

에너지 효율 향상을 위한 열전소자를 이용한 흡·탈착 시스템 개발 연구

A Study on the Development of Adsorption-Desorption Systems Using Thermoelectric Devices for Improved Energy Efficiency

유직수*

Jik-Su Yu*

〈Abstract〉

In recent years, there has been a growing focus on preserving the global environment and utilizing resources efficiently. The significance of energy conservation has led to the development of systems that recycle waste heat from factories and use eco-friendly refrigerants. This study aims to enhance the performance of adsorption-desorption systems using thermoelectric devices, which are known for their ability to convert temperature differences into electrical energy. The research focuses on improving the efficiency of these systems by integrating thermoelectric modules to cool the adsorption side and heat the desorption side, thus enhancing overall system performance. The experiments utilized a typical thermoelectric device and silica gel as the adsorbent. Key experimental parameters included varying the inlet air temperature and relative humidity on the desorption side. The results indicated that increasing the relative humidity of the inlet air on the desorption side significantly enhanced the overall mass transfer coefficient while reducing the completion time of the process. Similarly, higher inlet air temperatures led to an increase in the mass transfer coefficient and a decrease in process completion time. These findings suggest that optimizing the operational conditions of thermoelectric devices can substantially improve the performance

* 정회원, 교신저자, 국립군산대학교 기관공학과, 시간강사 * Corresponding Author, Lecturer, Kunsan National University,
E-mail: jiksuyu@kunsan.ac.kr Department of ship engine engineering

of adsorption-desorption systems, offering potential benefits for applications in ventilation systems and other related fields.

Keywords : Adsorption-Desorption System, Mass Transfer Coefficient, Silica Gel, Thermoelectric Element

1. 서론

최근 지구환경의 보전, 자원의 효율적인 활용 방법에 대해 많은 관심이 모여지고 있다. 자연환경에 악영향을 미치지 않는 물질의 사용이나 사용하는 자원을 줄이기 위한 방법 등 에너지 절약이 중요시되고 있다. 이러한 이유들로 공장 등의 폐열이 재이용 가능하고 프레온계의 가스 냉매, 액체냉매 등이 필요 없고 작동매체로 수증기를 사용하는 흡·탈착 시스템 혹은 이러한 방법을 활용한 환기시스템에 주목을 하고 있다[1-4].

그러나 이 흡·탈착 시스템에 있어서 흡착반응은 발열을 동반하고, 탈착반응은 흡열반응을 동반하게 된다. 이러한 발열, 흡열반응은 흡착제 온도를 상승 또는 하강시켜 버려, 흡·탈착 성능을 저하시키게 된다.

이런 상황에서 열전소자의 성능을 증대시키기 위해 열전소자의 반도체 종류 교체 또는 나노사이드로 축소시키는 방법, 열전소자의 반도체 결합구조에 대해 시뮬레이션 연구 등 열전소자의 효율을 증대시키는 연구가 최근 이루어지고 있다[5-7]. 이와 같이 열전소자만의 효율 증대를 위한 연구는 최근 많이 이루어지고 있으나 본 연구와 같이 흡착제 등의 성능 향상을 위해 열전소자를 사용하는 연구는 거의 이루어지지 않는 상태이다.

따라서 본 연구에서는 열전소자를 이용해 흡착측을 냉각, 탈착측을 가열하는 것으로 흡·탈착 성능의 촉진을 목적으로 일반적인 열전소자를 사용하여 시스템의 개발 가능성을 확보하고자 한다.

