

실리카겔-물계 흡착식 냉동기에 관한 실험적 연구

권 오 경^{*†}, 윤 재 호, 김 종 하

*한국생산기술연구원 열유체시스템팀

An Experimental Study of Adsorption Chiller using Silica gel-Water

Oh-Kyung Kwon^{*†}, Jae-Ho Yun, Joung-Ha Kim

ABSTRACT: The objectives of this paper are to investigate the performance of silica gel-water adsorption refrigeration system with heat recovery process from the system experiment. This system can be driven by waste heat at near ambient temperature from 60°C to 90°C. The cooling capacity and coefficient of performance(COP) were measured from various experimental conditions. An experimental results revealed the influence of operating temperatures(hot, cooling and chilled water), water flow rates, and adsorption-desorption cycle times on cooling capacity and COP. Under the standard conditions of 80°C hot water, 25°C cooling water, 14°C chilled water inlet temperatures and 420sec cycle time, a cooling capacity of 1.14kW and a COP for cooling of 0.55 can be achieved.

Key Words: Adsorption chiller(흡착식 냉동기), Cooling capacity(냉동능력), COP(성능계수)

Silica gel-water(실리카겔-물), Waste heat(폐열)

기호설명

1. 서 론

C_p	: 비열 [J/kg·K]
COP	: 성능계수
Q	: 열량 [J/s]
T	: 온도 [°C]
t	: 시간 [sec]

하첨자

ads	: 흡착
ch	: 냉수
des	: 탈착
hw	: 온수
in	: 입구
out	: 출구

생활수준 향상에 따라 체적한 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 발생되는 산업폐열에 대한 조사에 따르면 산업폐열의 형태는 중저온수, 포화수증기 등으로 다양하고 국내 폐열원의 종류 및 온도범위를 살펴보면 온도별로는 70~90°C의 폐열이 가장 많지만 대부분 폐기하고 있는 실정이다.⁽¹⁾

이들 열에너지를 유효하게 이용하는 것을 목적으로 최근 흡착식 냉동기가 주목을 받고 있다. 흡착식 시스템은 각 공정에서 버려지는 폐열을 구동원으로 사용할 수가 있어 에너지를 유효하게

[†]Corresponding author

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

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

재활용할 수가 있으며, 냉매로서 물을 사용함으로써 오존층 파괴와 관계없는 친환경적인 시스템이다. 상용화되고 있는 흡착식 냉동기에는 흡착제로 실리카겔 혹은 제오라이트가 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 흡착되어 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 0.3수준에서 현재는 0.7정도의 수준까지 효율이 향상되었다. 특히 일본의 Nishiyodo사와 Mayekawa사는 세계 최고수준의 기술력을 가지고 있으며 상품화에 성공한 유일한 회사이다.⁽²⁾ 그러나 연구개발 기간이 짧아 아직은 상품화 제품의 내구성, 성능의 신뢰성 등이 아직 입증되지 않아 생산 및 보급은 그다지 활성화되지 않은 상태이다. 하지만 다른 냉방시스템과 비교했을 때 나름대로의 장점(저온폐열 이용가능, 진동·소음이 적음, 용액결정 위험이 없음, 초기 불필요 등)을 가지고 있으므로 기술개발 및 보급의 확대가 가능하리라 생각된다.

본 연구에서는 실리카겔-물계 흡착식 냉동기 시스템의 특성을 평가하기 위해서 0.5USRt급 흡착식 냉동기 시스템을 설계/제작하여 시스템의 작동조건에 따른 성능특성을 정량적으로 평가하였다. 이를 통하여 얻어진 데이터는 흡착식 냉동기의 최적 설계 및 제작자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시스템의 작동원리

흡착식 냉동기는 2개의 열교환기를 1조로 하고

한쪽이 흡착공정일 때 다른 한쪽은 탈착공정을 하는 것에 의해 2개의 공정을 주기적으로 변화시키는 것이 가능하므로 연속적으로 냉수를 얻는 것이 가능하다.

