

흡착식 냉동기의 열 및 물질전달에 관한 실험적 연구

권 오 경[†], 윤 재 호, 주 영 주*, 김 용 찬**, 김 종 하
한국생산기술연구원 에너지응용팀, *고려대학교 대학원 기계공학과, **고려대학교 기계공학과

An Experimental Study on the Heat and Mass Transfer of Adsorption Chiller

Oh-Kyung Kwon[†], Jae-Ho Yun, Young-Ju Joo*, Yong-Chan Kim**, Joung-Ha Kim

Applied Energy System Team, Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 330-825, Korea

*Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received December 28, 2004; revision received June 9, 2005)

ABSTRACT: Adsorption chillers have been receiving considerable attentions as they are energy-saving and environmentally benign systems. In order to evaluate adsorption rates, experiments were performed in the batch type adsorption apparatus. Three types of silica gels were investigated under an assortment of experimental conditions that are representatives of the actual operating environments in the adsorber of adsorption chillers. Experimental results revealed the effects of silica gel particle size, bed temperature, and fin pitch of fin tube on the adsorption rate. The 0.25~1.18mm particle size of silica gel with high adsorption rate was selected as a suitable adsorbent. The measured adsorption rate became bigger with decreasing particle size. From the comparison of adsorption rate, it is found that the fin tube has about 21% higher value than that of the bare tube. The effect of heat and mass flux is found to be more significant in the fin tube than in the bare tube.

Key words: Adsorption chiller(흡착식 냉동기), Adsorption rate(흡착률), Heat and mass flux(열 및 질량유속), Silica gel-water(실리카겔-물)

기 호 설 명

A : 열교환기의 면적 [m^2]

a : 냉매증기 유입면 면적 [m^2]

C_p : 물의 비열 [$kJ/kg^\circ C$]

G : 냉각수 유량 [kg/h]

M : 흡착제의 질량 [kg]

m : 흡착률 [kg/kg]

M_b : 수증기의 흡착량 [kg]

m'' : 질량유속 [kg/m^2s]

Q : 열량 [kW]

q'' : 열유속 [kW/m^2]

t : 흡착시간 [s]

ΔT : 입구와 출구의 온도차 [$^\circ C$]

T_b : 베드온도 [$^\circ C$]

1. 서 론

열에너지를 유효하게 이용하는 것을 목적으로 최근 흡착식 냉동기가 주목을 받고 있다. 흡착식

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8528; fax: +82-41-589-8330

E-mail address: kwonok@kitech.re.kr

시스템은 각 공정에서 버려지는 폐열을 구동원으로 사용할 수가 있어 에너지를 유효하게 재활용할 수가 있으며, 냉매로서 물을 사용함으로써 친환경적인 시스템이다. 상용화되고 있는 흡착식 냉동기에는 흡착제로 실리카겔 혹은 제오라이트가 냉매에는 물이 일반적으로 사용된다. 이 시스템에서는 다공질의 흡착제 입자를 가지는 충전층 내의 열교환기와 흡착제의 흡탈착 성능이 냉동능력을 지배하는 중요한 구성요소이다.

흡착탑 내부에서는 흡착제와 냉매 사이에서의 발열과 흡열을 동반하는 반복적인 흡착·탈착 반응이 상호적으로 행해지며 열교환기 면을 거쳐서 열교환이 이루어진다. 열교환량은 흡착 및 탈착의 반응속도에 강하게 의존하며, 발열을 동반한 흡착반응의 촉진을 위해서는 발생열을 충전층에서 빠르게 제거해야 하며 탈착반응시에는 빠른 열의 공급이 요구된다.

Fig. 1은 열교환면 상에 흡착제 입자를 충전한 층의 단면을 나타낸 것이며, 층상면에서 유입된 수증기가 흡착제에 흡착되는 모습의 단면도를 나타낸 것이다. 흡착시에는 우선 수증기가 유입되어 입자 사이를 침투한다. 이때 대류에 의해 열 및 물질의 이동현상이 발생된다. 또한 입자 사이의 유체와 입자 표면 사이에서 열 및 물질전달이 생기며 입자의 세공 내에서 확산 및 흡착현상이 발생된다. 이와 같이 충전층 내에서는 많은 열 및 물질의 이동현상이 복잡하게 발생하며 흡착현상에 미치는 열 및 물질전달의 영향을 밝히는 것이 열교환기의 고성능화에 기여한다고 판단된다.

