

핀튜브형 흡착탑에서 열 및 물질전달 수치해석

Numerical Analysis of the Heat and Mass Transfer in a Fin Tube Type Adsorber

권오경(Oh Kyung Kwon)¹, 정재동(Jae Dong Chung)^{2*}

¹한국생산기술연구원 에너지시스템연구그룹, ²세종대학교 기계공학과

¹Energy System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 331-825, Republic of Korea

²Department of Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Republic of Korea

(Received April 3, 2013; revision received June 14, 2013)

Abstract Nowadays, adsorption chillers have been receiving considerable attention, as they are energy saving and environmentally benign systems. A fin tube type heat exchanger in which adsorption/desorption takes place is required with more compact size. The adsorption chiller is expected to have high energy efficiency in utilizing the waste heat exhausted from a process. The objectives of this paper are to scrutinize the effect of design parameters on the adsorption performance, especially the fin pitch of the fin tube, and to develop an optimal design fin tube heat exchanger in a silica gel/water adsorption chiller. From the numerical results, the fin pitch of 2.5 mm shows the highest adsorption rate, compared to other fin pitches, such as 5 mm, 7.5 mm and 10mm. Also, the adsorption rate is affected by the cooling water and hot water temperature.

Key words Adsorption chiller(흡착식 냉동기), Adsorption rate(흡착률), Fin pitch(핀 피치), Heat and mass transfer (열 및 물질전달), Silica gel/water(실리카겔/물)

* Corresponding author, E-mail: jdchung@sejong.ac.kr

기호설명

C_A	: 실리카겔의 비열 [kJ/kg°C]
F_p	: 핀 피치 [mm]
P_s	: 흡착제 온도에서의 포화압력 [kg/cm ²]
P	: 흡착탑 내에서의 압력 [kg/cm ²]
q^*	: 흡착률 [g/g]
T_A	: 실리카겔의 온도 [K]
w_f	: 핀 두께 [mm]
λ_C	: 실리카겔의 유효열전도율 [W/mK]
ρ_A	: 실리카겔의 충전밀도 [kg/m ³]

하첨자

A	: 실리카겔
f	: 유체
m	: 구리
w	: 물

1. 서 론

흡착식 냉동기는 흡착탑 내부에서의 흡착 및 탈착 현상을 이용하여, 냉수를 얻는 시스템으로 흡착제와 냉매의 쌍으로 이루어져 있다. 흡착탑 내부에서는 흡

착 및 탈착 반응시 냉매증기에서 흡착제로의 열 및 물질전달이 복잡하게 나타나며, 흡착탑 내에서의 열 및 물질전달의 정확한 규명은 흡착식 냉동 시스템의 성능을 높이는 중요한 인자로 작용된다. 또한 흡착 탑내에서의 빠른 열 및 물질전달은 사이클 시간을 단축할 수 있으며, 흡착 및 탈착능력을 높일 수 있다.

흡착식 냉동시스템에서의 흡착제와 냉매는 저온폐열(약 60~90°C)이 이용 가능한 실리카겔/물계 시스템이 일본을 중심으로 상업화에 성공하였으며, 이 때의 이용 열원은 산업용 공정, 가스엔진, 연료전지 등에서 발생하는 열을 다양하게 사용할 수가 있어 에너지의 유용성이 장점으로 부각된다. 또한 흡수식 냉동기와 비교하여 동력을 사용하지 않아 소음이 없고, 화학 반응에 의한 기체(불활성 기체)의 발생이 없어, 추가적인 추가작업이 불필요하며, 공급열원의 온도변화에도 냉동능력은 크게 변화하지 않는다.

종래연구로 Kwon et al.^(1,2)은 핀튜브 열교환기에서 흡착제 크기, 핀피치에 따른 열 및 물질전달 특성을 실험적으로 규명함과 동시에 흡착제의 유효열전도율을 측정하였다. Joo et al.⁽³⁾은 본 논문의 선행연구로서 흡착탑에서의 열 및 물질전달의 수치해석을 수행하였다.

