

열전소자와 흡착제를 이용한 환기시스템 개발을 위한 기초연구

Fundamental Study for the Development of a Ventilation System using Thermoelectric element and Adsorbent

유직수*

Jik-Su Yu*

〈Abstract〉

In this study, fundamental research was conducted on the development of an adsorption-desorption ventilation system incorporating thermoelectric elements to improve indoor air quality (IAQ) and energy efficiency. The experiment was conducted using a thermoelectric module and silica gel as a commonly used adsorbent to evaluate the cooling and heating effects during the adsorption and desorption process. The main experimental results show that applying 3W power to the thermoelectric module reduces the outlet air temperature and improves the adsorption efficiency, while excessive power (4-5W) reduces the adsorption efficiency due to increased heat load. Additionally, when the flow rate on the adsorption side is increased, the completion time decreases. On the other hand, if the flow rate on the desorption side is increased, the completion time is also shortened. It was confirmed that as the flow rate increases, the movement of heat and moisture generated during the adsorption and desorption process becomes faster, and the reaction progresses more quickly.

Keywords : Adsorption-desorption system, Energy efficiency, Indoor air quality(IAQ), Silica gel, Thermoelectric elements

* 정회원, 교신저자, 국립군산대학교 기관공학과, 시간강사
E-mail: jiksuyu@kunsan.ac.kr

* Corresponding Author, Lecturer, Kunsan National University,
Department of ship Engine Engineering
E-mail: jiksuyu@kunsan.ac.kr

1. 서론

최근 몇 년간 실내공기질(IAQ)은 인간의 건강과 생산성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 그 중요성이 큰 주목을 받고 있다. 불량한 IAQ는 경미한 자극부터 심각한 호흡기 질환에 이르기까지 다양한 건강 문제와 연관되어 있어 효과적인 환기시스템의 개발이 중요한 연구 분야이고, 이러한 문제에 대한 인식이 높아짐에 따라 더 깨끗하고 건강한 실내 환경을 보장하기 위한 효과적인 솔루션에 대한 요구도 커지고 있다. 환기시스템은 신선한 공기를 순환시키고 오염 물질을 제거하며 습도 수준을 조절하는 데 도움이 되기 때문에 이와 관련하여 중요한 역할을 하게 된다.

흡착식 환기시스템은 특히 실내와 실외 환경간의 온도 차이가 큰 환경에서 실내 공기질과 에너지 효율성을 관리하기 위한 방식이다. 흡착제의 선택은 매우 중요하며, 흡착 장치의 구조적 파라미터와 부피에 직접적인 영향을 미치는 최대 흡착용량과 같은 특성에 초점을 맞추게 된다. '실리카겔-황산나트륨'과 같은 복합재료는 흡착열과 전반적인 시스템 성능을 향상시키는 우수한 흡착 특성으로 인해 '실리카겔-아세트산나트륨'에 비해 더 높은 효율을 보이는 것을 보고하였다[1]. 실내 환경에서는 휘발성 유기 화학물질(VOC)을 10억 분의 1 수준으로 검출하기 위한 마이크로센서 기반 분석 시스템용으로 소형 이중 흡착제 예비 농축기가 개발되어 효과적인 공기질 관리를 달성하기 위한 흡착제 선택 및 용량의 중요성에 대해 발표하였다[2]. 흡착제를 사용한 환기시스템은 주거 및 산업 에너지 효율부터 의료 및 안전 응용 분야에 이르기까지 다양한 분야에서 사용되고 있다. 또한, 열전소자를 이용하여 기존 환기 및 공조시스템의 효율성을 향상시키는 연구들도 다양하게 실시되고 있다. 소규모 공조시스템과 열전 냉각 모듈을 결