흡착식 냉동기는 흡착탑, 응축기, 증발기로 구성되어 있으며, 흡착식 냉동기의 효율을 증가시키기 위해서 흡탈착 능력이 우수한 흡착제 개발

과 흡착탑에서의 열 및 물질전달의 향상이 필요하다. Yamaguchi et al.⁽¹⁾은 흡착성능에 영향을 주는 실리카겔 입자반경, 베드 높이, 흡착제의 충전방법 등에 연구를 수행하였으며, Boelman et al.⁽²⁾은 10 kW 냉동능력을 가지는 실리카겔-물계 흡착식 냉동기에 대해서 여러 가지 작동조건을 변화시켜서 시스템의 성능을 실험적으로 파악하였다.

Mori et al.⁽³⁾은 실리카겔 A타입과 제오라이트 13X에 대해서 열 및 물질전달 특성을 파악하였으며, Ng et al.⁽⁴⁾은 수분균형방법(moisture balance method) 등을 사용하여 실리카겔 A, 3A, RD 타입에 대한 등온특성을 파악하였다.

Watanabe et al.⁽⁵⁻⁷⁾은 충전층 흡착탑 내에서의 흡착특성에 대해서 소형장치를 이용하여 실험하였으며, 이를 수치적으로 검증하였다. 또한 Kwon et al.⁽⁸⁾은 비정상 열선가열법을 이용하여 실리카겔의 입자크기, 온도, 압력, 함수율 등에 대한 유효열전도율을 측정하였다.

본 연구에서는 흡착식 냉동기의 작동매체로서 실리카겔-물계를 사용하고 흡착과정 중에서의 흡착능력의 특성을 알아보기 위해 나관(Bare tube)과 핀튜브(Fin tube)에서 실리카겔의 입자크기에 따른 흡착률과 열유속 및 질량유속에 대한 실험을 수행하였다. 또한 핀튜브에서는 핀피치(Fin pitch)에 대한 영향을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 하나의 흡착탑에

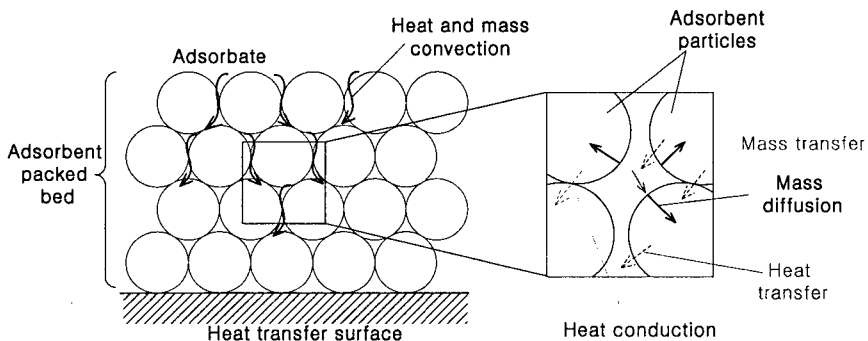


Fig. 1 Heat and mass transfer in the packed bed.