Saha et al.⁽⁴⁾은 Freundlich 방정식의 계수를 실험데이

터에 맞추어 최소자승법에 의해 결정하였다. 그리고, 작동조건, 온도, 유량, 사이클 시간의 영향을 시뮬레이션 프로그램을 통하여 분석하였으며, Chiahara and Suzuki⁽⁵⁾와 Sakoda and Suzuki⁽⁶⁾는 일본 Fuji사의 A형 실리카겔(5~10 mesh)을 중량측정법을 이용하여, 120°C 이하에서의 흡착률 상관식을 제시하였다.

Cho and Kim⁽⁷⁾은 RD형 실리카겔을 사용하였으며, 1.2RT급의 4~7°C의 냉수를 생산할 때의 각 요소에 열전달률의 영향을 결정하기 위해 해석모델을 개발하여 수치해석을 수행하였다. Yamamoto et al.⁽⁸⁾은 비교적 사이즈가 큰 B, ID형 실리카겔에 대해서 실리카겔 입자 내부에서의 온도분포와 수치해석을 수행하였다.

또한 Ng et al.⁽⁹⁾은 실리카겔/물계 흡착식 냉동기의 흡착제로 사용되는 실리카겔의 다양한 타입(A, 3A, RD)에 대하여 시간과 재생온도에 따른 등온특성을 실험적으로 제시하였다.

본 연구에서는 실험적으로 규명하기 힘든 흡착탑내에서의 시간에 따른 흡착 및 탈착능력을 해석하고, 그 결과를 통하여, 흡착식 냉동기를 최적 설계하는데 목적이 있다. 이를 위해 핀튜브 모듈에 대해 하나의 단위 핀과 핀사이에서의 열 및 물질전달에 관한 영향을 해석하여, 흡착탑 내부의 흡착률과 온도변화를 알아보고, 핀피치에 따른 흡착률의 영향과 흡착과 탈착시의 온도를 개별적으로 변화시켜 흡착률의 영향을 알아보았다. 수치해석은 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하였고, 연구결과의 검증에 위해 SATR-CCM+를 사용하여 동일한 결과가 나오도록 확인하였다.

2. 수치해석

2.1 해석 방법

실리카겔/물계의 흡착식 냉동기는 저온폐열을 이용한 흡착식 시스템으로서, 다른 흡착제와는 달리 비교적 낮은 온도에서 구동을 시킬 수 있는 장점이 있다. 흡착식 냉동사이클에서 두 개의 흡착탑은 흡착시에는 약 30°C의 냉각수, 탈착시에는 엔진배열이나 공정에서 버려지는 저온 폐열(약 80°C)이 구동 열에너지로 이용된다. 서로 연속적인 냉열을 얻기 위해 두 개의 흡착탑이 냉각수, 온수가 반복적으로 바뀌어 지게 되는데, 이 때의 흡착과정과 탈착과정이 바뀌게 되는 준비단계와 흡착탑내 흡착과정에서의 흡착열 제거와 탈착시에 흡착탑으로의 열전달 성능이 우수할수록 시스템의 효율은 증가하는 경향을 보인다.

흡착식 냉동기의 흡착탑에서의 열유동 해석에 사용된 핀튜브 타입의 열교환기에서의 열 및 물질전달을 평가하기 위하여 열교환기의 핀과 핀사이의 해석 모델 형상은 Fig. 1과 같다. 관 내부로 유동하는 냉각수와 온수온도는

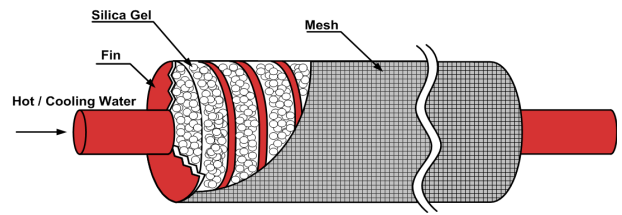


Fig. 1 Schematic diagram of heat exchanger of adsorber.

