

# 저온열구동 흡착탑 냉방 해석

정재동

세종대학교 기계공학과  
(jdchung@sejong.edu)

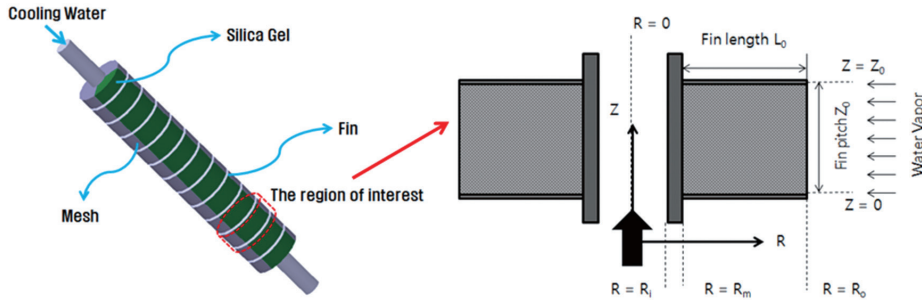
## 서론

경제의 발전에 따른 쾌적한 주거 및 근무환경 추구하고 지구온난화로 인한 기온 상승으로 하절기 냉방 수요가 급격히 증가하고 있다. 하지만 대부분의 냉방에 사용되는 전기압축식 프레온 냉동기는 많은 전력 공급 문제와 프레온 사용으로 인한 환경 파괴 문제를 가지고 있다. 따라서 무전력 또는 저전력으로 구동되는 환경친화적 냉방시스템이 전 세계적으로 활발히 연구되고 있다.<sup>1-5)</sup>

흡착식 냉동기는 흡착제와 냉매의 가역반응에 따르는 발열, 흡열현상을 이용하는 냉동 열기관으로 저온 열원(60~90°C)으로 구동되고 냉매로 물, 메탄올, 에탄올, 암모니아 등을 사용하여 전기압축 프레온 냉방기를 대체하는 열구동, 환경친화적 냉방시스템이다. 흡착식 냉동사이클에서 두 개의 흡착탑은 흡착 시에는 상온의 냉각수를 이용하고, 탈착 시에는 저온의 열에너지, 예를 들면 태양열, 지역난방수, 엔진배열, 공정에서 버려지는 저온 폐열 등을 구동 열에너지로 이용된다. 서로 연속적인 냉열을 얻기 위해 두 개의 흡착탑이 냉각수와 온수가 반복적으로

바뀌어지게 되는데, 이때의 흡착과정과 탈착과정이 바뀌게 되는 준비단계와 흡착탑 내 흡착과정에서의 흡착열 제거와 탈착 시에 흡착탑으로의 열전달 및 물질전달 능력은 시스템 성능에 큰 영향을 미친다.

흡착식 냉동기의 보급에 가장 큰 저해요인으로 상대적으로 낮은 성능과 큰 시스템 크기로서, 특히 시스템에 가장 큰 영향을 미치는 흡착탑에 대한 COP와 SCP에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. Li et al.<sup>6)</sup>은 핀-튜브 타입의 흡착탑에서 핀 피치 및 핀 높이가 성능에 미치는 영향에 대해 수치적으로 연구하였다. Leong and Liu<sup>7)</sup>은 제올라이트를 사용한 흡착탑에 대해 흡착제의 높이, 흡착제 입자의 지름, 흡착제 공극률 등의 인자에 대해 연구하였다. 이 연구에서 흡착탑의 높이가 높아질수록 COP는 증가, SCP는 감소하는 것으로 나타났으며 흡착제 입자와 공극률은 COP와 SCP에 큰 영향을 끼치지 않는다는 결과를 보였다. 이 연구에서 각각의 인자에 대한 영향을 잘 분석하고 있지만, simple tube type 흡착탑에 대한 해석으로 현실적인 적용에 제한이 있다. Zhang and Wang<sup>8)</sup>은 관형 핀을 사용한 흡착탑에 대한 3차원 해석모델을 개발하여 핀의 높이와



[그림 1] The cross section of the region of interest

핀 피치가 COP 및 SCP에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Zhang and Wang은 COP와 SCP를 최적화할 수 있는 핀 높이와 핀 피치의 범위가 존재함을 주장하였다. Pei-zhi et al.<sup>9)</sup>는 흡착탑에 있어 사이클 시간에 대한 COP, SCP의 변화를 언급하였다. 사이클 시간이 증가할 때 COP는 증가하며, SCP는 최적값을 갖는 사이클 시간이 있는 것으로 보고하였다. Sapienza et al.<sup>10)</sup>는 새로운 흡착제와 흡착질인 LiNO<sub>3</sub>, 버미클라이트를 사용하여 사이클 시간 그리고 사이클 시간비가 흡착탑의 성능에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였다. 이 연구에 의하면 사이클 시간과 사이클 시간 비가 클수록 흡착탑의 성능이 더 좋은 것으로 나타났다.

