

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 25, No. 2, 2005

이중진공관형 태양열 집열기의 성능시험에 관한 연구

윤영환*, 김경환**

*창원대학교 기계공학과(yhyoon@changwon.ac.kr), **창원대학교 시설과(c9837@changwon.ac.kr)

Study on Performance Testing of Concentric Evacuated Tube Solar Energy Collector System

Yoon, Young-Hwan*, Kim, Kyung-Hwan**

*Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National University(yhyoon@changwon.ac.kr),
**Division of Facilities Management, Changwon National University(c9837@changwon.ac.kr)

Abstract

Concentric evacuated tube solar energy collector has been interested recently since government has driven to install alternative energy systems in new large building. In this paper, testing of the evacuated tube collector is conducted in outdoor during daytime by transient method. The collector thermal efficiencies are plotted in term of $(T_{in}-T_a)/I_c$, where T_{in} is inlet working fluid temperature, T_a is atmospheric temperature and I_c is solar irradiation on the collector surface. The evacuated tube collector efficiency is ranged from 50% to 63% in real outdoor condition. In addition, the total overall heat loss coefficient is found to have an inverse variation to $(T_{in}-T_a)/I_c$ so that the coefficient becomes very high when $(T_{in}-T_a)/I_c$ is small.

Keywords : 이중진공관형 태양열 집열기(Concentric evacuated tube solar energy collector), 집열에너지(Energy delivery rate), 집열효율(Collector efficiency), 전체열손실계수(Overall heat loss coefficient)

기 호 설 명

A_c : Collector area [m^2]
 A_r : Absorber area [m^2]
 A_t : Projected area of a outer glass tube [m^2]
 c_p : Specific heat of water [$J/kg \cdot ^\circ C$]

F_R : Heat removal factor
 I_c : Solar irradiation on a collector surface [W/m^2]
 I_{eff} : Effective solar irradiation [W/m^2]
 mc : Effective heat capacity of collector [$J/m^2 \cdot ^\circ C$]

접수일자:2005년 5월 17일, 심사완료일자:2005년 6월 21일

- \dot{m}_c : Mass flow rate [kg/s]
- Q_L : Heat loss from a collector [W]
- q_u : Energy delivery rate of collector [W]
- T_m : Inlet working fluid temperature of collector [°C]
- T_{out} : Outlet working fluid temperature of collector [°C]
- \bar{T}_r : Mean temperature of absorber [°C]
- U_c : Heat loss coefficient of collector [W/m²·°C]
- U_{eff} : Effective heat loss coefficient of absorber surface [W/m²·°C]
- U_t : Overall heat loss coefficient [W/m²·°C]
- α_r : Solar absorptance
- η_c : Collector efficiency [%]
- τ_s : Solar transmittance

1. 서 론

현재 우리나라는 에너지원으로 화석연료나 원자력에 의존하여 모든 에너지를 해외에 의존하고 있다. 근래에 정부에서는 이들 1차에너지의 안정적 공급과 절약을 위해 정부에서는 연면적 3000 m² 이상의 새로운 건물을 신축할 때 예산의 일정 비율을 대체에너지 설비의 설치를 의무화 하고 있다. 대체에너지 설비중 태양열 온수 집열기는 주로 평판식과 진공관식으로 나눌 수 있는데 진공관식은 흐린 날씨에 열효율이 우수한 것으로 나타나 우리나라와 같이 흐린 날씨가 많은 경우에 유리한 것으로 예상하여 국내 업체에서 많은 관심을 가지고 있다. 따라서 여러 업체에서 중국산 이중진공관식 태양열 집열기를 수입하여 공급하거나 개조하여 제품을 생산하고 있다. 그러나 대부분의 중국 제품에 대해 그 성능이 규명된 바 없으며 국내 업체조차 영세하여 성능시험으로 제품의 타당성 및 태양열 시스템의 설계자료를 제시하지 못하고 있다.