30°C, 80°C로서 450초 간격으로 유입되는 조건으로 비정상상태 2차원 열전달 방정식을 사용하여 수치해석을 수행하였다. RD형 실리카겔과 수증기와의 열전달은 무시하였으며, 냉각수와 구리관과의 열전달 계수는 Dittus-Boelters 방정식을 이용하여 계산하였다. 해석에 이용된 핀튜브타입 열교환기의 해석조건은 Table 1에 나타내었으며, 해석형상은 핀피치 사이의 한 부분과 냉각수 유로의 중앙을 대칭조건으로 해석을 수행하였다. 구리표면에서 실리카겔로의 열전달로 인한 실리카겔의 내부 온도 분포는 에너지 방정식에 의해 계산되어지며, 실리카겔의 흡착률은 실험상관식을 적용하여, 실리카겔의 각 지점에서의 온도 변화와 각 온도의 포화 압력으로 계산하여, 시간에 따른 흡착률의 분포를 계산하였다.

2.2 가정

수치해석을 행하기 위해서 아래와 같은 가정을 두었다.

- ① 흡착제 입자는 균일한 구형입자이다.
- ② 흡착제 입자 외표면은 항상 입자온도에서 흡착 평형에 도달한다.
- ③ 입자 내에서 물질이동은 확산이 지배적이다.
- ④ 흡착제 입자와 전열면의 사이에 접촉저항은 없다.

2.3 지배방정식

흡착제 충전층의 밀도 및 유효열전도율은 문헌⁽⁴⁾에서 흡착농도가 0일 때의 값을 참고하여 최소자승법에 의해 식(1)~식(2)와 같이 수식화하여 사용하였다.

Table 1 Numerical conditions

Parameters	Conditions
Temp. of hot water(°C)	75, 80, 85, 90
Temp. of cooling water(°C)	25, 30, 35
Adsorption/Desorption cycle time(sec)	450
Inner diameter of tube(mm)	17
Outer diameter of tube(mm)	19.05
Fin height(mm)	12
Fin pitch(mm)	2.5, 5, 7.5, 10

(충전밀도)

$$\rho_A = 769.07 - 15.326 \times 10^3 r_c \quad (1)$$

(유효열전도율)

$$\lambda_c = 0.5876 \times 10^{-1} + 0.12695 \times 10^{-3} \rho_A \quad (2)$$

(입자 내 확산방정식)

실리카겔/물계에서는 입자 내에서 물질이동은 표면 확산에 지배된다. 이것은 흡착제 세공의 내부표면에 흡착된 분자가 흡착상태에서 세공내를 이동하는 것이다. 흡착제 내 물질수지는 다음 식(3)~식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dq}{dt} = K_{sap}(q^* - q) \quad (3)$$

여기서 K_{sap} 는 식(4)로부터 구할 수가 있다.

$$K_{sap} = 15 \frac{D_s}{r_c^2} \quad (4)$$

$$D_s = D_{s0} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_w}\right) \quad (5)$$

(에너지 방정식)

흡착시에 발생하는 흡착열은 식(6)과 같이 열전도에 의해 냉각수, 핀에 전달된다.

$$C_A \rho_A \frac{\partial T_A}{\partial t} = \lambda_c \left(\frac{\partial^2 T_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_A}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_A}{\partial R} \right) + H \cdot \rho_A \frac{\partial q}{\partial t} \quad (6)$$

(흡착평형)

실리카겔/물계에서는 Saha⁽⁴⁾ 등이 실험적으로 제시한 Freundlich의 방정식을 이용해서 흡착 평형관계를 구하였다.

$$q^* = 0.524 \left(\frac{P_s(T_v)}{P_s(T_A)} \right)^{0.99} \quad (7)$$

(물의 포화증기압)

포화증기압은 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$P_s(T) = 0.133 \exp\left(18.3 - \frac{3.82 \times 10^3}{T - 46.1}\right) \quad (8)$$

