

FAPO 제올라이트 흡착제 코팅을 통한 핀-관 열교환기 운전조건별 열전달 성능특성

Heat Transfer Characteristics of Fin-Tube Heat Exchanger Coated with FAPO Zeolite Adsorbent at Different Operating Conditions

정철기* · 김용찬** · 배경진*** · 차동안*** · 권오경****†
Chul-Ki Jeong*, Yong-Chan Kim**†, Kyung-Jin Bae***, Dong-An Cha*** and Oh-Kyung Kwon****†

(Received 04 May 2017, Revision received 13 June 2017, Accepted 13 June 2017)

Abstract: In conventional adsorption chamber, adsorbent is embedded in between heat exchanger fins by wire mesh. This method impedes heat and mass transfer efficiency. So in this study, to improve the heat transfer performance of heat exchanger, a fin-tube exchanger was coated with FAPO (Ferroaluminophosphate) zeolite adsorbent. The fin-tube heat exchanger has a fin pitch of 1.8 mm with a variation of adsorbent coating thickness of about 0.1 mm, 0.15 mm and 0.2 mm. By varying cooling water temperature and chilled water temperature respectively, heat transfer rate and overall heat transfer coefficient were investigated. As a result, the heat transfer rate and overall heat transfer coefficient increase with decreasing cooling water temperature and increasing chilled water temperature. Under the basic conditions, the heat transfer rate of heat exchanger with 0.2 mm coating thickness is 11% and 43% higher than that of 0.1 mm and 0.15 mm, respectively. The overall heat transfer coefficient is 189.1 W/m²·°C, it is two times larger than that of 0.1 mm.

Key Words : Adsorbent coating, Fin-tube heat exchanger, Heat transfer rate, Overall heat transfer coefficient

— 기호설명 —

A : 면적 [m²]

C_p : 정압비열 [kJ/kg·°C]

$LMTD$: 대수평균온도차

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

Pl : 열간격 [mm]

Pt : 단간격 [mm]

Q : 열전달량 [W]

T : 온도 [°C]

**** 권오경(교신저자) : 한국생산기술연구원 열유체시스템그룹

E-mail : kwonok@kitech.re.kr, Tel : 041-589-8528

*정철기 : 고려대학교 기계공학과 대학원

**김용찬 : 고려대학교 기계공학과

**** Oh-Kyun Kwon(corresponding author) : Thermal & Fluid system R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology. E-mail : kwonok@kitech.re.kr, Tel : 041-589-8528

*Chul-Ki Jeong : Department of Mechanical Engineering Graduate school, Korea University.

**Yong-Chan Kim : Department of Mechanical Engineering, Korea University.

U : 총괄열전달계수 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
 w : 오차

하첨자

bed : 흡착제
 in : 입구
 out : 출구

1. 서 론

최근 지구온난화로 인해 매년 여름철 온도가 상승하여 냉방 수요가 급격하게 증가하는 추세이다. 또한 경제의 발전과 생활수준 및 편의시설의 향상으로 인해 에너지 사용량이 증가하고 있다. 현재 냉각 또는 가열을 만들어 내는 증기압축식 냉·난방 시스템은 대부분 오존층 파괴 및 지구온난화의 원인이 되는 HCFC/HFC계 냉매를 사용하고 있다. 그러나 흡착식 냉동기는 각 공정에서 버려지는 폐열을 구동원으로 사용하고 냉매로 물을 이용하기 때문에 오존층 파괴 및 지구온난화 문제를 해결해 줄 친환경적인 냉동시스템으로써 전세계적으로 관심이 높아지고 있다. 하지만 성능이 낮고 부피가 큰 단점을 가지고 있다. 흡착식 냉동기의 흡착탑은 시스템 성능과 부피를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 따라서 흡착탑의 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발하게 진행 중이다.

기존의 흡착탑 성능에 대한 연구는 핀-관 열교환기에 직경이 약 0.2~0.5 mm 사이의 Silica-gel 흡착제를 Mesh망으로 고정하여 흡착 및 탈착 성능에 대한 연구를 진행하였다.¹⁾ 하지만 이러한 방법은 흡착제 물질과 열교환기 핀 사이에 접촉저항이 생겨 열전달 효율을 저해하며, 흡착제와 핀 사이의 간격이 넓기 때문에 흡착성능이 낮다.²⁾ 따라서 직접 핀의 흡착제를 코팅을 하면 기존의 방법에 비해 간격을 줄이고, 접촉저항을 줄여 열전달이 더 잘 일어난다. 대표적인 흡착제 코팅에 관한 연구로 Li et al.은 Silica-gel 흡착제를 바인더를 이용하여 열교환기에 코팅하여 흡착 및 탈착 성능을 평가하여 기존의 Mesh망을 이용한 실험방법