태양열 집열기의 시험은 실내시험과 야외시험으로 나누거나 정상상태 혹은 비정상상태 시험으로 나눌 수 있다. 먼저 실내시험은 정상상태를 얻기 쉬우나 비용이 많이 소요될 뿐 아니라 실제 하늘 온도(sky temperature)를 실내에서 얻기 어렵다. 반면 야외시험은 실제조건과 같으나 정상상태를 얻기 어렵고 각 시험조건이 다르므로 비교를 위한 변수를 마련할 필요성이 있다.

태양열 집열기의 열효율에 대한 변수로써 Goswami¹⁾에 의하면 $(T_{in}-T_a)/I_c$ 의 변수로 정리하고 있다. 이 식에서 T_m 은 동작유체의 집열기 입구에서 온도이며 T_a 는 대기온도, I_c 는 태양복사 강도이다. Amer et al²⁾은 평판식 집열기의 비정상상태 시험에서 여러 가지 동작유체의 집열기 입구온도에 대해 위의 변수로 비교 분석하였다. Bong et al³⁾도 열파이프를 사용한 평판식 집열기의 성능시험에서 집열기의 여러 가지 연결방식에 대해 역시 위의 변수를 이용하여 분석하였다.

국내 문헌에서도 Kim and Yim⁴⁾은 열파이프가 부착된 태양열 집열기의 열전달 특성에 대한 실험적 고찰에서 위의 변수로 결과를 정리하고 Hill et al⁵⁾의 결과와 비교하였다. Beack et al⁶⁾도 태양열을 이용한 히트펌프 시스템의 분석에서 태양열 집열기의 열효율을 위의 변수를 사용하여 시스템을 설계하였다. 그러나 대부분의 국내 문헌에서는 집열기의 열효율을 단지 아침부터 저녁

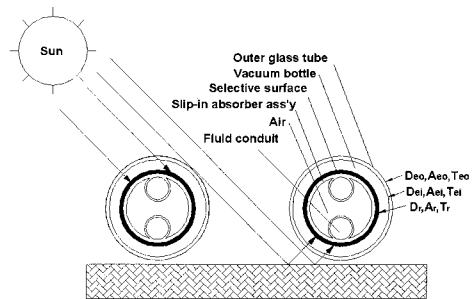


그림. 1 Schematic diagram of concentric evacuated tube solar collector

까지 시간에 대해 정리하여 상호비교가 어렵다. 그 예로 Ji⁷⁾은 시간 형상에 따른 평판형 태양열 집열기 연구의 이론 해석에서 위의 변수에 관한 식을 소개하였으나 결과 해석에서는 단지 경과시간에 따른 함수로 도시하였다. 그리고 실내시험으로 Yim and Kim⁸⁾은 열파이프를 이용한 태양열 집열기의 연구에서 전구를 열원으로 시험하고 경과시간에 대해 결과를 도시하였고, Shin et al⁹⁾도 진공관식 태양열 집열기 개발에서 역시 전구를 열원으로 하여 경과시간에 대해 결과를 정리하였는데 양자 모두 태양에너지는 짧은 파장안에 많은 복사에너지를 가지고 있으나 이에 대한 변수 정리 혹은 분석이 없다.

본 연구는 2003년 9월 4일부터 11월 5일 사이에 총 43일 동안 그림 1과 같은 이중진공관식 태양열 집열기를 사용하여, 야외에서 비정상상태로 운전하여 집열기 열성능을 $(T_{in}-T_a)/I_c$ 의 인자로 분석하고자 한다. 또한 이중진공관형 태양열 집열기에서 외기온도와 동작유체의 온도간에 열저항을 분석하고자 한다.

2. 이론적 고찰

진공관식 집열기의 열손실은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_L = U_c A_r (\bar{T}_r - T_a) \quad (1)$$

여기서 U_c 는 이중진공관의 열손실계수, T_a 는 외기온도, A_r 과 \bar{T}_r 은 크롬으로 선택적 흡수 코팅된 내부 유리관의 바깥 표면적과 평균온도를 각각 의미한다.