수치해석에 이용된 RD타입 실리카겔의 물성치는 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Physical properties of type RD silica gel

Properties	Values
Silica gel particle size(r_c)	0.5(mm)
Apparents density(ρ_A)	761(kg/m ³)
Effective conductivity(λ_c)	0.155(W/mK)
Surface diffusivity(D_s)	1.58×10 ⁻¹⁰ (m ² /s)
Mass transfer coefficient(K_{sap})	0.0095(m/s)
Specific Heat(C_A)	920(J/kgK)
Latent heat of adsorption(H)	2.43×10 ³ (kJ/kg)

2.4 경계조건 및 수치해법

$$X = 0, \quad \frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$X = X_e, \quad \frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$R = R_h, \quad \frac{\partial T_a}{\partial R} = 0 \quad (11)$$

$$R = 0, \quad \lambda_c \frac{\partial T_m}{\partial R} = h_0(T_a - T_f) \quad (12)$$

해석모델은 Fig. 1에 나타낸바와 같이 원형 핀튜브형 흡착기의 핀을 포함한 충전층부를 모델화한 것이다. 좌표계는 X, R의 2차원이고 핀 사이에 흡착제인 실리카겔이 충전되고 관내를 냉각수와 온수가 흐르는 구조로 되어 있다. 1개의 핀과 핀 사이 냉각수 유입 반경을 대칭조건으로 해석하였으며, 각 외면의 경계조건은 단열조건으로 설정하였다. 해석에 사용된 격자수는 3190개로 ±5% 범위에서 수행된 예비계산에서 결과에 큰 영향이 없음을 확인하였다.

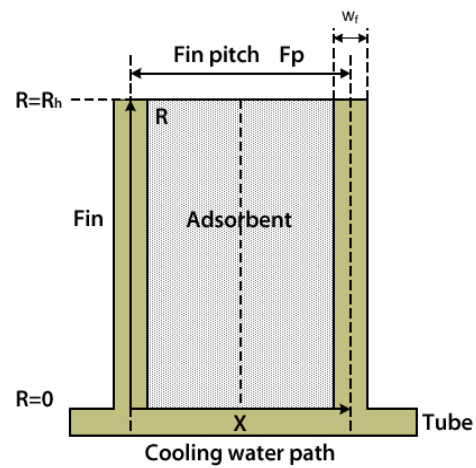


Fig. 2 Boundary conditions of numerical study.

수치해석에 사용된 핀튜브 열교환기의 개략적인 형상은 Fig. 2에 나타내었으며, 경계조건은 식(9)~식(12)와 같다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 수치해석의 타당성 평가

본 연구에서 수행한 수치해석의 타당성을 평가하기 위하여 Fig. 3에 상대압력에 따른 흡착등온선을, Fig. 4에 흡착 및 탈착 사이클을 기존에 실험을 통하여 상관식을 제시한 흡착률의 결과와 비교하였다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 본 수치해석의 결과는 Chihara and Sakoda and Suzuki⁽⁶⁾와 Cho⁽⁷⁾ 등의 흡착률 실험결과와 정성적인 경향은 일치하나 정량적으로는 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 흡착제로 사용되는 실

리카겔의 타입과 입자의 사이즈 등 물성치에 따른 차이와 실험조건 등의 차이로 결과에 있어 다소 차이가 났음을 판단할 수 있다.

3.2 핀피치 변화에 따른 흡착률

Fig. 5는 시간에 따른 흡착탑내 실리카겔의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 핀피치 2.5 mm일 때가 10.0 mm일 때보다 흡착시에는 온도가 낮고 탈착시에는 온도가 가장 높음을 알 수 있다. 이를 통하여 핀피치가 작을수록 흡착탑 내에서 열 및 물질전달이 활발하게 일어남을 알 수 있었다.

