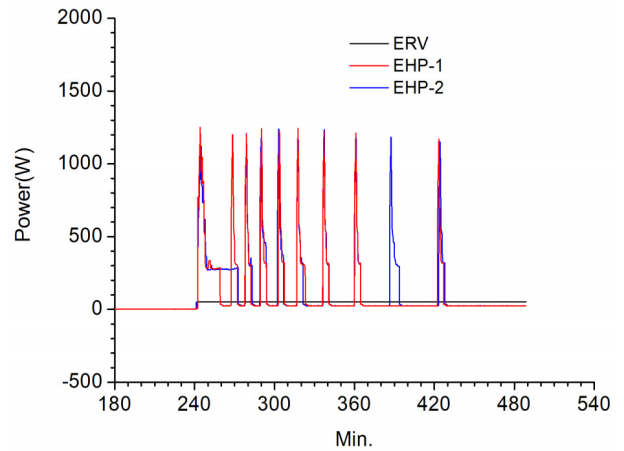
b) Indoor temperature (CASE 1-2)



e) Power consumption (CASE 1-2)

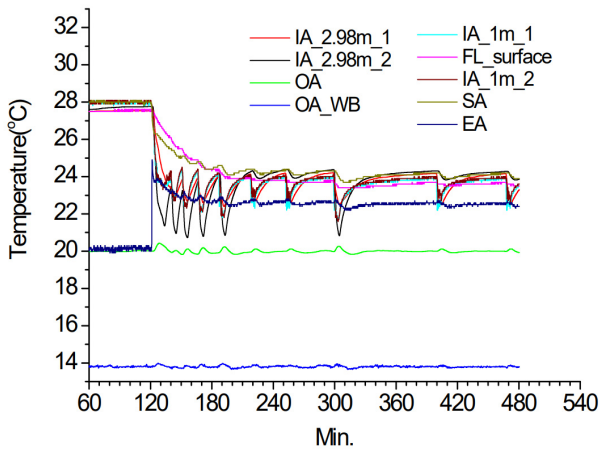


c) Indoor temperature (CASE 1-3)

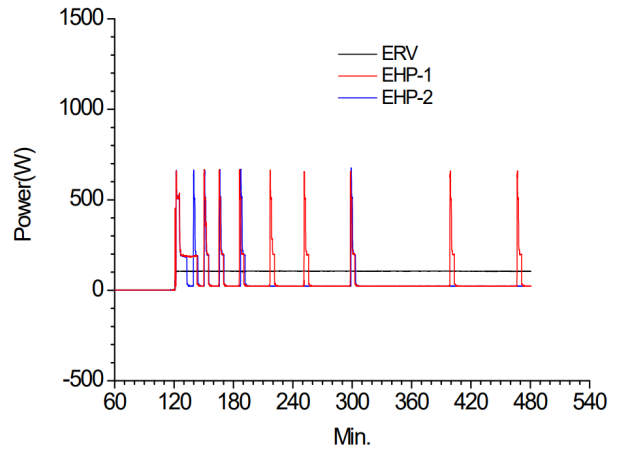


f) Power consumption (CASE 1-3)

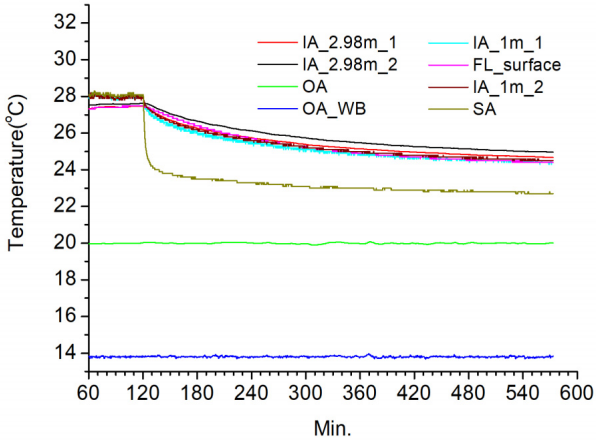
Fig. 4. Indoor temperature distribution and energy consumption by control strategy (outdoor air heating experimental conditions)