비정상상태에서 태양복사에너지로부터 집열기가 얻는 집열에너지(energy delivery rate)는 집열기로 입사된 태양복사에너지와 주위로의 열손실의 차이로 나타낼 수 있으며 식 (2)과 같다.

$$q_u = \tau_s \alpha_r I_{eff} A_c - U_c A_r (\bar{T}_r - T_a) - (mc) \frac{d\bar{T}_r}{dt} \quad (2)$$

여기서 I_{eff} 는 집열기에 실제 입사한 일사량, A_c 는 외부유리관의 투영면적 그리고 $(mc) \frac{d\bar{T}_r}{dt}$ 는 흡수기내에 구리관과 내부유리관을 조합시키는 알루미늄 금속박판을 포함한 집열기의 시간당 열용량의 변화이다. 위의 집열에너지는 집열기를 통과하는 유체의 질량유량을, 집열기의 입·출구 유체온도차에 의해 구할 수 있으며, 식 (3)과 같이 달리 표현할 수 있다.

$$q_u = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

식 (2)를 \bar{T}_r 대신 집열기의 입구 유체온도 T_{in} 으로 표현하기 위해 집열기 최대 열전달과 실제 열전달의 비인 열제거비(heat removal factor)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) + (mc) \frac{d\bar{T}_r}{dt}}{A_c [I_c (\tau_s \alpha_r) - U_c (T_{in} - T_a)]} \quad (4)$$

식 (3)와 (4)를 식 (2)에 대입하면 집열에너지는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$q_u = A_c F_R [I_c (\tau_s \alpha_r) - U_c (T_{in} - T_a)] \quad (5)$$

냉·난방용 태양열시스템의 성능은 집열기의 집열효율에 대부분 의존된다. 본 연구에 사용된 이중진공관형 집열기의 집열효율²⁾은 식 (6)과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_c &= \frac{q_u + (mc) \frac{d\bar{T}_r}{dt}}{A_c I_c} \\ &= \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) + \frac{d\bar{T}_r}{dt}}{A_c I_c} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (4)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (7)과 같으며, 이를 Hottel-Whillier-Bliss 방정식¹⁾이라고 부른다. 이 방정식은 집열판 내부온도와 외기온도가 같은 상태에서 시작하여 집열판 내부온도가 상승하면서 발생하는 열손실의 정도를 표현하고 있다.

$$\eta_c = F_R(\tau_s\alpha_r) - F_R U_c \frac{T_m - T_a}{I_c} \quad (7)$$

집열기 작동범위에서 F_R 과 U_c 가 크게 변하지 않는다고 가정하면 $F_R(\tau_s\alpha_r)$ 와 $F_R U_c$ 를 상수로 볼수 있다. 이 경우에 식 (7)의 집열효율은 $(T_{in}-T_a)/I_c$ 에 따라 변하는 일차식으로 생각할 수 있다. 이때 $F_R(\tau_s\alpha_r)$ 과 $F_R U_c$ 은 직교좌표계에서 y 축 절편값과 기울기에 해당한다. 일반적으로 집열효율은 $F_R(\tau_s\alpha_r)$ 은 클수록 $F_R U_c$ 은 작을수록 우수

한 집열기라 할 수 있다.

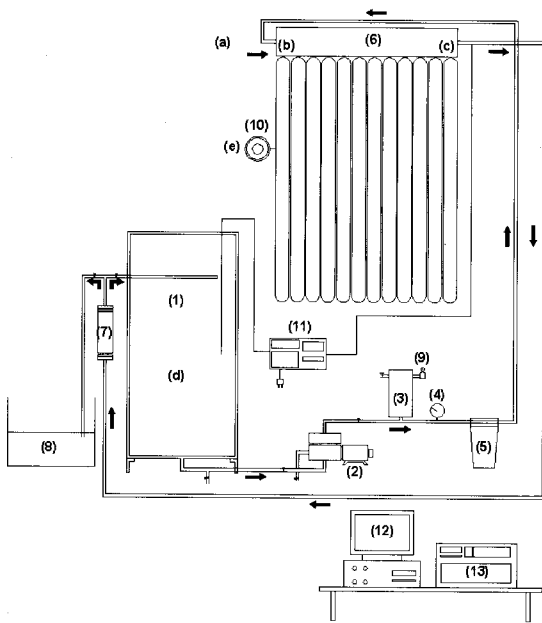
식 (2)과 식 (3)로부터 식 (8)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_c c_p (T_{out} - T_m) + (mc) \frac{d\bar{T}_r}{dt} \\ = \tau_c \alpha_r I_{eff} A_t - U_c A_r (\bar{T}_r - T_a) \end{aligned} \quad (8)$$

