

태양열 냉 · 난방시스템의 열성능 분석

곽희열*, 신우철**

*한국에너지기술연구원 태양열이용센터(hykwak@kier.re.kr), **대전대학교 건축공학과(shinuc@dju.ac.kr)

Analysis of Thermal Performance of a Solar Heating & Cooling System

Kwak, Hee-Youl*, Shin, U-Cheul**

*Korea Institute of Energy Research, Solar Thermal Research Center(hykwak@kier.re.kr),
**Dept. of Architectural Engineering, Daejeon University(shinuc@dju.ac.kr)

Abstract

The purpose of this study is to present the simulation results and an overview of the performance assessment of a solar heating & cooling system by means of the 200m² evacuated tube solar collector. The simulation was carried out using the thermal simulation code TRNSYS with new model of a single-effect LiBr/H₂O absorption chiller developed by this study. The calculation was performed for yearly long-term thermal performance and for two design factors: the solar hot water storage tank and the cold water storage tank. As a result, it was anticipated that the yearly mean system efficiency is 46.7% and the solar fraction for the heating, cooling and hot water supply are about 84.4 %, 41.7% and 72.4%, respectively.

Keywords : 1중 효율 흡수식 냉동기(single-effect LiBr/H₂O absorption chiller), TRNSYS 시뮬레이션(TRNSYS simulation), 태양열 난방 및 냉방시스템(Solar heating & cooling system)

1. 서 론

하절기 잉여열원을 활용한 태양열 냉방시스템은 태양열 이용효율을 극대화시키고 과열문제를 해소할 뿐만 아니라 전력수요 및 침투부하 감소와 CO₂를 저감시킬 수 있는 해결방안의 하나로

시장 잠재력이 점차 증가하고 있다. 이와 관련하여 IEA(International Energy Agency)-SHC(Solar Heating and Cooling Programme) Task 25¹⁾에서는 태양열 냉방시스템의 시장진입조건 향상에 대한 연구를 1999년부터 2002년까지 수행한 바 있다.

투고일자 : 2008년 6월 24일, 심사일자 : 2008년 7월 7일, 게재확정일자 : 2008년 8월 21일,
교신저자 : 신우철(shinuc@dju.ac.kr)

현재 상용화된 대표적인 태양열 구동 냉방기술은 1중 효용 리튬브로마이드/물 흡수식 냉동기(single-effect LiBr/H₂O absorption chiller)와 진공관형 집열기(evacuated tubes collector)나 CPC(Compound Parabolic Collector) 집열기를 접목한 것으로서, 흡수식 냉동기의 재생기에 필요한 열원을 폐열이나 가스보일러 대신 태양열 집열기를 통해 공급하는 것이다. 일반적으로 1중 효용 흡수식 냉동기의 작동성능이 2중 효용에 비해 떨어지나, 구동온도가 낮고 시스템의 설치와 운전, 유지보수비가 저렴하기 때문에 태양열 냉방시스템에 적합한 것으로 알려져 있다.

최근 연구동향을 살펴보면, Florides 등^{2,3)}은 정격용량 18kW의 1중 효용 흡수식 냉동기와 집열면적 15m²의 CPC로 구성된 태양열 냉방시스템에 대한 열성능 및 경제성을 사이프러스(Cyprus) 지방의 일반주택을 대상으로 분석하였으며, Assilzadeh 등⁴⁾은 말레이시아의 아열대지방을 중심으로 3.5kW의 LiBr/H₂O 흡수식 냉동기와 35m²의 진공관형 집열기로 구성된 태양열 냉방시스템의 최적화 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 Syed 등⁵⁾은 스페인 마드리드(Madrid) 인근지역에 정격용량 35kW의 1중 효용 흡수식 냉동기와 집열면적 49.9m²의 평판형 집열기로 구성된 태양열 냉방시스템의 실증실험을 실시하고, 태양열에 의한 냉동기의 작동상태를 제시한 바 있으며, Zambrano⁶⁾ 등은 151m²의 평판형 집열기로부터 열원을 공급받는 35kW 1중 효용 흡수식 냉방시스템의 이론해석 모델을 개발하고 실증실험을 통하여 그 타당성을 검토하였다. 한편 이들 연구의 대부분이 냉방부하가 지배적인 기후조건을 기반으로 한 것으로서 연중 하절기가 상대적으로 짧은 국내의 기후여건과는 차이를 보이게 된다. 중간기나 동절기의 열부하가 없는 상태에서 냉방조건만을 고려하여 태양열 냉방시스템을 설계하는 경우 비난방기에 시스템의 과열로 인한 다양한 문제점이 야기될 수 있으며, 경제성 또한 크게 떨어지게 된다.