합하면 성능 계수와 에너지 효율 비율이 크게 개선되어 $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 공기 흐름 속도에서 각각 1.71과 5.85의 값 달성에 대해 보고하고 있다[3]. 또 다른 연구에서는 특히 추운 기후에서 난방 용량을 높이기 위해 증기 압축 사이클에 열전 모듈을 적용한 결과 등을 보고하였고[4]. 열전 공조시스템은 표준 증기 압축 시스템에 대한 무소음 대안으로 사용 가능한 결과 등을 보고하였다[5]. 지하철 시스템에서 피스톤 바람과 열전 모듈을 활용한 혁신적인 환기 설계는 열 쾌적성과 공기 품질을 유지하면서 에너지 소비를 크게 줄인 성과를 도출하였다[6]. 흡착제와 열전소자 각각을 적용한 연구들은 다양하게 진행되고 있으나 흡착제와 열전소자를 접목한 환기시스템을 포함한 공조시스템에 대한 연구는 수산 폐기물인 굴폐각을 이용한 공조시스템 개발로 굴폐각의 제습성과 열전소자의 냉각효과를 파악하는 연구[7-9]가 있고 이외에는 많이 이루어지지 않는 상황이다.

본 연구에서는 흡착제와 열전소자를 접목한 흡·탈착시스템 개발의 기초 데이터 제공에 목적으로 두고 열전소자를 사용해 흡착제를 냉각·가열하는 것으로 흡·탈착 시의 흡착제의 발열, 흡열의 영향을 낮추고 더 나아가 냉각, 가열에 의한 흡·탈착의 촉진을 위한 조건 도출을 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 방법, 조건

2.1 열전소자 및 흡착제

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 컴프레서, 습도제어부, 히터 등으로 구성되어 있고 습도제어부에는 에프터 쿨러, 필터, 멤브레인 드라이어, 기포탑 등으로 이루어져 습도를 조절하는 계통으로 이루어져 있다. 또한 2

개의 콤프레서를 이용하여 각 각의 저습도 및 고 습도를 만들어 습공기의 온도와 유량을 각 각 절해 시험부에 유입시켜 실험을 실시한다.

실험은 콤프레셔에 의해 압축시킨 공기를 애프

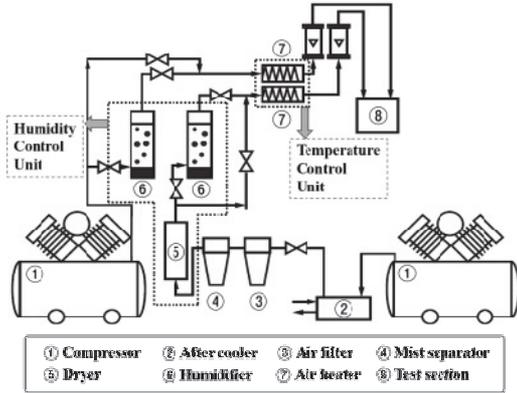


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

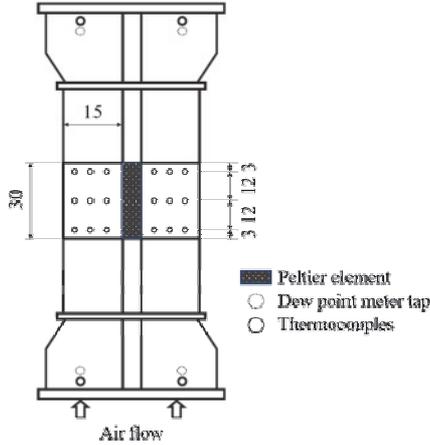


Fig. 2 Detail of test section

Table 1. Experimental condition

Initial condition			
Adsorption	$T=30^{\circ}\text{C}$	$\phi=20\%$	$u=0.4\text{m/s}$
Desorption	$T=30^{\circ}\text{C}$	$\phi=60\%$	$u=0.4\text{m/s}$
Experimental condition			
Adsorption	$T_{\text{in}}=30^{\circ}\text{C}$	$\phi_{\text{in}}=60\%$	$u=0.4\text{m/s}$
Desorption	$T_{\text{in}}=30^{\circ}\text{C}$	$\phi_{\text{in}}=20\%$	$u=0.4\text{m/s}$

