

태양열을 이용한 이중진공관형 집열기와 냉동기의 열성능에 관한 연구

윤준규[†]

(원고접수일 : 2013년 1월 2일, 원고수정일 : 2013년 2월 21일, 심사완료일 : 2013년 4월 11일)

A study on the thermal performance of all glass evacuated tube collector and refrigerator using solar energy

Jun-Kyu Yoon[†]

요약: 이중진공관형 집열기는 진공기술을 이용하여 흡수면에서 대류열손실을 줄일 수 있으며, 비교적 적은 온도차에서도 열수송능력과 열응답성이 빠른 이점이 있어 유용한 기기로 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 본 연구에서는 태양열 집열기와 냉동기가 조합한 성능실험장치를 이용하여 태양열의 일사량, 유체온도의 제어조건에 따른 집열기의 동적 열성능을 파악하고, 이에 따른 항온조를 이용한 유체의 일정한 온도범위에서 냉동성능을 동시에 측정하여 열역학적 특성을 고찰하였다. 그 결과로서 집열효율의 관계식을 도출하였으며, 항온조의 출구온도 18℃와 22℃에서 집열기의 출구온도 25℃로 설정하였을 때 항온조의 출구온도 22℃ 경우가 외기온도 및 일사량이 증가함으로써 빠른 열전달특성을 보여 평균집열효율이 상승됨을 보였다. 또한 항온조의 출구온도 18℃에서 냉동기의 성능계수는 6.2~7.1 정도의 결과를 얻게 되었다.

주제어: 이중진공관형 집열기, 히트파이프, 열성능, 집열효율, 성능계수

Abstract: All evacuated tube collector is being constantly studied since it can reduce the conductive heat loss in absorber by using vacuum technology and has advantage of heat transport capacity and quick thermal response in comparatively small temperature difference. This study investigated the dynamic thermal performance of the solar collector with the control condition of solar irradiance and fluid temperature by using performance experimental apparatus which is combined with solar collector and refrigerator, examined the thermal characteristics in definite temperature range of fluid in constant temperature tank by simultaneously measuring refrigerating performance. As a result of it, I deduced the related equation of collector efficiency and found that mean collector efficiency has increased through quick heat transfer characteristics according to increase of outdoor temperature and irradiance in case of outlet temperature of constant temperature tank 22℃ when set outlet temperature of solar collector 25℃ with outlet temperature of constant temperature tank 18℃ & 22℃. Also COP of refrigerator was acquired value of 6.2~7.1 at outlet temperature of constant temperature tank 18℃.

Keywords: All glass evacuated tube collector, Heat pipe, Thermal performance, Thermal efficiency of collector, COP(Coefficient of performance)

기호설명

A_c : 집열기의 투과면적 [m^2]

[†] 교신저자 : (461-701) 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342,

가천대학교 기계.자동차동차공학과, E-mail: jkyoon@gachon.ac.kr, Tel: 031-750-5651

COP	: 냉동기의 성능계수
C_p	: 유체의 비열 [J/kg·K]
F_R	: 집열효율의 수정계수
I_c	: 집열면의 일사량 [W/m^2]
\dot{m}	: 유체의 유량 [kg/h]
T_a	: 외기온도 [$^{\circ}C$]
T_c	: 항온조의 출구온도 [$^{\circ}C$]
T_g	: 집열기 유리관의 표면온도 [$^{\circ}C$]
T_h	: 히트파이프의 표면온도 [$^{\circ}C$]
T_i	: 집열기의 입구온도 [$^{\circ}C$]
T_m	: 집열기의 입·출구의 평균온도 [$^{\circ}C$]
T_o	: 집열기의 출구온도 [$^{\circ}C$]
T_p	: 히트파이프의 표면온도 [$^{\circ}C$]
Q_c	: 냉동기의 응축열량 [kJ/kg]
Q_e	: 냉동기의 증발열량 [kJ/kg]
\dot{Q}_u	: 집열기의 집열에너지 [W/h]
W_c	: 냉동기의 압축일량 [kJ/kg]
U_L	: 열손실율 [$W/m^2 \cdot K$]
α	: 흡열관의 흡수율
η_c	: 집열기의 집열효율
τ	: 유리관의 투과율