이에 따라 본 연구에서는 건물의 급탕부하와 일부 실의 냉·난방부하를 담당하도록 설계된 국내 최초의 태양열 냉·난방 겸용 시스템을 대상으로 열성능분석을 위한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 모델 개발과 해석을 위하여 TRNSYS를 사용하였으며, 주요 설계 변수에 따른 연간 동특성을 분석하였다.

2. 흡수식 냉동기 모델링

본 연구에서 검토한 1중 효용 흡수식 냉동기의 모델은 YAZAKI사의 WFC-SC10⁷⁾로서 제작회사의 카탈로그자료를 근거로 냉동기의 성능을 예측하였으며, 냉방능력과 동력을 응축기 입구 냉각수온도(T_C)와 재생기 유입온수온도(T_G)의 함수로 식 (1)과 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

① 냉방능력, Q_{eva} (kW)

$$Q_{eva} = a_0 + a_1 T_C + a_2 \cdot T_C^2 + a_3 \cdot T_G + a_4 \cdot T_G^2 + a_5 \cdot T_C \cdot T_G \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_0 &= -1.5349359E+2, & a_1 &= -4.4150576E-1, \\ a_2 &= -8.4674402E-2, & a_3 &= 4.4153809E+0, \\ a_4 &= -2.4499999E-2, & a_5 &= 3.0650726E-2 \end{aligned}$$

② 동력, P_{gen} (kW)

$$P_{gen} = b_0 + b_1 T_C + b_2 \cdot T_C^2 + b_3 \cdot T_G + b_4 \cdot T_G^2 + b_5 \cdot T_C \cdot T_G \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} b_0 &= 1.6435370E+2, & b_1 &= -9.6688372E+0, \\ b_2 &= 4.6679561E-2, & b_3 &= -1.7468573E-1, \\ b_4 &= 4.9107142E-3, & b_5 &= 4.2945248E-2 \end{aligned}$$

따라서 냉동기의 성능계수(COP)는 응축기 입구 냉각수온도와 재생기 유입온수온도의 함수로서 식 (3)과 같이 계산된다.

$$COP = \frac{Q_{eva}}{P_{gen}} \quad (3)$$

그림 1은 성능데이터를 근거로 흡수식 냉동기의 성능곡선을 나타낸 것이다. 재생기와 응축기의 입구온도가 각각 88℃와 31℃인 표준작동조건에서, 정격출력은 35kW와 COP 0.7이 된다.

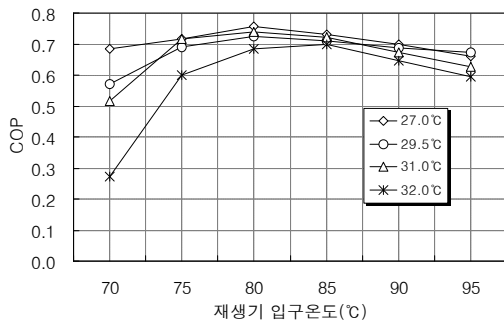


그림 1. 재생기 및 응축기 입구온도에 따른 흡수식 냉동기의 COP 변화

3. 시뮬레이션 모델

3.1 대상건물의 개요

본 연구의 태양열시스템이 설치된 대상건물은 광주광역시 서구문화센터로서 연면적 8,160m², 지하1층 지상 3층으로 2000년 1월에 준공되었다. 이 건물은 도서관과 공연장, 헬스장 등 다양한 문화시설을 갖추고 있으며, 년중 급탕사용량이 일정하고 냉·난방부하가 큰 열적 특성을 갖고 있다.