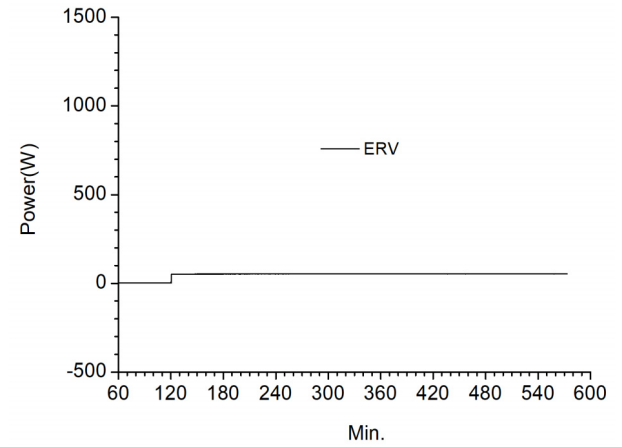
a) Indoor temperature (CASE 2-1)



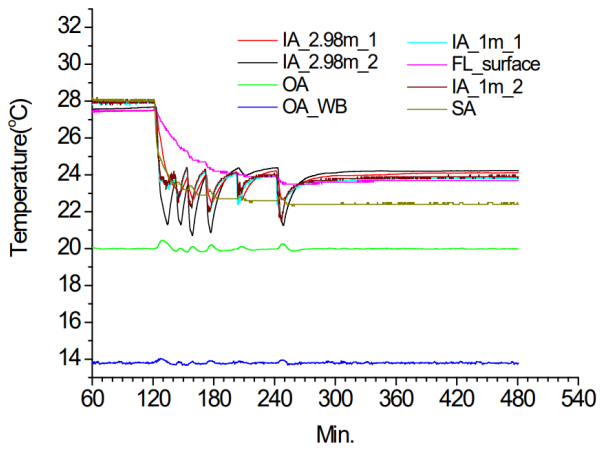
d) Power consumption (CASE 2-1)



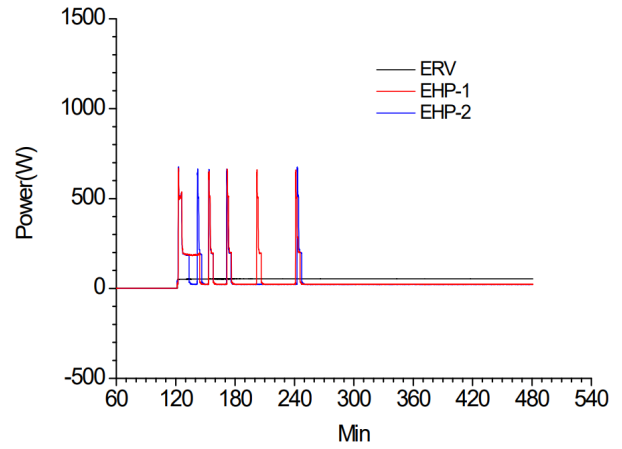
b) Indoor temperature (CASE 2-2)



e) Power consumption (CASE 2-2)



c) Indoor temperature (CASE 2-3)



f) Power consumption (CASE 2-3)

Fig. 5. Indoor temperature distribution and energy consumption by control strategy (outdoor air cooling experimental conditions)

만으로도 일정 수준의 실내 열환경 조정이 가능하다는 것을 의미하며, 실제 적용 시 재실 스케줄을 고려한 프리쿨링 및 프리히팅 운영 전략으로 확장될 수 있다. 이러한 전략은 냉·난방 기동 부하를 저감하고 피크 전력 관리 측면에서의 부가적 이점을 제공할 수 있다.