Fig. 6은 시간에 따른 흡착률을 핀피치의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 흡착/탈착을 반복하여 총 6,000초 까지 계산하였으며 시간에 따라 흡착률이 일정하게 나타나고 있으나 흡착이 시작되는 첫 번째

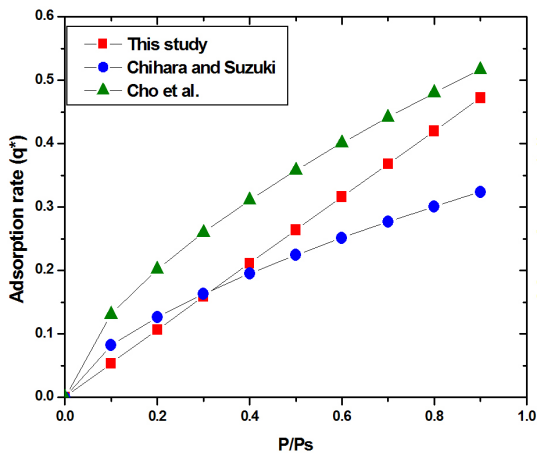


Fig. 3 Variation of adsorption rate with adsorption isotherms.

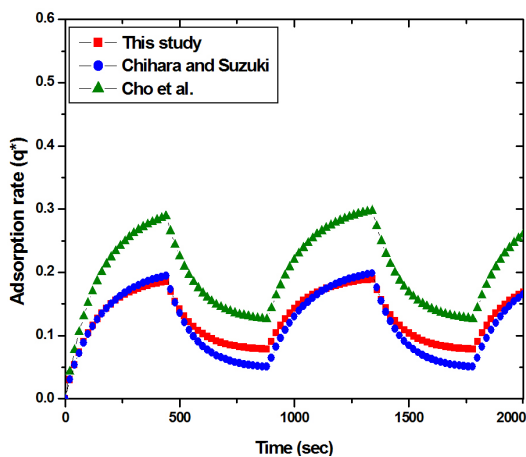


Fig. 4 Variation of adsorption rate for other experimental study with time.

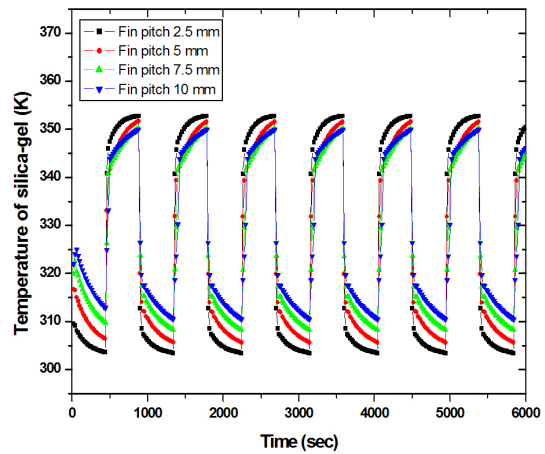


Fig. 5 Variation of silica gel temperature for fin pitch with time.

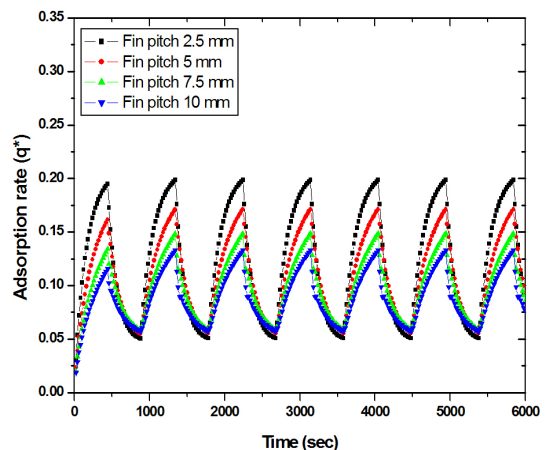


Fig. 6 Variation of adsorption rate for fin pitch with time.

