

태양열에 의한 냉방 및 난방시스템의 성능향상(Ⅱ)*

- 태양열을 이용한 흡수식 냉동기의 성능 -

The Improvement of the Performance of Solar Cooling
and Heating Systems(Ⅱ)- The Characteristics of an Absorption Refrigeration Powered by
Solar Systems -박 문 수*, 김 무 근*, 김 효 경**, 노 승 탁***
M.S. Park, M.G. Kim, H.K. Kim, S. T. Ro

ABSTRACT

The purpose of this study is to obtain the dynamic characteristics of an absorption refrigerator powered by solar energy by experiments. Since the absorption refrigerator power by solar energy should have the characteristics which is suitable for the intermittence and rarity of solar energy, not only the characteristics of the steady state operations but also the partial load and the transient operations should be considered. The minimum available temperature of the storage tank should be known, and the absorption refrigerator can be suitably selected for air-conditioning systems. In this study, the experimental data of the transient state for on-off and warming-up operations has been obtained. Also the experiments are performed which test the minimum available temperature of the storage tank. The results show that it takes 1 hour to get to the steady state of the absorption refrigerator, and the minimum available temperature of the storage tank is about 68°C. and show that in the partial load operations the performance of the absorption refrigerator is improved by applying the modified control method to on-off operations.

기 호 설 명			
		\dot{m}_g	: 발생기온수유량
		Q	: 열 량
CAPACITY:	흡수냉동기의 냉동용량	T_{amb}	: 주위온도
C_p	: 물의 비열	T_{cd}	: 응축기온도
COP	: 흡수냉동기의 성적계수	T_{chi}	: 냉수입구온도
\dot{m}_a	: 흡수기냉각수유량	T_{cho}	: 냉수출구온도
\dot{m}_c	: 응축기냉각수유량	T_{ci}	: 냉각수입구온도
\dot{m}_e	: 증발기냉각수유량	T_{co}	: 냉각수출구온도

+ 이 논문은 1986년도 문교부 자유과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음

* 서울대학교 대학원 기계공학과

** 전희장, 서울대학교 공과대학 기계공학과

*** 정희원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

- T_{ev} : 증발기온도
- T_{hd} : 농용액하강관온도
- T_{hi} : 온수입구온도
- $T_{hi,r}$: 온수입구초기온도
- T_{ho} : 온수출구온도
- T_{hu} : 농용액상승관온도
- T_{ld} : 희용액하강관온도
- T_{lg} : 희용액발생기입구온도

1. 서 론

태양열 구동 흡수식 냉동기는 보통 평판형 집열기로 얻어지는 비교적 저온수의 열원을 이용하며, 그 상태가 기상조건에 좌우되어 일정하지 못할 가능성이 있어 축열조를 이용하여 축열을 하지만 흡수식 냉동기의 정상상태 운전에 충분하도록 온도 수준을 유지하지 못할 수가 있다. 그러므로 태양열 구동 흡수식 냉동기를 공조 시스템의 하나로서 설계 계획할 때, 정상운전 특성 뿐만 아니라 미리 부분부하 운전, 비정상운전을 고려하여 그 동특성을 파악할 필요가 있으며, 실제로 이용 가능한 축열수조의 온도가 최저 어느 정도의 온도까지 가능한가를 알아두어야 할 것이다.

태양열 구동 흡수식 냉동기의 비정상운전에는 처음에 냉동기를 가동시켜 정상상태에 도달할때까지의 워밍업(warming-up) 시간 동안의 비정상운전과 축열수조의 온도변화로 인하여 온수온도가 일정하지 못함에 기인한 비정상상태와 흡수식 냉동기의 용량에 비해 냉방부하가 적은 부분부하일 때 흡수식 냉동기를 on-off 하므로써 발생하는 과도특성 등이 있다.

미국 CSU 태양열 주택 1호의 냉방 시스템 작동결과 보고¹⁾에 의하면 시스템 설계시의 냉방부하보다 적은 부분부하에서 자주 on-off 하게되어, on-off 사이클링으로 인한 정상상태에 대한 성능의 감소는 약 50%에 이른다고 발표하였다. 또한 일본 YAZAKI 사의 태양열 주택실험보고²⁾에서도 적은 냉방부하에서 하루 20회의 on-off 작동으로 상당한 성능감소가 일어나 처음 설계시보다 적은 용량의 냉동기로 바꿀 필요성이 있음을 알게되었다.