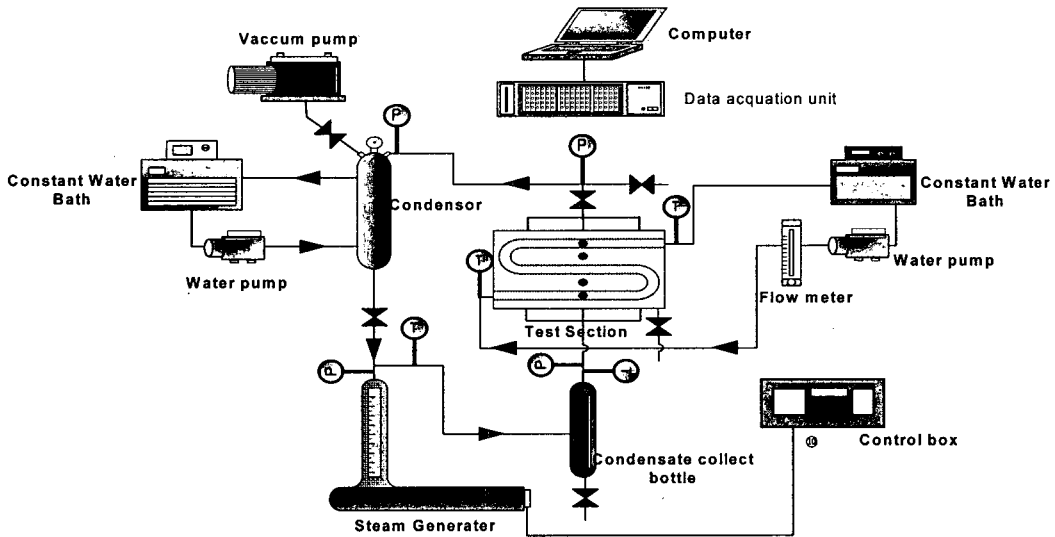


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

서 흡착, 탈착을 반복적으로 시행하는 개념의 batch type의 실험장치로, 흡착제와 냉매의 흡착량의 측정과 실험구간(Test section) 내의 온도, 압력분포를 측정할 수 있도록 설계, 제작되었다. 장치의 개략적인 구성은 Fig. 2에 나타내었다. 실험장치의 구성은 냉매인 증기(물)를 생성하는 스팀제너레이터(증발기), 탈착시 증기의 응축을 위한 응축기는 1/4" 튜브 6m를 감았으며 내부에는 냉각수가 흐르고 튜브 외부에는 탈착시에 발생하는 수증기가 응축되어 액주계로 모이도록 설계하였다. 또한 실리카겔이 충전되어 있는 bed (test section)와 열교환기, bed 내의 항온유지를 위한 항온조기, 원활한 탈착진행을 위한 진공펌프, 그 외 각종 밸브와 SUS 배관으로 이루어져

있다. 증발기 내부에는 물의 가열을 위한 카트리지형 히터(2 kW)를 장착하였으며, 히터의 온도조절은 PID 온도조절기를 통하여 냉매인 증기온도를 일정하게 유지하였다. 실험에 사용된 실리카겔은 일본 Fuji Silisia 사의 입자크기가 다른 3종류(0.25~1.18, 1.7~3.0, 3.35 mm)의 RD형을 사용하였고 열교환기로는 나관과 핀튜브를 사용하였으며 그 사양은 Table 1에 나타내었다.

Table 2는 실험에 사용된 실리카겔 입자크기별 분산분포와 평균값을 나타낸 것이며, 실리카겔 각각에 대한 분산분포는 0.25~1.18 mm인 경우에 99.7 wt%, 1.7~3.0 mm인 경우에 96.7 wt%, 3.35 mm인 경우에 98.7 wt%의 범위 내에 있으며, 측정에 사용된 실리카겔은 일본 F사(RD타입)의 제품을 사용하였다.

Table 3은 실험에 사용된 일본 F사(RD타입)

Table 1 Conditions of measurement

Parameters	Range
Silica gel's particle size (mm)	0.25~1.18
	1.7~3.0
	3.35
Heat Exchanger's size (mm)	$D_i=17.05, D_o=19.05$
	Fin pitch 2.3, 2.8
Pressure of packed bed (kPa)	25
Temperature of packed bed (°C)	25, 35, 45
Time (sec)	60, 180, 300, 600, 720

Table 2 Distribution of particle size

Particle size	Distribution	Analytical value	Average value
0.25~1.18 mm	0.25~1.18	99.7 wt%	0.72 mm
	below 0.25	0.3 wt%	
1.7~3.0 mm	above 3.0	2.9 wt%	2.35 mm
	1.7~3.0	96.7 wt%	
	below 1.7	0.4 wt%	
3.35 mm	3.35 mm	98.7 wt%	3.35 mm
	below 3.35	1.3 wt%	

