

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

환기장치의 열교환소자 기반 탄소 재료 및 상변화물질 적용 열 성능 개선

Improving thermal performance by applying carbon materials and phase-change materials to heat exchange elements in ventilator

○최 용 준*
Choi, Yongjun

남 지 희*
Nam, Jihee

김 수 민**
Kim, Sumin

Abstract

The growing emphasis on energy conservation and indoor air quality has led to the increased adoption of heat recovery ventilators (HRVs) in modern buildings. This research investigates the incorporation of phase-change materials (PCMs) into paper membrane systems to optimize the thermal efficiency of HRVs. Experimental techniques, including differential scanning calorimetry, thermogravimetric analysis, and thermal imaging, were employed to assess the impact of PCM integration. The findings demonstrated that PCM-enhanced membranes exhibited superior heat retention, with the brushing method yielding the highest latent heat storage. Specifically, the enthalpy increased by 45% for n-octadecane in comparison to untreated paper membranes. Additionally, the membranes preserved high moisture permeability ($S_d < 1$ m), ensuring effective humidity regulation. Long-term thermal cycling tests further confirmed the durability of PCM retention over 1000 cycles, underscoring the potential for scalable and energy-efficient ventilation applications.

키워드 : 열회수형 환기장치, 전열막지, 상변화물질, 열 성능

Keywords : Heat recovery ventilator, Membrane paper, Phase change materials module, Thermal performance

1. 서론

기후변화, 미세먼지 등 환경 악화에 따라 실내공기질에 대한 우려가 심화되고 있으며, 이에 대한 대응으로 기계식 환기 시스템의 중요성이 부각되고 있다. 그러나 고기밀 고층 건축물의 증가로 자연환기에는 한계가 있으며, 전통적인 환기 시스템은 외기 도입 시 상당한 열 손실을 발생시켜 에너지 소비 증가로 이어진다. 특히 여름철 고습 외기 유입은 잠열부하를 증가시키고, 겨울철에는 난방 부하가 상승하여 HVAC 시스템에 과부하를 유발한다. 이를 보완하기 위한 대안으로 열회수형 환기장치(ERV)가 주목받고 있다. ERV는 실내외의 공기 간 열과 수분을 교환하여 에너지 손실을 줄이는 동시에, 실내 공기질을 개선할 수 있는 시스템이다. 외기 부하가 전체 HVAC 에너지 소비의 약 30%를 차지하는 상황에서, ERV는 효율적인 환기와 에너지 절감을 동시에 달성할 수 있는 중요한 부분 중 하나이다. 특히 전 세계적인 탄소중립 정책과 건물 에너지 절감 목표가 강화됨에 따라, 고효율 환기 시스템의 역할은 더욱

중요해지고 있다. 상변화물질(PCM)은 특정 온도에서 열을 흡수하거나 방출하여 건물의 열부하를 조절하는 데 활용될 수 있는 유망한 축열 소재로 주목받고 있다. 그러나 기존 PCM은 낮은 열전도율로 인해 응답성이 떨어지는 한계가 있으며, 이를 해결하기 위한 방안으로 탄소 기반 첨가제와의 복합화가 활발히 연구되고 있다. 이러한 첨가제들은 PCM의 반응속도 및 저장 용량을 동시에 향상시킬 수 있어 실용성이 높다. 수증기 확산 특성과 기공 구조가 정밀하게 설계된 복합 멤브레인은, 외기 조건에 따른 에너지 손실을 최소화하고 환기 효율을 향상시키는 실질적인 해결책이 될 수 있다. 본 연구는 PCM과 탄소계 첨가제를 복합화한 소재를 기반으로, ERV 성능 향상을 위한 하이브리드 종이 멤브레인을 제안하고, 이를 통해 에너지 절감과 실내공기질 개선을 동시에 달성할 수 있는 가능성을 탐색하고자 한다.

2. 실험 설정 및 방법

PCM의 열전도 성능 향상을 위해 네 가지 탄소 기반 첨가제를 도입하였다. 사용된 첨가제는 다중벽 CNT, xGnP, graphene, 활성탄(AC)이다. 열확산도 측면에서는 CNT가 가장 높은 수치를 보였고, 그 뒤를 이어 AC, xGnP, graphene 순으로 나타났다. 각 첨가제의 미세 구조는 SEM을 통해 관찰하였다. PCM (n-octadecane)과 탄소 첨가제를 복합화하기 위해, 각 첨가제를 1wt% 비율로 액상 PCM에

* 연세대 대학원 박사과정

** 연세대 건축공학과 교수

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Yonsei University, kimsumin@yonsei.ac.kr)

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2025-02263517).

분산시켜 복합 현탁액을 제조하였다. 균일한 분산을 위해 교반 공정을 수행하였으며, 진동 모드와 적절한 진폭 조건을 유지하였다. 완성된 복합 PCM은 200 mm × 200 mm 크기의 종이 멤브레인에 도포하였고, 도포 완료 후에는 상온에서 24시간 동안 진공 건조 과정을 통해 필터링을 진행하였고 멤브레인 내부로의 PCM 침투를 충분히 유도하였다. PCM이 적용된 복합 멤브레인의 열 저장 능력은 DSC를 통해 평가하였고, 고온 환경에서의 안정성은 TGA를 통해 검토하였다. 또한, 장기적인 반복 사용 가능성을 검토하기 위해 1000회 이상의 열사이클 실험을 진행하였다. 이 실험을 통해 시간 경과에 따른 열 저장 및 방출 성능 유지 여부를 분석하였다. 습기 투과 성능은 건식 컵 테스트 방식을 기반으로 하여 측정되었으며, 복합물 PCM 적용 멤브레인의 수분 교환 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 더불어 열화상 촬영과 온도 로깅 장치를 활용하여, 실제 공기 온도 변화에 따른 멤브레인의 열 거동 특성을 동적으로 분석하였다.