태양열 이용 흡수식 냉동기의 성능에 관한 연구 분야에서 J. A. Duffie³⁾ 등은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 시스템의 성능에 영향을 미치는 인자에 대해 연구하였으며 J. M. Froemming⁴⁾ 등은 시스템을 설계, 제작하여 그

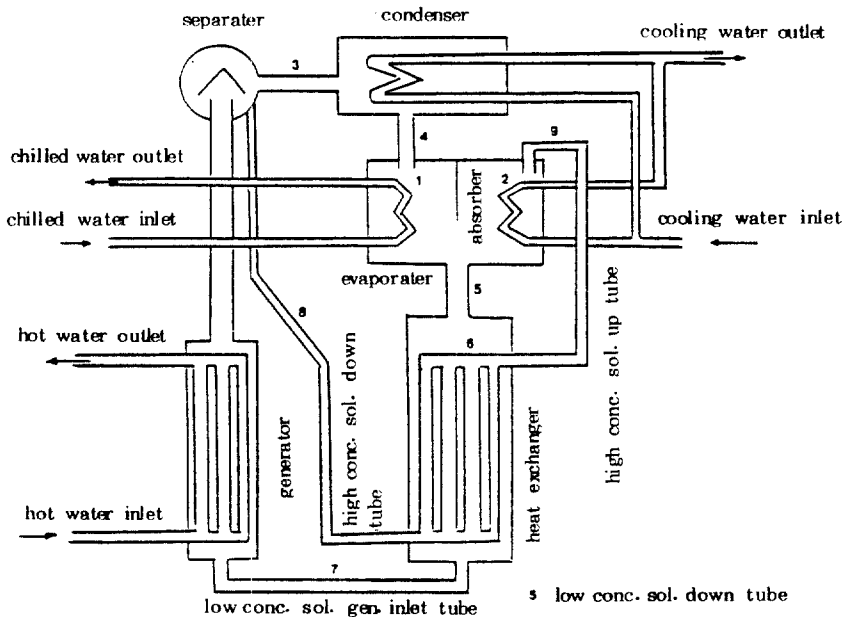


Fig.1 Schematic Diagram of Absorption Cooling System

동적성능을 보고하였으며, F. A. Holland^{5,6)} 등도 실험을 통하여 작동특성연구를 했으며, 많은 사람들이 흡수식 냉동기의 동적 성능에 대한 연구^{7,8,9)}를 계속 해오고 있다.

본 연구에서는 흡수식 냉동기를 처음 가동시킬 때의 워밍업 작동과 on-off 운전에 대한 비정상상태의 실험을 통하여 이용 가능한 최저 축열조 온도에 대하여 알아보았으며, 간단한 제어방식의 변화를 도입하여 어느 정도의 성능 개선이 있는지 알아보았다.

2. 관계이론

2.1 흡수식 작동 사이클

흡수식 시스템이 Fig.1에 나타나 있다. 상태 1에서 증발부로 들어가는 액체냉매는 낮은 온도 T_L 에서 증발하면서 냉수로부터 열을 빼앗고, 증발된 냉매는 상태 2로 흡수기에 들어가 농용액에 흡수된다. 포화흡수용액(희용액)은 상태 5로 흡수기를 떠나 용액 열교환기를 통과하여 발생기로 들어간다. 상태 7로 발생기에 들어간 희용액은 온수로 가열되어 냉매의 증발이 일어나게 되는 점까지 증기압력이 증가되며, 이때 발생된 냉매증기는 상태 3의 고압으로 응축기로 흐른다. 가열된 상태 3

으로 응축기로 들어간 냉매는 상태 4로 응축되고 증발기로 팽창된다. 냉매를 방출한 농용액은 상태 8로 발생기를 떠나 상태 9로 흡수기에 돌아온다. 흡수용액은 발생기에서 가열되고 흡수기에서는 냉각되므로 농용액으로부터 열을 빼앗아 희용액을 예열하기 위해서 두 용액의 흐름 사이에 용액 열교환기를 위치시킨다. 냉매-흡수제 용액에 대한 평형 상태도가 Fig.2에 나타나 있으며, 이 그림에서는 증기압력이 여러가지 용액 농도에 대하여 온도의 함수로 보여진다. 시스템의 각 점에서의 열역

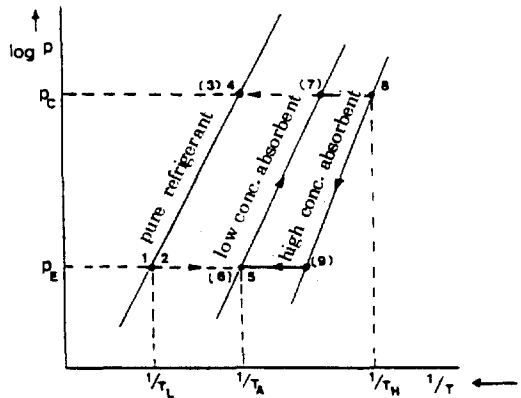


Fig. 2 Thermodynamic Equilibrium Diagram of the Absorbent-Refrigerant Solution in an Absorption System