위 식에서 $\tau_c \alpha_r I_{eff} A_t$ 를 이중진공관에 대한 태양 복사에너지의 손실로써 U_{eff} 를 새로 정의하면 식 (9)와 같다.

$$\tau_c \alpha_r I_{eff} A_t = I_c A_c - U_{eff} A_r (\bar{T}_r - T_a) \quad (9)$$

식 (9)을 식 (8)에 대입하고, $U_t = U_c + U_{eff}$ 라 하면 식 (10)과 같이 유도할 수 있다.



No.	Equipments
(1)	Storage tank
(2)	Pump
(3)	Accumulator
(4)	Pressure gauge
(5)	Filter
(6)	Solar collector
(7)	Flow meter
(8)	Sub-tank
(9)	Safety valve
(10)	Pyranometer
(11)	Automatic control system
(12)	Computer
(13)	Hybrid recorder

No.	Measurement points
(a)	Ambient temperature
(b)	Inlet fluid temperature
(c)	outlet fluid temperature
(d)	Temperature of storage tank
(e)	Solar radiation

그림. 2 Schematic diagram of the testing apparatus for concentric evacuated tube solar thermal system

$$U_t = \frac{I_c A_c - m_c c_p (T_{out} - T_{in}) - (mc) \frac{d\bar{T}_r}{dt}}{A_r (\bar{T}_r - T_a)} \quad (10)$$

여기서 U_t 는 전체열전달계수를 의미하며, $\bar{T}_r = \frac{T_{out} + T_{in}}{2}$ 이다.

3. 실험

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 이중진공관형 태양열 집열기의 성능시험장치는 그림 2에 나타내었다. 실험에 사용된 집열기는 폭 750 mm, 높이 1600 mm의 외형치수를 가지고 있으며, 이 위에 총 12개의 이중진공관들이 장착되어 있다. 집열기와 일사량계의 경사각은 설치지점의 위도와 동일한 35° 각도로 경사시켜 정남으로 각각 설치하였다.¹⁰⁾ 태양열 시스템에서 작동유체를 안정되게 수송하기 위해 정유량펌프와 축압기(accumulator)를 사용하였고, 시스템내에서 과도한 압력이 걸리는 것을 방지하기 위하여 축압기 상부에 안전밸브(safety valve)를 설치하였다. 열저장조는 직경 420 mm, 높이 1000 mm의 원형수조로써, 재질은 스테인리스 스틸이다. 스테인리스 스틸 판사이에 단열재를 사용하여 열손실이 최소화되도록 제작하였다.

실험에 사용된 이중진공관은 서론의 그림 1에서 나타내었는데, 외부유리관은 직경 47 mm의

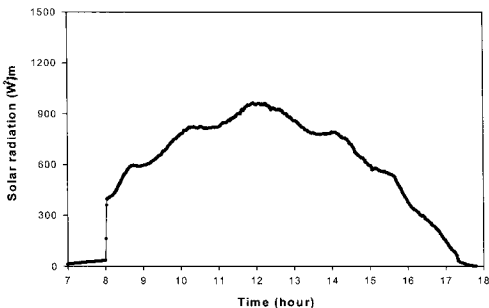


그림 3. Solar radiation per unit area of solar collector during day time (on October 24th)

