

< 논문 >

## 실리카겔-물계 흡착식 냉동기 사이클 시뮬레이션

권오경<sup>†</sup> · 윤재호<sup>\*</sup>

(2006년 6월 14일 접수, 2006년 12월 21일 심사완료)

### Cycle Simulation of an Adsorption Chiller Using Silica Gel-water

Oh-Kyung Kwon and Jae-Ho Yun

**Key Words** : Adsorption Chiller(흡착식 냉동기), Cooling Capacity(냉동능력), COP(성능계수), Cycle Simulation(사이클 시뮬레이션), Silica Gel-water(실리카겔-물)

#### Abstract

An adsorption chiller is expected to have high energy-efficiency in utilizing the waste heat exhausted from a process. The objective of this paper is to investigate the performance of silica gel-water adsorption chiller from the cycle simulation and to provide a guideline for design of the adsorption chiller. The effect of cycle time, inlet temperature and water flow rate on the cooling capacity and COP is quantified during the cycle operation. It is found that the performance of adsorption chiller is more sensitive to the change of inlet water temperature rather than the water flow rate. It is concluded that the COP is 0.57 in the standard conditions(hot water 80°C, cooling water 30°C, chilled water inlet temperatures 14°C and cycle time 420sec).

#### 기호설명

$A$	: 전열면적	[m <sup>2</sup> ]	$r_p$	: 흡착제 입자반경	[m]
$C_p$	: 비열	[J/kg · K]	$T$	: 온도	[K]
$D_s$	: 표면확산계수	[m <sup>2</sup> /s]	$t$	: 시간	[s]
$D_{so}$	: 확산계수	[m <sup>2</sup> /s]	$U$	: 총괄열전달계수	[W/m <sup>2</sup> · K]
$E_a$	: 활성화에너지	[J/mol]	$W$	: 질량	[kg]
$\dot{m}$	: 질량유량	[kg/s]	$\lambda$	: 열전도율	[W/m · K]
$k_{sap}$	: 물질전달계수	[s <sup>-1</sup> ]	하첨자		
$L$	: 증발잠열	[J/kg]	$ad$	: 흡착	
$P_s(T)$	: 온도T에서 포화증기압력	[kPa]	$al$	: 알루미늄	
$q$	: 흡착량	[kg/kg]	$c$	: 응축기	
$q^*$	: 평형흡착량	[kg/kg]	$ch$	: 냉수	
$Q$	: 열량	[J/s]	$cu$	: 구리	
$Q_{st}$	: 흡착열	[J/kg]	$cw$	: 냉각수	
$R$	: 가스정수	[J/mol · K]	$de$	: 탈착	
			$e$	: 증발기	
			$ew$	: 증발기에서 액냉매	
			$hw$	: 온수	
			$in$	: 입구	
			$out$	: 출구	
			$s$	: 실리카겔	
			$w$	: 냉매	

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

E-mail : kwonok@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8528 FAX : (041)589-8330

\* 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

## 1. 서론

생활수준 향상에 따라 쾌적한 주거환경 및 근무환경을 추구하는 경향이 뚜렷해짐에 따라 냉방 수요가 급격히 증대되고 있으며 이에 따라 에너지 소비도 대폭 증가하고 있다. 특히 대부분의 에너지원을 수입에 의존하고 있는 우리나라에서는 에너지의 효율적 활용에 대한 연구가 더욱 시급하다고 할 수 있다. 산업현장에서 발생하는 산업폐열에 대한 조사에 따르면 산업폐열의 형태는 중저온수, 포화수증기 등으로 다양하고 국내 폐열원의 종류 및 온도범위를 살펴보면 온도별로는 70~90℃의 폐열이 가장 많지만 대부분 폐기하고 있는 실정이다.<sup>(1)</sup>

이들 열에너지를 유효하게 이용하는 것을 목적으로 최근 흡착식 냉동기가 주목을 받고 있다. 흡착식 시스템은 각 공정에서 버려지는 폐열을 구동원으로 사용할 수가 있어 에너지를 유효하게 재활용할 수가 있으며, 냉매로서 물을 사용함으로써 오존층 파괴와 관계없는 친환경적인 시스템이다. 상용화되고 있는 흡착식 냉동기에는 흡착제로 실리카겔 혹은 제올라이트가 냉매에는 물이 일반적으로 사용된다.