Riffel et al.<sup>11)</sup>는 사이클 시간, 열교환 유체의 속도 및 온도가 COP 및 SCP에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 사이클시간이 길수록, 열교환 유체의 속도가 클수록, 열교환 유체의 온도가 낮을수록 COP가 커지며, 사이클시간이 짧을수록, 열교환 유체의 속도가 작을수록, 열교환 유체의 온도가 높을수록 SCP가 커지는 것으로 보고하였다. Niazmand et al.<sup>12-13)</sup>는 실리카겔을 흡착제로 사용한 흡착탑에 대해 핀 높이, 핀 피치 그리고 입자 반경이 갖는 영향에 대해 연구하여 핀 높이와 핀 피치가 클수록 그리고 입자반경이 작을수록 COP가 커지며, SCP의 경우 핀 높이와 핀 피치가 작을수록 그리고 입자반경은 최적화 범위를 가질 경우 SCP값이 커지는 것으

로 보고하였다.

많은 기존연구에서 찾아볼 수 있듯이 흡착탑의 성능에 영향을 미치는 인자에 대한 연구는 흡착탑 및 흡착식 냉동 시스템의 성능향상을 위한 hot issue였다. 그러나 기존 연구에서는 연구자가 관심 있는 몇 개의 인자에 국한되어 연구가 수행되었다. 흡착탑에 영향을 미치는 것으로 문헌에 보고된 모든 인자들에 대한 종합적이고 체계적인 연구는 수행된 적이 없다.

따라서 이 연구에서는 흡착탑의 성능에 영향을 미칠 것으로 기존 논문에서 보고된 10개의 인자(핀 피치, 핀 두께, 핀 높이, 확산계수, 입자 크기, 사이클 시간, 사이클 시간비, 온수 온도, 유체 속도, 공극률)

(표 1) Factors & Levels

Factors	Levels		
	1	2	3
Fin pitch (mm)	2.4	3	3.6
Fin thickness (mm)	0.4	0.5	0.6
Fin height (mm)	8	10	12
Diffusion (m <sup>2</sup> /s), × 10 <sup>10</sup>	1.2	1.5	1.8
Particle size, (μm)	400	500	600
Cycle Time (s)	960	1200	1440
Cycle Ratio (-)	1.2:1	1:1	1:1.2
Temp. of hot water (°C)	64	80	96
Fluid velocity (m/s)	0.08	0.1	0.12
Porosity (-)	0.4	0.5	0.6

를 토대로 실험계획법에 근거하여 이들의 영향을 종합적이고 체계적으로 살펴보는 것을 목표로 한다. 이를 통해 흡착탑의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자들을 찾고, 각 인자의 최적조건을 찾아내어 동 연구그룹이 진행 중인 흡착냉동시스템 개발에 있어서 시스템 최적화에 기여할 것이다.

### 수치해석

#### 해석방법

흡착식 냉동기 시스템에서 흡착탑의 성능 해석을 위해 사용된 2차원 축대칭 모델을 그림 1에 제시하였다. 본 연구에서 사용된 수치모델에 대한 보다 더 자세한 설명은 저자의 다른 논문<sup>(14)</sup>에서 찾을 수 있다. 기존 논문을 토대로 흡착탑의 성능에 영향을 미치는 10개의 인자들을 선정하여 표 1에 나타내었다. 표 1에서 cycle ratio는 식 (1), (2)에 따른 흡착시간과 탈착시간의 비로서 cycle time을 기준으로 나누어진다.