그림 2. 대상건물의 전경

그림 3은 대상건물에서 본 태양열 냉·난방시스템이 적용된 실의 평면을 나타낸 것이다. 해당 실은 3층 도서관에 위치한 열람실 1과 열람실 2로서 각 실의 최대 수용인원은 168명과 132명이다. 실의 건축구조 및 내부발열밀도, 재실자 스케줄, 급탕사용분포 등 시뮬레이션에 필요한 모든 입력자료는 현장 실사를 통하여 파악하였다.⁸⁾

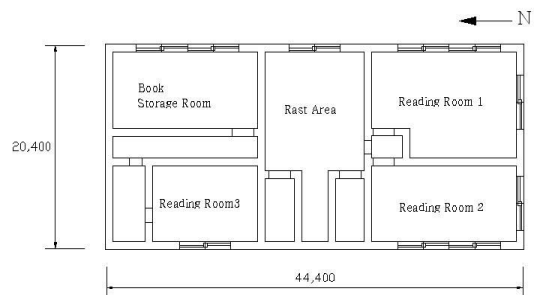


그림 3. 대상건물 평면

3.2 시스템 구성

그림 4는 태양열 시스템의 계통도를 나타낸 것이다. 진공관형 집열기와 열교환기, 흡수식 냉동기, 보조보일러, 태양열 축열조, 급탕 축열조, 축냉조, 순환펌프, 패키지에어컨 등으로 구성된다.

진공관형 집열기에서 집열된 태양열은 축열조에 저장되어, 부하조건에 따라 난방시스템이나 흡수식 냉동기의 열원으로 우선 공급되며 잉여열량이 발생하는 경우 급탕으로 제공된다. 또한 기상여건에 따라 진공관형 태양열 시스템의 작동이 원만치 않을 때는 보조열원에 의한 열량공급이 이루어져 원활한 냉난방 시스템이 가능하도록 설계되었다. 표 1은 시스템 구성의 주요 명세를 정리한 것이다.

3.3 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 태양열 시스템의 성능해석을 위한 시뮬레이션 도구로서 TRNSYS(A Transient System Simulation Program)⁹⁾를 사용하였다.

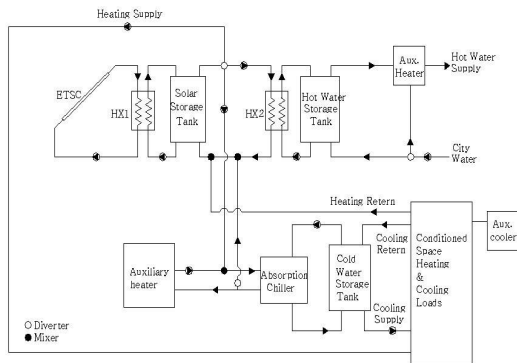


그림 4. 태양열 시스템 계통도

표 1. 시스템 구성 명세

구분	항목	명세
건물	실 면적(열람실 1)	182m ²
	실 면적(열람실 2)	151m ²
	층고	2.4m
흡수식 냉동기	정격냉방용량	35.2kW
	정격 COP	0.7
패키지에어컨	정격냉방용량	35kW
보조 보일러	정격용량	58kW
	설정온도	90℃
열교환기	태양열 열교환기 효율	85%
	냉방 열교환기 효율	85%
진공관형 집열기	집열기면적(전면적기준)	200m ²
	평균 설치경사각/방위각	23°/0°
	최고효율($F_R(\tau\alpha)$)	0.7295
축열조 용량	열손실계수($F_R U_L$)	0.72W/m ² ℃
	태양열 축열조	6m ³
	급탕 축열조	3m ³
실온제어	냉방 축열조	1m ³
	난방기준온도	22℃
태양열 시스템 제어	냉방기준온도	26℃
	제어방식	차온제어
	가동 온도차, ΔT_{on}	8℃
	정지 온도차, ΔT_{off}	3℃

4. 열성능 분석

본 연구에서는 태양열 시스템의 연간 열성능

을 2006년의 광주 기상청에서 측정한 기상자료를 기준하여 분석하였다. 표 2는 시뮬레이션의 태양열 축열조의 용도별 공급온수 온도제어범위를 나타낸 것이다. 중간기를 제외하고 난방 및 냉방 우선방식으로 시스템이 운전된다.