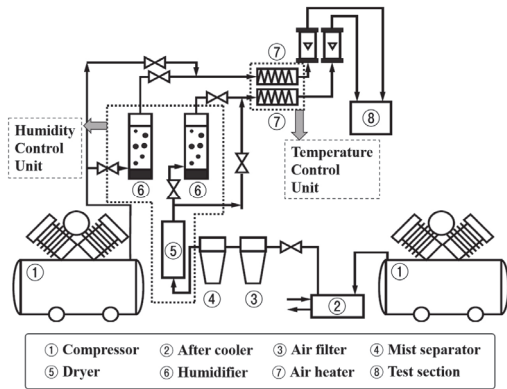
2. 실험장치 및 방법, 조건

2.1 열전소자 및 흡착제

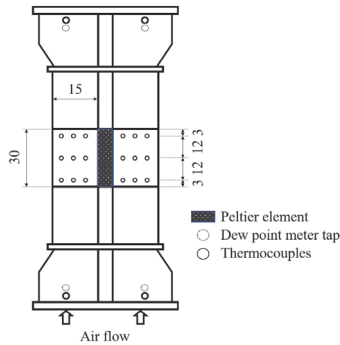
열전소자는 페르체효과를 응용한 것으로 n형반도체와 p형 반도체를 쌍으로 늘어놓아 구리 전극으로 결합한 것을 세라믹 판으로 끼운 구조를 하고 있다. 이것에 직류전류를 흘리는 것으로 열의 이동이 일어나고 한쪽면은 냉각되고, 다른 한쪽면은 가열되는 현상을 가지고 있다. 또한, 본 연구에서는 흡착제로 형태가 거의 구형으로 평균입자경이 $391.44\mu m$ 의 A형 실리카겔을 사용하였다.

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 실험장치는 크게 콤프레셔, 습도제어부, 온도제어부, 시험부의 4개의 공정으로 나누어져 있다. 본 실험에서는 2종류의 공기를 제조하기 때문에 저습도 제조측 그리고 고습도 제조측의 2개의 계통으로부터 구성 되어져 있다. 저습도 제조측에서는 콤프레셔에서 압축된 공기는 이전에 쿨러에서 냉각되고 에어필터, 미스트 세퍼레이터를 통과하면서 이물질 등이 제거된다. 그 후 압축공기는 막식 제습기와 기포탐 가슴기로 구성된 습도 제어부로 유입된다. 또한, 고습도 제조측에서는 다른 콤프레셔를 사용해 압축공기를 만들어 기포탐 가슴기로 유입된다. 이런 과정을 거쳐 실험조건에 만족 되



(a) Schematic diagram of experimental apparatus



(b) Detail of test section

Fig. 1 Experimental apparatus

는 습도로 된 2종류의 압축공기는 각 각의 온도 제어부인 히터를 통과한 후 유량계에서 유량이 조절되어 시험부로 유입되면서 실험이 실시된다.

2.3 실험조건

본 실험에서의 실험조건은 Table 1과 같고, 열

Table 1. Experimental condition

Initial condition			
Adsorption	$T=30^{\circ}\text{C}$	$\phi=20\%$	
Desorption	$T=30^{\circ}\text{C}$	$\phi=60\%$	
Experimental condition			
Adsorption	$T_{in}=30^{\circ}\text{C}$	$\phi_{ad}=60\%$	$u=0.4\text{m/s}$
Desorption	$T_{in}=30^{\circ}\text{C}$	$\phi_{de}=40\%$	$u=0.8\text{m/s}$