흡착식 냉동기는 흡수식 냉동기와 거의 비슷한 사이클로 운전되며, 다만 흡수기 대신 흡착탑에서 냉매를 흡착한다는 점이 다르다. 흡수식의 경우 흡수용액이 냉매를 흡수하여 시스템내를 같이 순환하나 흡착식의 경우 흡착탑에 고정되어 있는 고체상태의 흡착제에 냉매가 흡·탈착되어 시스템내에서는 냉매만 순환하게 된다.

흡착식 냉동기는 Faraday가 1848년에 그 원리를 최초로 제안한 이후 1920년대에 실리카겔을 사용한 흡착식 냉동기가 개발되어 기차와 빌딩에 적용되었으나, 이후 전기압축기 냉동기의 개발로 연구개발 및 생산이 중단되었다.

국내의 경우 일부 연구소에서 기초 연구를 수행한 정도이며, 국외의 경우 약 10여년 전부터 연구개발이 본격적으로 추진되어 초기의 냉방 COP 0.3 수준에서 현재는 0.7 정도의 수준까지 효율이 향상되었다. 특히 일본의 Nishiyodo사와 Mayekawa사는 세계 최고수준의 기술력을 가지고 있으며 상품화에 성공한 유일한 회사이다.<sup>(2)</sup> 그러나 경제성, 제품의 내구성, 성능의 신뢰성 등이 입증되지 않아 생산 및 보급은 그다지 활성화되

지 않은 상태이다. 하지만 다른 냉방시스템과 비교했을 때 많은 장점(저온폐열 이용가능, 진동·소음이 적음, 용액결정 위험이 없음, 추가 불필요 등)을 가지고 있으므로 기술개발 및 보급의 확대가 가능하리라 생각된다.

본 연구에서는 실리카겔-물계 흡착식 냉동기 시스템의 특성을 평가하기 위해서 Fortran을 이용한 사이클 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 시스템의 작동조건에 따른 성능특성을 정량적으로 평가하였다. 이를 통하여 얻어진 데이터는 흡착식 냉동기의 최적 설계 및 제작자료로 활용하고자 한다.

## 2. 사이클 시뮬레이션

### 2.1 사이클의 작동원리

흡착식 냉동기는 2개의 열교환기를 1조로 하고 한쪽이 흡착과정일 때 다른 한쪽은 탈착과정의 2개의 과정을 주기적으로 변화시키는 것이 가능하므로 연속적으로 냉수를 얻는 것이 가능하다.

흡착식 냉동기는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 증발기, 응축기, 열교환기 1·2(흡·탈착기), 및 4개의 증기밸브로 구성되어 있다. 흡착제로서 실리카겔을 충전한 열교환기를 흡·탈착기라 하고 냉매로는 물을 사용한다. 4개의 밸브의 개폐 및 2개의 열교환기에 흐르는 온수, 냉각수의 선택은 Table 1의 타임차트에 따라 시간제어를 한다.

한 사이클을 크게 4가지로 나누어 각각의 과정을 A, B, C, D라 하면, 과정 A는 우선 밸브 2, 3을 열고, 열교환기 1에 냉각수를 흘려 충전되어 있는 실리카겔의 온도를 내려 흡착과정을 진행한다. 이 과정에서 증발기내의 물이 기화하여 냉열  $Q_e$ 를 얻는다. 그리고 흡착됨에 따라 냉각수가 열량  $Q_{ad}$ 를 얻는다. 또한 열교환기 2에는 구동열원인 온수를 흘려 열량  $Q_{ac}$ 로 충전되어 있는 실리카겔을 가열하여 탈착과정을 진행한다. 이 과정에서 탈착된 증기가 응축기에서 응축하여 냉각수에 응축열  $Q_c$ 를 주게 된다. 과정 B는 열교환기 1이 흡착과정에서 탈착과정으로, 열교환기 2가 탈착과정에서 흡착과정으로 이동하기 위한 준비과정이다. 우선 모든 밸브를 닫아 흡·탈착에 의한 열 및 물질의 이동을 정지시킨 다음 열교환기 1에는 온수를 흘려 내부를 가열하고 열교환기 2에

는 냉각수를 흘려 내부온도를 낮춘다. 따라서 과정 C로 이동하기 전에 실리카겔의 온도를 약간 조절할 수 있게 되어 다음 과정으로의 시작이 부드럽게 된다. 과정 C, D는 각각 과정 A, B의 역과정이다. 과정 C에서는 밸브 1, 4를 열고 열교환기 1에 온수를 흘려 탈착과정으로, 열교환기 2에는 냉각수를 흘려 흡착과정으로 한다. 과정 D는 열교환기 1이 탈착과정에서 흡착과정으로, 열교환기 2가 흡착과정에서 탈착과정으로 이행하는 준비과정이며, 과정 D의 종료후는 다시 과정 A가 이루어진다.

