

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

건물 통합형 옥상온실의 양방향 공기교환이 실내 공기질과 건물 에너지 성능에 미치는 영향 분석

Analysis of the Impact of Bidirectional Air Exchange in Building-Integrated Rooftop Greenhouses on Indoor Air Quality and Building Energy Performance

○이 준 오*

Lee, Juno

박 성 우*

Park, Seong-Woo

김 준 섭**

Kim, Jun-Sub

문 현 준***

Moon, Hyeun-Jun

Abstract

This study evaluates a bidirectional air exchange strategy for a Building-integrated Rooftop Greenhouse (BiRTG). Simulations confirm the strategy successfully improves CO₂ levels for both the office and the greenhouse. While this approach can reduce cooling loads, the additional fan power and the adverse impact of high ventilation rates resulted in an overall increase in total energy consumption. Therefore, an optimized control algorithm is necessary to balance the significant air quality benefits with energy efficiency.

키워드 : 양방향 공기교환, 건물 통합형 옥상온실, 건물 에너지 절감, 쾌적 환경

Keywords : Bidirectional Air Exchange, BiRTG, Building Energy Savings, Comfortable Indoor Environment

1. 서론

기후 변화와 도시의 에너지 수요 증가는 건축물의 효율성 향상을 핵심 과제로 부각시키고 있다. 이러한 배경에서 건물 통합형 옥상온실(Building integrated rooftop greenhouse, BiRTG)은 도시 농업과 건물 에너지 절감을 동시에 구현하는 지속가능한 대안으로 주목받고 있다(Choi, 2024).

선행 연구들은 BiRTG의 Passive적 기술 요소 효과 분석에 집중한 반면, 최근에는 온실과 건물 간의 Active한 기술 요소 적용에 대한 관심이 증가하고 있다(Goo, 2023). 특히, 오피스와 온실의 양방향 공기교환은 실내공기질(IAQ) 개선과 냉난방 에너지 절감에 높은 잠재력을 가지는 것으로 평가된다(Munoz-Liesa, 2022).

이에 본 연구는 EnergyPlus 시뮬레이션을 통해 양방향 공기교환 장치의 공기교환 전략 시나리오에 따른 CO₂ 농도 유지 성능과 에너지 소비량을 비교 분석하여, BiRTG 통합 제어 알고리즘 개발을 위한 기초 자료 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 시뮬레이션 설계

2.1 시뮬레이션 모델 구축

본 연구는 서울특별시 성동구 성수동 P빌딩을 대상으로 EnergyPlus 모델을 구축하였다. 오피스와 옥상온실은 각 존별 EHP 냉난방 시스템을 구축하였고, 사례 분석을 위해 오피스와 옥상온실 간의 양방향 공기교환 장치모듈을 추가하였다. 모델의 신뢰도 검증을 위해 실측 데이터를 활용하여 1시간 단위 온도를 대상으로 캘리브레이션을 수행하였으며, 그 결과 CV(RMSE)가 2.18%로 ASHRAE Guideline 14의 시간별 오차율 허용 기준을 만족함을 확인하였다.

양방향 공기교환의 성능을 실험하기 위해, 옥상온실의 CO₂ 농도 및 냉난방 설정온도 스케줄은 실측 데이터를 기반으로 적용하였고, 일반 업무 공간인 오피스는 ASHRAE 표준에 명시된 재실 및 설비 운영 스케줄을 적용하였다. 상세한 시뮬레이션 설정값은 표 1과 같다.

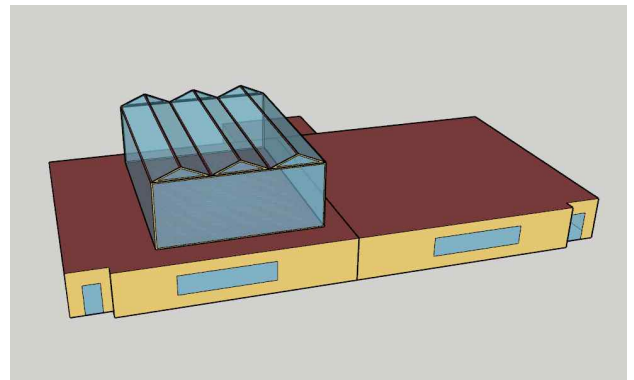


그림1. 에너지 시뮬레이션 모델

* 단국대학교 건축공학과 석사과정

** 단국대학교 건축공학과 박사과정

*** 단국대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Dankook University, hmoon@dankook.ac.kr)

이 연구는 2025년도 상업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2021-KP002462)

표1. 시간대 별 냉방 설정온도 및 최대 CO₂ 농도

Time Zone	BiRTG Cooling Setpoint	Office Cooling Setpoint	GH Maximum CO ₂	Office Minimum CO ₂
00:00 - 07:00	35℃	-	500ppm	550ppm
07:00 - 20:00	19℃	24℃	450ppm	1600ppm
20:00 - 24:00	35℃	-	500ppm	600ppm

2.2 시뮬레이션 Case 설정

시뮬레이션 대상 기간은 냉방부하가 집중되는 2024년 7월 22일로 설정하였다. 분석 조건은 표2와 같이 환기 방식, 환기 운전 시간, 환기량을 변수로 하여 총 네 가지 Case로 구성하였다. Baseline은 옥상온실과 오피스가 각각 독립적으로 외기를 도입하여 환기하는 조건이다. Case 1과 Case 2는 동일한 환기량으로 양방향 공기교환을 적용하되, 환기 운전 시간에 따른 영향을 비교하고자 하였다. 마지막으로 Case 3는 에너지 효율이 높았던 Case 2와 동일한 운전 시간에 환기량만 1.92 m³/h로 상향 조정하여 환기량 변화가 미치는 영향을 평가하도록 설정하였다.