터쿨러에서 냉각시켜 에어필터, 미스트 세퍼레이터를 통과시키는 것으로 수분을 거의 제거시키고 습도제어부에 유입시킨다. 습도제어부에서는 공기를 멤브레인 드라이어에서 한번 더 건조시켜 건공기 조건으로 만든다. 그 후 통과한 공기를 각 각의 공기의 습도를 기포탑에서 제어하게 된다. 다음으로 온도제어부인 히터를 각각 통과시켜 공기 온도를 제어한 후 유량을 제어해 실험조건에 맞는 공기상태로 조절해 시험부에 유입한다. 그래서 본 실험장치에서는 습도, 온도, 유량의 조건이 다른 2종류의 공기를 시험부로 유입이 가능하다.

Fig. 2에 시험부의 개략도를 나타내고 있고 시험부는 아크릴 재질의 2개의 사각관 사이에열전소자를 배치시키고, 열전소자와 흡착제 사이에는 동판을 설치하였다. 또한 단열은 글라스울을 사용하여 실시하였다. 실험부의 내부에 흡착제를 가로 45mm, 세로 12mm, 높이 30mm의 스테인리스재질의 망형대로 상자를 만들어 공기를 흡착제 내부에 유입시키고, 시험부의 입구, 출구에서의 온도, 습도, 흡착제 내부의 9개 부분에서의 온도, 열전소자의 열을 흡착제에 전달되는 동판 표면의 온도를 측정해 입구 온도를 변화시킨 경우, 출구의 공기 상태를 검토한다. 또한 초기조건 및 실험조건은 Table 1과 같다.

3. 실험 결과

3.1 열전소자 적용에 따른 영향

Fig. 3, 4는 실험 조건의 공기를 흘려 열전소자에 3W의 전력을 인가한 경우의 흡착과 탈착의 시간에 따른 온도 변화를 나타내고 있다. 또한 점선은 전력량이 0W의 변화량이다.

Fig. 3의 결과로부터 흡착측에서는 냉각의 효과

에 의해 출구온도의 상승이 냉각하지 않은 경우와 비교해 작고, 평형 시에서도 낮은 값이 되는 것을 알 수 있다. 냉각에 의해 출구측 상대습도의 변화가 출구온도 변화와 비교해 작은 것은 공기로부터 빼앗기는 수분량이 냉각되기 때문이다.

Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 출구온도는 실험개시 직후에 입구온도보다 작은 값을 나타내지만 그 후에 급격하게 상승해 입구온도보다 높은 값으로 평형상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 또한 출구 상대습도는 가열하지 않은 경우와 비교해 입구 상대습도보다 더 감소하여 평형상태

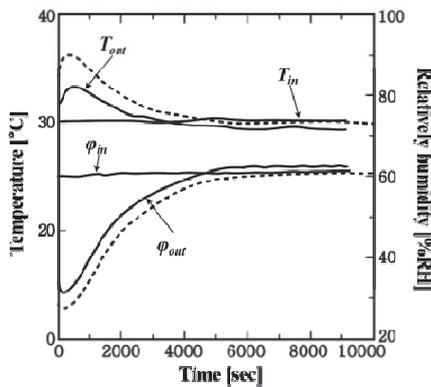


Fig. 3 Temperature and humidity change during adsorption process

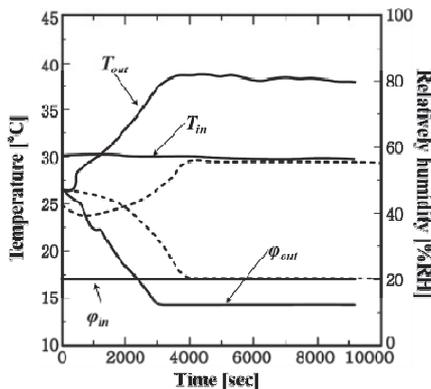


Fig. 4 Temperature and humidity change during desorption process

에 도달한 시간이 짧아지게 된다. 이것은 가열에 의해 온도의 급상승과 공기가 받는 수분량의 증가 때문이다.