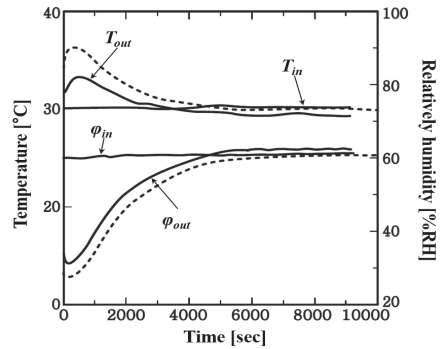


Fig. 2 Change of temp. and humidity during adsorption process

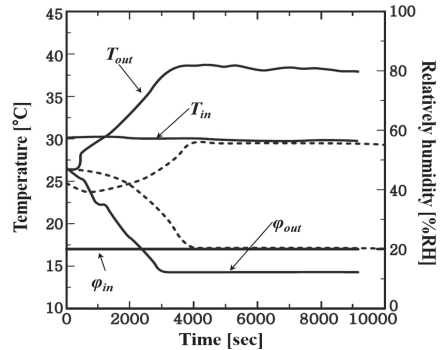


Fig. 3 Change of temp. and humidity during desorption process

전소자의 인가전력은 기초 실험을 통해 3W로 설정하여 실험을 실시하였다(Fig. 2, 3 참조). 열전소자에 전력 3W(실선), 전력 0W(점선)을 인가한 경우의 흡착 시의 온도변화를 Fig. 2, 탈착 시의 온도변화를 Fig. 3에 나타내었다.