Table 3 Thermal properties of silica gel

Properties		Japan F company
Particle size (mm)		0.5~0.8
		2.3~2.7
		3.35~3.9
Moisture adsorption capacity (wt%)	20% R.H.	12.0 Min
	50% R.H.	25.0 Min
	90% R.H.	35.0 Min
Bulk density (g/ml)		0.73
Surface area (m ² /g)		650
PH (at 5% slurry)		5.0
Pore volume (ml/g)		0.36
Pore diameter (nm)		2.3

실리카겔의 열물성치를 나타낸 것이다. 흡착물에는 수분흡착률(Moisture adsorption capacity), 겔보기 비중(Bulk density), 비표면적(Surface area), PH, 세공용적(Pore volume), 세공크기(Pore diameter) 등의 열물성치가 큰 영향을 미친다.

Fig. 3은 실험에 사용된 흡착탑(Test section)의 열교환기 형상과 열전대의 위치를 나타낸 것이다. 흡착탑의 외부에는 충전층에서의 열손실을 감안하여 외부를 단열재로 충분히 단열하였다. 열교환기는 3열 3패스 병류형이며 원형 핀튜브(동관, 동핀) 외부에 메시망으로 흡착제가 빠지지 않도록 고정하였고 열교환기의 종횡비(Aspect ration)는 3.47 : 1이다. 충전층 내부의 온도측정은 T타입 열전대를 사용하였으며, 열전대 보정을 시행한 후 실험을 수행하였다. 실험구간 내의 열전

대의 위치는 높이 5 mm, 30 mm, 80 mm, 105 mm에 설치하였으며, 수평방향으로 3포인트씩 총 12포인트의 열전대를 심어서 각 열(row)마다의 평균값을 취하여 대표값으로 사용하였다. 압력은 충전층 전후 입, 출구에서 각각 측정하였다.

2.2 실험방법

실험은 흡착과 탈착을 교대로 전환시키면서 실험을 수행하였다. 먼저 흡착과정에서 흡착시 증발기의 히터를 75℃로 증가시켜 그 온도가 안정상태에 도달하였을 때, 밸브를 열어 냉매증기가 실리카겔에 흡착되도록 하였다.

각 흡착실험시에 진공펌프를 이용하여 흡착탑 내부의 압력을 25 kPa로 압력조건을 맞추었으며, 흡착시에 발생하는 흡착열은 열교환기 내부에 항온조에서 일정하게 조절되는 냉각수를 순환시켜 흡착열을 제거하였다.

충전층 내의 실리카겔의 질량은 2 kg을 충전하였으며, 열교환기 내 냉각수의 유량은 500 l/h로 일정하게 유지하였다. 흡착이 종료되면 밸브를 닫아 유입된 증기의 질량을 측정하고 흡착률을 계산하였다. 흡착이 종료된 후에는 탈착과정으로 밸브를 전환시켰다. 탈착은 항온조의 온도를 90℃로 유지하고 8시간 이상 충분한 시간 동안 실리카겔에 흡착된 냉매증기를 탈착할 수 있도록 하였다.

2.3 실험 데이터 처리

흡착률은 흡착제의 질량과 흡착된 냉매증기량

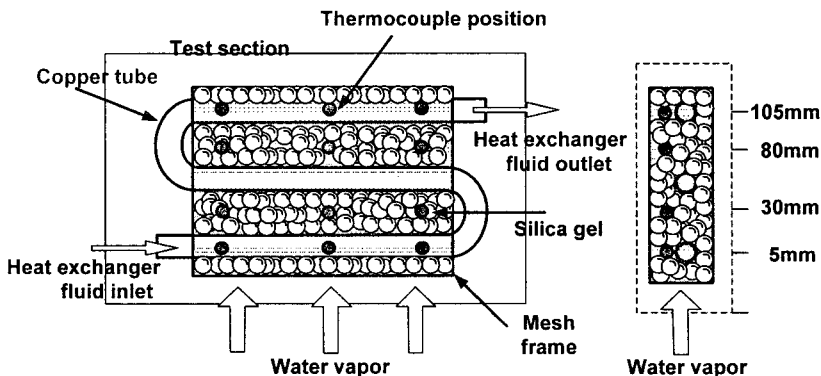


Fig. 3 Adsorber test section.