과 비교하였다. 그 결과 Silica-gel이 코팅된 열교환기의 총괄열전달계수와 흡착속도는 각각 약 4.6 배, 2배 정도 증가하여 열 및 물질전달이 향상됨을 파악하였다.^{3,4)} Heyden et al.은 알루미늄 판에 흡착제 ALPO-18을 코팅하여 코팅 두께에 따라 열 및 물질전달을 분석하였다. 코팅의 두께가 0.2 mm 이하에서 열 및 물질전달에 유리하게 작용하는 것을 확인하였다.⁵⁾ 현재 흡착식 냉동기에 사용되고 있는 흡착제는 Silica-gel, Zeolite 등이 있다.

Fig. 1은 흡착제별 흡착등온선을 비교하여 나타낸 그래프이다. Silica-gel 흡착제는 흡착 및 탈착 속도가 느리며 흡착식 냉동기의 작동분압(0.1~0.3) 내에서 최대 수분흡착량이 0.1 g/g으로 작으며, Zeolite 흡착제는 강한 친수성으로 인해 탈착시 250°C 이상 고온을 사용해야 하는 단점을 가지고 있다. 따라서 흡착식 냉동기의 운전 범위에서 흡·탈착량이 크고 흡·탈착 속도가 빠른 흡착제가 필요하다. Kwon et al.은 흡착식 시스템의 작동분압(0.1~0.3)에서 흡착량이 약 0.183 g/g FAPO (Ferroaluminophosphate)흡착제의 합성을 성공하였다.⁶⁾

FAPO 흡착제는 수분흡착곡선이 S자 형태로서 작동분압이 약 0.1~0.3 사이에 수분흡착량이 크게 증가한다. 하지만 FAPO 흡착제 자체의 열전도율이 낮고 흡착제와 열교환기의 열전달을 향상시키기

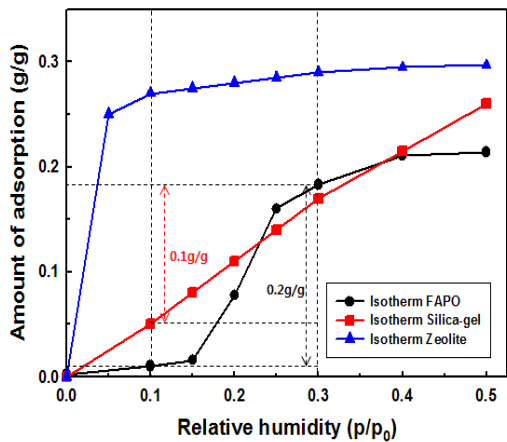


Fig. 1 Isotherm curves of adsorbent with relative humidity

위해 열교환기의 흡착제 코팅이 필요하다. Jeong et al.은 FAPO 흡착제와 바인더를 이용하여 금속 표면에 코팅하여 흡착 및 열전달 특성을 파악하였다. 그 결과 흡착제의 최적의 코팅두께는 0.2 mm로 판단하였으며, 코팅하지 않은 흡착제보다 코팅이 된 흡착제에서 열전달이 향상되었음을 확인하였다.⁷⁾

따라서 본 연구는 흡착제와 열교환기 사이의 열전달을 향상시키기 위해서 핀-관 열교환기에 바인더를 이용하여 흡착제를 코팅하였으며, 운전조건에 따른 성능 특성을 파악하였다. 이는 흡착식 냉동기의 흡착탑을 설계하는데 있어 기초적인 데이터를 제공할 것이다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

본 연구는 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 열전달 특성을 파악하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험 장치를 설계하였으며, Fig. 3과 같이 제작하였다. 실험 장치는 크게 증발기, 흡착탑, 응축기로 구성되어 있으며 증기밸브로 연결되어 있다. 증발기와 응축기는 각각 Endcross와 Corrugated 전열관을 사용하였으며, 냉수배관과 냉각수배관은 각각의 항온조와 연결하여 증발온도와 응축온도를 변화시킬 수 있게 설계하였다. 흡착탑은 코팅조건에 따라 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기를 교체할

수 있게 설계하였으며, 흡착과 탈착 공정에서 각각 흡착열을 제거하고 탈착열량을 공급하기 위해 실제 사용되는 냉각탑과 폐열원을 고온과 저온의 항온조로 모사하여 설계하였다. 그리고 흡착식 냉동기는 진공상태에서 운전됨으로 실험 전 실험장치 내부를 진공상태로 만들기 위해 진공펌프를 사용하였다. 그리고 증발기, 응축기, 흡착탑의 냉수, 냉각수, 온수배관 입-출구에 RTD와 유량계를 설치하여 온도와 유량을 제어하였으며 이를 통해 흡착탑의 열량을 측정하였다.