1. 서론

지구온난화, 탄소배출 규제강화, 화석에너지의 고갈 등과 같은 용어들이 최근 국·내외적으로 중요한 화두가 되면서 신재생에너지인 태양에너지는 건물의 냉난방에너지로서 기술적인 측면에서 이용 가능성이 입증되어 경제성 확보를 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 그동안 태양열을 운수 및 급탕에 이용하고 보급하는 집열기는 열에너지를 최소의 비용으로 얻기 위한 장치로서 평판형, 진공관형, 집광형 등으로 분류할 수 있다. 이 중에서 진공관형 집열기는 진공기술을 이용하여 흡수면에서의 대류열손실을 획기적으로 줄이며, 비교적 적은 온도차에서도 열수송능력과 열응답성이 빠른 히트파이프를 사용함으로써 저·중온에서 안정적으로 작동하며 높은 집열효율을 나타내고 있다[1].

이와 관련된 태양열을 이용한 진공관형 집열기에 관련된 연구로서는 Yim과 Kim[2]은 히트파이프를 이용한 태양열 집열기의 전열특성을 파악하기 위하여 전구를 열원으로 시험하여 경과시간에 대한 집열효율을 고찰하였으며, Kim과 Lee[3]은 중심부에 열파이프를 적용하여 일사량 및 입사각 조건에 따라 반사판에 의한 집열면의 온도특성 및 열파이프의 열전달특성을 고찰하였고, Schmid et al. [4]는 집열기 유리면과 내부 금속관과의 열전달특성을 통하여 공기층의 열저항을 줄이고 전도에 의한 효과를 높이기 위하여 여러 형태의 핀을 사용하여 집열기의 성능을 개선시키는 방안을 제시하였으며, Hyun et al. [5]는 집열기의 형태를 직접순환식과 히트파이프식으로 구분하여 열성능 실험을 통하여 일사량 및 외기온도가 집열효율에 미치는 영향을 조사하여 장단점을 비교하였고, Hyun과 Chun[6]은 집열장치와 축열장치와의 결합형태에 따른 축열성능을 분석하여 최적의 결합형태를 찾아 효율증대를 도모하였다. 또한 Kwak과 Shin[7]은 건물의 급탕부하와 일부 실의 냉난방부하를 담당하도록 설계된 국내 최초의 태양열 냉난방 겸용시스템을 대상으로 주요 설계변수에 따른 연간 열성능을 분석하여 태양열의 용량이 커질수록 냉방 및 난방 공급열량이 증가하여 시스템효율을 증가함을 나타냈고, 그 외에도 태양열 집열시스템의 열성능 향상을 위하여 집열형태의 구성품 변경 및 여러 가지 운전특성 등을 고려하여 부가적으로 냉매를 적용한 열펌프 하이브리드 시스템을 개발하여 집열기의 최적설계를 위하여 많은 연구가 지속적으로 진행되고 있다[8]-[11].

본 연구는 이중진공관형 태양열 집열기와 R-12를 냉매로 사용하는 냉동기를 조합한 성능실험장치를 이용하여 실제 태양열의 일사량, 유체온도의 제어조건에 따른 집열기의 동적 열성능을 파악하고, 이에 따른 항온조의 일정한 유체의 온도범위에서 냉매를 증발시켜 냉동성능을 동시에 측정하여 열역학적 특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 적용한 이중진공관형 집열기의 구조는 **Figure 1**에 나타내고 있다.