3. 실험 결과

3.1 탈착속 온도를 변화시킨 경우

Fig. 4와 5는 기본 실험조건 내의 탈착속 유입

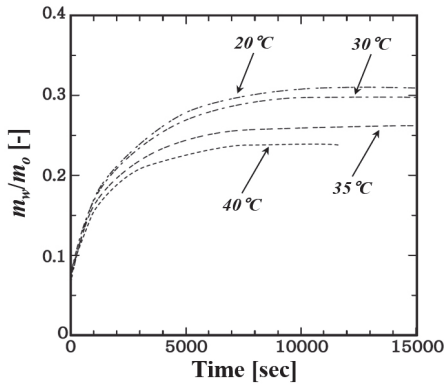


Fig. 4 Change of dimensionless adsorption amount ratio in the adsorption side

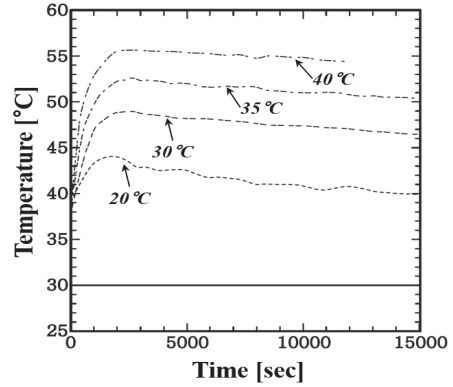


Fig. 7 Temp. change of the copper plate in the desorption side

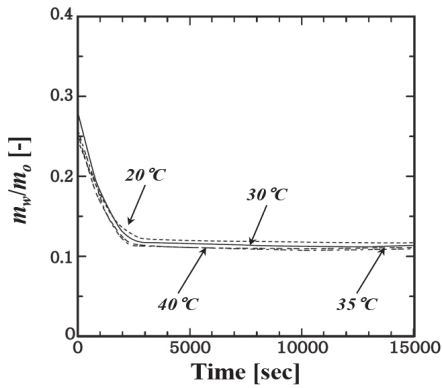


Fig. 5 Change of dimensionless adsorption amount ratio in the desorption side

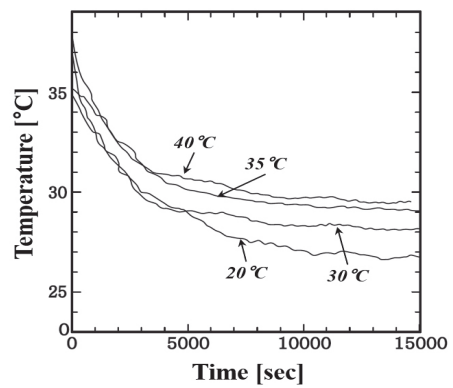


Fig. 8 Internal average temp. change of the adsorption side

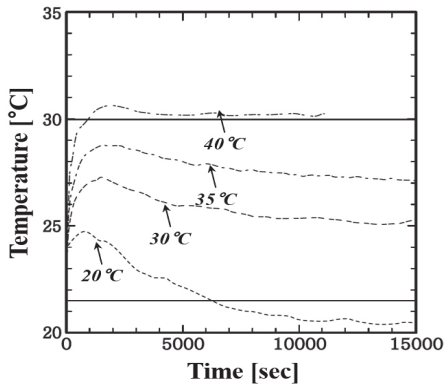


Fig. 6 Temp. change of the copper plate in the adsorption side

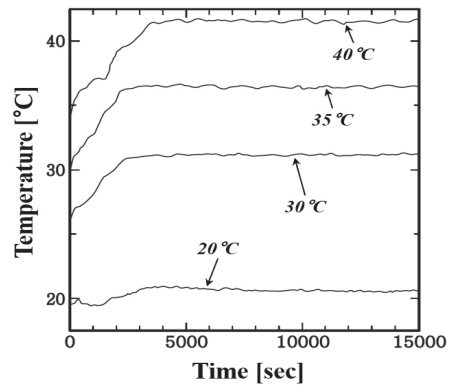


Fig. 9 Internal average temp. change of the desorption side

공기온도를 20℃, 30℃, 35℃, 40℃로 변화시킨 경우의 흡착측, 탈착측 각각의 시험부에서의 무차원 흡착량 비율의 시간에 따른 변화를 나타내고, Fig. 6, 7, 8, 9는 그 변화에 따른 각각의 흡착측, 탈착측에서의 동판온도, 시험부 내의 평균온도를 나타내고 있다.

Fig. 4를 보면 알 수 있는 바와 같이 흡착측 시험부에서는 탈착측 유입공기온도를 상승시킬수록 흡착측의 시험부에서의 무차원흡착량 비율은 감소해 간다. 이것은 Fig. 6의 흡착측 동판온도, Fig. 8의 시험부 내부 평균온도의 그래프를 보면 온도의 상승과 함께 상승하고 있고 탈착측 공기의 열량이 흡착측까지 전달되어 흡착측에서의 냉각에 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

Fig. 5의 탈착측의 시험부의 결과를 살펴보면, 탈착측 유입공기온도를 상승시켜도 무차원 흡착량비율의 변화는 거의 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7의 탈착측 동판온도, Fig. 9의 시험부 내부 평균온도의 그래프를 보면, 탈착측 온도의 상승과 함께 동판온도는 상승하고 있지만 내부온도는 유입공기와 비교해 약간 상승하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 탈착측 상대습도를 변화시킨 경우

Fig. 10, 11은 기본 실험조건 내의 탈착측 유입 공기 습도를 20%, 30%, 40%, 50%, 60%로 변화시킨 경우의 흡착측, 탈착측 각각의 시험부에서의 무차원흡착량비율의 시간에 따른 변화를 나타내고, Fig. 12, 13, 14, 15는 그 변화에 따른 각각의 흡·탈착에서의 동판온도, 시험부 내부 평균온도 변화를 나타내고 있다.

Fig. 10으로부터 탈착측의 상대습도를 상승시켜도 흡착측의 시험부에서의 무차원 흡착량 비율은 거의 변화하지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12의 흡착측 동판온도, Fig. 14의 시험부 내의 평