2.2 시뮬레이션의 가정

사이클 시뮬레이션을 행하기 위해서 다음과 같은 가정을 두었으며, 계산 순서는 Fig. 2와 같다.

- (1) 증발기, 응축기, 열교환기 1·2의 내부온도는 각각 일정하고 항상 포화상태로 유지되어 있다.
- (2) 열교환기 1·2에 있어서 충전층내의 실리카겔의 흡착량은 일정하다.
- (3) 단위시간당의 증발량과 흡착량 및 응축량과 탈착량은 각각 같다.
- (4) 흡착제 전체의 열용량은 흡착제 자체의 열용량과 내부에 흡착되어있는 냉매의 열용량의 합과 같다.
- (5) 응축기에서 발생된 물은 순간적으로 증발기로 흐른다.
- (6) 준비과정에서 흡착과정으로 이행할 때 증발기와 흡착기의 압력은 밸브가 열림과 동시에 같아지게 된다. 또한 준비과정에서 탈착과정으로 이행할 때 응축기와 탈착기에서도 압력이 같아지게 된다.
- (7) 흡·탈착기의 열통과율은 각각 일정하고 흡착량에 의존하지 않는다.
- (8) 외부로의 열손실 및 불응축가스의 영향은 무시가능하다.

2.3 기본방정식

시뮬레이션 대상으로 삼은 흡·탈착기 열교환기는 원형 핀튜브 열교환기로서 튜브의 재질은 구리, 핀의 재질은 알루미늄이다. 사용된 흡착제는 실리카겔 RD형으로서 관련물성은 Table 2에 나타내었다. Table 3은 사이클 시뮬레이션의 작동조건을 나타낸 것이다.

2.3.1 흡착평형

흡착평형식은 Saha 등의<sup>(3,4)</sup> 실험 데이터를 통하여 구한 Frenlich의 방정식을 이용하였다.

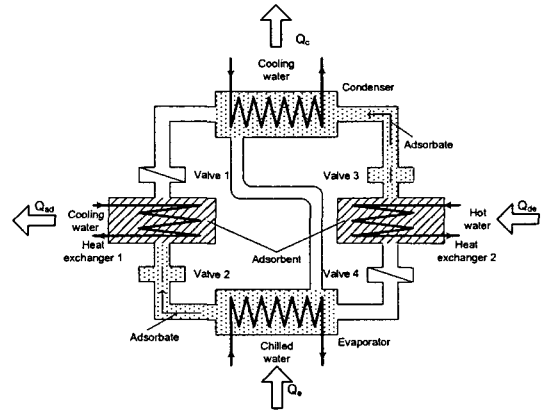


Fig. 1 Operation principle of adsorption chiller

Table 1 Time chart of adsorption chiller

Cycle	A	B	C	D	
Time(Sec)	420	30	420	30	
Valve	1	×	×	○	×
	2	○	×	×	×
	3	○	×	×	×
	4	×	×	○	×
Heat exchanger	1	Cw	Hw	Hw	Cw
	2	Hw	Cw	Cw	Hw

Cw : Cooling water, Hw : Hot water

Table 2 Physical properties of silica gel

Properties	Value
Particle size of silica gel(m)	$0.17 \times 10^{-3}$
Bulk density(g/ml)	0.73
Surface area(m <sup>2</sup> /g)	650
Pore volume(ml/g)	0.36
Pore diameter(nm)	2.3
Weight of silica gel(kg)	47

Table 3 Conditions of cycle simulation

Parameters	standard conditions	Ranges
Cooling water temp.(°C)	30	22-35
Hot water temp.(°C)	80	55-95
Chilled water temp.(°C)	14	10-18
Cooling water flow rate(kg/s)	1.7	0.5-2.5
Hot water flow rate(kg/s)	1.7	0.5-2.5
Chilled water flow rate(kg/s)	0.7	0.1-1.5
Cycle time(sec)	420	120-660
Adsorber UA (W/K)	4241.4	
Condenser UA (W/K)	15349.8	
Evaporator UA (W/K)	4884.9	