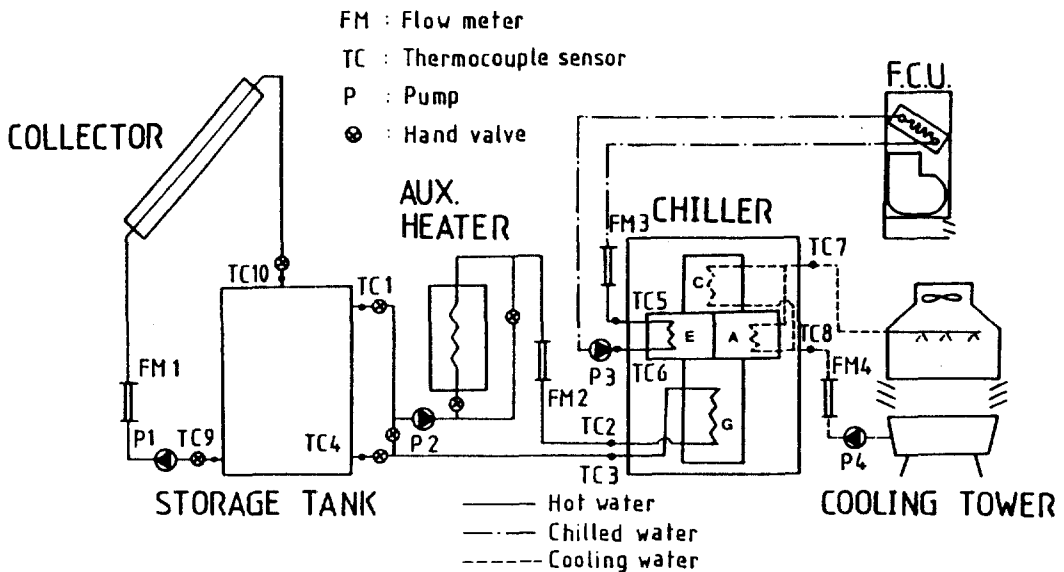


Fig. 3 Schematic Diagram of Solar Powered Absorption Cooling System

학적 상태를 나타내기 위하여 Clapeyron 방정식에 기초한 $\log P$ 대 $1/T$ 의 그래프가 이용된다. 점 1과 2는 증발기 입출구 조건을 나타내고, 점 3과 4는 응축기 입출구 조건을 나타낸다. 응축기와 발생기의 압력 P_c 는 점 4를 통과하는 직선과 증축과의 교점이며, 증발기와 흡수기에서의 압력은 P_E 이고 냉수온도에 의존한다.

흡수용액의 사이클은 발생기에서 등압선 7-8과 흡수기에서 9-6의 등압선과 열교환기를 통과하는 일정 농도선으로 이루어진다. 비평형 상태 9로 흡수기에 들어가는 용액은 고농도에서 저농도로 희석된다. 흡수과정은 점 6에서 끝나게 되며 이때의 압력은 냉각수 온도에 관계된다. 마찬가지로 증기 발생의 끝상태 8은 응축기 압력 P_c 와 열원 공급온도 T_H 의 평형에 관계된다. 이상의 과정에서는 냉매의 열전달에서 온도 차이를 무시하였고 농용액과 희용액의 열교환기에서의 이상적인 열교환을 가정하였다.

2.2 흡수식 냉동기에 대한 관계식

흡수식 냉동기와 관련된 각종의 에너지 식과 성능계수는 Table 1로 요약하여 나타낼 수 있다. 이 표에서는 흡수식 냉동기를 발생기-응축기 부분과 증발기-흡수기 부분으로 나누어 각 개소에서의 에너지 식을 기술하였다.

Table 1. Working equations for absorption refrigerator

Components	Equations
Generator-Condensor	$Q_g = \dot{m}_g C_p (T_{hi} - T_{ho})$
Generator	$Q_c = \dot{m}_c C_p (T_{co} - T_{ci})$
Condensor	
Evaporator-Absorber	$Q_e = \dot{m}_e C_p (T_{chi} - T_{cho})$
Evaporator	$Q_a = \dot{m}_a C_p (T_{co} - T_{ci})$
Absorber	
Coefficient of Performance of the Refrigerator	$COP = \frac{Q_e}{Q_g}$

3. 실험장치 및 실험방법

태양열을 이용한 흡수식 냉동기의 동특성을 알아보기 위하여 흡수식 냉동기와 집열기를 중심으로 태양열 냉방 시스템을 구성하였으며 이 장치를 이용하여 워밍업 동작특성과 정지시의 과도특성을 알아보았다. 또한 제어방법의 변화와 on-off 작동실험을 통하여 잔류 냉동용량의 이용 가능성을 알아보았다.