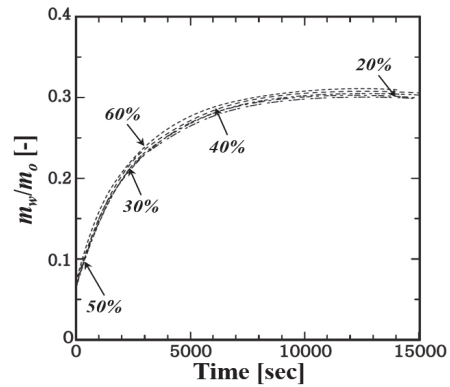


Fig. 10 Change of dimensionless adsorption amount ratio in the adsorption side

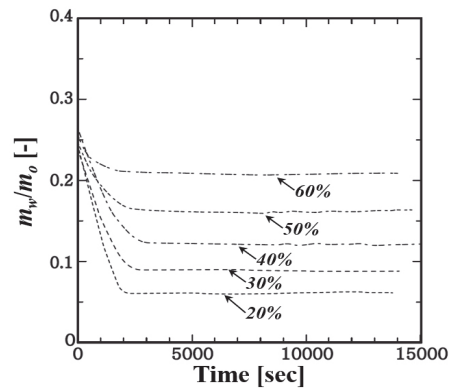


Fig. 11 Change of dimensionless adsorption amount ratio in the desorption side

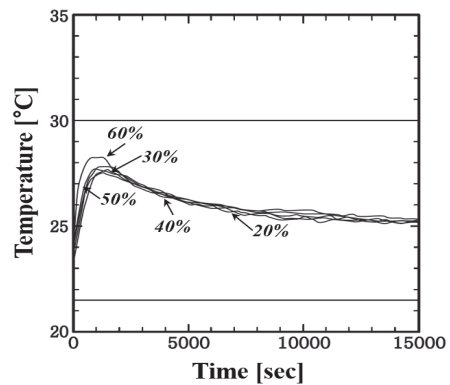


Fig. 12 Temp. change of the copper plate in the adsorption side

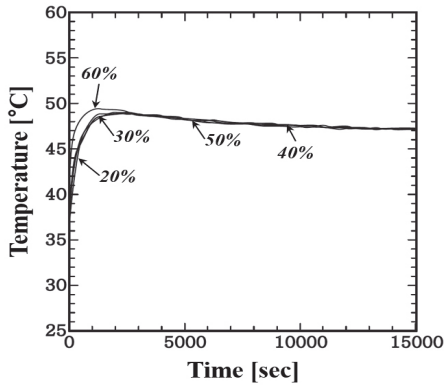


Fig. 13 Temp. change of the copper plate in the desorption side

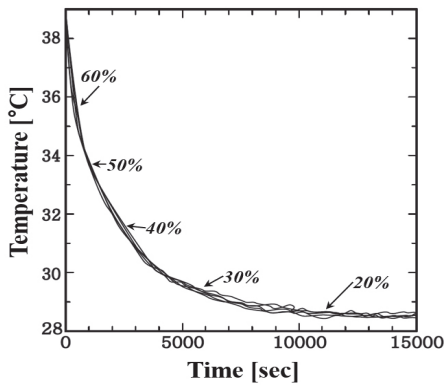


Fig. 14 Internal average temp. change of the adsorption side

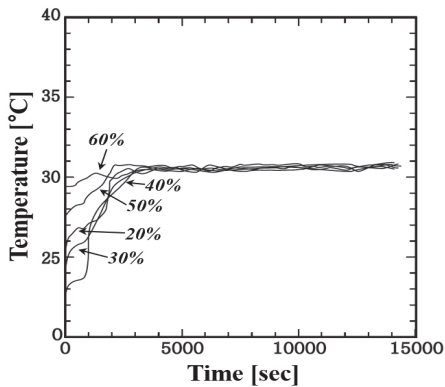


Fig. 15 Internal average temp. change of the desorption side

균온도 그래프를 보면 확인할 수 있는 바와 같이 20~50%까지는 거의 변화하지 않지만 60%에서는 동판온도의 최대값이 조금 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이것은 60%로 되면 탈착측에서의 탈착반응이 작아져 흡착량이 감소하기 때문에 그 흡열량의 저하가 흡착측까지 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 11의 탈착측 시험부에 대해서 살펴보면, 탈착측의 상대습도를 상승시킬수록 무차원 흡착량 비율은 증가해 탈착량은 감소해 간다. 이것은 탈착측 시험부 입구 상대습도의 값이 증가함에 따라 수증기 농도차가 작아지기 때문에 단위시간당 탈착량이 감소한 것으로 판단된다.

또한 Fig. 13의 탈착측 동판온도, Fig. 15의 시험부 내의 평균온도 그래프를 확인해 보면 20~50%까지는 그다지 큰 변화를 확인할 수 없지만, 60%에서는 탈착이 거의 이루어지지 않기 때문에 흡열반응이 작아져 탈착측 동판온도, 시험부 내부의 평균온도가 높아지는 것을 알 수 있다.