흡착식 냉동기는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 증발기, 응축기, 열교환기1·2(흡·탈착기), 및 4개의 증기밸브로 구성되어 있다. 흡착제로서 실리카겔을 충진한 열교환기를 흡·탈착기라 하고 냉매로는 물을 사용한다. 4개의 밸브의 개폐 및 2개의 열교환기에 흐르는 온수, 냉각수의 선택은 Table 1의 타임챠트에 따라 시간제어를 한다.

2.2 실험장치

흡착식 냉동시스템의 성능특성을 평가하기 위하여 단단형 흡착식 냉동사이클 실험장치를 설계, 제작하고 그 운전특성에 관한 성능평가 실험을 하였다.

실험장치는 크게 흡착식 냉동시스템 부분과 시스템의 입출구 온도 조건을 맞추어주는 조건부로 나눌 수 있다. 흡착식 시스템에서 흡착과 탈착을 연속적으로 할 수 있도록 2개의 흡착탑과 응축기, 증발기로 나눌 수 있으며, 각 요소를 연결하는 배관과 밸브, 그리고 밸브를 제어하는 PLC 컨트롤러가 있다. 흡착탑에는 원형 펀튜브의 열교환기가 설치되었으며, 각 탑당 4.8 kg, 총 9.6 kg의 RD형 실리카겔을 충진하였다. 시스템의 유입 온도 조건을 맞추는 조절부는 각 요소의 열교환 유체의 온도를 제어 할 수 있도록 4대의 항온조를 사용하였다. 시스템 내로 유입되는 냉각수와 냉수의 항온조는 1 RT, 3 RT급 용량의 칠리를 사용하였으며, 온수온도 조절을 위한 항온조는 PID 제어를 이용한 히터가열방식의 칠리를 사용하였고, 응축기의 순환수는 0.5 RT급의 정밀항온조를 사용하였다.

시스템의 진공압력을 위해 최대 1×10^{-4} torr의 진공도를 얻을 수 있는 로터리형 진공펌프를 설치하였다. 항온조의 입구온도와 출구온도 측정을 위해 Pt100Ω의 RTD센서를 각 시스템으로 유입되는 입/출구에 설치하였으며, 각각의 배관에 0.25%의 정밀도의 마그네틱 유량계를 설치하여 유량을 측정하였다. 흡착탑 열교환기 각 패스 입구부분에 일정량의 유량이 흐르도록 면적식 유량계를 설치하여 조절하였으며, 각 요소의 압력측

정을 위하여, $-1 \sim 1 \text{ kg/cm}^2$ (gauge)의 범위의 압력계를 설치하였다. 모든 데이터는 YOKOGAWA 사의 MV200 데이터 수집장치를 이용하여 데이터를 취득하였다. Fig. 2는 실험장치의 개략도를, Fig. 3은 실험장치의 사진을 나타낸 것이다.

2.3 실험방법

흡착식 냉동시스템은 흡착과 탈착과정의 연속적인 반복과정으로 운전되어진다. 본 실험에서는 흡착식 냉동시스템의 온수 입구온도 80°C , 냉각수 입구온도 25°C , 냉수 입구온도 14°C , 냉각수 유량 12lpm , 온수 및 냉수 유량 10lpm 을 기준조건으로 설정하였으며 각 변수의 실험범위는 Table 2와 같이 여러 가지 조건에서 실험하였다.

실험을 수행하기 전에 먼저 시스템 내의 불용축 가스를 제거하기 위하여, 로터리형 진공펌프를 충분히 가동하여 진공을 -1.00 kg/cm^2 (gauge) 이하로 유지하였고, 충분한 진공이 이루어진 후 증발기의 화학식 순환펌프를 사용하여 증발기 내의 냉매를 순환시켜, 증발기의 냉매온도가 6°C 에도 달하였을 때, 실험을 진행하였다. 흡착탑 내의 온수와 냉각수 온도는 진공 초기 후, 충분한 유량으로 탑내를 순환시켜 설정온도를 맞추었으며 온도 조건이 안정화 되었을 때, 사이클 운전을 수행하였다. 모든 사이클은 PLC(Programmable Logic Controller)에 의해 밸브가 제어되며 흡착시간은 420초, 열회수시간(Heat recovery time)은 60초 동안 진행하였다.