3.2 열전소자의 전력량 변화

실험조건의 공기를 흘려 열전소자에 인가되는 전력량을 변화시킨 경우의 무차원흡착량의 변화를 Fig. 5, 6에 나타내었다.

흡착측에 있어서는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 Q=2W, 3W의 경우에는 냉각의 효과에 의해 평형

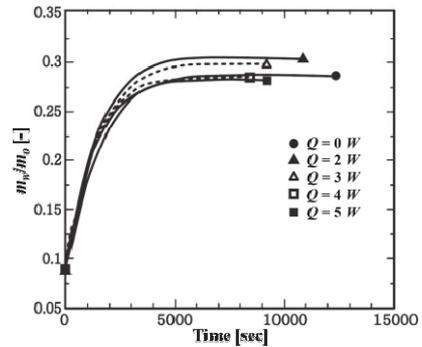


Fig. 5 Change in amount of non-dimensional adsorption according to change in power amount

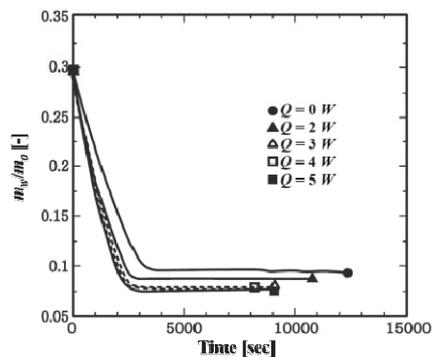


Fig. 6 Change in amount of non-dimensional desorption according to change in power amount

흡착량의 증가, 흡착속도의 상승이 나타난다. 그러나 열전소자에 인가되는 전력량이 크게 되면, 평형흡착량이 감소되고, $Q=4W$, $5W$ 의 경우에는 $Q=0W$ 의 경우보다 낮은 값이 나타나게 된다. 이것은 전력량이 크게 될수록 탈착층에서의 가열량이 증가되어 탈착층에서 이동해 오는 열량을 방열하지 못하게 되어 열이 흡착층으로 전도되어 흡착층의 열전소자 표면온도가 상승했기 때문이다. 특히 $Q=4W$, $5W$ 의 경우에 있어서는 열전소자 표면온도가 입구 공기온도를 상회해 흡착제가 가열되기 때문이다.

탈착층은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 인가되는 전력량의 증가와 함께 흡착제로 전달되는 열량이 증가되기 때문에 평형 탈착량, 탈착속도와 함께 커지는 것을 알 수 있다.

3.3 탈착층 유속변화

Fig. 7, 8은 흡착층에 기본조건의 공기, 탈착층에 $T_{in}=30^{\circ}C$, $\phi_{in}=20\%$ 의 조건에 유속을 변화시킨 공기를 흘려 열전소자에 $4W$ 의 전력을 인가시킨 경우 무차원흡착량의 시간에 따른 변화량을 나타내고 있다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 흡착층에 있어서는 유속이 증가하면 흡착속도, 평형 흡착량이 함께 증가하고, 유속이 감소하면 흡착속도, 평형 흡착량이 함께 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 유속이 증가할수록 단위시간당의 탈착층의 공기가 가지고 가는 열량이 많아져 흡착층의 열전소자 표면온도가 낮아지기 때문에 발생하게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 8의 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 탈착층에서는 흡착층과 달리 유속이 증가할수록 탈착속도는 증가하지만 평형 탈착량은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 유속이 빨라지는 것

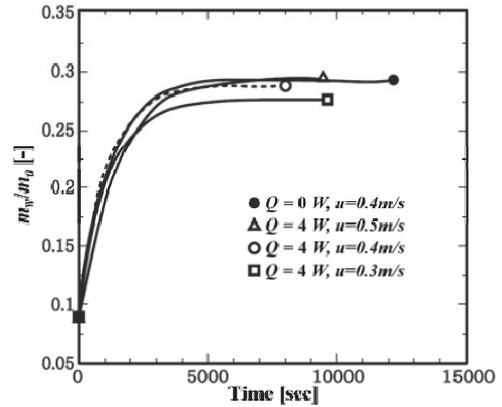


Fig. 7 Change in amount of non-dimensional adsorption according to change in flow rate