3.3 실험완료시간, 총괄물질전달계수

본 연구에서는 완료시간을 t_f 를 실험 중 흡·탈착량이 총 흡·탈착량의 90%가 되는 시간으로 정의하고 있고, 식 1과 같이 총괄물질전달계수 K_s 에 관해서는 완료시간까지의 평균값을 사용해 산출한다.

$$K_s = \frac{\rho}{a[(m_w/m_0)^* - (m_w/m_0)]} \cdot \frac{d(m_w/m_0)}{dt} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 증진밀도[kg/m³], a 는 단위증진용적당 외표면적[m²/m³], $(m_w/m_0)^*$ 는 평형 시 흡착량[kg/kg], m_w/m_0 는 무차원 흡착량[kg/kg]이다.

3.4 탈착측 입구 상대습도 변화에 따른 영향

탈착측 입구 상대습도 ϕ_{de} 를 20~60%까지 변화 시킨 경우의 흡·탈착에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

Fig. 16, 17은 탈착측 입구 상대습도를 변화시킨 경우의 흡착측(냉각면), 탈착측(가열면)에서 공기로의 평균 열유속의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 16에 나타나 있는 바와 같이 흡착측에서의 열유속은 시간 경과와 함께 감소해 평형을 이루게 된다. 이것은 실험개시 직후에 흡착측의 발열 및 탈착측의 흡열이 최대로 되기 때문에 열유속이 높은 값을 나타내지만 시간의 경과와 함께 흡착측에서의 발열, 탈착측에서의 흡열이 감소해 가기 때문에 이러한 경향을 나타나게 된다.

Fig. 17에 나타나 있는 바와 같이 탈착측에서의 열유속은 시간 경과와 함께 감소해 가다가 어느 한 지점에서 최저값을 나타낸 후 상승해 평형을 이루게 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 먼저 실험개시 직후에는 흡착측과 같이 흡착측에서의 발열 및 탈착측에서의 흡열의 감소와 함께 열유속은 감소해 간다. 그 후, 탈착측의 반응이 완료에 가까워져 흡열의 영향이 작아지게 되면 상승하는 경향에 있던 가열면 온도가 평형상태를 이루게 된다. 이것은 가열면 온도의 상승과 함께 시험부의 승온에 사용되어지는 열이 공기 가열에 사용되어진 결과로 열유속은 증가해 가고, 반응 완료와 함께 평형상태에 도달하게 된다.

Fig. 18은 탈착측 입구 상대습도와 흡착측, 탈착측의 실험완료시간, 총괄물질전달계수의 관계를 나타내고 있다. 흡착측에서는 실험완료시간, 총괄물질전달계수 둘다 거의 일정한 결과를 나타내고 있다. 탈착측에서는 탈착측 입구 상대습도의 증가

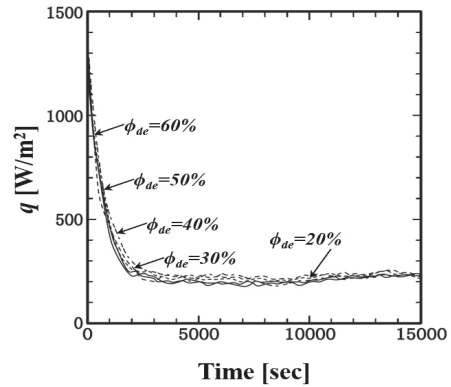


Fig. 16 Time histories of heat flux in the adsorption side according to change of relative humidity in the desorption side

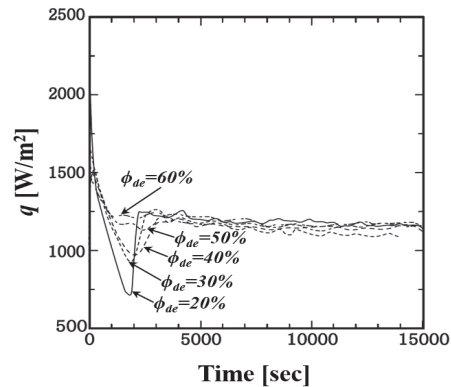


Fig. 17 Time histories of heat flux in the desorption side according to change of relative humidity in the desorption side