$$\text{cycle ratio}_{\text{ads}} = \frac{\text{cycle time}}{\text{cycle ratio}_{\text{ads}} + \text{cycle ratio}_{\text{des}}} \times \text{cycle ratio}_{\text{ads}} \quad (1)$$

$$\text{cycle ratio}_{\text{des}} = \frac{\text{cycle time}}{\text{cycle ratio}_{\text{ads}} + \text{cycle ratio}_{\text{des}}} \times \text{cycle ratio}_{\text{des}} \quad (2)$$

각 인자의 수준은 기준값의 ±20%, 즉 3수준으로 정하였다. 본 연구를 수행하는데 있어 실험의 횟수를 줄이기 위해 3수준계의 13인자 이하의 범위에서 사용할 수 있는 직교배열표  $L_{27}(3^{13})$ 를 사용하였다. 교호작용은 없다고 가정하였으며 분산분석(Analysis Of Variance, ANOVA)을 통해 각 인자의 기여도를 산출하였다.

격자의 독립성을 보이기 위해 2,800~5,000개의 격자에 대한 grid test를 진행하였으며 3,400개 정

도의 격자를 사용하였을 때 상대적으로 가장 정확하고 빠른 결과를 얻을 수 있었다. 시간 간격은 0.05초가 사용되었으며 계산시간은 개인용 PC인 Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1275 v3 @ 3.50 GHz를 사용하였을 경우 하나의 수치해석 모델 당 12시간 이하인 것으로 나타났다. 해석은 상용 CFD 프로그램인 STAR-CCM+ v7.04를 사용하였다.

#### 가정

- 1) 흡착제는 균일한 구형입자로 이루어져 있고, 공극률은 균일하다.
- 2) 수증기와 흡착제 열적 평형관계에 있다.
- 3) 흡착탑 내에서 원주방향으로의 유동은 무시한다.
- 4) 증발기와 응축기는 이상적인 조건이다.
- 5) 입자사이를 흐르는 유동의 저항은 무시하고 입자 내부를 흐르는 유동은 고려한다.
- 6) 수증기는 이상기체로 가정한다.
- 7) 흡착탑 주위로의 열손실은 무시한다.

#### 지배방정식

흡착탑의 입자 내외 입자사이 물질전달은 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며<sup>(14)</sup>, 계산의 정확도를 위해 비등압모델과 고체확산법이 각각 사용되었다.

#### 비등압 모델

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + (1-\varepsilon) \rho_A \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = \frac{K}{\mu_v \rho_0} \left[ \rho_v \left( \frac{\partial^2 \rho_v}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \rho_v}{\partial R} + \frac{\partial^2 \rho_v}{\partial Z^2} \right) + \left( \frac{\partial \rho_v}{\partial R} \right)^2 \right] \quad (3)$$

#### 고체확산법

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (4)$$

$$\bar{q} = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} r^2 q \, dr \quad (5)$$

흡착탑에서의 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\rho_B C_{p,B} \frac{\partial T_B}{\partial t} = \rho_B H \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + k_B \left[ \left( \frac{\partial^2 T_B}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_B}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 T_B}{\partial Z^2} \right] \quad (6)$$

여기서  $\rho_B \Delta H (\partial \bar{q} / \partial t)$ 는 생성항으로 흡착과 탈착시 상변화에 의해 발생하는 발열, 흡열반응을 나타낸다. 이 항에 의해 흡착탑 전체의 온도와 흡착률 변화에 큰 영향을 주게 된다.

핀과 튜브에서의 열전달 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho_C C_{p,C} \frac{\partial T_C}{\partial t} = k_C \left[ \left( \frac{\partial^2 T_C}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_C}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 T_C}{\partial Z^2} \right] \quad (7)$$

열교환 유체의 현상을 해석하는 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho_W C_{p,W} \frac{\partial T_W}{\partial t} + \rho_W u_W C_{p,W} \frac{\partial T_W}{\partial Z} = \frac{4}{D} h (T_{W,R=R_i} - T_W) + k_W \frac{\partial^2 T_W}{\partial Z^2} \quad (8)$$

여기서  $(4/D)h(T_{W,R=R_i} - T_W)$ 는 생성항으로서 냉수와 온수가 흡착탑으로부터 주고받는 열전달량을 의미한다. 유체와 튜브사이의 대류계수값은 Dittus-Boelter 식을 사용하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad \begin{matrix} n = 0.3 (T_f = T_L) \\ n = 0.4 (T_f = T_H) \end{matrix} \quad (9)$$