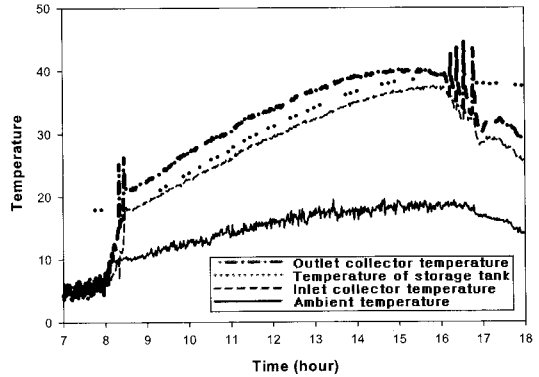


그림 4. Temperature of the system during day time (on October 24th)

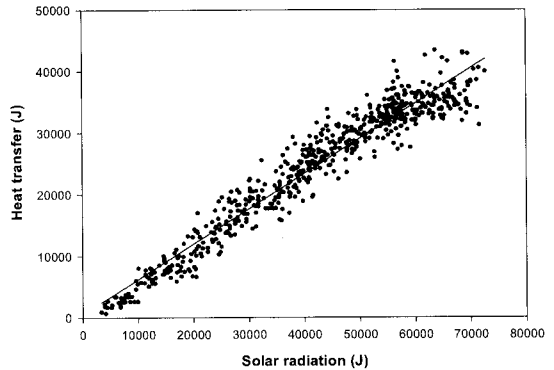


그림 5. Heat transfer according to solar radiation

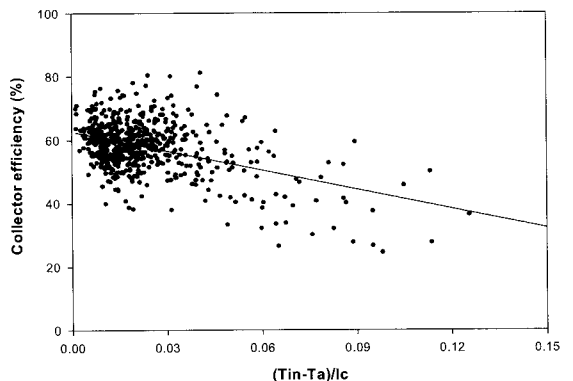


그림 6. Collector efficiency according to $(T_{in}-T_a)/I_c$

투명유리이며, 내부유리관은 직경 37 mm이고 그 외경에 크롬으로 선택적 흡수 코팅을 하여 집열기에 일사 흡수율을 최대한 높이고 방사율은 낮추려

고 했다. 그리고 이중진공관의 내부에 두개의 작은 원이 온수배관이며 그 주위에 열전도를 위한 알루미늄 금속박판이 장착되어 있다.

3.2 실험방법

본 실험에서는 집열기를 건물의 옥상에 설치(경남 창원시 : 동경 128°69', 북위 35°22')하고 열저장조 및 측정 장치 등은 실험실내에 설치하였다. 집열기와 열저장조간의 수직 거리는 9m이다. 작동유체는 물을 사용하였으며 약 1.98 l/min의 유량이 순환되도록 하였다. 그리고 열손실을 최소화하기 위해 집열기의 출구온도가 열저장조의 온도보다 높을 때만 작동하도록 설계하였다.

태양열 시스템의 측정점은 그림 2에서 (a) ~ (e) 항목으로 나타내었으며, 실험 기간은 2003년 9월 4일에서 11월 5일 사이에 총 43일 동안 일출시간(아침 7시경)부터 일몰시간(오후 6시경)까지 하였다. 매분마다의 온도 변화를 측정하여 하기 위하여 열전대를 사용하여 Hybrid Recorder에서 측정하고 또한 컴퓨터에 저장된다.

4. 결과 및 고찰

태양열 집열기의 성능시험장치는 날씨의 맑고 흐림에 영향을 받아 집열기의 출구온도와 열저장조의 온도에 따라 시스템의 작동이 결정된다.