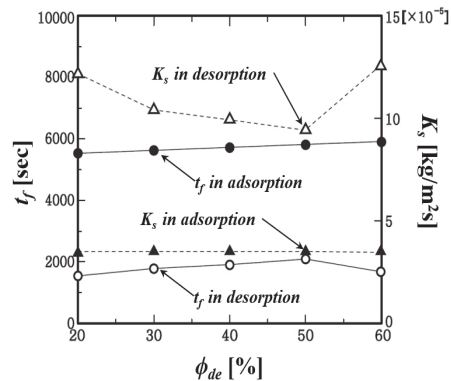


Fig. 18 Relationship between t_f , K_s and ϕ_{de}

와 함께 탈착의 구동력인 상대습도 차도 증가하기 때문에 물질전달계수는 크게 되고, 실험종료시간은 짧게 된다. 탈착측 입구 상대습도가 60%일 때 물질전달계수가 증가해 실험종료시간이 짧아지고 있는 것은 상대습도차에 대하여 탈착량이 적었기 때문이다.

3.5 탈착측 입구온도 변화에 따른 영향

Fig. 19, 20은 탈착측 입구온도를 변화시킨 경우의 흡착측(냉각면), 탈착측(가열면)에서 공기로의 평균 열유속의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 19를 보면 알 수 있는 바와 같이 탈착측 입구 상대습도를 변화시킨 경우와 같이 흡착측에서의 열유속은 시간의 경과와 함께 감소해 평형상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 20의 결과로부터 탈착측에서도 열유속은 시간의 경과와 함께 감소해 가고 어느 지점에서 최저값을 나타낸 후 상승해 평형상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 그러나, 탈착측 입구온도를 변화시킨 경우, 탈착측 입구온도가 높을수록 흡착측, 탈착측 둘다 평형상태에서의 열유속은 낮은 값을 나타내고 있다. 이러한 현상은 탈착측 입구온도가 상승하는 것으로 인해 가열면과의 온도차가 작아져 열전소자의 흡열능력이 저하했기 때문이다.

Fig. 21은 탈착측 입구온도와 흡착측, 탈착측의 실험종료시간, 총괄물질전달계수의 관계를 나타낸 것이다. 흡착측에서는 탈착측 입구온도의 상승과 함께 실험완료시간은 감소하고, 총괄물질전달계수는 증가해 간다. 이것은 탈착측 입구온도의 상승과 함께 열전소자의 흡열능력이 저하했기 때문이다. 탈착측에서도 탈착측 입구온도의 상승과 함께 실험종료시간은 감소하고, 총괄물질전달계수는 증가해 간다. 이러한 현상은 탈착측 입구온도의 상승에 따라 상대습도차가 거의 같아져도 절대습도

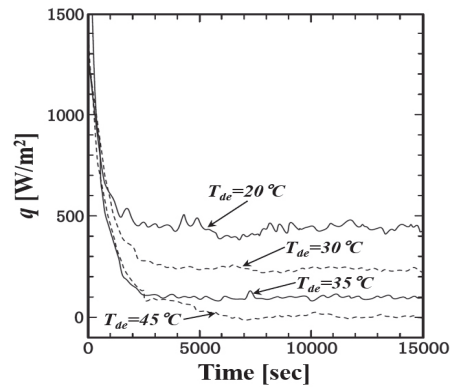


Fig. 19 Time histories of heat flux in the adsorption side according to change in inlet temp. of the desorption side