2.4 실험데이터 처리

실험데이터는 시간에 따른 각 열교환기의 입/출구 온도데이터를 이용하였으며, 시스템 내의 입/출구 온도차는 흡착 및 탈착 사이클이 안정화되는 2번째 사이클에서부터의 데이터를 사용하였다. 실험데이터는 3~4회의 반복실험을 통하여 평균값을 취하였다.

성능계수(COP)는 식 (1)을 사용하였으며, 냉동능력과 온수열량은 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$COP = \frac{Q_{ch}}{Q_{hw}} \quad (1)$$

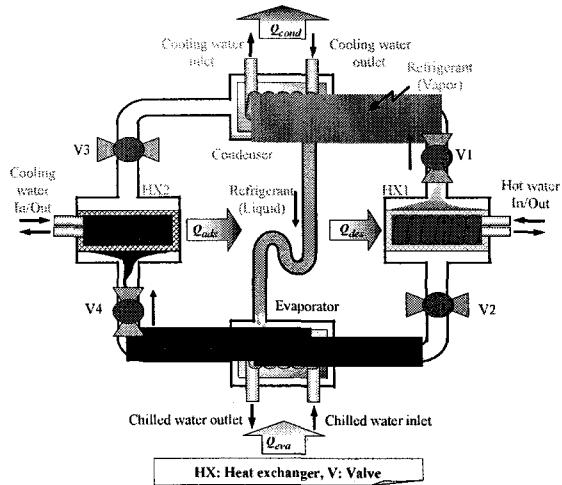


Fig. 1 Operation principle of adsorption chiller.

Table 1 Time chart of adsorption chiller

Cycle	A	B	C	D
Time(Sec)	420	60	420	60
Valve	○	×	×	×
	×	×	○	×
	×	×	○	×
	○	×	×	×
Heat exchanger	Hw	Cw	Cw	Hw
	Cw	Hw	Hw	Cw

Cw : Cooling water, Hw : Hot water

Table 2 Experimental conditions of adsorption chiller

Parameters	standard conditions	Ranges
Cooling water temp.(°C)	25	20 ~ 33
Hot water temp.(°C)	80	60 ~ 90
Chilled water temp.(°C)	14	10 ~ 18
Cooling water flow rate(lpm)	12	8 ~ 14
Hot water flow rate(lpm)	10	8 ~ 14
Chilled water flow rate(lpm)	10	8 ~ 14
Adsorption/desorption time(sec)	420	240 ~ 540
Heat recovery time(sec)	60	-
Weight of silica gel(kg)	4.8(1Bed)	-
Particle size of silica gel(mm)	0.5	-

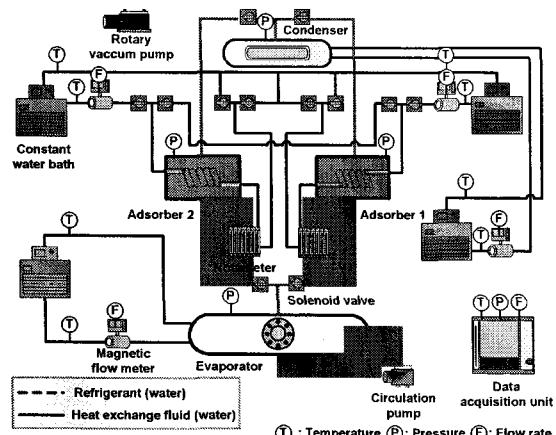


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

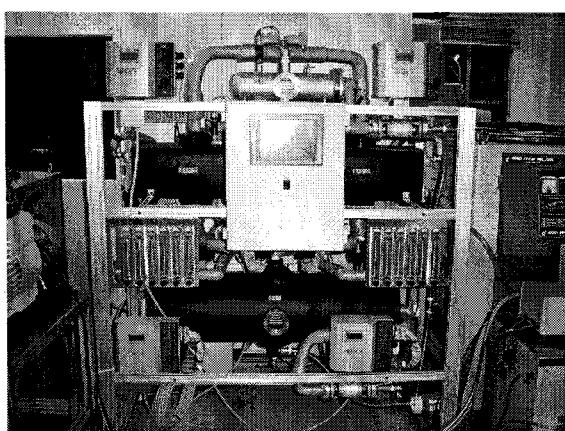


Fig. 3 Photo of experimental apparatus.