### 초기조건 및 경계조건

초기조건

1) 흡착과정

$$R_m \leq R \leq R_0, \quad 0 \leq Z \leq Z_0 : \quad \begin{matrix} T = T_{ads} \\ q_0 = q_{des} \end{matrix} \quad (10)$$

$$0 \leq r \leq r_0 : \quad q_0 = q_{des} \quad (11)$$

2) 탈착과정 (Desorption Process)

$$R_m \leq R \leq R_0, \quad 0 \leq Z \leq Z_0 : \quad \begin{matrix} T = T_{des} \\ q_0 = q_{ads} \end{matrix} \quad (12)$$

$$0 \leq r \leq r_0 : \quad q_0 = q_{ads} \quad (13)$$

경계조건

1) 흡착제 입자의 경계조건

$$r = 0 : \quad \frac{\partial q}{\partial r} = 0 \quad (14)$$

$$r = r_0 : \quad q = q(\phi) \quad (15)$$

2) 흡착탑에서의 경계조건

$$R = R_i, \quad 0 \leq Z \leq Z_0 : \quad h(T_C - T_W) = k_C \frac{\partial T_C}{\partial R} \quad (16)$$

$$R = R_m, \quad 0 \leq Z \leq Z_0 : \quad \begin{matrix} k_C \frac{\partial T_C}{\partial R} = \frac{\Delta T}{1/h_C} = k_A \frac{\partial T_A}{\partial R} \\ \frac{\partial \rho_v}{\partial Z} = 0 \end{matrix} \quad (17)$$

$$R = R_0, \quad 0 \leq Z \leq Z_0 : \quad \frac{\partial T_A}{\partial R} = 0, \quad \rho_v = \rho_0 \quad (18)$$

$Z = 0, Z_0, R_m \leq R \leq R_0 :$

$$k_C \frac{\partial T_C}{\partial R} = \frac{\Delta T}{1/h_C} = k_A \frac{\partial T_A}{\partial R} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial Z} = 0$$

식 (13)에서  $\phi$ 는 상대압으로  $\phi = P_v/P_A$ 을 나타내며  $q(\phi)$ 는 흡착제 표면에서의 흡착평형( $q^*$ )을 나타내는 값으로 Yamamoto et al.<sup>15)</sup>에서 실험으로 구한 값을 사용하였다.

### 평가 지표

흡착식 냉동기의 보급에 가장 큰 저해요인으로 는 상대적으로 낮은 성능과 큰 시스템 크기로서, 각 인자들에 따른 흡착식 냉동기의 영향을 평가하

기 위하여 COP(Coefficient of performance)와 SCP (Specific cooling power)를 사용하였으며 다음과 같이 각각 표현된다.

$$COP = \frac{Q_{eva}}{Q_f} \quad (20)$$

$$SCP = \frac{Q_{eva}}{M_{ads} t_{cycle}} \quad (21)$$

$$Q_{eva} = M_{ads} \int_{t_0}^{t_{ads}} \frac{\partial q}{\partial t} (H(T_L) - C_{P,A}(T_{con} - T_{eva})) dt \quad (22)$$

$$Q_f = \int_{t_{ads}}^{t_{des}} \rho_f \alpha_f \pi R_i^2 C_{P,f} (T_{f,i} - T_{f,o}) dt \quad (23)$$

여기서  $M_{ads}$ 는 흡착제로 사용된 실리카겔의 질량,  $Q_{eva}$ 는 증발열,  $Q_f$ 는 유체가 흡착탑에 주는 공급열량,  $t_{cycle}$ 은 사이클 시간을 의미한다.

흡착탑의 성능을 해석하는 데 있어 사용한 지배 방정식, 경계조건 및 해석방법에 대한 정확성은 저자의 다른 논문<sup>14)</sup>에서 검증하였으며, 해석에 필요한 보다 자세한 물리적 조건들 또한 찾아볼 수 있다.

## 결과 및 고찰

### 분산분석(ANOVA)

$L_{27}(3^{13})$ 의 직교배열표에 따라 실시한 27개의 COP, SCP값을 표 2에 언급하였다. 표 2의 결과를 바탕으로 COP와 SCP에 대한 분산분석(ANOVA)을 실시하였으며 이를 표 3과 표 5에 나타내었다. 여기서 S는 제곱합,  $\phi$ 는 자유도, V는 불편분산,  $F_0$ 는 분산비,  $\rho$ 는 기여도를 의미한다.  $F_0$ 가 1보다 작을 경우 해당 인자는 오차항으로 풀링시키며 목적함수(COP, SCP)에 큰 영향을 끼치지 않는 인자로 판단한다.