표 2. 용도별 공급온수 온도제어조건

항목	제어값	
난방공급 최저온수온도	45℃	
급탕	동절기((1월~3월, 12월)	60℃ 이상
	중간기	예열방식
	하절기(6월~9월)	93℃ 이상
냉방공급 온수온도범위	78~93℃	

4.1 시스템의 장기 열성능

표 3은 태양열 축열조의 취득 열량 및 용도별 공급열량을 정리한 것이다. 연간 총 집열량은 555.2GJ로서 연평균 시스템효율 46.7%를 나타내고 있다. 하절기 시스템 효율이 동절기에 비해 다소 낮은 이유는 흡수식 냉동기의 재생기 온수 공급을 위한 태양열 축열조의 온도가 높게 설정되어 집열효율이 상대적으로 떨어지기 때문이다. 연중 취득 태양열의 사용분포를 살펴보면 12.8%가 난방용으로, 22.3%가 냉방용으로, 64.9%가 급탕용으로 사용되는 것을 알 수 있다. 또한 동절기와 하절기 용도별 태양열 이용분포를 구분하면, 4월을 제외한 동절기에는 취득된 태양열의 37.5%가 난방으로 사용되고, 나머지 62.5%가 급탕으로 공급되고 있으며, 하절기에는 취득열량의 71.8%가 태양열 냉방을 위한 흡수식 냉동기에 사용되고, 나머지 28.2%가 태양열 급탕으로 나타났다. 시스템의 운전을 난방 및 냉방 우선 제어하는 상태에서 이와 같이 태양열 급탕 공급열량이 상대적으로 많은 이유는 냉·난방 시스템의 특성상, 냉·난방 공급온수 온도범위가 제한되어 잉여열량이 급탕으로 공급되고 있기 때문이다. 따라서 태양열 냉·난방 시스템 설계 시 시스템의 효율을 높이기 위해서는 중간기와 냉·난방 기간의 잉여열량 처리를 위한 급탕부하의 확보가 전제되어야 하는 것을 의미한다.

표 3. 태양열 시스템 월별 분석결과(단위:GJ)

월	집열면 일사량	총공급 열량	시스템 효율 (%)	공급열량		
				난방	급탕	냉방
1	85.5	41.9	49.0	20.4	21.5	0.0
2	91.0	44.5	48.9	18.8	25.7	0.0
3	125.1	60.1	48.0	11.2	48.9	0.0
4	105.0	51.1	48.6	0.8	50.2	0.0
5	111.1	55.2	49.7	0.0	55.2	0.0
6	112.7	46.8	41.5	0.0	15.6	31.2
7	71.9	31.6	44.0	0.0	3.7	28.0
8	112.0	51.4	45.9	0.0	12.2	39.2
9	104.7	43.0	41.1	0.0	17.3	25.7
10	117.5	56.3	47.9	0.0	56.3	0.0
11	84.3	42.4	50.3	3.8	38.6	0.0
12	67.0	30.9	46.2	16.1	14.8	0.0
합계	1188.0	555.2	46.7	71.1	360.1	124.0

표 4는 용도별 태양열 의존율을 정리한 것이다. 본 시스템의 난방 및 급탕의 태양열 의존율은 각각 84.4%와 72.4%로서 ASHRAE¹⁰⁾가 제시한 적정 시스템 설계에 해당되는 것으로 분석되었다. 또한 태양열 구동에 따른 흡수식 냉동기 공급열량은 88GJ로서 연간 냉방부하 211.1GJ 대비 41.7%의 태양열 의존율을 갖는 것으로 예측되었다. 한편 보조 보일러에 의해 흡수식 냉동기가 연속 가동할 수 있는 상태에서, 실내 패키지 에어컨이 작동하는 것은 흡수식 냉동기의 용량이 실 최대 냉방부하에 비해 다소 작은 것을 의미한다.

표 4. 용도별 태양열 의존율

용도		열량 또는 의존율	
난방	연간 난방부하	84.3GJ	
	태양열 난방 공급열량	71.1GJ	
	태양열 의존율	84.4%	
급탕	연간 급탕부하	479.2GJ	
	태양열 급탕 공급열량	360.1GJ	
냉방	태양열 의존율	72.4%	
	연간 냉방부하	211.1GJ	
	흡수식 냉동기	태양열구동	88.0GJ
		보조보일러구동	57.1GJ
	실내 패키지 에어컨	공급열량	66.0GJ
	태양열 의존율	41.7%	

그림 5는 흡수식 냉동기의 월 평균 작동 COP를 나타낸 것이다. 월별 성능차이는 거의 없으며 년 평균 COP는 0.71로서 표준운전조건($T_C = 31^\circ\text{C}$ 와 $T_G = 88^\circ\text{C}$)에서 COP가 0.7인 점을 비교할 때 작동상태가 양호한 것을 알 수 있다.