3.1 실험장치

본 연구에서는 흡수식 냉동기와 집열기를 중심으로 주변장치를 설치하여 Fig. 3과 같은 태

Table 2. Yazaki Co. absorption chiller specification (model no. 600s)

Items	Specifications
Refrigeration capacity	6000 kcal/h
Chilled water outlet temp.(design)	9 °C
Chilled water outlet temp.(minimum)	8 °C
Chilled water flow rate (design)	1200 l/h
Chilled water flow rate (minimum)	2040 l/h
Generator inlet temp. (design)	88 °C
Generator inlet temp. (range)	75-100 °C
Generator flow rate	1668 l/h
Cooling water inlet temp. (design)	29.5 °C
Cooling water inlet temp. (range)	24-32 °C
Cooling water rate	3200 l/h

양열 냉방 시스템을 구성하였다. 집열기는 일본 YAZAKI 사 제품인 Blue panel 20매와 국산 10매를 병렬로 15매씩 직렬 2단으로 설치하였으며, 경사각은 20도이고, 이것은 축열조와 개회로 또는 폐회로로 연결될 수 있다. 보조열원으로 온수보일러를 축열조와 냉동기 사이에 설치하였으며, 발생기의 온수 출구 온도가 축열조의 온수 출구 온도보다 높게되어 보조열원이 축열조내의 물을 데우는 효과가 생기지 않도록 온수회로내에 솔레노이드 밸브와 Thermostat를 설치하여 이를 제어하고 있다. 흡수식 냉동기는 YAZAKI 사 제품인 모델 WFC-600S 이며 제작자가 제시한 작동특성을 Table 2에 나타내었다. 냉동기를 통하는 3개의 순환회로는 각각 열원 온수, 냉수, 냉각수의 회로이다. 흡수식 냉동기의 외부 유체회로중 집열기 입출구, 축열조 온수 입출구, 발생기 온수 입출구, 냉수 입출구, 냉각수 입출구 온도와 냉동기 내부 요소의 온도로는 증발기, 응축기, 농용액 하강관, 농용액 상승관, 희용액 하강관, 희용액 발생기 입구 온도 등을 T형(Copper-Constantan) 열전대와 Multi-Channel Recorder, Multi-Point Recorder를 이용하여 측정하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 워밍업(warming-up) 동작특성 실험

하루중 흡수식 냉동기를 처음 주위 온도에서 작동시킬 때, 시스템이 켜게되는 가장 긴 비정상상태에 대한 실험으로, 먼저 냉각수의 온도가 원하는 일정한 온도가 되도록 Thermostat를 조절하고, 실험하고자 하는 온수 온도 범위는 보일러에 부착된 온도조절기를 이용하여 택한다. 온수 입구 초기온도가 흡수식 냉동기의 정상상태에 도달하는 시간에 미치는 영향을 조사하기 위해 보일러 온도 조절기를 사용하여 발생기 입구 초기온도를 원하는 온도로 맞추어 실험하고, Multi-Channel Recorder의 데이터 기록은 1분 간격으로 행한다. Robitz형 일사계를 사용하여 수평면 전일사량을 측정하였다.

4. 실험결과 및 해석

4.1 워밍업(warming-up) 동작에 대한 과도특성

흡수식 냉동기가 켜게 될 가장 긴 비정상상태는 장치가 처음 주위 온도상태에서 시동될 때이다. 워밍업 시간은 흡수식 장치가 열개될 정상상태조건의 setting에 의존하므로 워밍업 시간에 대한 장치의 성능을 비교하기 위해서는 기준이 있어야 한다. 본연구의 모든 실험은 발생기 입구온도 78℃의 정상상태조건에 setting하였다. 흡수식 냉동기는 다른 장치에 비해서 가동시의 워밍업에 시간이 걸려 부하변동에 대한 즉각적인 반응이 약하다. 그 이유는 냉매 증발량 1에 대해서 용액 순환량은 13-15에 대응되어, 이 다량의 용액을 가열, 농축하는데에 시간이 걸리기 때문이다. 발생기 온수입구 초기온도를 변화시켜가며 행한 시동시의 과도특성실험 결과가 Fig. 4, Fig. 5