### COP 결과 고찰

표 3으로부터 핀 두께, 핀 피치가 각각 48.81%,

27.09%의 기여도를 가짐으로써 COP에 가장 큰 영향을 미치는 인자들임을 알 수 있다. 표 4에 나타낸 각 인자의 수준별 모평균을 보면 그 방향성을 알 수 있다. 가장 기여도가 큰 핀 두께의 경우 가장 얇을 수록 좋으며 이는 핀 두께가 얇아짐에 따라 thermal mass가 작아지고 흡착제의 부피는 더 커져서 식 (20)의 분자가 커졌기 때문으로 해석할 수 있다. 두 번째로 기여도가 큰 인자로서 핀 피치의 경우 핀 피치가 클수록 COP가 큰 것으로 나타났다. 이는 유체

〈표 2〉 Results of COP and SCP

No.	COP [-]	SCP [W/kg]
1	0.5537	118.9
2	0.5870	154.2
3	0.5726	151.2
4	0.5575	183.3
5	0.5454	178.2
6	0.5397	80.29
7	0.5069	212.2
8	0.4838	85.73
9	0.5223	122.0
10	0.6307	94.37
11	0.6185	130.5
12	0.5768	191.6
13	0.5819	141.3
14	0.5707	140.7
15	0.5643	92.98
16	0.5287	174.5
17	0.5748	87.67
18	0.5115	175.2
19	0.6470	80.16
20	0.6417	145.6
21	0.6031	161.7
22	0.6138	127.8
23	0.5447	205.3
24	0.5936	100.7
25	0.5463	147.2
26	0.5514	105.7
27	0.5849	137.9

〈표 3〉 ANOVA table for COP

Factors	S	$\phi$	V	$F_0$	$\rho$ (%)
Fin pitch	0.011902	2	0.005951	181.1	27.1
Fin thickness	0.021396	2	0.010698	325.6	48.8
Fin height	0.000281	2	0.000141	4.280	0.49
Diffusion coefficient	0.000193	2	0.000097	2.940	0.29
Particle size	0.000530	2	0.000265	8.070	1.06
Cycle time	0.002236	2	0.001118	34.03	4.97
Cycle ratio	0.000431	2	0.000216	6.560	0.84
Temp. of hot water	0.002860	2	0.001430	43.53	6.40
Fluid velocity	0.000096	2	0.000048	1.460	0.07
Porosity	0.003575	2	0.001787	54.40	8.03
e	0.000197	6	0.000033		1.95
T	0.043698	26			100

〈표 4〉 The population mean of each factor for COP

Factor	Levels		
	1	2	3
Fin pitch	0.5410	0.5731	0.5918
Fin thickness	0.6035	0.5680	0.5345
Fin height	0.5645	0.5724	0.5691
Diffusion coefficient	0.5681	0.5722	0.5657
Particle size	0.5741	0.5687	0.5632
Cycle time	0.5565	0.5710	0.5784
Cycle ratio	0.5737	0.5640	0.5682
Temp. of hot water	0.5710	0.5799	0.5550
Fluid velocity	0.5660	0.5701	0.5699
Porosity	0.5537	0.5706	0.5817

로부터 흡착탑에 공급되는 열량 대비 사용되는 흡착제의 부피가 더 커져서 식 (20)에서의 분자에 해당하는 증발열량이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다. 이는 Niazmand et al.<sup>13)</sup>의 연구에서도 같은 양상을 보이고 있다.