또한 시스템 내의 압력변화량을 측정하기 위해 각각의 증발기, 응축기, 흡착탑에 진공압력계를 설치하였다. 흡착 시 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 열전달 성능을 측정하기 위해 흡착제 표면온도를 측정하여야 한다. 따라서 Fig. 4와 같이 코팅된 핀-관 열교환기의 상단과 하단, 좌측과 우측, 중심에 5개의 온도센서를 설치하여 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 흡착제 표면온도를 측정하였으며, 흡착제 표면온도는 평균값을 사용하였다. 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 크기는 420(L)×274(W)×116(H) mm이며, 관은 4열 12행 엇갈림 배열로써 냉각수 및 온수는 12개의 관으로 분배된다. 관 외경 9.53 mm, 핀 두께 0.115 mm, 핀 피치 1.8 mm이며, 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기에 대한 자세한 사양은 Table 2에 나타내었다.

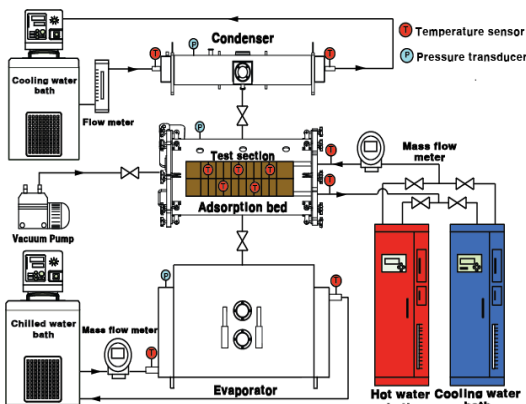


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

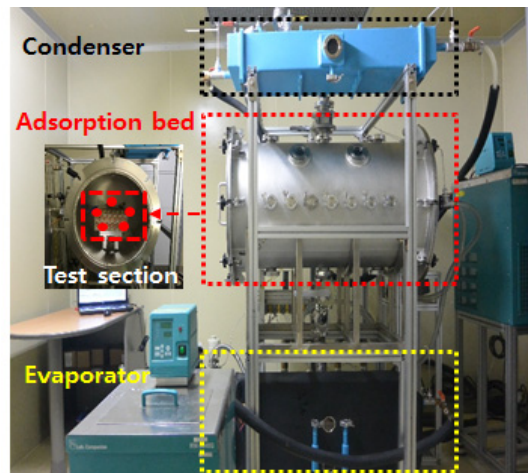


Fig. 3 Photo of experimental apparatus

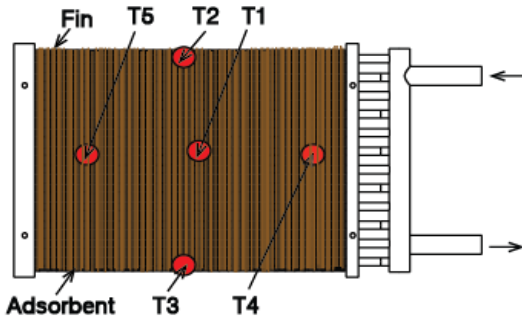


Fig. 4 Locations of thermal couple on fin-tube heat exchanger

본 연구에서 사용된 RTD(PT 100Ω)와 온도센서(T type)의 측정오차는 각각 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 이며, 진공압력계(Setra 730)와 유량계(Toshiba)의 측정오차율은 각각 $\pm 0.25\%$ $\pm 0.2\%$ 이다. 각각의 센서 측정값은 데이터 수집기(DA 100)를 이용하여 컴퓨터에 기록하였다.