$$Q_{ch} = m \cdot C_{ph} \cdot (T_{ch\ in} - T_{ch\ out}) \quad (2)$$

$$Q_{hw} = m \cdot C_{phw} \cdot (T_{hw\ in} - T_{hw\ out}) \quad (3)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 운전시간의 영향

Fig. 4는 운전시간에 따른 온수, 냉각수 및 냉수 입·출구의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 처음 30초가 열회수공정, 나머지 420초가 흡·탈착공정을 나타낸다. 온수와 냉각수(흡착탑)는 열회수공정에서 입구·출구의 온도차가 급격

하게 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 입구와 출구에서는 온도차가 발생한다. 그러나 시간의 경과에 따라 단위시간당의 흡·탈착량이 감소하므로 서서히 온도차는 작아지게 된다.

Fig. 5는 운전시간에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 냉동능력은 운전시간이 증가함에 따라 점차로 감소하는 경향을 보였으며, COP는 운전시간이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 이것은 구동열원의 열량감소에 의한 것으로 판단된다.

3.2 온도의 영향

Fig. 6은 냉각수온도 변화에 따른 냉동능력과

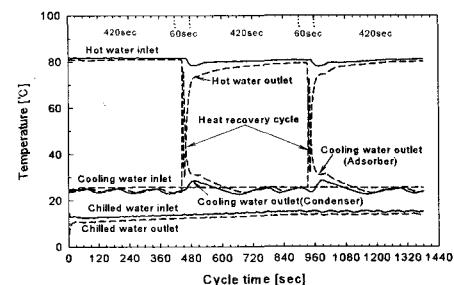


Fig. 4 Temperature profile on cycle time.

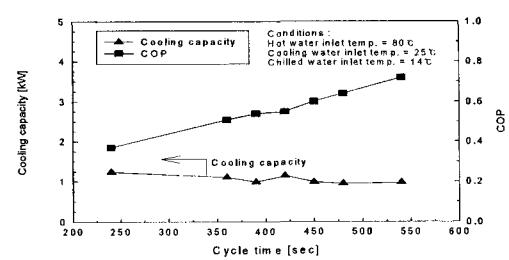


Fig. 5 Effect of cycle time on cooling capacity and COP.

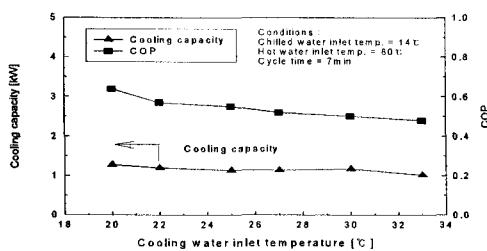


Fig. 6 Effect of cooling water on cooling capacity and COP.

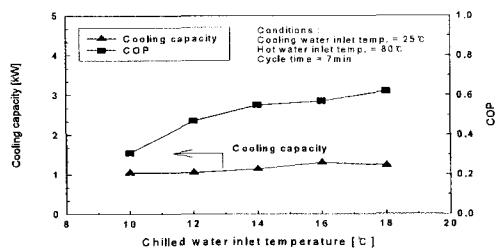


Fig. 8 Effect of chilled water on cooling capacity and COP.

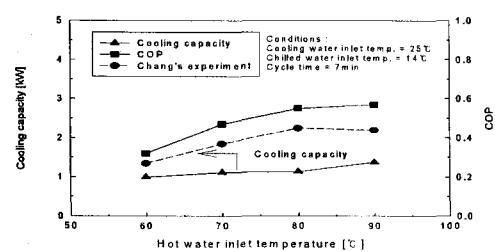


Fig. 7 Effect of hot water on cooling capacity and COP.

COP의 변화를 나타낸 것이다. 냉각수온도가 낮을수록 냉동능력과 COP는 크게 나타났다. 기준 조건인 냉각수온도 25°C, 온수온도 80°C 및 사이클 시간 420초에서 냉동능력은 1.14kW, COP는 0.55를 나타내었다.