세 번째로 큰 기여도를 갖는 공극률( $\rho=8.03\%$ )의 경우, 그 값이 커질수록 COP의 값도 증가하는 것을 확인하였다. 이는 공극률이 커지게 되면 입자 사이의 물질전달능력이 증가하게 되고, 결국 흡착되는 증기의 양이 많아지기 때문이다. 기존 연구로

Leong and Liu<sup>7)</sup>는 공극률에 따른 COP의 큰 변화가 있지 않는 것으로 주장하였으나, 기존 연구에서는 사용된 공극률의 범위(0.25~0.38)가 매우 작기 때문에 본 연구와는 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

네 번째로 기여도가 큰 인자는 온수온도( $\rho=6.40\%$ )로 나타났다. 온수온도가 증가함에 따라 COP가 감소하는 경향을 보인 Riffel et al.<sup>11)</sup>의 연구와 달리 본 연구에서는 표 4로부터 최적값을 갖는 온수온도가 존재하는 것으로 나타났다. 즉, 온수온도가 임계점 이하일 경우 흡착탑으로 공급되는 열전달량(식 (20)의 분모)에 비해 흡착되는 증기의 양(식 (20)의 분자)이 더 크나 임계점 이상이 되면 흡착탑으로 공급되는 열전달량이 증발열량보다 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 Riffel et al.<sup>11)</sup>의 연구에서 사용된 온수온도의 범위(76°C~92°C)가 본 연구에서 사용된 온수온도의 임계점보다 크다는 사실로부터 결국 두 연구 모두 같은 양상을 보이고 있다는 것을 알 수 있다.

다섯 번째로 큰 기여도를 갖는 사이클 시간( $\rho=4.97\%$ )의 경우 사이클 타임이 길수록 COP가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Pei-zhi et al.,<sup>9)</sup> Riffel et al.<sup>11)</sup>의 연구에서도 같은 양상을 보이고 있다. 사이

클 시간이 길어지게 되면 증기를 흡탈착하는 시간이 길어지기 때문에 흡착탑의 물질전달 능력이 향상되어 COP가 증가하게 된다. 하지만 실용적인 측면에서는 짧은 사이클 시간에서 운영해야 하므로 COP향상을 위해 사이클 시간을 늘리는 데는 제한이 있고, 그 영향이 5% 정도로 상대적으로 크지 않다는 사실이 의미 있을 것이다.

나머지 인자들은 COP에 미치는 영향이 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 특히 핀 높이의 경우 기여도( $\rho = 0.49\%$ )가 예상보다 작은 것으로 나타났으며 3수준의 중간값인 10 mm에서 최대 COP를 갖는 것으로 나타났다. 이는 핀 높이가 지나치게 높아질수록 늘어나는 흡착제의 양에 비해 유체로부터 흡착탑으로 공급되는 열량이 증가하게 되며 결과적으로 식 (20)에서 분모가 더 커지게 되므로 COP가 감소함을 알 수 있다. Zhang and Wang<sup>8)</sup>의 연구에서도 최대 COP를 갖는 핀 높이의 범위를 찾아내었으며 이로부터 두 연구가 같은 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 반면에 Niazmand and Dabzadeh<sup>12)</sup>는 핀 높이의 증가에 따라 COP가 일정하게 증가하는 연구결과를 보였다. 하지만 이 연구에서 사용된

온수와 냉각수 온도는 본 연구와는 다르며 또한 대류계수  $h$ 를 구할 때 사용되는 Pr 수를 다소 큰 일정한 값을 사용하였다. 즉, 흡착탑의 열전달 능력이 과대평가되었기 때문에 본 연구와는 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 확산계수와 유체속도의 경우 기여도가 각각 0.29%, 0.07%로 흡착탑의 성능에 거의 영향을 미치지 못하고 있다. 확산계수는  $1.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , 유체속도는 0.1 m/s일 때 최대 COP를 갖는 것으로 나타났다.

### SCP 결과 고찰

표 5에 SCP에 대한 분산분석 결과를 나타내었으며 표 6에 SCP에 대한 인자별 모평균을 나타내었다. 표 5에서  $F_0$ 값이 1보다 작은 인자(Fin thickness, Porosity)는 SCP에 영향을 미치지 않는 인자로 판단하여 오차항으로 풀링시켰다. 표 5를 살펴보면 온수온도( $\rho = 74.2\%$ )가 SCP에 대해 가장 영향력이 큰 인자임을 알 수 있다. COP와 달리 SCP의 경우 흡착탑에 전달되는 열량을 고려하지 않는다. 따라서 온수온도가 높을수록 탈착능력이 높아