표 1. Characteristics of carbon materials

Carbon material	CNT	xGnP	Graphene	AC
Thermal diffusivity (mm ² /s)	3.674	0.797	0.538	1.077
Thermal conductivity (W/(m·K))	2608.54	565.87	381.98	118.47

3. 실험 결과

PCM이 도입된 종이 멤브레인은 기존 멤브레인과 비교해 열 저장 성능이 전반적으로 향상되었다. 복합재의 적용 방식에 따라 열적 특성에 차이를 보였으며, 특히 탄소 기반 첨가제를 포함한 복합 구조는 우수한 성능 개선 효과를 나타냈다. 탄소 재료가 혼입된 PCM 복합 멤브레인의 경우, 최소 잠열 저장 용량이 42.99 J/g로 측정되었으며, 이는 무처리 멤브레인 대비 약 17% 향상된 수치이다. 복합 멤브레인의 장기적 안정성을 확인하기 위해 1000회의 반복적인 열 사이클 시험을 수행한 결과, 초기 열 저장 성능이 대부분 유지되었고, 장시간 사용 조건에서도 안정적인 열 저장 및 방출 특성이 지속됨을 확인하였다. 이로써 복합 멤브레인은 반복된 상변화 과정에서도 물리적·화학적 열화가 최소화됨을 입증하였다. 수증기 투과 성능 측정 결과, 모든 샘플에서 S_d 값이 1 m 이하로 유지되어, HRV 시스템 적용 시에도 적절한 수분 교환 기능이 가능함을 확인하였다. 추가적으로 수행된 열화상 분석에서는, PCM이 적용된 샘플이 냉각 속도가 다소 느려지며 열 보유 시간이 연장되는 경향을 보여주었으며, 이러한 특성은 실내외 온도 차에 대응하는 능력을 향상시켜 실내 열환경 조절에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 해석된다.

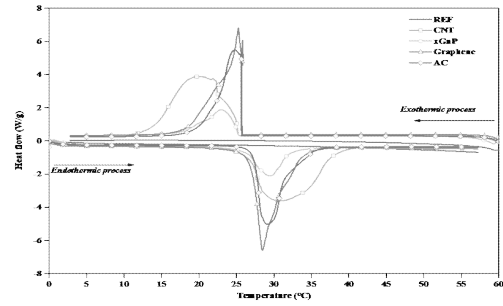


그림 1. 복합물 적용 종이 멤브레인의 열 저장 성능 평가

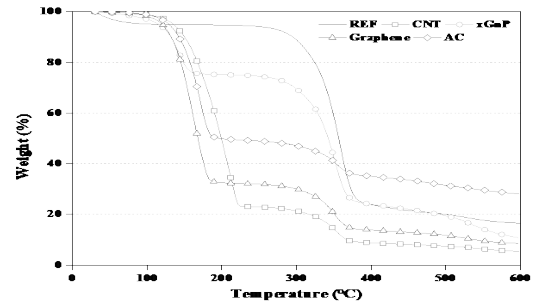


그림 2. 복합물 적용 종이 멤브레인의 열 분해 특성 평가

4. 결론

건축물의 에너지 효율성과 실내 공기질 향상을 동시에 만족시키기 위한 수단으로, PCM과 탄소소재가 융합된 종이 멤브레인 복합재의 적용 가능성이 확인되었다. 제작된 복합 멤브레인은 최소 17% 수준의 잠열 저장 성능을 나타냈으며, 특히 CNT와 그래핀을 포함한 시료는 높은 엔탈피 개선 효과를 보였다. 이러한 열적 성능 향상에도 불구하고 수증기 투과 성능은 유지되었으며, 이는 ERV 시스템 내 적용 적합성을 뒷받침한다. 1000회의 열사이클 이후에도 초기 성능이 대부분 유지되었으며, 열화상 분석 및 실시간 온도 측정 결과, 열 보유 시간 증가 및 냉각 지연 특성이 나타나 실내 온도 조절에 효과적임을 입증하였다. 동적 열 응답 실험에서는 CNT, xGnP, 그래핀, AC 등 첨가제들이 열전도도 향상에 기여하여 보다 균일하고 신속한 열전달 성능을 구현하였다. 복합재의 구조적 안정성과 화학적 안정성이 확보되어 실사용 환경에서도 장기적인 내구성을 확보할 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과는 PCM 기반 수동형 열 조절 기술의 실효성을 입증함과 동시에, 에너지 절감형 환기 시스템 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Ashrae (2022) ANSI/ASHRAE Standard 62.2-Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, American Society of heating, Refrigerating and air-conditioning Engineers.
2. ASHRAE (2021) Ashrae Handbook-Fundamentals.
3. ASHRAE (2021) Climatic data for building design standards.