의 비로 식(1)을 이용하여 계산하였으며, 열유속과 질량유속은 식(2)와 (3)을 이용하였다. 열유속은 전열면에서 냉각수가 얻은 흡착열량(kW)을 열교환기의 면적으로 나누었으며, 질량유속은 흡착제 질량과 흡착물을 냉매증기 유입면적($a = 0.065 \text{ m}^2$)과 흡착시간으로 나누어 입자 내부로의 확산 등을 고려하였다.

$$\text{Adsorption rate } m = \frac{M_v}{M} \quad (1)$$

$$\text{Heat flux } q' = \frac{G \cdot C_b \cdot \Delta T}{A} \quad (2)$$

$$\text{Mass flux } m' = \frac{M \cdot m}{t \cdot a} \quad (3)$$

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 실리카겔 입자크기에 따른 흡착물을 시간에 따라 나타낸 것이다. 실험에 사용된 입자크기는 0.25~1.18, 1.7~3, 3.35 mm의 3종류이며, 충전층의 온도는 25°C, 압력은 25 kPa인 나관에서 흡착물을 측정하였다. 모든 입자에서 흡착이 시작되는 초기에 흡착이 급격하게 진행되다가 흡착 진행 후 약 400 sec 이후에 흡착평형이 일어났으며 입자크기가 작은 경우가 흡착률이 크게 나타났다. 이는 입자크기가 작은 경우 냉매증기의 유입저항은 커지게 되지만 이보다는 전열면이나 흡착제 입자와의 접촉면적과 유효열전도율의 증가로 인해 흡착률은 크게 증가하는 것으로 판단된다. 일반적으로 흡착식 냉동사이클에서 흡착 및

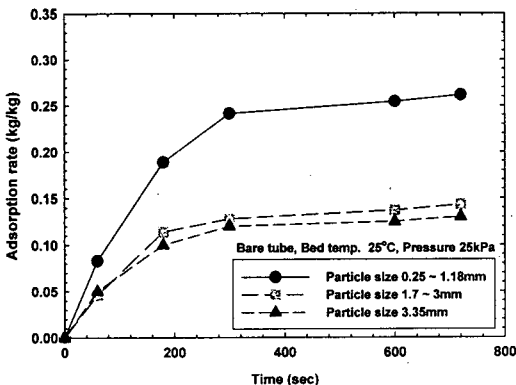


Fig. 4 Adsorption rate versus time for the particle size in bare tube.

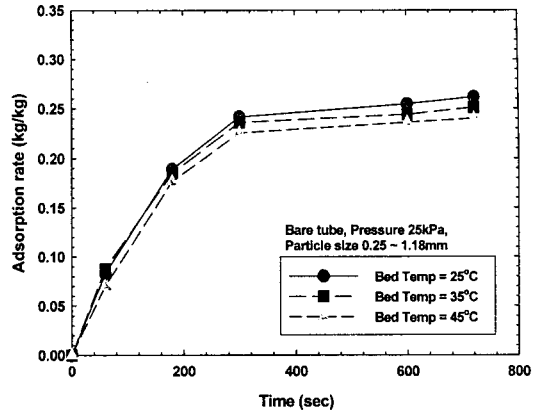


Fig. 5 Adsorption rate versus time for the bed temperature in bare tube.

탈착공정시간이 7~8분 정도인 것을 감안하면 본 실험에서의 흡착실험은 400초 이후에 흡착률이 정상상태에 도달하므로 타당성이 있다고 판단된다.

Fig. 5는 충전층의 온도변화에 따른 흡착물을 시간에 따라 나타낸 것이다. 실험에 사용된 입자크기는 0.25~1.18 mm이며, 충전층의 온도는 25, 35, 45°C인 경우에 흡착물을 측정하였다. 흡착물의 진행과정은 Fig. 4와 같으며 충전층의 온도가 낮을수록 흡착률은 크게 나타났다. 이는 충전층의 온도가 낮으면 냉매증기와 압력차이가 증가되면서 흡착률이 커진 것으로 생각된다.