여기서,

$$A(T_s) = A_0 + A_1 \times T_s + A_2 \times T_s^2 + A_3 \times T_s^3$$

$$\begin{aligned} A_0 &= -6.5314 \\ A_1 &= 0.72452 \times 10^{-1} \\ A_2 &= -0.23951 \times 10^{-3} \\ A_3 &= 0.25493 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$B(T_s) = B_0 + B_1 \times T_s + B_2 \times T_s^2 + B_3 \times T_s^3$$

$$\begin{aligned} B_0 &= -15.587 \\ B_1 &= 0.15915 \\ B_2 &= -0.50612 \times 10^{-3} \\ B_3 &= 0.53290 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

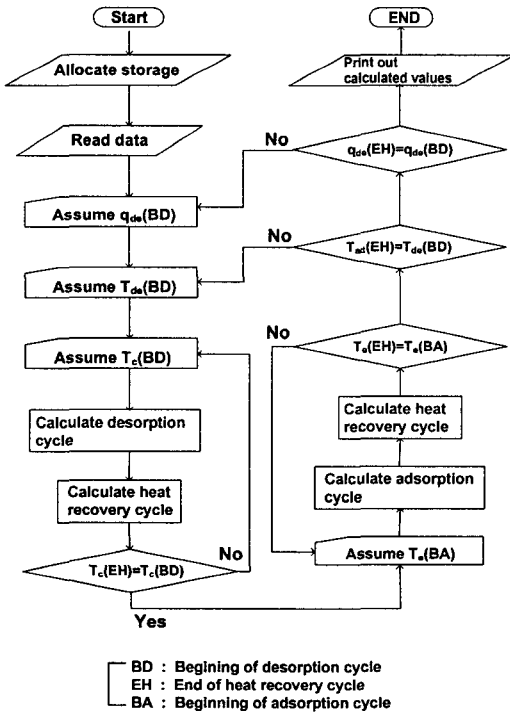


Fig. 2 Flow chart of cycle simulation program

$$q^* = A(T_s) \times \left( \frac{P_s(T_w)}{P_s(T_s)} \right)^{B(T_s)} \quad (1)$$

### 2.3.2 흡착률

표면확산계수  $D_s$ 는 Sakoda 등<sup>(5)</sup>이 제시한 식을 사용하였으며, 이 식은 입자내에서 물질이동은 표면확산에 지배되며, 흡착제 세공의 내부표면에 흡착된 분자가 흡착상태에서 세공내를 이동하는 것을 토대로 구하였다.

$$D_s = D_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_w}\right) \quad (2)$$

흡착에 대한 총괄 물질전달계수는 Sakoda 등이<sup>(5)</sup> 제시한  $K_{sap}$  식 (3)에 의하여 구하였다.

$$k_{sap} = 15 \frac{D_s}{R_p^2} \quad (3)$$

흡착률은 다음 식으로 구하였다.

$$\frac{dq}{dt} = k_{sap} \cdot (q^* - q) \quad (4)$$

흡착제 충전층의 밀도 및 유효열전도율은 Saha 등이<sup>(3,4)</sup> 제시한 식을 사용하였다.

$$\rho_s = -15.326 \times 10^3 r_p + 769.07 \quad (5)$$

$$\lambda_e = 0.12695 \times 10^{-3} \rho_A + 0.58765 \times 10^{-1} \quad (6)$$

### 2.3.3 증발기

냉수의 교환열량과 전열에 의한 열통과량에 의하여 냉수출구온도는 식 (7)과 같다.

$$T_{ch_{out}} = T_e + (T_{ch_{in}} - T_e) \cdot \exp\left(\frac{-U_e \cdot A_e}{\dot{m}_e \cdot C_{p_{ch}}}\right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt}((C_{p_{ch}} \cdot W_{cw} + C_{cu} \cdot W_e)T_e) \\ & = -L \cdot W_s \cdot \frac{dq_{ad}}{dt} + \dot{m}_e \cdot C_{p_{ch}}(T_{ch_{in}} - T_{ch_{out}}) \\ & \quad - C_{p_{ch}} \cdot T_c \cdot W_s \cdot \frac{dq_{de}}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

증발기내에서 단위시간당의 에너지수지는 우변의 제 1항 흡착에 의해서 빼앗긴 증발잠열, 제 2항 냉수로부터 얻은 열량, 제 3항 응축기에서 물로 되고, 팽창밸브를 거쳐 유입된 냉매의 엔탈피량으로 나타낼 수 있다.