표2. Case 구분

	환기 방식	환기 운전 시간	환기량
Baseline	외기 도입	07시 - 20시	0.77 m ³ /h
Case 1	양방향 공기교환	00시 - 24시	0.77 m ³ /h
Case 2	양방향 공기교환	07시 - 20시	0.77 m ³ /h
Case 3	양방향 공기교환	07시 - 20시	1.92 m ³ /h

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과, 표3에서 나타나듯 외기를 도입한 Baseline의 경우 오피스 내 농도는 850 ppm으로 가장 낮게 유지되었으나, 옥상온실은 450 ppm에 머물러 작물 생육에 불리한 환경이 조성되었다. 반면, 양방향 공기교환을 적용하자 두 공간의 CO₂ 농도는 상호 보완적으로 개선되었다. 특히 환기량이 가장 많은 Case 3에서는 오피스의 CO₂ 농도가 실내공기질 권고 기준인 1000 ppm을 만족시키는 동시에, 옥상온실은 900 ppm 작물 생육에 유리한 환경을 조성하였다.

표3. 주간 최대 CO₂ 농도

	오피스	옥상온실
Baseline	850 ppm	450 ppm
Case 1	1100 ppm	850 ppm
Case 2	1100 ppm	850 ppm
Case 3	1000 ppm	900 ppm

표 4는 각 Case별 에너지 소비량을 나타낸다. Baseline은 고온의 외기 도입으로 인해 냉방 에너지 소비량이 가장 컸으며, 환기에 소비된 에너지가 없음에도 총에너지 소비량이 가장 높게 나타났다.

한편, 양방향 공기교환을 적용한 Case 1과 Case 2의 비교에서는, 주간 시간에만 운전한 Case 2가 에너지 효율 측면에서 더 유리했다.

그러나 Case 2와 동일 조건에서 환기량만 상향 조정한 Case 3에서는 냉방 에너지 소비량이 20 kWh 증가하였다. 이는 그림 2와 3에 확인할 수 있듯, 오피스가 온실의 시원한 공기(19℃)로 얻은 냉방 에너지 절감 효과보다 오피스

의 따뜻한 공기(24℃)의 유입으로 인한 옥상온실의 냉방 에너지 증가 효과가 더 컸기 때문이다.

표4. 에너지 소비량

	냉방용 EHP	환기용 팬	Total
Baseline	327 kWh	17 kWh	344 kWh
Case 1	242 kWh	31 kWh	273 kWh
Case 2	240 kWh	17 kWh	257 kWh
Case 3	260 kWh	43 kWh	303 kWh

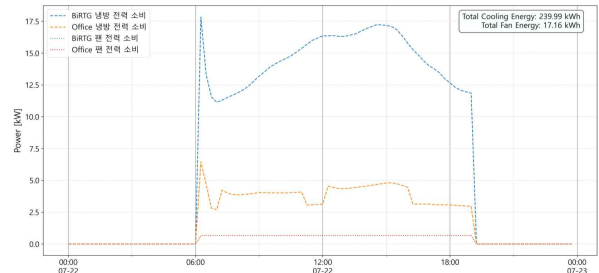


그림 2 Case 2 에너지 소비량

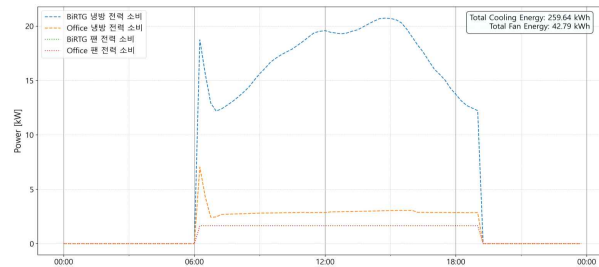


그림 3 Case 3 에너지 소비량

4. 결론

본 연구는 BiRTG와 오피스 간 양방향 공기교환이 CO₂ 농도를 상호 보완적으로 개선하는 데 효과적임을 확인하였다. 또한, 에너지 측면에서도 냉방 에너지 절감 가능성을 확인하였으나, 과도한 환기량은 오히려 총에너지 소비량을 증가로 이어졌다.

따라서 향후 CO₂ 농도 최적화와 총에너지 절감을 동시에 달성하기 위해, 실시간 조건에 따라 운전 시간과 환기량을 정밀하게 제어하는 최적 제어 알고리즘 개발이 요구된다.

참고문헌

- Choi, E.-J. et al. (2024). Impact of building integrated rooftop greenhouse (BiRTG) on heating and cooling energy load: a study based on a container with rooftop greenhouse. Agriculture, Vol. 14, p. 1275.
- Munoz-Liesa, J. et al. (2022). Building-integrated greenhouses raise energy co-benefits through active ventilation systems. Building and Environment, Vol. 208, p. 108585.
- Goo, J. et al (2023) A comparative analysis of energy consumption through HVAC system configuration in a building-integrated rooftop greenhouse. Proceedings of Building Simulation 2023: 18th Conference of IBPSA, pp. 1840-1847.