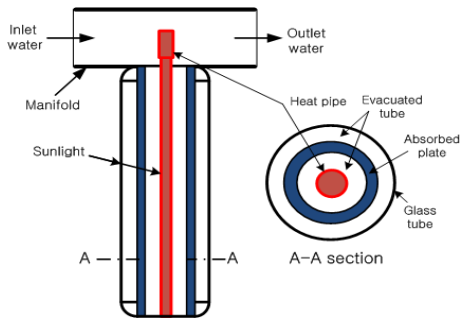


Figure 1: Schematic all glass evacuated tube solar collector with heat pipe

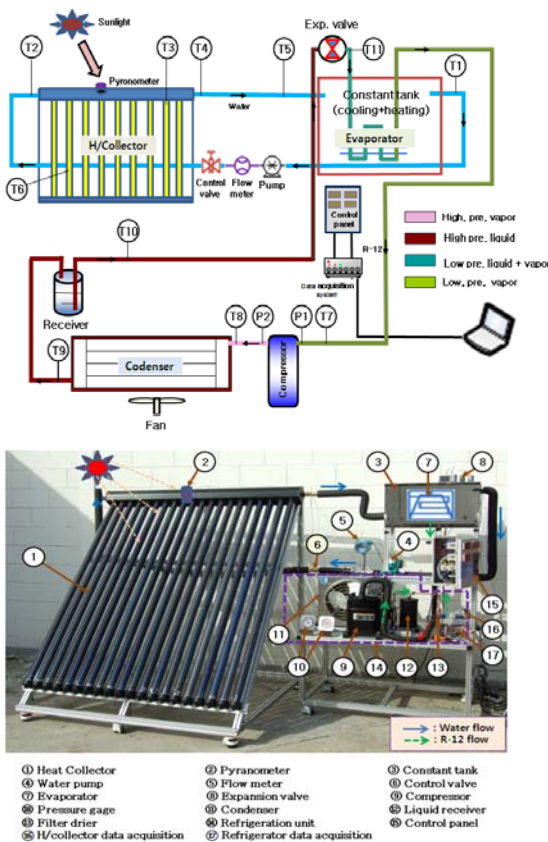


Figure 2: Schematic setup of solar collector and refrigerator experimental apparatus

일반적으로 집열튜브는 들어오는 태양에너지 전부가 손실로 인해 열에너지로 변환되지 않는다. 이 손실은 온도에 의해 받는 손실과 온도에 영향을 받지 않는 손실로 나누어 질 수 있다. 온도에 영향을 받지 않는 손실은 빛을 반사 및 흡수하는 유리관과 관련이 있다. 이 흡수관은 일반적으로 높은 흡수율과 낮은 방사율을 갖도록 특수한 코팅처리를 하는 것이 중요하며, 집열기의 특성은 크기 및 배열형식, 유체의 입·출구온도 등에 따라 성능이 달라진다. 따라서 집열기 설계시 이들 인자들에 대한 최적조건을 잘 고려하여야 만이 성능과 효율을 높일 수 있다.

Figure 2는 본 연구에 적용한 태양열 집열기 및 냉동기를 조합한 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로 집열기의 설치방향은 정남향으로 수평면에 대해 45°의 경사각을 갖도록 고정하였으며, 순간 일사량계는 집열기와 동일한 평면상에 놓이도록 설치하였다.

2.2. 실험방법

본 연구에 적용한 자동성능프로그램의 구성은 집열기는 Lab View로, 냉동기는 KTE-DA100을 이용하여 소프트웨어를 제작하였고, 각 센서데이터 값을 받아서 마이크로 컨트롤러에서 디지털 신호로 변환하여 RS232 통신케이블을 이용하여 데이터를 컴퓨터의 데이터 기록 및 시스템 모니터링 프로그램을 통하여 실시간으로 계속되도록 하였다. 실험장치의 작동원리는 태양열 집열기 출구의 온도컨트롤러의 설정온도(ΔT)에 따라 순환펌프가 작동하도록 되어 있고, 펌프의 작동에 따라 배관내의 유체는 **Figure 2**에서 나타난 바와 같이 화살표 방향으로 흐르게 되고, 집열기에서 집열된 열은 항온조로 이동하게 된다.

이 때 항온조의 유체는 냉각 유닛과 히팅 유닛에서 항온조건(냉동기, 히터 온도컨트롤러)에 따라 설정온도로 맞춰져 유체의 열적상태가 바뀌게 된다. 이러한 항온조건에 맞추기 위해 냉동기와 히터 온도컨트롤러에 의해 냉동 유닛과 히팅 유닛이 ON-OFF로 작동된다. 실험방법은 충분한 예비실험을 통하여 각부의 안정성을 육안관찰한 후 실제의

외기온도 및 일사량 조건에서 기준 냉각수량 0.055 kg/s로 설정하고, 항온조출구의 설정온도 18℃ 및 22℃에서 집열기 유체의 출구제어온도를 편차 $\Delta T=3\text{℃}$ (26.5~28.5℃)로 제어하여 집열기 및 냉동기의 각부의 온도, 냉매의 압력 등을 계측하여 집열기의 열전달률, 집열효율, 냉동기의 성능 등을 산출하여 분석할 수 있도록 수행하였다. **Table 1**은 태양열 집열기 및 냉동기 실험장치의 구성품에 대한 사양을 나타내었다.