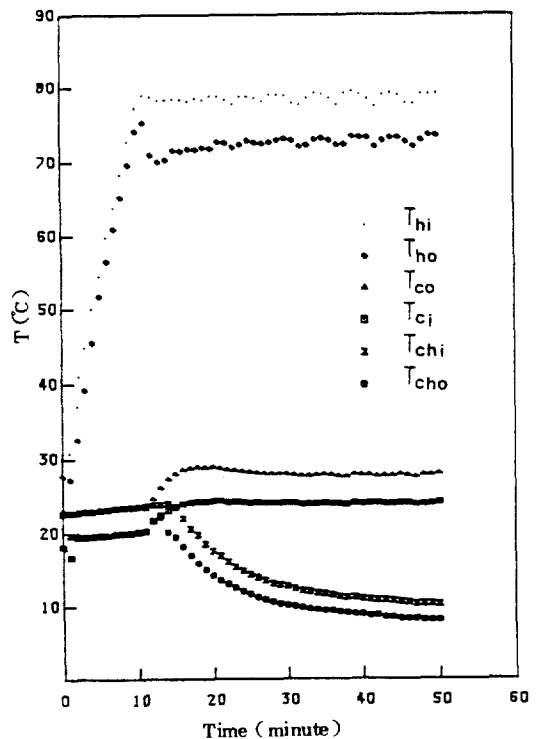


Fig.4a Cold Start-up Instantaneous Values of Hot, Cooling, Chilled water temp. ($T_{hi, i} = \text{amb. temp}$)

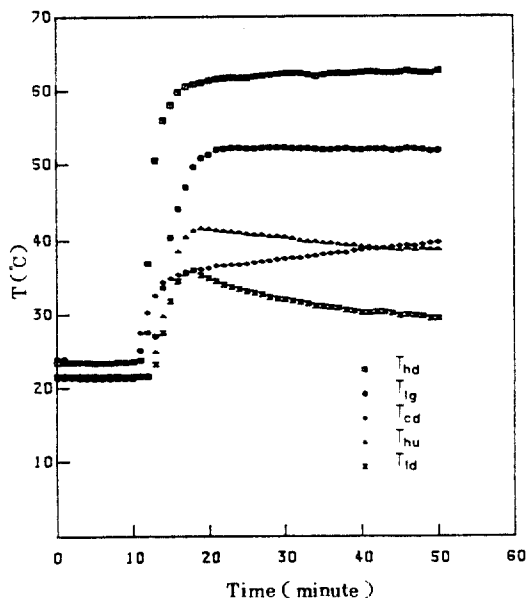


Fig.4b Cold Start-up Instantaneous Values of Internal Temperature of an Absorption Chiller($T_{hi,i} = \text{amb. temp}$)

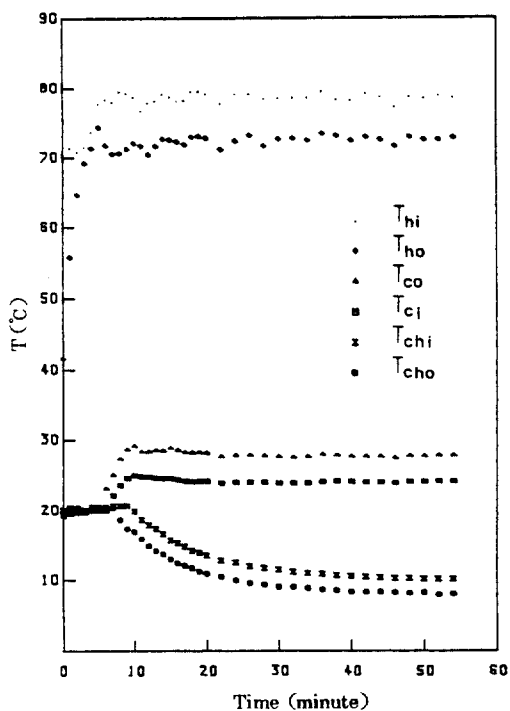


Fig.5a Cold Start-up Instantaneous Values of Hot, Cooling, Chilled water Temp. ($T_{hi,i} = 70^\circ\text{C}$)

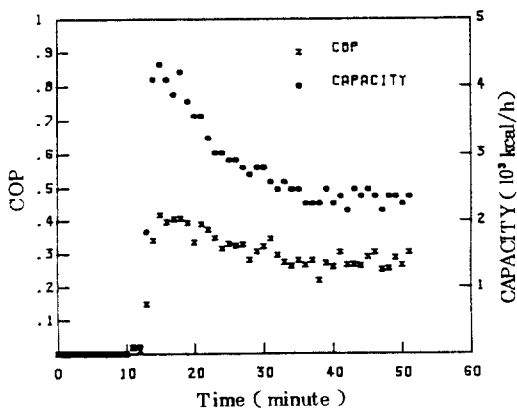


Fig.4c Cold Start-up Instantaneous Values of COP and Capacity of an Absorption Chiller($T_{hi,i} = \text{amb. temp}$)