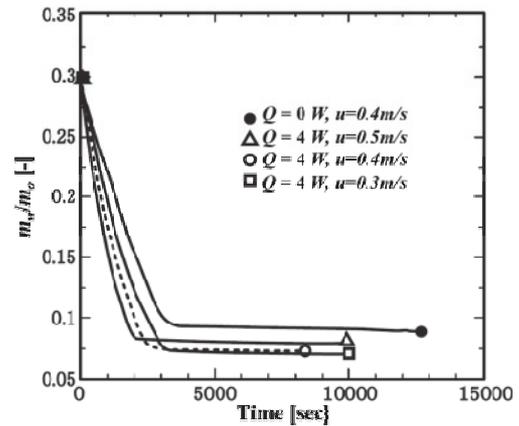


Fig. 8 Change in amount of non-dimensional desorption according to change in flow rate

로 단위 시간당 흡착제로부터 공기 증으로 이동하는 수분량이 증가하기 때문에 탈착속도는 증가하지만 동시에 공기가 가지고 가는 열량도 증가하기 때문에 흡착제 온도가 떨어져 평형 탈착량이 감소하게 되기 때문이다.

3.4 완료시간

본 연구에서는 완료시간 T_f 는 총 흡·탈착량의

90%가 되는 시간으로 정의하고 있다.

Fig. 9, 10에 흡착측 유속($u_{adsorption}$)를 0.2-0.8 m/s, 탈착측 유속($u_{desorption}$)를 0.2-1.2m/s까지 변화시킨 경우의 흡착측, 탈착측에서의 완료시간의 변화를 나타낸다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 흡착측 완료시간변화는 흡착측 유속의 증가에 동반하여 짧아지고 탈착측 유속의 증가와 함께 길어지고 있다. 이러한 이유는 흡착측 유속이 증가하면 수증기 이동량이 증대되어 흡착속도가 증가하는 영향과 유속의 증가와 함께 냉각효과가 미치는 영역의 감소에 따른 영향에 의해 총흡착량이 저하된 것으로 판단된다.

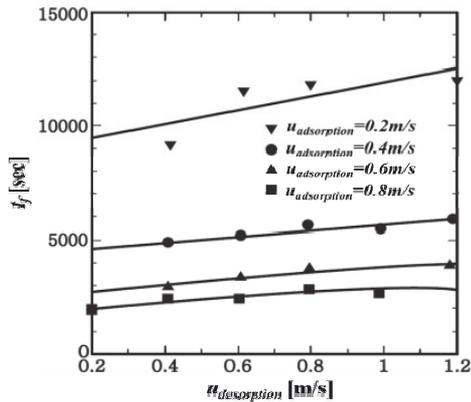


Fig. 9 Completion time of adsorption side

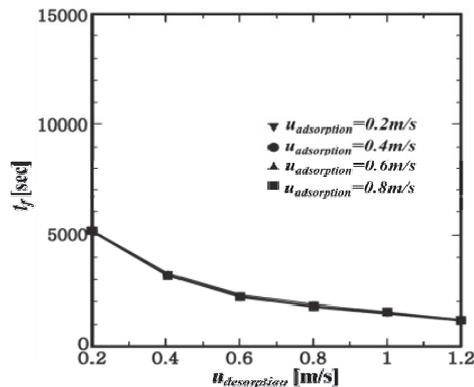


Fig. 10 Completion time of desorption side

또한, 탈착측 유속이 증가하면 열전소자의 방열량이 증가해 흡착측에서의 냉각온도가 저하된다. 그에 따라 흡착량이 증가하기 때문에 완료시간은 증가해 간다.