Table 1: Specification of experimental apparatus

Components	Parameter	Specification
Heat collector (TZ58/1800)	Evacuated tube	$\phi 58 \times 1800 \text{ mm} \times 20$ (t=18 mm)
	Size (Aperture area)	1640×1980×155 mm (1.98 m ²)
	Slop	45°
	$F_R(\tau\alpha)$	0.741
	$F_R U_L$	2.747
	Heat pipe	copper tube
Flow system	Constant temp. tank	25 l (Fin coil type)
	Heater	200 W×3
	Water pump flow	Max. 30 l/min
	Flow control	Manual valve
Refrigerator	Compressor	0.74 kW
	Condenser fan motor	0.37 kW
	Evaporator	Plate type
	Exp. valve	Manual type
	Refrigerant	R-12
Transducer	Temperature	T type
	Pressure	-1~ 35 bar
Data Acquisition system	Collector	NI-cDAQ 9174
	Refrigerator	KTE-DA100

3. 실험결과 및 고찰

3.1 집열기의 집열효율 특성

집열기의 집열효율은 집열기 입구에서의 유체온도에 따라 얻어진 열량과 그 순간의 태양열 일사

량에 의한 최대 가능한 열전달량의 비로서 정의하며, KS B ISO 9806-3 기준[12]에 의해 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\dot{Q}_u}{I_c A_c} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{I_c A_c} \\ &= \frac{F_R [I_c (\tau\alpha) - U_L (T_m - T_a)]}{I_c} \\ &= F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_m - T_a}{I_c} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Figure 3는 이중진공관형 집열기를 이용하여 외기온도, 일사량, 유량, 집열기의 입·출구온도 등을 측정하여 실제 집열기의 집열효율 η 을 계산하여 $(T_m - T_a)/I_c$ 의 관계를 나타낸 것이다. 그 결과로 $(T_m - T_a)/I_c$ 가 클수록 집열효율이 감소함을 알 수 있으며, 이 값들을 선형화하여 관계식을 나타내면, $y = 0.728 - 2.534x$ 이다. 여기서 y 축의 절편값 $F_R(\tau\alpha)$ 은 0.728이고, 기울기인 $F_R U_L$ 은 -2.534임을 알 수 있어 집열기 제작사양의 $F_R(\tau\alpha)$ 과 $F_R U_L$ 이 각각 0.741과 2.747인 계수와 비교할 때 다소 편차는 있으나 대체로 비슷한 특성을 보였다. 여기서 편차가 있는 원인은 집열기의 설치위치와 외기온도에 따른 일사량의 특성, 유량조건 및 집열되는 열전달률 등의 변화에 따른 실험조건의 차이로 사료된다.

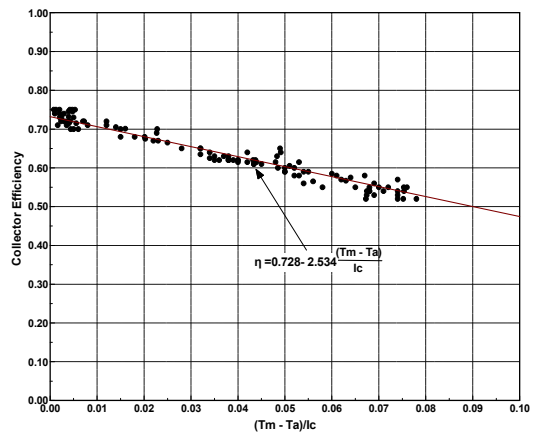


Figure 3: Efficiency characteristics of solar collector

3.2 집열기의 열전달 특성

Figure 4과 Figure 5는 집열기에 순환하는 기준 냉각수량을 0.055 kg/s로 하고, 집열기에 태양복사가 입사한 일사량조건(외기온도 25°C~27°C)에서 항온조의 출구온도를 18°C로 설정하여 집열기의 출구온도를 25°C(편차 ±1.5°C)로 제어하여 1시간동안 운전했을 때 일사량에 따른 항온조 및 집열기 각부의 온도특성과 집열기의 열전달특성을 나타낸 것이다.