### 2.3.4 열교환기 1(흡착)

냉각수의 교환열량과 전열에 의한 열통과량에 의해 냉각수 출구온도는 식 (9)와 같다.

$$T_{cw_{out}} = T_{ad} + (T_{cw_{in}} - T_{ad}) \cdot \exp\left(\frac{-U_{ad} \cdot A_{HEX}}{\dot{m}_{cw} \cdot C_{p_{cw}}}\right) \quad (9)$$

흡착탑 내에서 단위시간당의 에너지수지는 흡착에 의해 발생된 열을 냉각수에 주는 열량으로 에너지수지가 성립되므로 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt}((W_s(C_{p_i} + C_{p_{cw}} \cdot q_{ad}) \\ & \quad + (C_{p_{cw}} \cdot W_{K_{HEX}} + C_{p_{ad}} \cdot W_{f_{HEX}}))T_{ad}) \\ & = Q_{st} \cdot W_s \frac{dq_{ad}}{dt} + \dot{m}_{cw} \cdot C_w(T_{cw_{in}} - T_{cw_{out}}) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 증발기에서 단위시간당의 증발량은 흡착탑에서 흡착량과 같다는 가정하에 물질수지는 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dW_{ew}}{dt} = W_s \cdot \left(-\frac{dq_{de}}{dt} - \frac{dq_{ad}}{dt}\right) \quad (11)$$

### 2.3.5 응축기

냉각수의 교환열량과 전열에 의한 열통과량에 의해 냉각수(응축기) 출구온도는 식 (12)와 같다.

$$T_{c_{out}} = T_{cw} + (T_{cw_{in}} - T_{cw}) \cdot \exp\left(\frac{-U_{cw} \cdot A_{cw}}{\dot{m}_{cw} \cdot C_{p_{cw}}}\right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} C_{p_{cw}} \cdot W_{cw} \frac{dT_{cw}}{dt} & = -L \cdot W_s \frac{dq_{de}}{dt} \\ & \quad + \dot{m}_{cw} \cdot C_w(T_{cw_{in}} - T_{cw_{out}}) \\ & \quad + C_{p_{cw}} \cdot T_{cw} \cdot W_s \frac{dq_{de}}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

응축기내에서 단위시간당의 에너지수지는 우변의 제 1항 냉매의 응축에 의해서 발생하는 열량, 제 2항 냉각수에 주어지는 열량, 제 3항 그 응축된 냉매가 증발기에 유입하는 것에 의한 엔탈피 변화량으로 나타낼 수 있다.

### 2.3.6 열교환기 2(탈착)

온수의 교환열량과 전열에 의한 열통과량에 의해 온수 출구온도는 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$T_{hw_{out}} = T_{de} + (T_{hw_{in}} - T_{de}) \cdot \exp\left(\frac{-U_{de} \cdot A_{HEX}}{\dot{m}_{hw} \cdot C_{p_{hw}}}\right) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt}((W_s(C_{p_i} + C_{p_{hw}} \cdot q_{de}) \\ & \quad + (C_{p_{cw}} \cdot W_{K_{HEX}} + C_{p_{ad}} \cdot W_{f_{HEX}}))T_{de}) \\ & = Q_{st} \cdot W_s \frac{dq_{de}}{dt} + \dot{m}_{hw} \cdot C_w(T_{hw_{in}} - T_{hw_{out}}) \end{aligned} \quad (15)$$

열교환기 2(탈착)에서 단위시간당의 에너지수지는 구동열원인 온수가 냉매에 대해서 탈착에 필요한 열량을 주는 것에 의해 에너지수지가 성립되므로 식 (15)가 성립된다. 우변의 제 1항은 탈착열(흡열반응), 제 2항은 온수로부터 얻어진 열

량을 나타낸 것이다.