2.2 흡착제 코팅

핀-관 열교환기 표면에 흡착제를 코팅하기 전 열교환기를 초음파 세척기로 세척 후 건조하여 이물질 및 기름때를 제거한 후에 코팅을 진행하였다. 흡착제와 바인더, 희석제를 코팅 비율에 따라 계량하고 이를 교반하여 코팅용액을 제조하였다. 기존의 연구에서 Cha et al.은 금속표면에 흡착제를 바인더 비율에 따라 수분흡착량 실험과 유효열전도율을 측정하여 비교하였다. 최적의 바인더 비율은 10wt%로 제시하였다.⁹⁾ 따라서 본 연구에서도 바인더 비율을 10wt%로 선정하였다. 희석제량은 흡착제와 바인더 양의 2배 비율로 선정하였다. 이는 희석제량이 흡착제와 바인더 무게의 2배 이상이 되면 코팅용액이 묽어져 코팅두께가 얇아지고, 희석제량이 흡착제와 바인더 무게의 2배 이하가 되면 코팅용액의 점도가 커져 핀과 핀 사이에 응집되어 흡착과 탈착 시 냉매증기의 원활한 이동을 막기 때문이다. 핀-관 열교환기 표면에 흡착제를 코팅하기 위한 코팅사양은 Table 3에 자세하게 나타내었다. 코팅방법은 Dip coating과 Spray coating을 병행하여 열교환기 표면에 흡착제

를 코팅하였으며, 건조방법 또한 열풍건조와 진공 열풍건조를 병행하여 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기를 건조하였다.

본 연구에서는 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 흡착제 코팅두께에 따른 성능 특성을 파악하기 위해 코팅두께를 각각 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm로 코팅하였으며, 코팅두께에 따라 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기는 Fig. 5와 같다. Fig. 6은 실험에서 사용된 FAPO 흡착제와 바인더 10wt%가 함량된 흡착제를 SEM 사진으로 나타낸 것이다. FAPO 대부분의 입자는 기둥형태의 결정을 형성하고 있으며, 부분적으로 비결정형의 입자들을 형성하고 있다.

Table 1 Thermal properties of FAPO⁸⁾

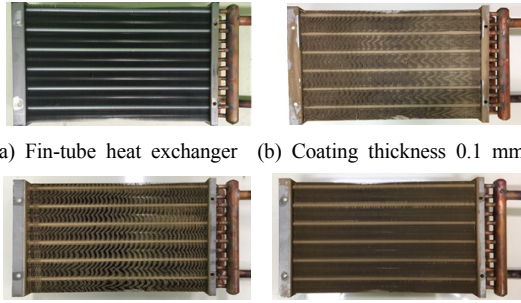
Properties	FAPO
Density	700 kg/m ³
Specific heat	805 J/kg·K
Thermal conductivity	0.113 W/m·K
Diffusivity	0.000254 m ² /s

Table 2 Specifications of heat exchanger

Item	Value	Unit	
Tube	Row	12	-
	Step	4	-
	Pt	21.65	mm
	Pl	25	mm
	Out diameter	9.53	mm
	Thickness	0.36	mm
	Material	Copper	-
Fin	Pitch	1.8	mm
	Thickness	0.115	mm
	Material	Aluminum	-
Size(L×W×H)	420×274×116	-	

Table 3 Coating specifications

	(b)	(c)	(d)
Adsorbent	FAPO		
Binder	Epoxy		
Binder ratio(wt%)	10		
Adsorbent weight(g)	400	1000	1600
Coating thickness(mm)	0.1	0.15	0.2



(a) Fin-tube heat exchanger (b) Coating thickness 0.1 mm
 (c) Coating thickness 0.15 mm (d) Coating thickness 0.2 mm
 Fig. 5 Photo of fin-tube heat exchanger with adsorbent-coating

Table 4 Experimental conditions

Item		Value	Unit
Chilled water	Temperature	10,12*,14	°C
	Flow rate	0.68	m³/h
Cooling water	Temperature	28,30*,32	°C
	Flow rate	1.316	m³/h
Adsorption time		420	s

*Basic conditions

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

$$LMTD = \frac{(T_{in} - T_{bed}) - (T_{out} - T_{bed})}{\ln \left(\frac{T_{in} - T_{bed}}{T_{out} - T_{bed}} \right)} \quad (2)$$

$$U = \frac{Q}{A \times LMTD} \quad (3)$$

$$w_Q = \sqrt{\left(\frac{\delta Q}{\delta \dot{m}} w_{\dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{\delta Q}{\delta C_p} w_{C_p} \right)^2 + \left(\frac{\delta Q}{\delta \Delta T} w_{\Delta T} \right)^2} \quad (4)$$

$$w_U = \sqrt{\left(\frac{\delta U}{A \cdot \delta Q} w_Q \right)^2 + \left(\frac{\delta U}{A \cdot \delta LMTD} w_{LMTD} \right)^2} \quad (5)$$