Figure 4의 결과로 순환펌프가 주기적으로 집열기의 출구온도가 26.5°C 이상에서는 펌프 ON되고, 23.5°C 이하에서는 펌프 OFF됨을 알 수 있었으며, 이 때 항온조의 출구온도는 순간적인 관성에 의한 온도 히스테리시스현상으로 일정하지는 않지만 평균적으로 볼 때 대략 18°C로 제어하고 있음을 알 수 있었다.

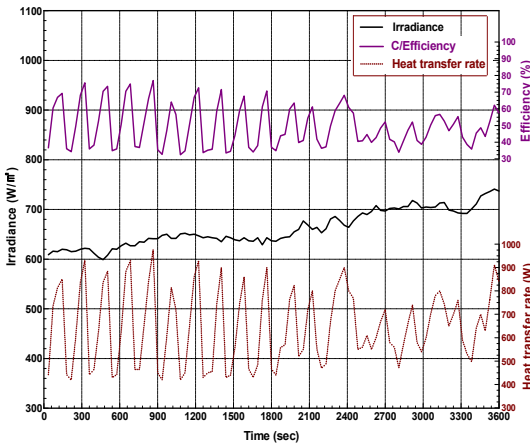


Figure 4: Temperature characteristics of solar collector at constant tank out 18°C and collector out 25°C (outdoor temp. 25°C~27°C)

Figure 5는 외기온도 25°C에서 27°C에서 집열기에 태양복사가 입사되는 태양복사강도에 따른 집열기의 집열효율 특성을 나타낸 것이다. 그 특성으로 일사량에 관계없이 집열효율 특성이 주기적으로 변하는 것은 특별히 본 실험장치에서 외부의 축열조 대신에 일정한 유체온도만을 제어하는 항온기를 이용하여 집열기 출구온도를 설정하여 순

환펌프작동이 ON-OFF되어 운전되기 때문에 정확하게 구분하여 정량분석하기에는 어려움이 있지만 펌프작동에 따른 대략적인 집열효율 특성을 고찰할 수 있었다. 그 결과로서 1시간동안 집열되는 평균열전달률은 약 647.2 W가 얻어지고, 평균일사량은 661.6 W/m²으로서 집열기의 투과면적 1.98 m²를 고려한 평균열전달률은 1309.9 W이므로 평균집열효율은 약 49.4%을 얻었다.

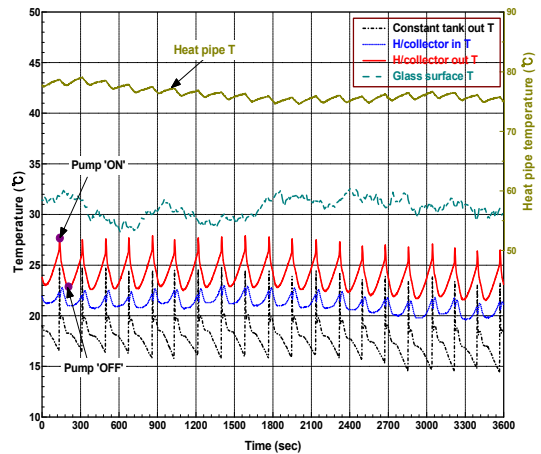


Figure 5: Heat transfer and efficiency characteristics of solar collector at constant tank out 18°C and collector out 25°C (outdoor temp. 25°C~27°C)

Figure 6와 Figure 7은 집열기에 순환하는 기준 냉각수량을 0.055 kg/s로 하고, 집열기에 태양복사가 입사한 일사량조건(외기온도 29°C~32°C)에서 항온조의 출구온도를 22°C로 설정하여 집열기의 출구온도를 25°C(편차 ±1.5°C)로 제어하여 1시간동안 운전했을 때 일사량에 따른 항온조 및 집열기 각부의 온도특성과 집열기의 열전달특성을 나타낸 것이다.

Figure 6의 결과로 Figure 4에서 나타난바와 같이 순환펌프가 주기적으로 집열기의 출구온도가 26.5°C 이상에서는 펌프 ON되고, 23.5°C 이하에서는 펌프 OFF됨을 알 수 있었으나, 항온조의 출구온도를 18°C했을 경우보다 22°C로 올려 했을 경우가 온도 상승에 따라 펌프작동시간이 빠르게 단축됨을 알 수 있었다.