2.3.7 COP

COP는 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$COP = \frac{Q_{ch}}{Q_{hw}} \tag{16}$$

여기서,

$$Q_{ch} = \dot{m} \cdot C_{p, ch} \cdot (T_{ch, in} - T_{ch, out}) \tag{17}$$

$$Q_{hw} = \dot{m} \cdot C_{p, hw} \cdot (T_{hw, in} - T_{hw, out}) \tag{18}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 사이클 시간의 영향

Fig. 3은 사이클 시간에 따른 온수, 냉각수 및 냉수 입·출구의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 처음 30초가 준비과정, 나머지 420초가 흡·탈착과정을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 온수와 냉각수(흡착탑)는 준비과정에서 입구·출구의 온도차가 급격하게 변함을 알 수 있으며, 이는 열교환기 1, 2가 서로 흡착탑 및 탈착탑이 되는 배치운전을 하고 있기 때문이다. 즉 온수는 탈착시에 필요한 열량을 주고 냉각수(흡착탑)는 흡착시에 발생하는 열량을 얻으므로 입

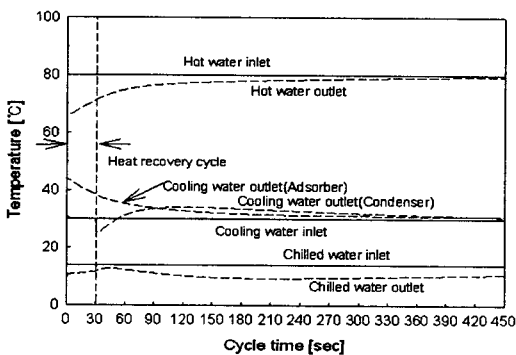


Fig. 3 Temperature profile on cycle time

구와 출구에서는 온도차가 발생한다. 그러나 시간의 경과에 따라 단위시간당의 흡·탈착량이 감소하므로 서서히 온도차는 작아지게 된다. 냉각수(응축기)는 탈착된 냉매증기가 응축하면서 열을 얻고 냉수는 증발하는 냉매에 열을 빼앗기므로 온도차가 생기게 된다.

Fig. 4는 사이클 시간에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 냉동능력은 사이클 시간 360초까지 점차로 증가하다가 서서히 감소하는 경향을 보인다. 이것은 실리카겔이 초기에는 흡착능력이 활발하다가 360초 이후부터는 포화흡착과 재탈착에 의해서 더 이상 냉동능력은 향상되지 않음을 알 수 있다. COP는 사이클 시간이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며 이는 구동열원의 열량감소에 의한 것으로 판단된다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 냉동능력과 COP를 고려하여 적정 사이클 시간은 420초로 설정하였다.

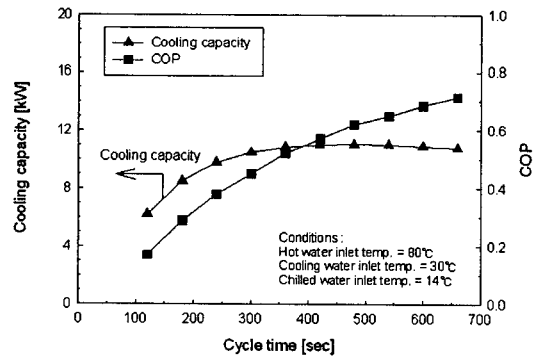


Fig. 4 Effect of cycle time on cooling capacity and COP

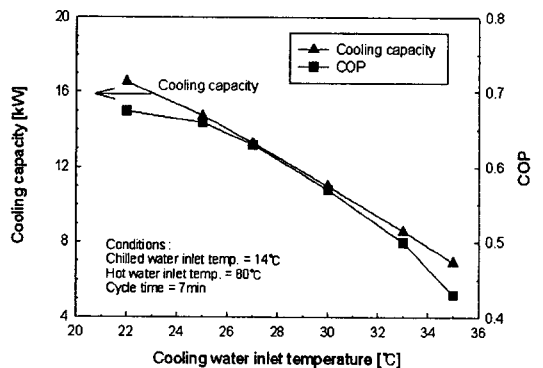


Fig. 5 Effect of cooling water on cooling capacity and COP

3.2 온도의 영향

Fig. 5는 냉각수온도 변화에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 일반적인 증수수 흡수식 냉동기의 경향처럼 냉각수온도가 낮을수록 냉동능력과 COP는 크게 나타났으며 이는 냉각수온도가 낮으면 흡착열의 제거능력이 좋아지게 되고 이에 따라서 실리카겔의 흡착능력이 증대되어 냉동능력이나 COP는 증가하게 된다. 기준조건인 냉각수온도 30℃, 온수온도 80℃, 사이클 시간 420초에서 냉동능력은 11kW, COP는 0.57을 나타내었다.