Fig. 7은 온수온도 변화에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 온수온도를 높게 할수록 냉동능력과 COP는 증가하였다.

실험결과의 타당성을 검증하기 위하여 Chang⁽⁶⁾ 등의 실험과 비교한 결과 정성적인 경향은 비슷하였으나 정량적으로 다소 차이가 있었다. 이것은 흡착탑의 형상, 흡착제의 종류 및 실험조건이 다른 것에 기인한 것으로 판단되며, 본 실험결과는 Chang 등의 결과에 비해서 온수온도 60°C에서 18.5%, 90°C에서 29.5%의 COP 향상을 보였으며, 흡착식 냉동기의 효율향상에 기여함을 알 수 있었다.

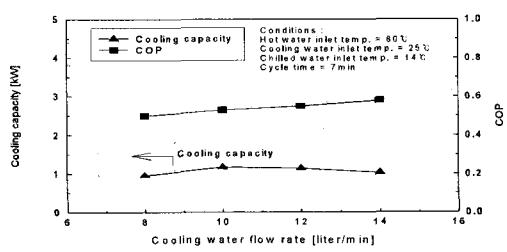


Fig. 9 Effect of cooling water flow rate on cooling capacity and COP.

Fig. 8은 냉수온도 변화에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 냉수온도가 증가 할수록 냉동능력과 COP는 증가하는 경향을 보였다.

3.3 유량의 영향

Fig. 9와 10은 냉각수와 온수유량 변화에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 냉각수와 온수유량이 증가할수록 냉동능력과 COP의 변화는 거의 나타나지 않았다. 따라서 냉각수 및 온수유량 변화를 통해서 성능향상은 거의 없음을 알 수 있었다.

Fig. 11은 냉수유량 변화에 따른 냉동능력과 COP의 변화를 나타낸 것이다. 냉수유량이 증가 할수록 냉동능력은 10lpm까지는 점차로 증가하다가 거의 변화가 없었으며, COP는 유량증가에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

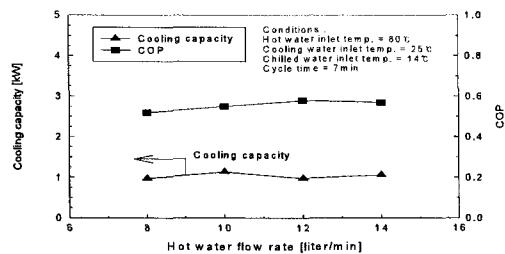


Fig. 10 Effect of hot water flow rate on cooling capacity and COP.

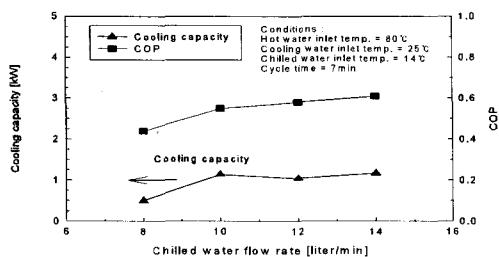


Fig. 11 Effect of chilled water flow rate on cooling capacity and COP.

4. 결론

흡착식 냉동기 시스템 실험을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 흡착식 냉동기 시스템 실험을 통하여 각 열교환기 입, 출구 온도차이를 알 수 있었으며 이를 통하여 실험장치의 운전특성을 파악할 수 있었다.

(2) 운전시간이 증가함에 따라 냉동능력은 점차로 감소하는 경향을 보였으며, COP는 증가하는 경향을 보였다.

(3) 냉각수온도가 낮고 온수온도 및 냉수온도가 높을수록 냉동능력과 COP는 크게 나타났다. 기준조건인 냉각수온도 25°C, 온수온도 80°C 및 사이클 시간 420초에서 냉동능력은 1.14kW, COP는 0.55를 나타내었다.

(4) 유량변화를 통하여 냉수유량이 증가할수록 냉동능력과 COP의 변화는 크게 나타났으나, 냉각수와 온수유량 변화에 따라 냉동능력과 COP의 변화는 거의 나타나지 않았다.

후기

본 연구는 국가과학기술위원회 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 “차세대 냉각시스템 기술개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사를 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) 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.