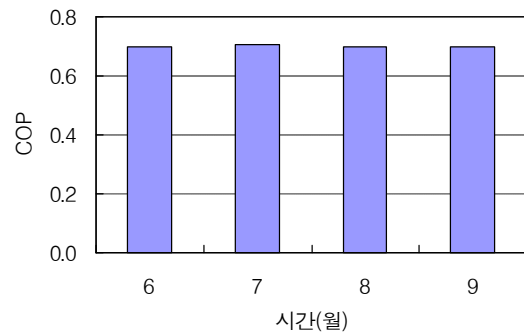


그림 5. 월별 흡수식 냉동기 작동 COP

그림 6은 8월 19일부터 25일까지 1주간의 흡수식 냉동기의 시간별 작동 COP를 예시한 것이다. 태양열 축열조의 축열여건이나 부하조건에 따라 오전이나 야간에 보조 보일러에 의해 흡수식 냉동기가 운전되고 있으며, 주간에는 태양열만으로 연속 구동되는 것을 알 수 있다. 보조 보일러 구동에 의한 작동 COP는 태양열 구동에 비해 다소 낮으나 0.7 내외의 거의 일정한 성능을 보이고 있다.

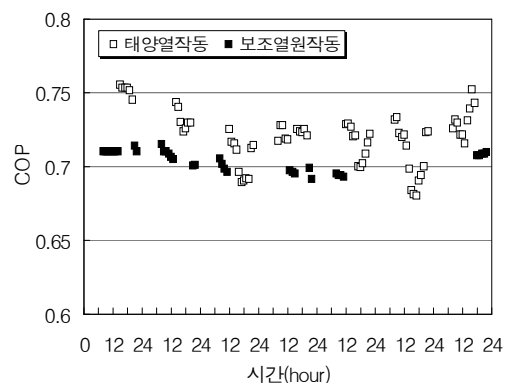


그림 6. 시간별 흡수식 냉동기 작동 COP

4.2 설계변수에 따른 시스템의 열성능

본 연구에서는 시스템의 설계변수로서 태양열 축열조와 냉방 축냉조의 용량을 검토하였다.

표 5와 그림 7은 태양열 축열조의 용량변화에 따른 용도별 공급열량과 축열조 용량 6m³ 기준 공급열량 증감률을 나타낸 것이다. 축열조 용량이 커질수록 총 공급열량이 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 용도별 분포를 살펴보면 냉방 및 난방 순으로 공급열량이 증가하고 있으나 급탕은 오히려 감소추세를 보이고 있다. 태양열 축열조의 용량이 작은 경우 축열온도 상승으로 인한 잉여열량의 급탕공급이 증가하기 때문에 난방 및 냉방공급열량은 상대적으로 줄어들기 때문이다. 태양열 급탕시스템의 태양열 축열조 용량 설계기준이 일반적으로 집열기 단위면적당 50~100kg/m²인 점을 고려할 때, 본 축열조의 설계치 30kg/m²은 다소 적은 것을 알 수 있다. 이것은 대상건물의 옥상 지붕의 구조하중을 고려하여 축열조의 용량을 다소 적게 설계했기 때문이다.

그림 8은 축냉조의 용량변화에 따른 태양열 축열조의 냉방용 공급열량의 변화를 나타낸 것이다. 축냉조 용량 1m³ 대비 6m³일 때 공급열량의 증가는 2% 미만으로서 큰 영향이 없는 것으로 분석되었다. 태양열 냉방의존율을 향상시키기 위한 방안으로서 진술한 태양열 축열조의 용량변화가 더욱 효율적인 것을 알 수 있다.

표 5. 축열조 용량에 따른 용도별 공급열량

용량 (m ³)	용도(GJ)			
	난방	급탕	냉방	총 공급열량
4	66.2	372.3	109.3	547.8
6	71.1	360.1	124.0	555.2
8	74.2	353.0	131.3	558.5
10	75.2	344.5	139.9	559.6
12	76.3	343.8	146.3	566.4
14	77.3	344.1	152.4	573.9
16	77.7	347.6	156.0	581.3
18	78.6	349.1	158.5	586.3
20	78.8	346.8	160.1	585.7