2.3 실험조건

흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기를 흡착탑에 설치 후 진공펌프를 이용하여 실험장치 내부를 진공상태로 만들고 냉매를 증발기에 주입하였다. 실험은 실제 온수와 응축수 조건을 고려하여 응

축기와 흡착탑 배관에 각각 30°C 냉각수와 80°C 온수를 공급하였다. 이는 수증기 분압이 약 0.089에 해당한다. 매 실험마다 초기 흡착제의 수분함수율을 동일하게 만들기 위해 1시간이상 탈착을 진행하여 수증기 분압을 유지함으로써 흡착제를 동일한 초기상태의 수분함수율로 만들었다. 이때 흡착제의 수분함수율은 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 약 0.0011 g/g인 것으로 확인되었다. 탈착 후에는 모든 증기밸브를 닫고 증발기와 흡착탑 배관에 각각의 증발온도와 흡착온도에 해당하는 냉수와 냉각수를 공급하였다. 냉수와 냉각수의 온도 및 유량은 실제 흡착식 냉동기의 운전조건을 고려하여 결정하였으며, 냉수온도 12°C, 냉각수 온도 30°C를 기준으로 냉수와 냉각수 온도를 변화시켰으며, 냉수와 냉각수 유량은 각각 0.68, 1.316 m³/h로 설정하여 실험을 진행하였다. 흡착시간은 7분으로 설정하였으며, 자세한 실험조건은 Table 4에 나타내었다.

흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 흡착 시 발생하는 흡착열량을 계산하기 위해 식 (1)을 이용하였으며, 냉각수 입-출구 온도와 흡착제 표면 평균 온도를 이용 하여 식 (2)를 통해 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 LMTD를 구하였다. 그리고 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수는 식 (3)으로 구하였다.¹⁰⁾ 여기서, 열교환기의 면적은 관외측 면적으로 계산하였으며 10.077 m²이다. 열전달량과 총괄열전달계수에 대한 불확실성은 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 계산하였으며, 실험조건에서 제시한 온도 및 유량

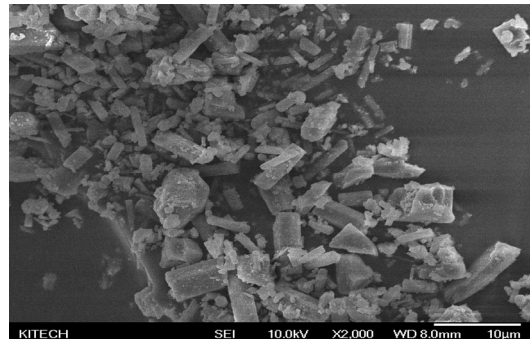


Fig. 6 SEM analysis of FAPO

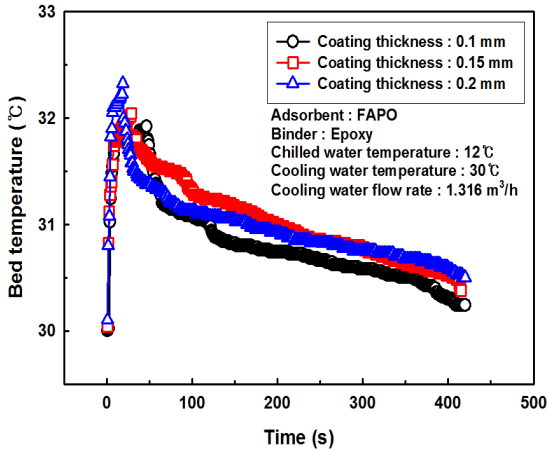


Fig. 7 The variation of bed temperature with adsorption time

센서의 측정오차를 반영하는 경우 열전달량의 불확실성은 평균 11%, 총괄열전달계수의 불확실성은 평균 10%로 나타났다. 또한 증발기와 흡착탑의 주고 받는 열량변화를 통해 에너지밸런스를 계산하였으며, 그 결과 에너지밸런스는 최소 89%, 최대 95%로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시간에 따른 흡착제 코팅 열교환기의 성능 특성 변화

Fig. 7은 기준 조건인 냉각수 온도 30°C, 냉수 온도 12°C에서 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 흡착제 표면 온도를 흡착시간에 따라 나타낸 것이다. 흡착을 시작하여 약 50초까지는 흡착제 표면온도가 급격하게 증가하였으며, 약 50초 이후에는 흡착제 표면온도가 감소하는 것을 확인하였다. 이는 기존의 Gao et al.¹¹⁾의 연구에서 볼 수 있듯이 흡착제는 특성상 강한 친수성을 가지고 있기 때문에 흡착 초기 단계에서 많은 양의 증기를 흡착함에 따라 흡착열이 크게 발생하여 흡착제 표면 온도가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 그 이후에는 냉각수의 흡착열 제거로 온도는 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 흡착제 코팅두께가 0.2 mm일 때 흡착제 표면 온도는 최대 32.3°C