Fig. 6은 온수온도 변화에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 온수온도를 높게 설정할수록 냉동능력과 COP는 증대하는 경향을

가진다. 이것은 온수온도가 높을수록 탈착이 촉진되고 결과적으로 흡착개시시와 탈착개시와의 흡착량의 차가 커지게 되므로 냉동능력과 COP는 증가하게 된다. 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여 Chang 등<sup>(9)</sup>의 실험과 비교한 결과 정성적인 경향은 비슷하였으나 정량적으로 다소 차이가 있었다. 이것은 시뮬레이션 계산시에 여러 가지 가정을 둔 점과 흡착탑의 형상, 흡착제 종류, 열교환기 UA값, 유량에 따른 차이에 따라 결과값은 다소 차이가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 냉수온도 변화에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 냉수온도가 증가할수록 냉동능력과 COP는 증가하는 경향을 보인다. 이것은 냉수온도가 증가할수록 시스템 내부의 압력이 증가하게 되고 냉수와 냉매온도와의

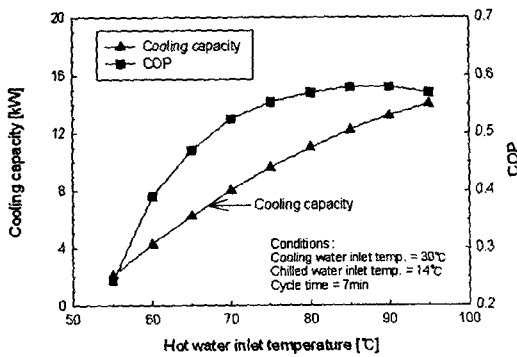


Fig. 6 Effect of hot water on cooling capacity and COP

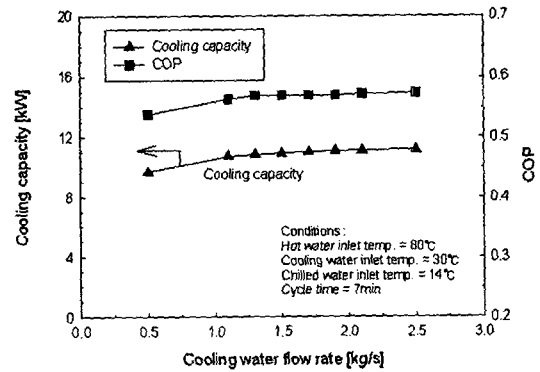


Fig. 8 Effect of cooling water flow rate on cooling capacity and COP

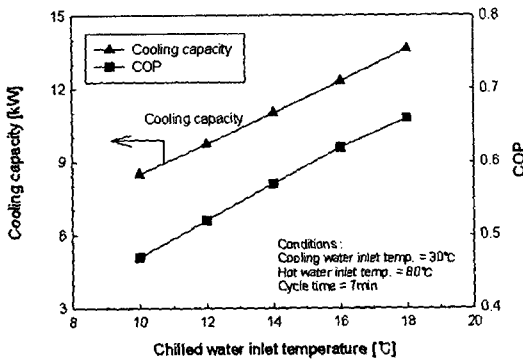


Fig. 7 Effect of chilled water on cooling capacity and COP

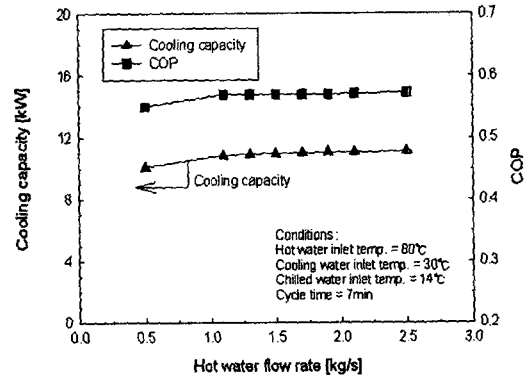


Fig. 9 Effect of hot water flow rate on cooling capacity and COP

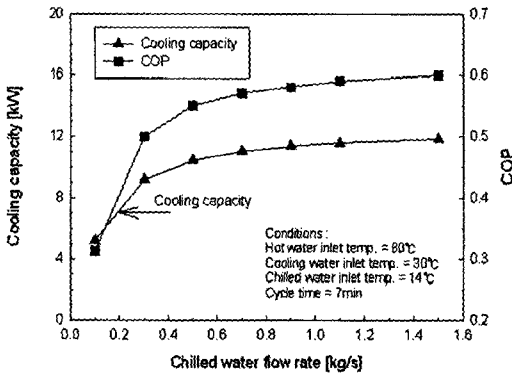


Fig. 10 Effect of chilled water flow rate on cooling capacity and COP

차가 커지면서 냉매의 증발잠열이 증가하면서 냉동능력과 COP는 증가하게 된다.

3.3 유량의 영향

Fig. 8은 냉각수유량 변화에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 냉각수유량이 증가할수록 냉동능력과 COP는 1.7kg/s까지 다소 증가하다가 그 이후에는 일정한 경향을 나타내었다.

Fig. 9는 온수유량 변화에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 온수유량이 증가할수록 냉동능력과 COP는 냉각수유량과 비슷하게 1.7kg/s까지 다소 증가하다가 그 이후에는 일정한 경향을 나타내었다. 따라서 냉각수 및 온수유량을 어느 정도 증가시키더라도 시스템에는 큰 변화가 없음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 냉수유량 변화에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 냉수유량이 증가할수록 냉동능력과 COP는 0.7kg/s까지 급격하게 증가하다가 그 이후에는 서서히 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 냉수유량이 증가하게 되면 냉수출구 온도도 증가하게 되므로 적절한 냉수유량의 설정이 대단히 중요함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실리카겔-물계 흡착식 냉동기 사이클 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 시스템의 작동조건에 따른 성능특성을 평가하였으며, 이를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 사이클 시뮬레이션을 통하여 각 열교환기 입, 출구 온도특성을 파악하였으며, 실험데이터와의 비교분석을 통하여 시뮬레이션의 타당성을 검증하였다.