Fig. 6은 시간변화에 따른 충전층의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 충전층의 온도는 냉매증기가 가장 먼저 도달하는 열교환기 하단부가 가장 높았으며(5 mm), 상단부의 온도가 가장 낮았

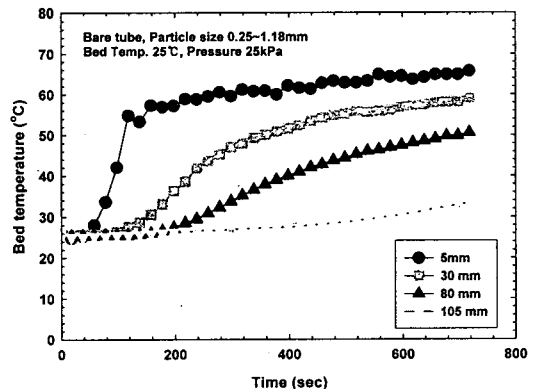


Fig. 6 Bed temperature versus time for the thermocouple position in bare tube.

다(105 mm). 냉매증기가 유입하여 압력이 상승함과 동시에 흡착이 시작되고 흡착열의 발생에 의해 흡착탑 내의 냉각수 온도가 25°C인 경우에 충전층의 온도는 60°C 전후까지 급상승한다. 그후 충전층 내의 온도는 최고온도에 도달된 후 전열면에서의 열제거에 의해 완만하게 평형상태에 도달하고 흡착반응은 종료함을 알 수 있다. 즉, 흡착속도는 흡착개시 직후가 가장 크고 시간이 경과하여 평형상태에 근접하여 감을 알 수 있다.

Fig. 7은 시간에 따른 흡착탑 입, 출구의 압력 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4의 흡착물의 실험결과와 마찬가지로 흡착이 진행되면서 충전층 내 압력차이는 흡착이 평형상태에 도달하는 400 sec 이후에서는 거의 같아짐을 알 수 있었다. 충전층 전후에서 실리카겔의 입자크기가 달라짐에 따라 압력차이가 존재하였으며, 입자크기가 작은 경우

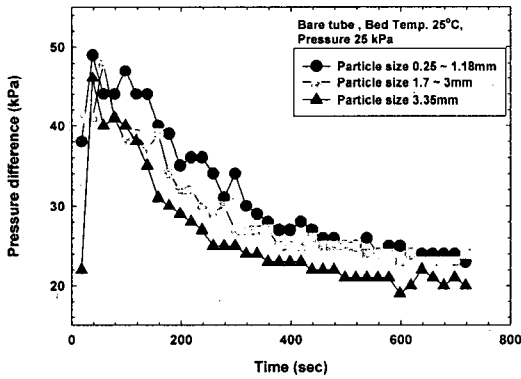


Fig. 7 Pressure difference versus time for the particle size in bare tube.

냉매증기의 유입저항은 커지게 되지만 이보다는 흡착제 입자와의 접촉면적과 유효열전도율의 증가로 인해 압력차이는 크게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 8은 핀튜브의 핀피치에 따른 흡착물을 시간에 따라 나타낸 것이다. 실험에 사용된 핀튜브의 핀피치는 2.3, 2.8 mm이며, 입자크기는 0.25~1.18 mm에서 흡착물을 측정하였다. 핀에 의한 열 및 물질전달의 향상으로 핀튜브가 나관에 비해서 흡착률은 약 21% 정도 나타났으며 핀피치가 작은 2.3 mm인 경우가 2.8 mm인 경우보다 흡착률이 증가하는 경향을 보였다. 이것은 핀피치가 작으면 동일한 전열면에서 핀피치가 큰 것에 비해 핀수가 많아지게 되고 이에 따라 전열면적이 증가되면서 열전달이 증가하게 되는 이유 때문에 흡착률이 증가되는 것으로 판단된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 나관에 대해서 입자크기를

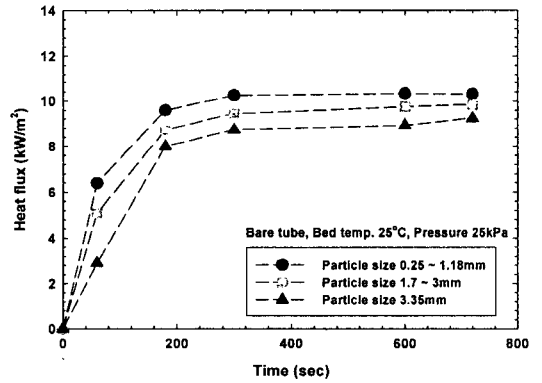


Fig. 9 Heat flux versus time for the particle size in bare tube.