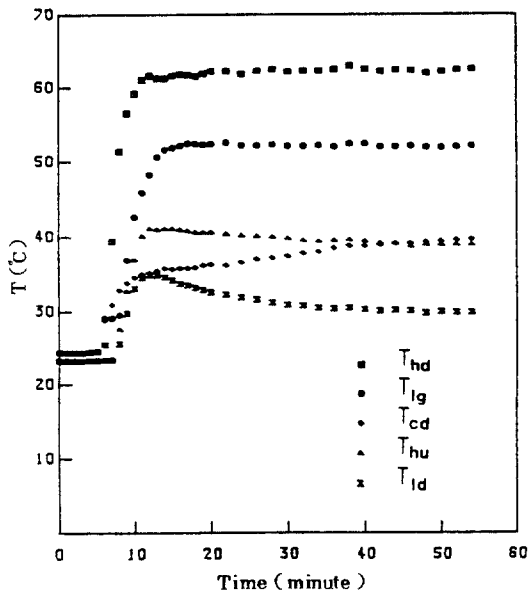


Fig.5b Cold Start-up Instantaneous Values of Internal Temperature of an Absorption Chiller($T_{hi,i} = 70^\circ\text{C}$)

에 나타나 있으며, Fig. 4-a와 Fig. 5-a를 비교하여 보면 냉각작용이 시작되는 시간이 짧아지나 그리 큰 차이는 보이지 않음을 알 수 있다. 실험을 행할 때 냉방부하는 약 3.7kW 정도로서 흡수냉동기의 최적 정상상태 냉동 능력보다 작기 때문에 Fig. 4-c, Fig. 5-c와 같이 낮은 COP가 얻어졌다고 생각된다.

시스템의 내부 구성요소 온도변화를 나타낸

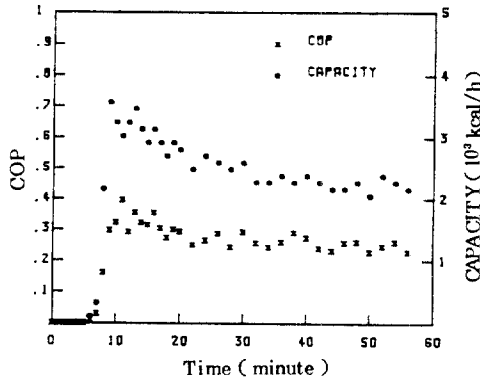


Fig. 5c Cold Start-up Instantaneous Values of COP and Capacity of an Absorption Chiller ($T_{hi,i} = 70^\circ\text{C}$)

Fig. 4-b로부터 발생기내의 LiBr 수용액에서 냉매가 발생되기 시작하는 것은 운전 개시후 약 7-15 분 사이이며, 증발기의 냉각작용도 운전 개시후 약 7-15 분에 시작하여 30-40 분에서 거의 일정치에 도달하게 되고, 약 1시간 정도에서 냉수 출구 온도가 설계치 온도에 도달하게 된다.

4.2 정지시의 과도특성

정상상태로 작동하고 있는 흡수식 냉동기를 정지시킨 이후의 시스템의 내부온도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 증발기내의 온도는 운전정지와 함께 급격하게

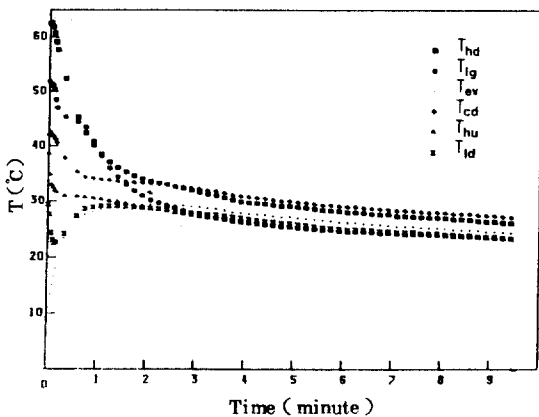


Fig. 6 Instantaneous Values of Internal Temperature of an Absorption Chiller after Shut-off

상승하며, 희용액 하강관 온도는 초기에는 급격히 하강하다가 다시 상승하는 모습을 보여 준다. 그런데 농용액 하강관 온도와 희용액 발생기 입구온도는 운전정지 후 초기 몇 분동안은 큰 변화를 보이지 않는다. 그 이유는 시스템을 갑자기 정지시켜도 써모사이폰 펌프 작용에 의해 흡수용액의 순환이 약간은 계속되기 때문이라고 생각된다. 따라서 시스템을 정지시킬 때 온수 펌프만 중단시키고 냉수펌프와 냉각수 펌프를 계속 순환시켜 잔류 냉동용량의 이용이 가능하리라고 보여진다.