(2) 사이클 시간 변화에 따라 냉동능력은 사이클 시간 360초까지 점차로 증가하다가 서서히 감소하는 경향을 보였으며, COP는 사이클 시간이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 냉동능력과 COP를 고려하여 적정 사이클 시간은 420초로 설정하였다.

(3) 냉각수온도가 낮고 온수온도와 냉수온도가 높을수록 냉동능력과 COP는 크게 나타났다. 기준조건인 냉각수온도 30°C, 온수온도 80°C, 사이클 시간 420초에서 냉동능력은 11kW, COP는 0.57을 나타내었다.

(4) 냉각수 및 온수유량은 1.7kg/s까지는 다소 증가하다가 그 이후에는 시스템의 성능에 큰 변화가 없었으나 냉수유량은 0.7kg/s까지 급격하게 증가하다가 그 이후에는 서서히 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 냉수유량이 증가하게 되면 냉수출구 온도도 증가하게 되므로 적절한 냉수유량의 설정이 대단히 중요함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 국가과학기술위원회 산하 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 "차세대 냉각시스템 기술개발"의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Park, I. H., Park, J. T. and Yoo, S. Y., 2002, "An Investigation Study on Fact of Waste Heat of Domestic Industry," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 811~816.
- (2) Yonezawa, Y., 1999, "Adsorption Chiller," *Refrigeration*, Vol. 73, No. 854, pp. 41~44.
- (3) 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.
- (4) Saha, B.B., Boelman, E.C. and Kashiwagi, T., 1995, "Computational Analysis of an Advanced Adsorption-Refrigeration Cycle," *Energy*, Vol. 20, No. 10, pp. 983~994.
- (5) 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.
- (6) Cho, S.H. and Kim, J.N., 1992, "Modeing of a Silica gel/Water Adsorption Cooling System," *Energy*, Vol. 17, No. 9, pp. 829~839.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Chang, W.S., Wang, C.C. and Shieh, C.C., 2006, "Experimental Study of a Solid Adsorption Cooling System Using Flat-tube Heat Exchangers as a Adsorption Bed," *Applied Thermal Engineering*, In Press.