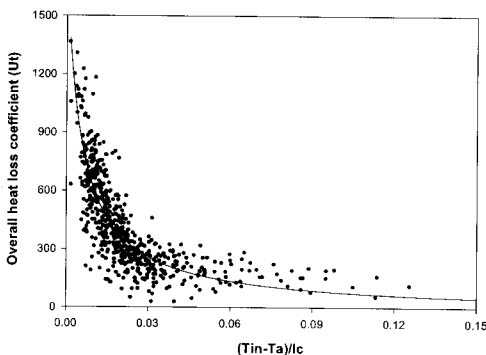


그림 7. Overall heat loss Coefficient according to $(T_{in}-T_a)/l_c$

2003년 9월 4일부터 11월 5일 사이에 총 43일 동안의 실험결과 중 한 예를 나타내면 그림 3 과 그림 4와 같다.

그림 3은 맑은 날에 집열기 단위면적당 일사량을 일출에서 일몰까지 1분단위로 나타낸 것이다. 동 그림에서 선이 부드럽게 증가하여 12시경부터 감소하는 경향을 보인다. 동 그림에서 12시경에 태양이 집열판의 정 중앙에 위치하므로 일사량이 가장 많았다는 것을 알 수 있다. 그리고 8시경에 일사량이 3분 동안 급격히 증가한 것은 지리적으로 집열기를 설치한 장소 뒤쪽으로 높은 산이 위치하고 있어서, 봄의 경우에는 산의 골짜기 부분에서 해가 뜨기 시작하지만 가을에는 산의 정상부근에서 해가 뜨기 시작하므로 일사량이 순간적으로 급격히 많아진다.

그림 4은 같은 날에 집열기에서 작동유체의 입·출구 온도, 외기온도 및 열저장조 온도를 각각 나타낸 것이다. 동 그림을 보면 집열기의 출구온도가 열저장조의 온도보다 높은 8시 20분경 시스템이 작동하기 시작하였다. 오후 4시경 이후부터는 일사량이 줄어들어서 시스템이 꺼졌다가 켜짐을 반복한다. 이는 집열기에 집열된 에너지가 열저장조 온도보다 높아지면 잠깐 작동하다가 다시 멈추고 또 다시 새로운 에너지를 집열기에 집열시켜 작동하는 것을 반복하는 것이다. 또한 오후 5시경 이후부터는 시스템이 완전히 멈추었다. 또한 시스템이 정지할 경우에 수조온도와 집열기의 입구온도가 같아야 하지만 집열판의 입구온도가 수조온도보다 약간 낮게 나타난다. 이는 보온된 배관을 유체가 통과하면서 열손실이 일어났기 때문이다.

그림 5 ~ 그림 7의 각 점들은 9월 4일부터 11월 5일 사이에 총 43일 동안 측정된 실험자료를 이용하여 30분 간격의 평균값으로 제2장의 이론적 고찰에서 소개한 수식에 의해 계산한 값들을 모은 것이다. 그리고 실선은 최소자승법으로 구하여 나타내었다.

그림 5는 태양복사에너지와 동작유체의 전열량

과의 관계를 나타낸 것이다. 동 그림의 기울기는 0.57이며, 이 기울기는 태양복사에너지가 1인 경우에 실제로 집열기내의 작동유체가 얻는 에너지가 0.57인 것을 의미한다.

그림 6는 $(T_{in}-T_a)/I_c$ 에 대한 집열기의 집열효율의 관계를 나타낸 것이다. $(T_{in}-T_a)/I_c$ 가 클수록 집열기의 열효율이 감소함을 보이고 있다. $(T_{in}-T_a)/I_c$ 가 0과 0.05사이에 밀집한 것을 볼 수 있으며, 이 범위는 태양복사강도 I_c 가 큰 부분으로써 날씨가 맑았다는 것을 알 수 있다. 동 그림의 집열효율은 50% ~ 63%의 분포를 가지며, 이 값들을 선형화하여 관계식으로 나타내면 $y = 0.63 - 2.02x$ 이다. 여기서 y 축의 절편값인 $F_R(\tau_s\alpha_s)$ 이 0.63이고 기울기인 $F_R U_c$ 은 2.02임을 알 수 있다.