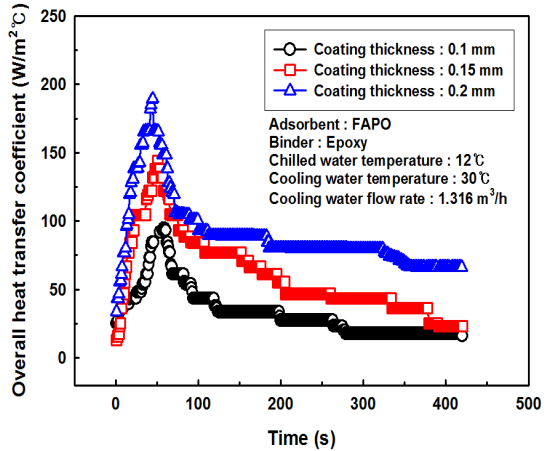


Fig. 8 The variation of overall heat transfer coefficient with time

로 가장 높게 나타났으며, 코팅두께 0.15 mm, 0.1 mm에서는 각각 32°C, 31.8°C로 측정되었다.

Fig. 8은 흡착시간에 따른 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수를 보여주고 있다. 흡착시간에 따라 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수는 Fig. 7과 같이 흡착제 표면 온도와 비슷한 경향을 보이지만 최대 총괄열전달계수의 흡착시간은 약 50초로 최대 흡착제 표면 온도 시간에 비해 약 2배 정도 늦게 나타났다. 이는 흡착제 표면에서 발생한 흡착열이 흡착제와 열교환기를 통해 냉각수로 전달되는 시간차이가 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 흡착제의 두께가 두꺼울수록 총괄열전달계수가 높게 나왔으며, 최대 총괄열전달계수의 흡착시간도 늦게 나타나는 것으로 확인되었다. 흡착제 코팅두께가 0.2 mm에서 최대 총괄열전달계수는 약 189.1 W/m²·°C로 나타났으며, 흡착제 코팅두께가 0.15 mm와 0.1 mm에 비해 각각 약 18, 50% 높은 것으로 나타났다.

3.2 냉수 및 냉각수 온도에 따른 흡착제 코팅 열교환기 열전달 특성

Fig. 9는 냉각수 온도 변화에 따라 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 열전달량을 보여주고 있다.

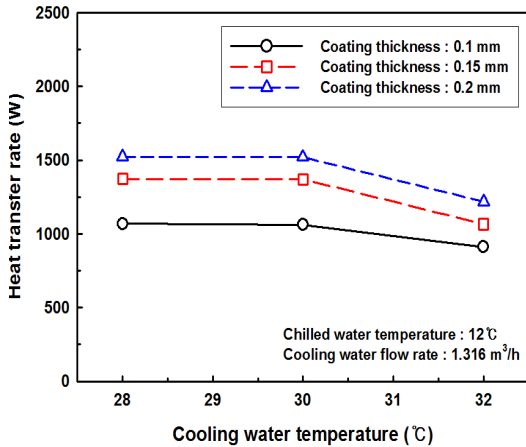


Fig. 9 The variation of heat transfer rate with cooling water temperature

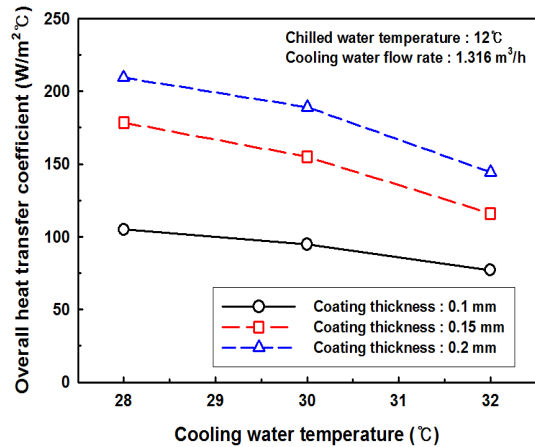


Fig. 11 The variation of overall heat transfer coefficient with cooling water temperature