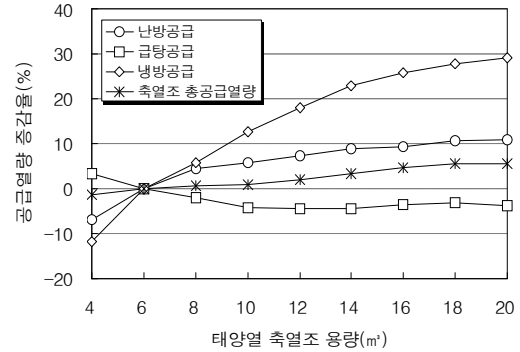


그림 7. 태양열 축열조 용량에 따른 공급열량 증감률

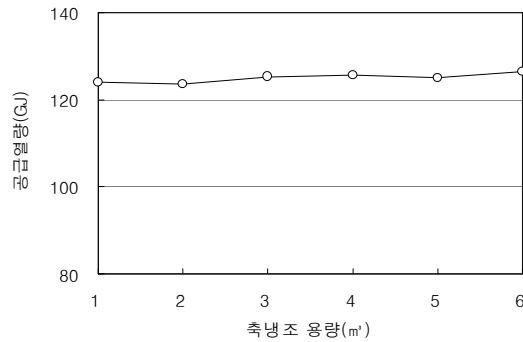


그림 8. 축냉조 용량에 따른 공급열량

5. 결 론

본 연구에서는 건물의 급탕부하와 일부 실의 냉·난방부하를 담당하도록 설계된 국내 최초의 태양열 냉·난방시스템을 대상으로 시뮬레이션을 실시하였다. 35kW의 LiBr/H₂O 흡수식 냉동기와 200m²의 진공관형 집열기로 구성된 태양열 시뮬레이션 모델 개발과 해석을 위하여 TRNSYS를 사용하였으며, 주요 설계 변수에 따른 연간 열성능을 분석하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 년 평균 시스템효율은 46.7%로 나타났다. 연간 총 집열량 555.2GJ에서 난방 및 냉방 공급열량은 각각 12.8%와 22.3%인 것으로 분석되었으며 나머지 64.9%가 급탕 공급인 것으로 나타났다.

- (2) 동절기 용도별 태양열 이용분포는 37.5%가 난방으로 사용되고, 나머지 62.5%가 급탕으로 나타났으며, 하절기에는 취득열량의 71.8%가 태양열 냉방을 위한 흡수식 냉동기에 사용되고, 나머지 28.2%가 급탕으로 공급되었다.
- (3) 흡수식 냉동기의 평균 작동 COP는 0.71로서 표준운전조건 상태의 COP가 0.7인 점을 비교할 때 작동상태가 양호한 것으로 분석되었다.
- (4) 시스템의 설계변수로서 태양열 축열조와 냉방 축냉조의 용량을 검토한 결과 태양열 축열조의 용량을 커질수록 냉방 및 난방 공급열량이 증가하고 시스템 효율이 높아지는 것으로 분석되었으며, 냉방 축열조가 시스템 효율에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.
6. D. Zambrano et al. "Mode development and validation of a solar cooling plant", International Journal of Refrigeration, Vol. 31, pp. 315-327, 2008.
7. Yazaki, WFC-SC(H) Chiller & Chiller -Heater 1: Specifications WFC- SC(H)10, 20 & 30, WFC-SC(H) Series Specifications
8. 산업자원부, 태양열 구동 흡수식 냉방시스템 실증연구, KIER-A54901, 2006.
9. University of Wisconsin-Madison, TRNSYS 15 Reference manual, 2000.
10. AHRAEA, Guide for Preparing Active Solar Heating Systems Operation and Maintenance Manuals, 1990.

참 고 문 헌

1. <http://www.iea-shc-task25.org>
2. G.A. Florides, S.A. Kalogirou, S.A. Tassou and L.C. Wrobel, "Modeling, simulation and warming impact assessment of a domestic-size absorption solar cooling system", Applied Thermal Engineering, Vol. 22, pp. 1313-1325, 2002.
3. G.A. Florides, S.A. Kalogirou, S.A. Tassou and L.C. Wrobel, "Modeling and simulation of an absorption cooling system for Cyprus", Solar Energy, Vol. 72, pp. 43-51, 2002.
4. F. Assilzadeh, S.A. Kalogirou, Y. Ali, and K. Sopian, "Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors", Renewable Energy, Vol. 30, pp. 1143-1159, 2005.
5. A. Syed et al. "A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid", International Journal of Refrigeration, Vol. 28, pp. 859-871, 2005.