다만 본 연구는 외기냉방 및 외기난방 효과가 뚜렷하게 나타나는 중간기 조건에서의 단기 실험을 기반으로 하였기 때문에, 혹서기 및 혹한기를 포함한 연중 운전조건으로 연구결과를 일반화하는 데에는 한계가 있다. 또한 바이패스 모드 적용 시 외기 도입량 증가에 따른 풍량 변화, 실내 열·공기환경 분포, 외기 미세먼지 농도 변화에 따른 제어 안정성 등은 추가적인 분석이 필요하다. 이에 따라 향후 연구에서는 계절별 외기조건을 반영한 연간 에너지 시뮬레이션과 장기 실증시험을 통해 제안된 제어모드의 연중 에너지 절감 효과와 실내공기질 유지 성능을 종합적으로 평가할 계획이다.

종합하면, 본 연구는 기존에 제한적으로 활용되던 바이패스 기능을 설정온도 기반의 능동적 외기 활용 제어전략으로 확장함으로써, 열회수 환기설비가 실내공기질 개선뿐 아니라 냉·난방 에너지 절감에도 실질적으로 기여할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 이는 공동주택을 포함한 소규모 건물의 환기설비 운전 전략 고도화와 향후 스마트 환기 기술 개발에 중요한 기여를 제공하며, 건물 에너지 효율 향상 정책적·산업적 측면에서도 높은 파급효과를 가질 것으로 기대된다.

## Acknowledgement

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호: RS-2024-0039 8693, 과제명: 세대부 15%, 공용부 10% 에너지 절감이 가능한 기층 공동주택 사용 용도별 맞춤형 무자각 무구속 자율제어 기반 에너지 수요 최적화 서비스 개발 및 실증).

## References

- [1] 국토교통부, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙, 제11조 및 별표 1의5, 2006. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Regulations on facilities standards of buildings, Article 11 & Schedule 1-5, 2016.)
- [2] 국토교통부, 건강친화형 주택건설 기준, 2016. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Healthy housing construction standards, 2016.)
- [3] 정재원, 노상태, 현행 다중이용시설 환기량 기준의 수요기반 환기량 제어법(DCV) 적용성 평가, 대한건축학회논문집 계획계, 제24권 제3호, 2008, pp.249-256. // (J.W. Jeong, S.T. Ro, Possibility of demand controlled ventilation (DCV) in multi-purposed facilities under the current ventilation standard, Journal of the Architectural Institute of Korea (Planning), 24(3), 2008, pp.249-256.)
- [4] W.J. Fisk, Sensor-based demand-controlled ventilation: A review, Energy and Buildings, 29, 1998, pp.35-45.
- [5] ASHRAE, ANSI/ASHRAE standard 62.1-2007: Ventilation for acceptable indoor air quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2007.
- [6] 이정재, 김석근, 공동주택 전열교환 환기시스템의 에너지 절약적 외기도입 운전제어 방안에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계, 제25권 제6호, 2009, pp.295-302. // (J.J. Lee, S.G. Kim, A study on an energy-efficient Outdoor air supply operation control method of apartment heat recovery ventilation system, Journal of the Architectural Institute of Korea (Planning), 25(6), 2009, pp.295-302.)
- [7] K. Cho, D. Cho, T. Kim, Effect of bypass control and room control modes on fan energy savings in a heat recovery ventilation system, Energies, 13(7), 2020, 1815. <https://doi.org/10.3390/en13071815>
- [8] 광병창 외 4인, 공동주택 세대 습기제어를 위한 환기시스템 운영전략 효과 분석, 한국건축친환경설비학회논문집, 제15권 제5호, 2021, pp.572-585. // (B.C. Kwak et al., The effects of ventilation strategies on indoor humidity control in multi-family residential buildings in South Korea, Journal of the Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 15(5), 2021, pp.572-585.)
- [9] U.S. Department of Energy & NREL, Smart ventilation controls: Using real-time information to reduce energy use and improve indoor air quality, DOE, 2020.