Fig. 10에서 나타내고 있는 탈착측에서의 완료시간의 변화는 흡착측 유속의 증가에 의해서는 거의 변화되지 않고 탈착측 유속의 증가와 함께 짧아져 간다. 흡착측 유속의 영향을 받지 않는 것은 흡착측 유속이 변화해도 탈착측에서의 열전소자의 가열온도가 크게 변화하지 않기 때문이다. 또한 탈착측 유속의 증가와 함께 완료시간이 감소해 가는 것은 수증기 이동량 증대에 의해 흡착속도의 증가와 가열면온도의 저하에 의해 총탈착량이 감소했기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 열전소자를 사용해 흡·탈착 시 발생하는 흡착제의 발열, 흡열의 영향을 낮추고 더 나아가 냉각·가열에 의한 흡·탈착의 촉진을 위한 기초 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

열전소자에 3W의 전력을 인가했을 때, 냉각 효과로 인해 흡착제의 흡착 효과를 향상시키는 것을 확인하였다.

열전소자에 전력을 3W로 설정했을 때 흡착량이 증가하였으나, 4W이상에서는 전력공급 과다로 인해 탈착측의 열량을 증가시켜 흡착 효율을 저하시키는 것을 확인하였다.

탈착측 유속을 증가시킬 경우, 유속 증가로 인해 단위 시간당 흡착제에서 이동하는 수분량이 증가하고, 더 많은 열량이 제거되어 흡착제의 온도가 감소하는 것을 알 수 있었다.

흡착측의 유속을 증가시킬 경우, 유속이 증가함

에 따라 흡착과 탈착 과정에서 발생하는 열과 수분의 이동이 빨라져 반응이 더욱 신속하게 진행되는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] E. Belyanovskaya, R. D. Lytovchenko, K. Sukhy, O. Prokopenko, O. Yeromin, I. V. Sukha, "Choice Criteria of Adsorbents for Heat Energy Converters in Ventilation Systems," *Scientific Works*, vol. 83, pp. 4-9, (2019).
- [2] C. J. Lu, E. T. Zellers, "A Dual-Adsorbent Preconcentrator for a Portable Indoor- VOC Microsensor System," *Analytical Chemistry*, vol. 73, no.14, pp. 3449-3457, (2001).
- [3] S. Poojeera, A. Srichat, N. Naphon, P. Naphon, "Study on Thermal Performance of the Small-Scale Air Conditioning with Thermoelectric Cooling Module," *Mathematical modeling of engineering problems*, vol. 9, pp. 1143-1151, (2022).
- [4] O. Toru, R. Rademacher, Y. Hwang, "A Novel Application of Thermoelectric Modules in an HVAC System Under Cold Climate Operation," *Journal of Electronic Materials*, vol. 41, pp. 1749-1758, (2012).
- [5] K. Irshad, "Performance Improvement of Thermoelectric Air Cooler System by Using Variable-Pulse Current for Building Applications," *Sustainability*, vol. 13, pp. 9682, (2021).
- [6] G. Li, X. Meng, X. Zhang, L. Zhang, C. Du, N. Li, W. Yu, J. Xiong, S. Zhang, B. Li, "An innovative ventilation system using piston wind for the thermal environment in Shanghai subway station," *Journal of Building Engineering*, vol. 32, pp. 101276, (2020).
- [7] M. J. Kim, J. S. Yu, "Fundamental Study on the Probability of Oyster Shell Desiccant Cooling System Driven by Renewable Energy of Photo-Voltaic Effect", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 32, pp. 387-393, (2008).
- [8] M. J. Kim, G. H. Chea, "Study on the PV Driven Dehumidifying System with Oyster Shell and Thermoelectric Device", *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, vol.18, pp.287-293, (2012).
- [9] M. J. Kim, "Study on the Adsorption and Desorption Enhance Effect of Oyster Shell Using Peltier Element", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol.17, pp.71-76, (2013).

(접수: 2024.09.11. 수정: 2024.10.02. 게재확장: 2024.10.08.)