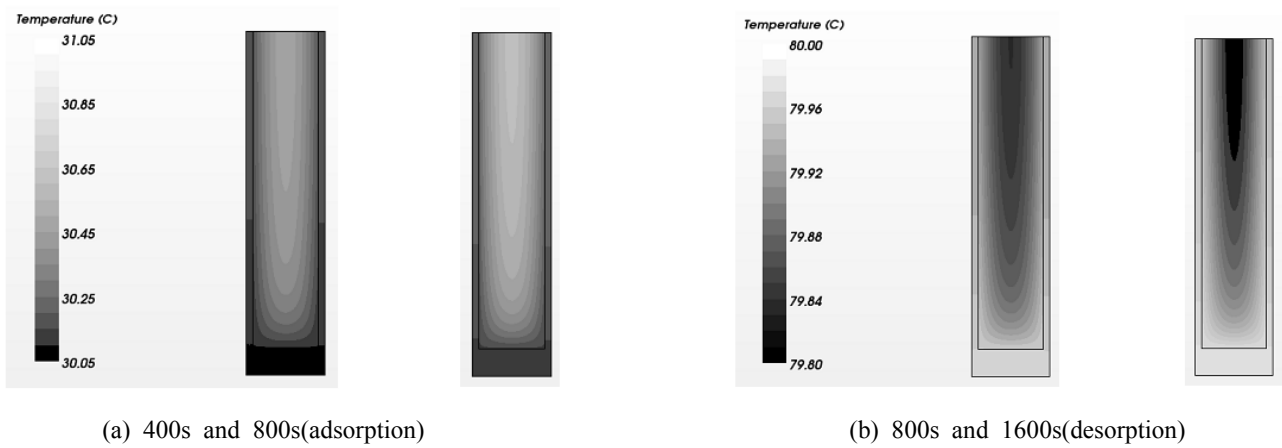


Fig. 7 Distribution of temperature contours in the fin pitch 2.5 mm.

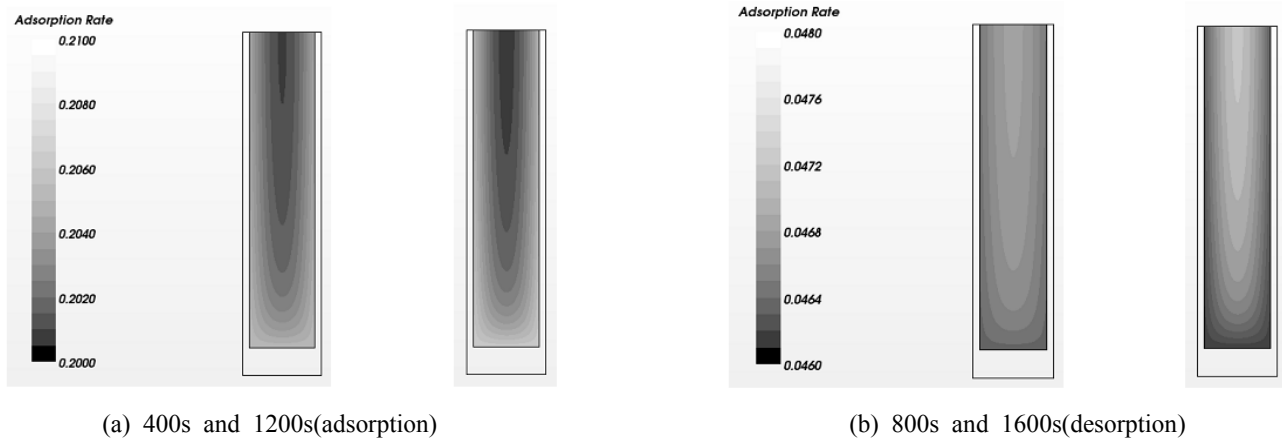


Fig. 8 Distribution of adsorption rate contours in the fin pitch 2.5 mm.