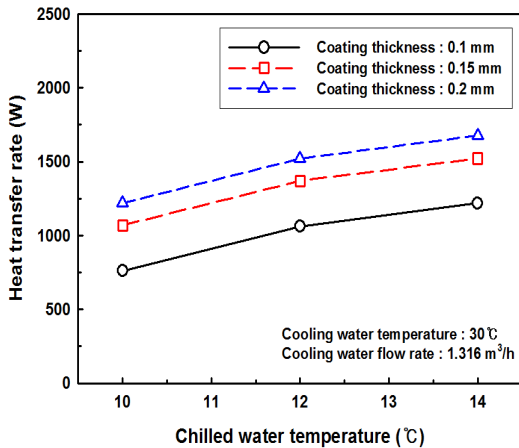


Fig. 10 The variation of heat transfer rate with chilled water temperature

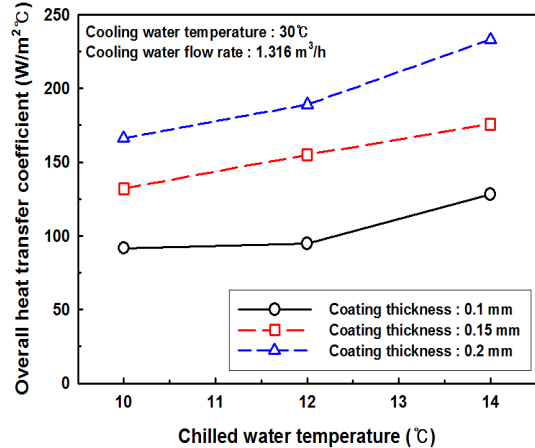


Fig. 12 The variation of overall heat transfer coefficient with chilled water temperature

열전달량 값은 420초 동안 측정하였으며, 본 실험에서 제시한 열전달량 값은 총괄열전달계수가 최대인 시간에서의 온도차를 반영한 값을 적용하였다. 핀-관 열교환기의 흡착제 코팅두께가 0.1, 0.15, 0.2 mm일 때 냉각수 온도가 28°C에서 30°C 증가함에 따라 열전달량은 약 1% 미만으로 감소하였지만, 냉각수 온도가 30°C에서 32°C로 증가함에 따라 열전달량은 약 15% 이상 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 FAPO 흡착제의 수분흡착 곡선은 S형 형태로서 작동분압이 약 0.1~0.3 사이에

수분흡착량이 크게 증가한다. 따라서 냉수 온도 12°C, 냉각수 온도 32°C일 때 흡착 분압은 약 0.29로서 흡착제의 수분 흡착량이 감소하기 때문이다.

Fig. 10은 냉수 온도 변화에 따른 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 열전달량을 보여주고 있다. 냉수 온도가 증가하고 흡착제 코팅두께가 두꺼울수록 핀-관 열교환기의 열전달량은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 코팅두께가 두꺼울수록 핀-관 열교환기 표면에 코팅된 흡착제 양이 증가함으로 더 많은 냉매 증기를 흡착할 수 있기 때문이다.

증발온도 12℃에서 흡착제 코팅두께가 0.2 mm인 핀-관 열교환기의 열전달량은 약 1,521 W로 흡착제 코팅두께가 0.1, 0.15 mm인 핀-관 열교환기에 비해 각각 약 11, 43% 높은 것으로 나타났다.

Fig. 11은 냉각수 온도 변화에 따라 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수를 보여주고 있다. 냉각수 온도가 증가함에 따라 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수는 흡착제의 코팅두께가 두꺼울수록 더 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 코팅두께가 두꺼울수록 코팅된 흡착제의 양이 증가하여 코팅두께가 얇은 핀-관 열교환기에 비해 많은 냉매증기를 흡착하고 상대적으로 흡착제의 낮은 열전도도에 대한 열저항이 커지기 때문인 것으로 판단된다. 냉각수 온도가 28℃에서 32℃로 증가함에 따라 흡착제 코팅두께가 0.1, 0.2 mm인 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수는 각각 약 27, 31% 감소하였다.

Fig. 12는 냉수 온도 변화에 따른 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수를 보여주고 있다. 기준온도 조건인 냉수 온도 12℃, 냉각수 온도 30℃에서 흡착제 코팅두께가 0.2 mm인 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수는 약 189 W/m²·℃로 나타났으며, 흡착제 코팅두께가 0.1 mm인 핀-관 열교환기에 비해 약 2배 정도 높은 것으로 나타났다. 흡착제 코팅두께와 관계없이 냉수온도가 증가함에 따라 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수는 증가하는 경향을 보였으며, 이는 냉수온도가 증가함에 따라 흡착제의 수분흡착량이 증가하기 때문이다.