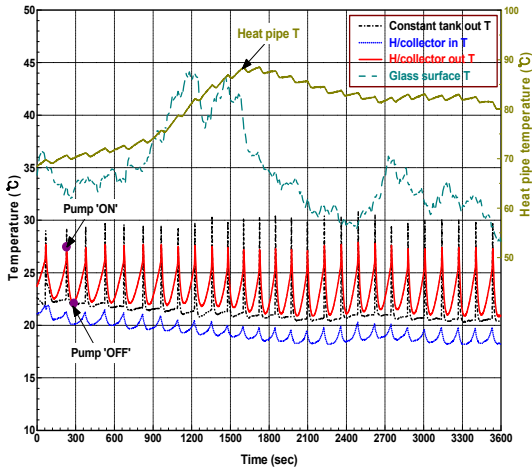


Figure 6: Temperature characteristics of solar collector at constant tank out 22°C and collector out 25°C (outdoor temp. 29°C ~32°C)

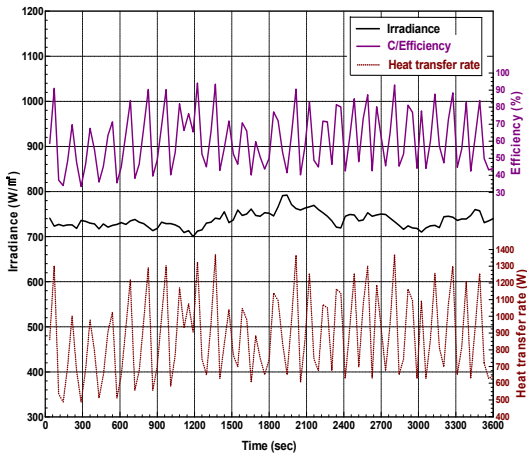


Figure 7: Heat transfer and efficiency characteristics of solar collector at constant tank out 22°C and collector out 25°C (outdoor temp. 29°C ~32°C)

Figure 7은 외기온도 29°C ~32°C 범위에서 집열기에 태양복사가 입사되는 태양복사강도에 따른 집열기의 집열효율 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 Figure 5에서 나타난바와 같이 일사량에 관계없이 집열효율 특성이 주기적으로 변함을 알 수 있었다. 따라서 1시간동안 집열되는 평균열전달률은

약 880.2 W가 얻어질 때 평균일사량 739.1 W/m² 및 집열기의 투과면적 1.98 m²를 고려한 평균열전달률은 1463.4 W로서 평균집열효율은 약 60.1%을 얻었다. 이는 항온조의 출구온도, 외기온도 및 일사량 상승에 따른 전열효과로 사료된다.

3.3 냉동기의 성능특성

태양열 집열기를 이용한 냉동기 각부의 열역학적인 특성을 고찰하기 위해 집열기에 순환하는 기준 냉각수량을 0.055 kg/s로 하고, 외기온도를 25°C ~27°C에서 항온조의 출구온도 18°C 이상이면 압축기 ON되고 18°C 이하이면 압축기 OFF되도록 설정하도록 하여 10분간 운전을 수행하였다.

Figure 8과 Figure 9는 압축기의 냉매온도와 압력의 특성 및 응축기와 팽창밸브의 냉매온도특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 냉동기가 작동하는 47초에서 429초 부근에서 불 때 정상적인 압축기전후의 온도와 압력변화는 각각 대략 45°C ~52°C 및 9.0~9.5 bar정도로 상승하고, 응축기와 팽창밸브의 온도변화는 각각 대략 45°C ~55°C 및 30°C ~35°C 정도로 감소하는 특성을 나타냈다.