사이클에서는 나머지 사이클에 비교하여 조금 작은 흡착률을 가지고 있다. 이것은 처음 시작할 때의 실리카겔의 온도가 두 번째 사이클이 시작할 때의 탈착 온도와의 차이(Fig. 5 참조) 때문에 나타나는 현상으로 생각되며, 약 두 번째의 사이클이 계산되는 시점에서 흡착률이 안정적으로 진행되는 것으로 추정된다. 핀피치가 2.5 mm일 때 최대 0.198(g/g), 최소 0.05(g/g)의 흡착률이 나타났으며 이를 핀피치 10 mm와 비교하였을 때 최대 흡착률이 약 46% 증가함을 보였다. 이는 흡착탑 내의 냉매증기량은 일정하나, 충전되는 흡착제의 중량 및 부피가 감소함으로서 그에 따른 유효전열면적이 증가하기 때문에 흡착온도와 탈착온도에 빨리 도달한다고 판단된다. 따라서 핀피치가 작을수록 보다 높은 열 및 물질전달률을 갖는다고 할 수 있으며, 이는 흡착식 냉동시스템에서 짧은 흡착 및 탈착 시간을 나타내므로 보다 높은 시스템의 성능을 얻을 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 핀피치 2.5 mm인 흡착탑내에서의 온도장과 흡착률의 분포를 나타내는 것으로 흡착시에는 중심부의 온도가 높고 탈착시에는 열원 가까이에 있는 튜브쪽의 온도가 높음을 알 수 있다. 반면에 흡착률의 경우 흡착시에는 튜브쪽에서 흡착률이 높게 나타났으며 탈착시에는 튜브중심부의 흡착률이 높게 나타남을 알 수 있다.

3.3 냉각수 온도 변화에 따른 흡착률

Fig. 9는 온수 온도를 80°C로 고정시키고 흡착과정에서 발생하는 흡착열의 제거를 위해 사용되는 냉각수의 온도를 25°C~35°C까지 5°C 간격으로 변화시켰을 때 흡착률의 변화를 나타낸 것이다.

흡착과정에서 흡착열을 제거하기 위해 유입되는 냉각수의 온도가 낮아질수록 흡착탑 내에서 압력이 감소하므로 흡착률의 변화가 뚜렷하게 크게 나타났으며,

탈착과정에서의 영향은 온수의 유입온도가 80°C로 일정하여 흡착시에 냉각수의 온도와 무관하게 작용하여 크게 변화하지 않았다.

이는 흡착시에 더 낮은 냉각수로 흡착탑을 냉각하게 되어도 온수의 온도가 충분한 열전달을 하기 때문에 그 영향이 없는 것으로 판단된다. 각 냉각수의 온도의 변화에 따른 최대 흡착률의 값을 비교하였을 때 냉각수 온도 25°C에서 최대 흡착량 0.267(g/g)을 보이며, 30°C, 35°C로 냉각수의 온도가 증가할수록 흡착률이 감소함을 알 수 있다.

3.4 온수 온도 변화에 따른 흡착률

냉각수 온도는 30°C로 고정하고 온수 온도를 75~90°C 까지 5°C의 간격으로 변화시켜 흡착률을 시간에 따라 계산한 값을 Fig. 10에 나타내었다. 온수는 탈착과정시

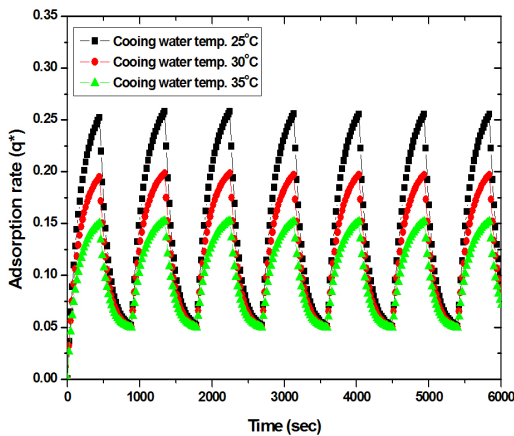


Fig. 9 Variation of adsorption rate for cooling water temperature with time.