〈표 5〉 ANOVA table for SCP

Factors	$S$	$\phi$	$V$	$F_0$	$\rho(\%)$
Fin pitch	333.47	2	166.74	3.29	0.59
Fin thickness					
Fin height	719.10	2	359.55	7.09	1.56
Diffusion Coefficient	454.23	2	227.11	4.48	0.89
Particle size	255.37	2	127.66	2.52	0.39
Cycle time	7459.5	2	3679.7	72.6	18.4
Cycle ratio	171.98	2	85.990	1.70	0.18
Temp. of hot water	29341	2	14716	290	74.2
Fluid velocity	296.66	2	148.33	2.92	0.49
Porosity					
e	507.11	10	50.710		3.34
T	39600	26			100

(표 6) The population mean of each factor for SCP

Factors	Levels		
	1	2	3
Fin pitch	142.9	136.5	134.7
Fin thickness	136.5	139.0	138.7
Fin height	143.9	138.8	131.4
Diffusion coefficient	132.2	140.7	141.1
Particle size	142.2	137.1	134.8
Cycle time	159.0	136.5	118.6
Cycle ratio	141.5	137.0	135.6
Temp. of hot water	94.06	146.4	173.6
Fluid velocity	133.7	138.8	141.7
Porosity	138.5	139.2	136.4

지며 결국 흡착과정을 더 작은  $q_0$ 에서 시작하기 때문에 결과적으로 큰 흡착량을 갖게 되어 식 (21)의 분자인 증발열량이 증가하게 된다. 따라서 온수 온도가 클수록 SCP는 증가하게 되며 이는 Riffel et al.<sup>(11)</sup>의 연구에서도 같은 양상을 보이고 있다.

두 번째로 큰 기여도를 갖는 인자는 사이클 시간( $\rho = 18.4\%$ )이다. 식 (21)에서 알 수 있듯이 SCP의 경우 분모의  $t_{cycle}$ 에 직접적인 영향을 받는다. 그 결과 표 6에서 사이클 시간이 작을수록 SCP가 커짐을 알 수 있다. Pei-zhi et al.<sup>(9)</sup>과 Riffel et al.<sup>(11)</sup>의 연구에서도 사이클 시간이 작을수록 SCP가 증가하는 결과를 보이고 있다.

세 번째로 기여도가 높은 인자는 핀 높이( $\rho = 1.56\%$ )이다. 핀의 높이가 증가할수록 SCP가 감소하는 추세를 보이고 있는데, 이는 증가된 부피로 인해 흡착탑의 열 및 물질전달 능력이 낮아졌기 때문이다. 이는 많은 기존연구<sup>7-8, 12)</sup>에서도 같은 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

네 번째로 큰 기여도를 갖는 인자는 확산계수( $\rho = 0.89\%$ )이다. 확산계수가 클수록 SCP는 증가함을 알 수 있다. 확산계수가 커지게 되면 입자내 물질전달 능력이 증가하게 되어 흡착량이 커지기 때문이다.

핀 피치, 입자크기, 사이클 시간비 그리고 유체 속도의 기여도는 각각 0.59%, 0.39%, 0.18%, 0.49%로 나타났다. 표 6으로부터 핀 피치가 증가할수록 SCP가 감소함을 알 수 있으며 이는 핀 높이의 방향성과 같은 맥락으로 해석할 수 있다. 입자 크기는 가장 작을 때가 좋은데 이는 작은 입자일수록 입자내 물질전달능력이 향상되기 때문이며 Niazmand and Dabzadeh<sup>(12)</sup>의 연구에서도 같은 양상을 보이고 있다. 사이클 시간비에 대해서는 탈착시간 대비 흡착시간이 클수록 SCP가 더 좋은 것을 알 수 있으며 유체속도의 경우 가장 빠른 속도가 가장 높은 SCP를 갖는 것으로 나타났다. 사이클 시간비와 유체속도에 대해서는 Sapienza et al.<sup>(10)</sup>과 Leong and Liu<sup>(7)</sup>의 연구에서도 각각 같은 양상을 보이고 있다.

## 결론

본 연구에서는 핀튜브 형상의 흡착탑에 대한 2차원 축대칭 모델을 대상으로 흡착탑의 성능에 대해 수치적으로 연구하였다. COP와 SCP 각각에 대한 기존 논문을 토대로 10가지 인자를 선정하여 각 인자의 기여도를 분석하고 이를 바탕으로 최적조건을 찾기 위해 실험계획법에 의한 분산분석을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) COP의 경우 핀 두께가 기여도 48.8%, 핀 피치가 기여도 27.1%를 가짐으로써 COP에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 판단되었다.
- 2) 핀 두께는 작을수록, 핀 피치는 클수록, 입자 크기는 작을수록, 사이클 타임은 길수록, 사이클 시간비는 흡착시간이 탈착시간에 비해 더 길수록, 그리고 공급물은 클수록 COP가 커지는 것으로 나타났다.
- 3) SCP의 경우 온수온도가 기여도 74.2%, 사이클 시간이 18.4%로서 SCP에 가장 큰 영향을



미치는 인자로 판단되었다.