4.3 제어방법의 변화실험

정상상태로 작동되고 있는 시스템의 운전 정지시에 온수펌프, 냉수펌프, 냉각수펌프를 모두 동시에 정지시키지 아니하고, 온수펌프만 중단시킨 채로 시스템을 가동시켜 잔류 냉동용량의 이용 가능성을 실험한 데이터가 Fig. 7에 나타나 있다. 그림에 나타난 것처럼 가열원의 공급이 중단된 뒤에도 약 3분간은

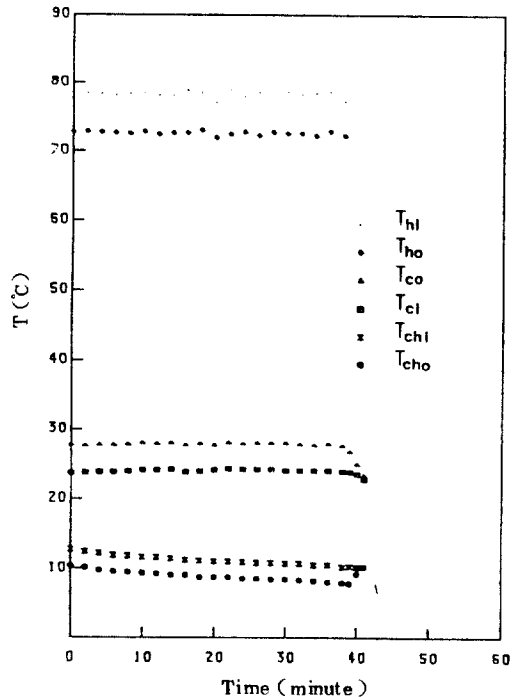


Fig. 7 Instantaneous Values of Hot, Cooling, Chilled water Temp. under Modified Control Mode

시스템 냉각작용이 계속될 수 있음을 알 수 있었다.

4.4 on-off 작동의 과도특성

on-off 작동 실험에서는 on-off 시간의 비율을 1:1로 행하였다. 2시간 on-off사이클(1시간on, 1시간off)에 대한 순간 COP와 냉동용량이 Fig. 8에 나타나있으며, 각 사이클링 실험에 대하여 다음 사이클링전에 정상상태에 도달하였다. 변경된 제어방법 아래에서의 2시간 on-off사이클에 대한 성능특성이 Fig.9에 나타나 있으며, 가열원이 중단된 뒤에도 약 3분간은 잔류 냉동용량을 이용할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 냉방부하가 작아서 하루중 on-off운전을 자주하게 되면 제어방법의 변화가 이득이 있다고 생각된다. 그러나 근본적으로는 냉방부하에 적절히 냉방용량의 냉동기를 설치하는 것이 중요하다.

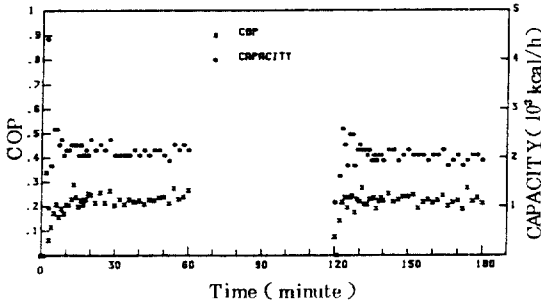


Fig. 8 Instantaneous Values of COP and Capacity of 2-hour on-off Operation

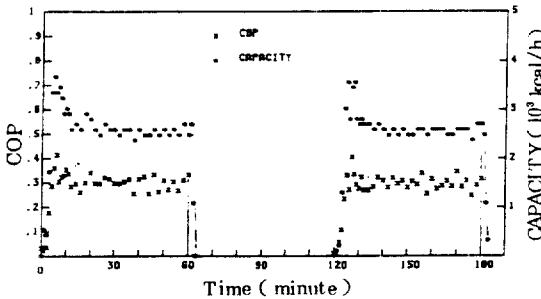


Fig. 9 Instantaneous Values of COP and Capacity of 2-hour on-off Operation under Modified Control

4.5 태양열 이용 운전특성

9월 17일의 태양열 이용 운전특성이 Fig. 10에 나타나 있다. 이 날의 축열조 온수 최고온도는 약 72 °C정도였으며, 냉각수 입구온도를 20 °C로 일정하게 하여 실험을 행하였다. 이 그림에서 황측의 초기시간 14시는 시스템이 정상상태에 도달할 때까지 보조 보일러를 이용하여 시스템을 작동시킨 다음에 온수 온도변화로 인한 과도성능 영향에 대비하여 축열조 온수온도에 대응하는 온도로 시스템의 내부가 정상상태로 될 때까지 작동시킨 후를 초기로 나타낸 것이다. 냉각수 입구 온도를 20 °C로 일정하게 했더니, Fig. 10-a에 보여진 것처럼 축열조 온수온도가 70°C까지는 일정한 냉방능력을 보여주었으며, 온수온도가