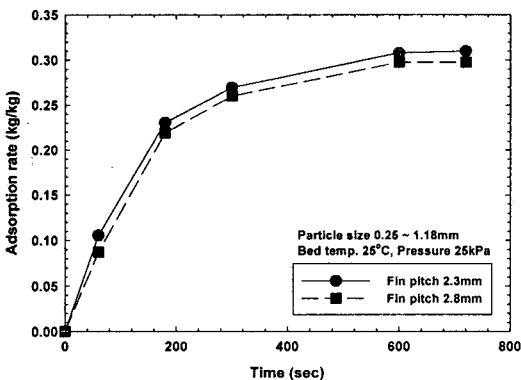


Fig. 8 Adsorption rate versus time for the fin pitch.

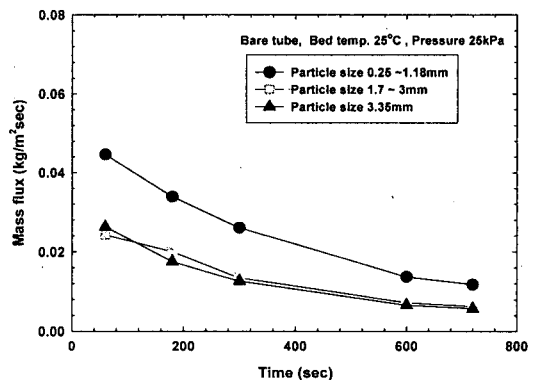


Fig. 10 Mass flux versus time for the particle size in bare tube.

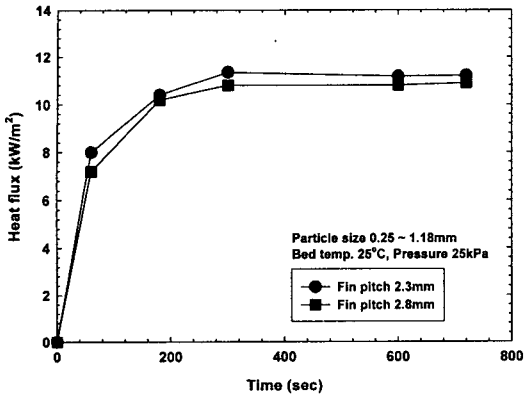


Fig. 11 Heat flux versus time for the fin pitch.

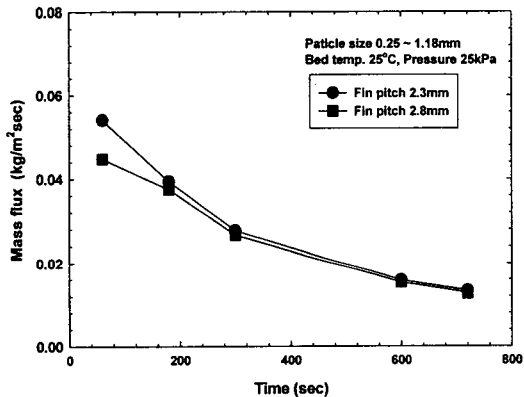


Fig. 12 Mass flux versus time for the fin pitch.

변화시키는 경우에 열 및 질량유속을 시간에 따라 나타낸 것이다. 열 및 질량유속은 Fig. 4의 시간에 따른 흡착률과 Fig. 7의 흡착탑 전후의 압력차이와 크게 관계가 있는 것으로 판단되며 입자크기가 작을수록 열 및 질량유속은 크게 나타나는 경향을 보였다.