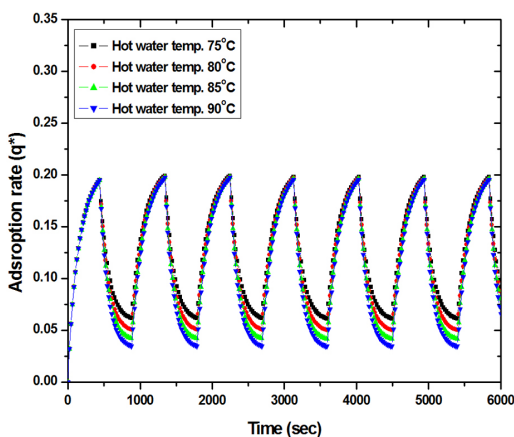


Fig. 10 Variation of adsorption rate for hot water temperature with time.

의 흡착제의 탈착을 돕기 위한 열원으로서 냉각수 온도에서의 경향과 같이 최소 흡착률(최대 탈착률)에 영향이 있는 것으로 보인다. 온수 온도가 높아짐에 따라 흡착률이 가장 크게 감소하였고, 이 때 흡착률은 0.0348(g/g)로 나타났다. 이는 냉각수의 온도변화 경향과 유사하며 또한 흡착률에는 큰 영향을 미치지 않았다.

4. 결 론

흡착식 냉동기의 작동매체로서 실리카겔/물계를 사용한 흡착탑 내에서의 열 및 물질전달 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 흡착탑 내 실리카겔의 온도분포를 살펴본 결과 핀피치가 작을수록 흡착탑 내에서 열 및 물질전달이 활발하게 일어남을 알 수 있었다.
- (2) 핀피치가 작을수록 흡착률이 증가하였으며, 핀피치 2.5 mm에서 최대 0.198의 흡착률을 얻었으며 핀피치 10 mm와 비교하여 약 46% 증가함을 알 수 있었다.
- (3) 냉각수 온도가 낮을수록 흡착률이 증가하였으며, 냉각수 온도 25°C, 온수 온도 80°C에서 최대 0.267(g/g)의 흡착률을 보였다.
- (4) 온수 온도가 높을수록 탈착률이 증가하였으며, 냉각수 온도 30°C, 온수 온도 90°C에서 최대 0.0348(g/g)의 탈착률을 보였다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20122010100120).

참고문헌

1. Kwon, O. K., Yun, J. H., Joo, Y. J., Kim, Y. C., and Kim, J. H., 2005, An experimental study on the heat and mass transfer of adsorption chiller, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 746-753.
2. Kwon, O. K., Yun, J. H. and Kim, J. H., 2004, Measurement of effective thermal conductivity in silica gel packed bed, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 1126-1133.
3. Joo, Y. J., Kwon, O. K., Yun, J. H., Kim, J. H., and Kim, Y. C., 2005, A numerical study for the heat and mass transfer in silica gel/Water adsorption chiller's adsorber, 2005 SAREK Winter Conference, pp. 341-346.
4. Saha, B. B., Boelman, E. C., and Kashiwagi, T., 1995,

- Computer simulation of a silica gel-water adsorption refrigeration cycle- the influence of operating conditions on cooling output and COP, ASHRAE Transactions, Vol. 101, pp. 348-357.
5. Chihara, K. and Suzuki, M., 1983, Air drying by pressure swing adsorption cooling system, Journal of Chemical Engineering Japan, Vol. 16, pp. 293-298.
 6. Sakoda, A. and Suzuki, M., 1984, Fundamental study on solar powered adsorption cooling system, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 17, No. 1, pp. 52-57.
 7. Cho, S. H. and Kim, J. N., 1992, Modeling of a silica gel/water adsorption cooling system, Energy, Vol. 17, No. 9, pp. 829-839.
 8. Yamamoto, E., Watanabe, F., Kobayashi, N. and Hasatani, M., 2002, Intra particle heat and mass transfer characteristics of water vapor adsorption, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 35 No. 1, pp. 1-8.
 9. 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.