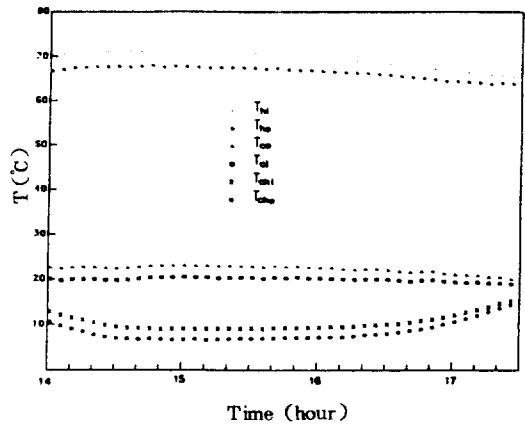


Fig.10a Instantaneous Values of Hot, Cooling, Chilled water Temp. for using Solar Energy(Sept. 17, 1987, Seoul)

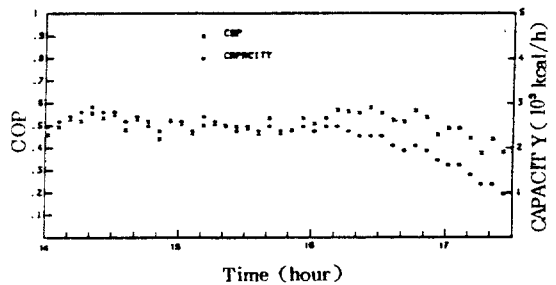


Fig.10b Instantaneous Values of COP and Capacity for using Solar Energy (Sept. 17, 1987, Seoul)

68℃까지는 냉수 입출구 온도차가 1℃ 정도가 나고, 그 이하에서는 증발기의 냉각작용이 이루어지지 않았다.

5. 결 론

태양열 구동 흡수식 냉동기의 과도성능과 제어방법의 변화에 대한 실험을 하였고, 냉각수 온도를 낮추었을 때 이용가능한 온수온도에 대해서도 알아보았다.

1) 시스템을 작동시킨 후 처음 증발기의 냉각작용이 일어나는데 소요되는 시간, 즉 발생기 워밍업 시간은 약 7-15 분이였다.

2) 주위 온도상태의 시스템을 처음 운전한 뒤에 정상상태에 도달하는 데에 약 60 분 정도가 걸린다.

3) 가열원이 중단된 뒤에도 약 2~3 분가량 잔류 냉동용량을 이용할 수 있음을 알게 되었고, on-off 운전이 적용될 때 시스템의 성능 개선이 기대된다.

4) 태양열 이용 실험에서 냉각수 온도를 20℃로 낮추었을 때 냉방에 이용 가능한 축열조 온도는 68℃였다.

참 고 문 헌

1. Ward, Dans S, Weiss, T.A. and Lof, G.O.F., "Preliminary Performance of CSU Solar House I Heating and Cooling System", *Solar Energy*, Vol.18, pp.541-548, 1976.
2. 石橋, "Yazaki Solar House I 溫水加熱吸收冷凍機" 空氣調和, 衛生工學 第50卷 4號, pp.67~77, 1976.
3. Duffie, J.A. and Sheridan, N.R., "LiBr-Water Refrigerators for Solar Operation", *Mechanical and Chemical Engineering Transaction*, pp.79-88, May 1965.
4. Froemming, James M., Wood Byard D. and Guertin, James M., "Dynamic Test Results of an Absorption Chiller for Residential Solar Applications", *ASHRAE Transaction*, Vol.85, pp.777-786, 1979.
5. Landauro, J.M. and Holland, F.A., "Experimental Study of the Operating Characteristics of a Water-LiBr Absorption Cooler", *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol.61, November 1983.
6. Eisa, M.A.R. and Holland, F.A., "A Study of the Operating Parameters in a Water-LiBr Absorption Cooler", *Energy Research*, Vol.10, pp.137-144, 1986.
7. Anand, D.K., Allen, R.W. and Kumar, B., "Transient Simulation of Absorption Machine", *J. of Solar Energy Engineering*, Vol.104, pp.197-203, 1982.
8. Ishibashi, T., "The Result of Cooling Operation of Yazaki Experimental Solar House I", *Solar Energy*, Vol.21, pp.11-16, 1978.
9. Yabase, H. and Nishihara, Y., "The Dynamic Characteristics of Absorption Refrigerating Machine", *Refrigeration*, Vol.56, No.648, pp.1-8, 1981.