- 4) 핀 피치는 작을수록, 핀 높이는 작을수록, 확산계수는 클수록, 입자크기는 작을수록, 사이클 타임은 짧을수록, 사이클 타임비는 흡착 시간이 탈착시간에 비해 더 길수록, 온수온도는 높을수록, 유체속도는 빠를수록 SCP가 커지는 것으로 나타났다.
- 5) SCP의 경우 핀 두께와 공극률은 큰 영향력을 갖지 못하는 것으로 나타났다.
- 6) 본 연구에서 실시한 분산분석에 대한 검증을 실시하였으며, 이 결과로부터 최적화된 COP 및 SCP를 찾을 수 있었다. COP와 SCP의 최적값은 각각 0.6782, 240.4 W/kg이다.

## 참고문헌

1. Chung, J.D., Lee, D.Y. and Yoon, S.M., 2009, Optimization of desiccant wheel speed and area ratio of regeneration to dehumidification according to regeneration temperature, *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 625-635.
2. Chung, J.D. and Lee, D.Y., 2009, Effect of desiccant isotherm on the performance of desiccant wheel, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, pp. 720-726.
3. Chung, J.D. and Lee, D.Y., 2011, Contributions of system components and operating conditions to the performance of desiccant cooling system, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, pp. 922-927.
4. Kiplagat, J.K., Wang, R.Z., Li, T.X. and Oliveira, R.G., 2012, Enhancement of heat and mass transfer in solid gas sorption systems, *International Journal of Air-Conditioning Refrigeration*, Vol. 20, 1130001-1-113001-16.
5. Oh, S.T., Saha, B.B., Kariya, K., Hamamoto, Y., and Mori, H., 2013, Fuel cell waste heat powered adsorption cooling systems, *Int. J. Air-Conditioning Refrigeration*, Vol. 21, pp. 1350010-1-1350010-10.
6. Li, J., Kubota, M., Watanabe, F., Kobayashi, N., and Hasatani, M., 2004, Optimal design of a fin-type silica gel tube module in the silica gel/water adsorption heat pump, *J. Chemical Engineering of Japan*, Vol. 37, pp. 551-557.
7. Leong, K.C. and Liu, Y., 2004, Numerical modeling of combined heat and mass transfer in the adsorbent bed of a zeolite/water cooling system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 2359-2374.
8. Zhang, L. Zhi, and Wang, Ling, 1999, Effects of coupled heat and mass transfers in adsorbent on the performance of a waste heat adsorption cooling unit, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 19, pp. 195-215.
9. Yang, P., 2009, Heat and mass transfer in adsorbent bed with consideration of non-equilibrium adsorption, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 3198-3203.
10. Sapienza, A., Glanzev, I.S., Santamaria, S., Freni, A., and Aristov, Y.I., 2012. Adsorption chilling driven by low temperature heat: New adsorbent and cycle optimization, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 32, pp. 141-146.
11. Riffel, D.B., Wittstadt, U., Schmidt, F.P., Nunez, T., Belo, F.A., P.F. Leite, A., and Ziegler, F., 2010, Transient modeling of an adsorber using finned-tube heat exchanger, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1473-1482.
12. Niazmand, H., Dabzadeh, I., 2012. Numerical

- simulation of heat and mass transfer in adsorbent beds with annular fins, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, pp. 581-593.
13. Niazmand, H., Talebian, H., and MahdaviKhah, M., 2012, Bed geometrical specifications effects on the performance of silica/water adsorption chillers, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, pp. 2261-2274.
  14. Hong, S.W., Ahn, S.H., Kwon, O.K., and Chung, J.D., 2014, Validity of Intra-Particle Models of Mass Transfer Kinetics in the Analysis of a Fin-Tube Type Adsorption Bed, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, pp. 1985-1993.
  15. 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, *J. Chemical Engineering of Japan*, Vol. 33, pp. 12-18. 