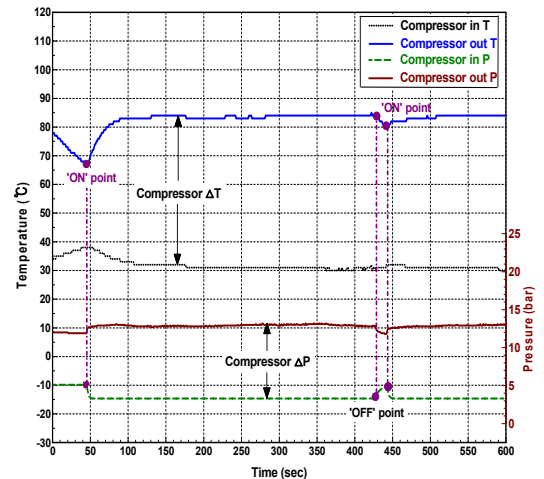


Figure 8: Temperature and pressure characteristics of compressor inlet and outlet

Figure 10은 증발기의 온도특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 냉동기가 작동하는 범위에서 불 때

항온조의 유체온도에 의한 냉매온도가 상승됨을 알 수 있으며 증발기전후의 온도변화는 대략 5°C ~ 6°C 정도로 상승하는 특성을 나타냈다

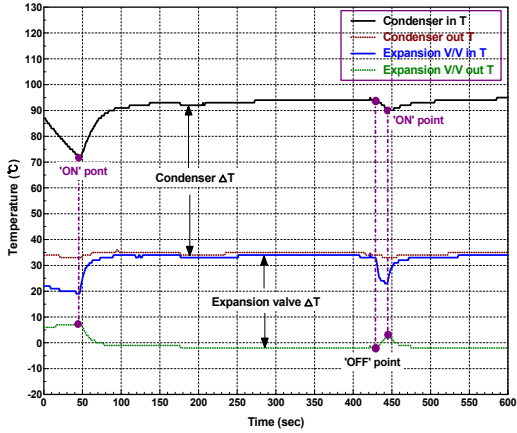


Figure 9: Temperature characteristics of condenser and expansion valve

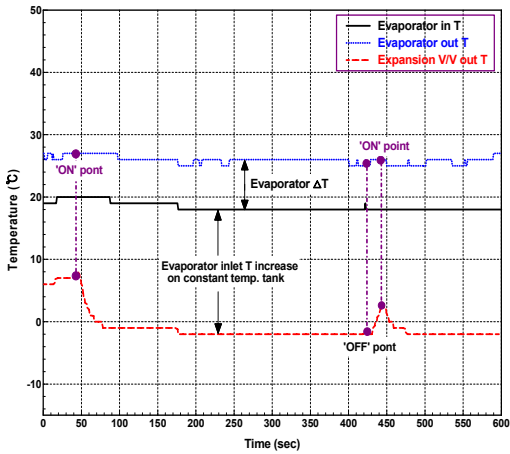


Figure 10: Temperature characteristics of evaporator

Figure 11은 냉동기 작동에 따른 압축기일량, 증발열량, 응축열량 및 성능계수의 열역학적 성능을 나타낸 것이다. 그 결과로 냉동기 작동범위에서 냉동기의 성능계수는 대략 6.2~7.1 정도로 나타났고, 냉동기 성능특성상 증발열량과 응축열량은 비례함을 알 수 있었으며, 압축기일량이 상승함에 따라

성능계수는 감소하는 서로 상반관계임을 확인할 수 있었다.

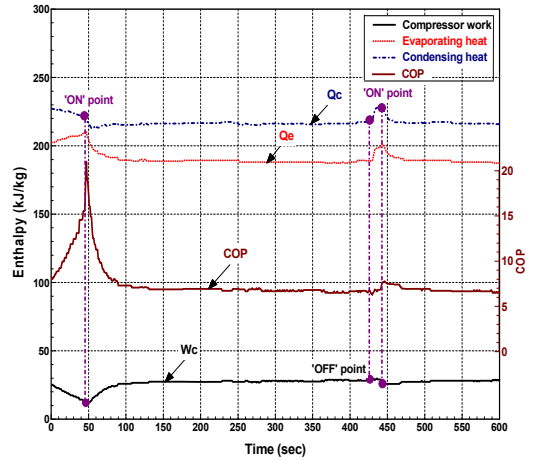


Figure 11: Performance characteristics according to compressor operation conditions

4. 결론

본 연구는 이중진공관형 태양열 집열기와 R-12 냉매로 사용하는 냉동기를 조합한 성능실험장비를 이용하여 실제 태양열의 일사량, 유체온도의 제어 조건에 따른 집열기의 동적 열성능과, 항온조를 이용한 유체의 일정한 온도에서 냉동성능 등을 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 작동유체의 기준 냉각수량을 0.055 kg/s로 설정하였을 때 이중진공관형 집열기의 효율관계식은 $\eta = 0.728 - 2.534 \cdot (T_m - T_a) / I_c$ 로 나타났다.