그림 7은 $(T_{in}-T_a)/I_c$ 에 대한 집열기의 전체열손실계수와와의 관계를 나타낸 것이다. 동 그림에서 $(T_{in}-T_a)/I_c$ 가 클수록 집열기의 전체열손실계수가 작아지고 $(T_{in}-T_a)/I_c$ 가 적을수록 전체열손실계수가 극대화 된다. 또한 본 연구 범위에서 집열기의 전체열손실계수는 100에서 1350 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ 사이에 있으며, 이 점들을 선형화하여 관계식을 만들면

$$y = \frac{9.81175}{0.0057 + x} - 15.14 \text{이다.}$$

5. 결 론

본 연구는 동경 128°69', 북위 35°22'의 위치에서 2003년 9월 4일부터 11월 5일 사이의 총 43일 기간동안에 자료를 분석하여, 이중진공관형 태양열 집열기와 단열된 열저장조를 사용하여 비정상상태에서 적은 비용의 성능시험 장치와 실제운전 조건에서 집열기의 성능과 전체열손실계수를 구하였다.

- (1) 태양열 시스템을 순환하는 작동유체의 유량이 1.98 l/min 일때, 본 실험의 이중진공관식 집열기의 집열효율은 50 ~ 63%범위로서 평균 집열효율은 57%이었으며 열효율의

관계식은 $\eta_o = 0.63 - 2.02 \frac{T_m - T_a}{I_c}$ 이었다.

- (2) 전체열손실계수는 $(T_{in}-T_a)/I_c$ 의 역수에 비례하며, 그 관계식은 $y = \frac{9.81175}{0.0057 + x} - 15.14$ 으로서 $(T_{in}-T_a)/I_c$ 의 적어질수록 전체열손실계수가 매우 커져서 태양열 집열기로부터 열손실도 극대화 된다고 볼 수 있다.

후 기

이 논문은 2004년도 창원대학교 연구교수 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. D. Y. Goswami, F. Kreith and J. F. Kreider, Principle of Solar Engineering, Taylor & Francis, Inc., pp. 103-120, 2000.
2. E. H. Amer, J. K. Nayak and G. K. Sharma, Transient Methods for Flate-plate Collectors : Review and Experimental Evaluation, Solar Energy, Vol. 60, No. 5, pp. 229-243, 1997.
3. T. Y. Bong, K. C. Ng and H. Bao, Thermal Performance of a Flate-plate Heat Pipe Collector Array, Solar Energy, Vol. 50, No. 6, pp. 491-498, 1993.
4. C. J. Kim and K. B. Yim, An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics for a Flat Plate Solar Collector with a Heat Pipe, Proceedings of the KSME, Vol. 17, No. 5, pp. 1237-1245, 1993.
5. J. E. Hill and E. R. Streed, A Method of Testing for Rating Solar Collectors

- based on Thermal Performance, Solar Energy, pp. 421-429, 1976.
6. N. C. Beack, J. K. Lee and B. H. Song, Performance of Dual Source Heat Pump System with Solar-assisted Evaporator, Proceedings of the SAREK, Summer Annual Conference, pp. 1334-1338, 2001.
 7. M. K. Ji, H. M. Jeong, H. S. Chung and C.I. Lee, Optical Design of Flate Plate Solar Collector by the Riser Type, Proceedings of the Korean Journal of Air-Conditioning and refrigeration Engineering, Winter Annual Conference, pp. 675-681, 2000.
 8. K. B. Yim, and C. J. Kim, A Study on Design and Performance of a Heat Pipe for the Application to Solar Collector, Energy Eng. J., Vol. 2, No. 2, pp. 179-186, 1993.
 9. J. H. Shin, C. S. Yi and K. Y. Bae, development of Evacuated Glass Tube Solar Collector, '02 Transaction of Energy Technical Development Workshop, Gyeongsang National University, 2002.
 10. L. Norbert, Heating, Cooling, Lighting Design Methods for Architects, John Wiley & Sons, Inc., pp. 172-200, 1991.