4. 결 론

본 연구는 핀-관 열교환기에 흡착제를 코팅하여 흡착제와 열교환기의 열전달을 향상시키기 위한 연구로써 코팅두께별로 다양한 운전조건에 따라 실험을 진행하였으며, 결과는 다음과 같다.

- 1) 흡착제 코팅두께가 0.2 mm일 때 흡착제 표면 온도는 최대 32.3℃로 가장 높게 측정되었으며, 총괄열전달계수는 약 189.1 W/m²·℃로 나타났다.
- 2) 흡착제가 코팅된 핀-관 열교환기는 냉각수

온도가 28℃에서 30℃로 증가함에 따라 열전달량은 약 1% 미만으로 감소하였지만 냉각수 온도가 30℃에서 32℃로 증가함에 따라 열전달량은 약 15% 이상 크게 감소하는 것으로 나타났다.

3) 증발온도 12℃에서 흡착제 코팅두께가 0.2 mm인 핀-관 열교환기의 열전달량은 약 1,521 W로 흡착제 코팅두께가 0.1, 0.15 mm인 핀-관 열교환기에 비해 각각 약 11, 43% 높은 것으로 나타났다.

4) 냉각수 온도가 28℃에서 32℃로 증가함에 따라 흡착제 코팅두께가 0.1, 0.2 mm인 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수는 각각 약 27, 31% 감소하였으며, 냉수 온도 12℃, 냉각수 온도 30℃에서 흡착제 코팅두께가 0.2 mm인 핀-관 열교환기의 총괄열전달계수는 흡착제 코팅두께가 0.1 mm인 핀-관 열교환기에 비해 약 2배 정도 높은 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부-한국에너지기술평가원청정화학력핵심기술개발사업(20161110100090)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. B. B. Saha, S. Koyama, T. Kashiwagi, A. Akisw, K. C. Ng and H. T. Chua, 2003, "Waste heat driven dual mode, multi-stage, multi-bed regenerative adsorption system", International Journal of Refrigeration, Vol. 26, pp. 749-757.
2. W. Loh, I. El-Sharkawy, K. C. Ng and B. B. Saha, 2009, "Adsorption cooling cycles for alternative adsorbent/adsorbate pairs working at partial vacuum and pressurized conditions", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 793-798.
3. A. Li, A. B. Ismail, K. Thu, M. W. Shahzad, K. C. Ng and W. Chun, 2014, "Improvement of adsorbent embedded heat transfer through introduction of binder", Proceedings of ACRA,

- pp. 471.
4. A. Li, K. Thu, A. B. Ismail, M. W. Shahzad and K. C. Ng, 2016, "Performance of adsorbent-embedded heat exchangers using binder-coating method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 92, pp. 149-157.
 5. H. Heyden, G. Munz, L. Schnabel, F. Schmidt, S. Mintova and T. Bein, 2009, "Kinetics of water adsorption in microporous aluminophosphate layers for regenerative heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1514-1522.
 6. O. K. Kwon, K. J. Bae and D. A. Cha, 2015, "Kinetics of water vapor adsorption with zeolite adsorbent coating", *Proceedings of KSME*, pp. 161-162.
 7. C. K. Jeong, K. J. Bae, O. K. Kwon and Y. C. Kim, 2015, "Water vapor adsorption and heat transfer characteristics of the metal surface with adsorbent coating", *Proceedings of SAREK*, pp. 206-208.
 8. S. W. Hong, S. H. Ahn, J. D. Chung, K. J. Bae, D. A. Cha and O. K. Kwon, 2016, "Characteristics of FAM-Z01 compared to silica gels in the performance of an adsorption bed", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 104, pp. 24-33.
 9. D. A. Cha, K. J. Bae and O. K. Kwon, 2017, "Measurement of effective thermal conductivity and peeling durability by zeolite adsorbent coating", *Proceedings of KSPSE*, pp. 117-118.
 10. K. Thu, K. C. Ng, B. B. Saha and K. Chakraborty, 2010, "Overall of heat transfer analyses of a heat-driven adsorption chiller", *Proceedings of International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology*, Tokyo, Japan.
 11. W. Gao, C. Li, D. Wang and D. Wu, 2016, "An experimental investigation of salt-water separation in the vacuum flashing assisted with heat pipes and solid adsorption", *Desalination*, Vol. 399, pp. 116-123.