(2) 항온조의 출구온도를 18°C와 22°C로 하고, 집열기의 출구온도를 25°C(제어범위 ±1.5°C)로 동일하게 하였을 때 순환펌프의 작동범위는 항온조의 출구온도 22°C인 경우가 빠른 열전달특성을 보여 평균집열효율도 약 10% 이상 상승됨을 알 수 있었다.

(3) 항온조의 출구온도를 18°C로 일정하게 했을 때 냉동기의 성능특성은 성능계수가 대략 6.2~7.1 정도의 결과를 얻었으며, 압축기일량과 성능계수는 감소하는 상반관계를 나타내었다.

(4) 본 연구를 통하여 사용자의 요구에 맞게 실

시간으로 데이터 기록 및 모니터링이 가능한 자동 성능프로그램을 개발하여 제어시스템을 구축하였으며, 다양한 실험변수를 통한 정확한 성능분석이 가능하여 태양열 보일러 등의 신재생에너지를 이용한 냉난방기기의 개발에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2013년도 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임.(GCU-2013-R016)

참고문헌

- [1] H.-J. Joo, J.-B. Kim, J.-B. Kim, and K.-H. Kwak, "Thermal performance study of various heat pipe working fluid for evacuated tubular solar collector", Journal of the Korean Solar Energy Society, vol. 27, no. 4, pp. 97-98, 2007 (in Korean).
- [2] K.-B. Yim and C.-J. Kim, "A study on design and performance of a heat pipe for the application to solar collector", Journal of the Korea Society for Energy Engineering, vol. 2, no. 2, pp. 176-186, 1993 (in Korean).
- [3] C.-J. Kim and J.-S. Lee, "A fundamental study on the heat transfer characteristics of a Dewar-type evacuated glass tube solar collector with a heat pipe located at the center", Journal of the Korean Solar Energy Society, vol. 16, no. 1, pp. 39-49, 1996 (in Korean).
- [4] R. Schmid, R. E. Collins, and B. A. Pailtrope, "Heat transport in Dewar-type evacuated tubular collectors ", Journal of Solar Energy, vol. 45, pp. 291-300, 1990.
- [5] S.-T. Hyun, Y.-H. Kang, H.-K. Yoon, C.-K. Yoo, and M.-C. Kang, "A study on the thermal performance of evacuated tube collectors for process heat applications", Proceeding of Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, pp. 71-75, 2002 (in Korean).
- [6] J.-H. Hyun and W.-G. Chun, "A comparative analysis on the thermal performance of solar vacuum collector tubes", Journal of the Korean Solar Energy Society, vol. 23, no. 3, pp. 15-17, 2003 (in Korean).
- [7] H.-Y. Kawk and U.-C. Shin, "Analysis of thermal performance of a solar heating & cooling system", Journal of the Korean Solar Energy Society, vol. 28, no. 4, pp. 43-49, 2008 (in Korean).
- [8] E.-Y. Choi, Y. Kim, and T.-B. Seo, "Effects of absorber tube shape and operating conditions on thermal performance of all glass evacuated tube solar collectors", Journal of the Korean Solar Energy Society, vol. 25, no. 1, pp. 19-25, 2005 (in Korean).
- [9] P.-H. Son, B.-W. Park, Y.-S. Lee, O.-J. Lee, S.-H. Choi, and S.-H. Yoon, "A study of collecting Efficiency of flat plate solar collector by collecting angle", Proceeding of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 163-164, 2007 (in Korean).
- [10] W.-S. Kim and H.-H. Cho, "Experimental study on the operating characteristics of a solar hybrid heat pump system according to indoor setting temperature", Journal of the Korean Solar Energy Society, vol. 30, no. 6, pp. 50-58, 2010 (in Korean).
- [11] W.-S. Kim and H.-H. Cho, "Study on the performance characteristics of the solar hybrid system with heat pump operating temperature during winter season", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 22, no. 12, pp. 821-827, 2010 (in Korean).
- [12] Test methods for solar collectors, KS B ISO 9806-3, 2003 (in Korean).