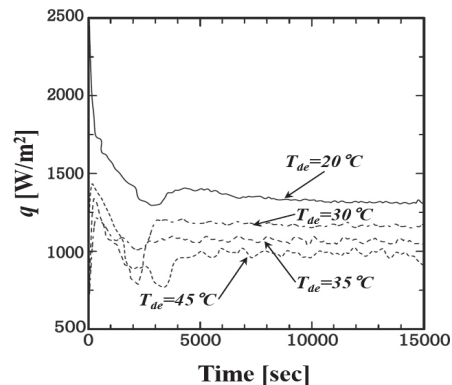


Fig. 20 Time histories of heat flux in the desorption side according to change in inlet temp. of the desorption side

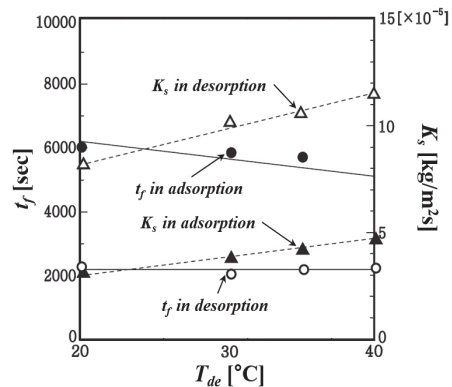


Fig. 21 Relationship between t_f , K_s and T_{de}

차가 커지기 때문에 물질 이동량이 증가되기 때문이다.

4. 결론

본 논문에서는 열전소자를 활용하여 흡·탈착 시스템의 성능을 개선하는 연구를 수행하였고 예비 실험을 통해 열전소자의 최적의 인가전력 인 3W로 설정하여 실험 완료시간과 총괄물질전달계수 등의 실험 결과를 평가하였다. 그 결과 탈착측에서의 입구 상대습도가 증가함에 따라 총괄물질전달계수는 증가하고 완료시간은 감소하는 것을 알 수 있었고 이는 상대습도 차가 증가하여 물질 전달이 원활해진 결과로 볼 수 있다. 또한 탈착측 입구온도의 상승과 함께 열전소자의 가열에 의해 공기가 받는 수분량이 증가하여 실험종료시간이 감소하고, 총괄물질전달계수는 증가하는 것을 확인하였다. 이것은 탈착측 입구온도 상승과 함께 상대습도차가 거의 같아져도 절대습도차가 커지기 때문에 물질 이동량이 증가한 것이다. 현재 열전소자의 효율이 높아지고 있는 상황에서 개발된 열전소자를 활용하여 흡·탈착 시스템에 접목하면 환기시스템과 같은 분야에 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] E. Belyanovskaya, R. Lytovchenko, K. Sukhyy, 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. Jeong, H. K. Kim, G. J. You, T. W. Im, Y. S. Park, "Moisture removal system using adsorbent for a better cold start of FCVs," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 21, pp. 1775-1780, (2007).
- [4] J. Pei, J. Zhang, "Modeling of sorbent-based gas filters: Development, verification and experimental validation," *Building Simulation*, vol. 3, pp. 75-86, (2010).
- [5] R. Fortulan, S. A. Yamini, C. Nwanebu, S. Li, T. Baba, M. J. Reece, T. Mori, "Thermoelectric Performance of n-Type Magnetic Element Doped BI_2S_3 ," *ACS Applied Energy Materials*, vol. 5, no. 3, pp. 3845-3853, (2022).
- [6] C. Li, J. Jin, W. Cao, X. Sun, Q. Ding, Y. Hou, Z. Wang, "Finite Element Analysis and Design of a Flexible Thermoelectric Generator with a Rhombus Gap Structure," *ACS Applied Material&Interfaces*, vol. 16, no.18, pp. 23406-23415, (2024).
- [7] E. A. Lebedev, S. Yu. Pereverzeva, D. G. Gromov, A. V. Sysa, S. A. Gavrilov, "A New Heat-Generating Element Based on Al-Ni- Fe_3O_4 Nanosized Powder Energetic Materials for Autonomous Thermoelectric Generators," *Nanobiotechnology Reports*, vol. 16, pp. 480-487, (2021).