Fig. 11과 Fig. 12는 핀튜브에 대해서 핀피치를 변화시키는 경우에 열 및 질량유속을 시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 9와 Fig. 10의 나관의 경우와 비교해서 핀튜브의 경우에 열 및 물질전달이 촉진되며, 핀의 효과로 인해 냉매증기의 흡착이 활발하게 진행되면서 질량유속은 증가하게 되며, 이에 따라서 흡착열의 증가로 열교환기에서 냉각수가 제거해야 되는 열전달량이 증가하게 되므로 열유속도 증가하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 흡착식 냉동기의 작동매체로서 실리카겔-물계를 사용하고 흡착과정 중에서의 흡착특성을 알아보기 위해서 나관과 핀튜브에서 실리카겔의 입자크기에 따른 흡착률, 열유속 및 질량유속에 대한 실험을 수행하였으며, 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실험을 통하여 실리카겔 크기별, 온도별, 열교환기 종류별 흡착률과 열유속 및 질량유속을 정량적으로 평가함으로써 적절한 실리카겔의 입자크기와 열교환기를 선정할 수 있었다.

(2) 흡착식 냉동사이클에서 흡착 및 탈착공정 시간이 7~8분 정도인 것을 감안하면 본 실험에서의 흡착률은 400초 이후에 정상상태에 도달하므로 타당성이 있는 실험이라고 판단된다.

(3) 나관의 열교환기에서 실리카겔 입자크기가 작을수록(0.25~1.18 mm > 1.7~3 mm > 3.35 mm) 흡착률이 증가함을 보였다.

(4) 흡착탑 내의 충전층의 온도가 냉매증기가 유입되는 하단부에서 가장 높게 나타났으며(5 mm) 상단부에서 가장 낮게 나타났다(105 mm). 또한 흡착탑 전후의 압력차이를 살펴본 결과 입자크기가 작은 경우 냉매증기의 유입저항은 커지게 되지만 이보다는 흡착제 입자와의 접촉면적과 유효열전도율의 증가로 인해 압력차이는 크게 나타남을 알 수 있었다.

(5) 핀튜브의 열교환기에서 흡착률은 나관인 경우보다 약 21% 정도 증가하였으며, 핀피치가 작은 경우(2.3 mm)가 큰 경우(2.8 mm)보다 흡착률, 열 및 질량유속이 증가하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 국가과학기술위원회 산하 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 “차세대 냉각시스템 기술개발”의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Yamaguchi, H., Furuta, Y., Boelman, E., Katoh, T. and Kashiwagi, T., 1992, Heat and mass transfer of adsorber considered

- silica gel particle size, Proc. of 26th Japanese Joint Conf. on Air-Conditioning and Refrigeration, pp. 149-156.
2. Boelman, E. C., Saha, B. B. and Kashiwagi, T., 1995, Experimental investigation of a silica gel water adsorption refrigeration cycle, ASHRAE Transactions Research, Vol. 101, No. 2, pp. 358-366.
 3. Mori, H., Hamamoto, Y., Yoshida, S. and Yonemaru, A., 2000, Experimental study on heat and mass transfer in packed beds adsorbing steam, Transactions of the JSME, Vol. 66, No. 649, pp. 207-214.
 4. Ng, K. C., Chua, H. T., Chung, C. Y., Loke, C. H., Kashiwagi, T., Akisawa, A. and Saha, B. B., 2001, Experimental investigation of the silica gel-water adsorption isotherm characteristics, Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 1631-1642.
 5. Watanabe, F., Jianfang, L. I., Kubota, M., Kobayashi, K. and Hasatani, M., 2003, Development of high performance adsorption heat pump by using FST module type adsorber, Proceedings of the International Seminar on Thermally Powered Sorption Technology, 4-5 December, Fukuoka, Japan, pp. 187-193.
 6. Yamamoto, E., Katsurayama, K., Watanabe, F., Matsuda, H. and Hasatani, M., 2000, Heat and mass transfer characteristics in adsorption of water vapor for silica gel packed bed adsorber, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 33, pp. 12-18.
 7. Yamamoto, E., Watanabe, F., Kobayashi, N. and Hasatani, M., 2002, Intraparticle heat and mass transfer characteristics of water vapor adsorption, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 35, No. 1, pp. 1-8.
 8. Kwon, O. K., Yun, J. H. and Kim, J. H., 2004, Measurement of effective thermal conductivity in silica gel packed bed, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 1126-1133.