

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 4, 2007

단일 진공관형 집열기 히트파이프 작동유체에 따른 열성능 연구

주홍진*, 김정배**, 김종보***, 곽희열****

*인하대학교 기계공학과 대학원(joo@inhaian.net), **한국에너지기술연구원(hykwak@kier.re.kr)

인하대학교 기계공학과(cbkim@inha.ac.kr), *한국에너지기술연구원(hykwak@kier.re.kr)

Thermal Performance Study of Various Heat Pipe Working Fluid for Evacuated Tubular Solar Collector

Joo, Hong-Jin*, Kim, Jeong-Bae**, Kim, Jong-Bo***, Kwak, Hee-Youl****

*Dept. of Mechanical Engineering, Inha University(joo@inhaian.net)

**Korea Institute of Energy Research, Renewable Energy Research Dept(doctorjkb@kier.re.kr)

***Dept. of Mechanical Engineering, Inha University(cbkim@inha.ac.kr)

****Korea Institute of Energy Research, Renewable Energy Research Dept(hykwak@kier.re.kr)

Abstract

This study was carried out to compare the thermal performance and operating characteristics of evacuated tubular solar collector(ETSC) with different working fluid. The evacuated tubular solar collectors with different working fluid of heat pipe were investigated in the same operating condition for a indoor experiment equipment. First, the result of working fluid with Water showed that $F_R(\tau\alpha)$ was 0.6636 and $F_R U_L$ was -1.8457. Second, Ethanol showed that $F_R(\tau\alpha)$ was 0.6147 and $F_R U_L$ was -0.6365. Third, Flutec-pp9 showed that $F_R(\tau\alpha)$ was 0.515 and $F_R U_L$ was -3.2313. Finally MA's showed that $F_R(\tau\alpha)$ was 0.6572 and $F_R U_L$ was -2.0086.

Keywords : 진공관형 태양열집열기(Evacuated tubular solar collector), 열성능(Thermal performance)
히트파이프 작동매체(Heat pipe working fluid), 집열 효율(Collector efficiency)

접수일자 : 2007년 10월 29일, 심사완료일자:2007년 12월 10일

교신저자 : 곽희열(hykwak@kier.re.kr)

기 호 설 명

- \dot{m} : Mass flow rate [kg/s]
- C_p : Specific heat [J/kg · °C]
- A_C : Aperture area [m²]
- I_T : Irradiation on a collector surface [w/m²]
- T_{in} : Inlet temperature [°C]
- T_{out} : Outlet temperature [°C]
- T_a : Ambient temperature [°C]
- T_{cl} : Heat Pipe condenser temperature [°C]
- F_R : Heat removal factor
- U_L : Overall heat loss coefficient [w/m²°C]
- $\tau\alpha$: Transmittance-absorptance product
- η : Efficiency [%]

1. 서 론

태양열 집열 기술 중에서 단일 진공관형 집열기는 진공기술을 사용함으로써 흡수면에서의 대류 열손실을 획기적으로 줄일 수 있다. 또한 비교적 적은 온도차에서도 열 수송능력과 열응답성이 빠른 고효율 전열소자인 히트파이프를 사용함으로써 중온범위에서 안정적으로 작동하며, 높은 집열 효율을 나타낸다. 진공관형 집열기에 응용되는 히트파이프는 용기의 재료 및 작동유체의 종류, 모세관 구조물의 종류, 액체의 귀환방법, 내부의 기하학적 형태, 작동온도, 충전량 등에 따라 다양하게 분류 될 수 있으며, 이에 따른 히트파이프에 미치는 성능 변화에 대한 선행연구¹⁾²⁾³⁾가 있었다.

현재 상용화 되어있는 단일 진공관형 집열기의 히트파이프 작동유체는 일반적으로 물과 에탄올을 사용한다. 히트파이프의 작동유체로써 가장 많이

사용되는 물은 그림 1에 나타낸 바와 같이 여러 가지 작동유체 중에서 높은 Merit number를 갖는 작동유체이며, 사용온도 범위가 20°C ~ 200°C까지 사용 가능한 대표적인 히트파이프 작동유체이지만 동결기 결빙에 대한 문제가 고려되고 있다. 또한, 에탄올은 사용 온도범위가 -30°C ~ 140°C로 비교적 결빙 현상으로 인한 문제는 적은 반면 히트파이프가 200°C이상으로 과열이 될 경우 구리와 화학적 반응에 의해 불응축 가스가 발생하여 히트파이프의 성능을 감소시킨다.

히트파이프를 태양열 집열기에 적용할 목적으로 설계 할 때는 태양열 집열기의 정체온도(stagnation temperature)를 고려해야 하며, 일반적으로 평판형 집열기는 약 180°C, 진공관형 집열기는 약 260°C로 알려져 있다.

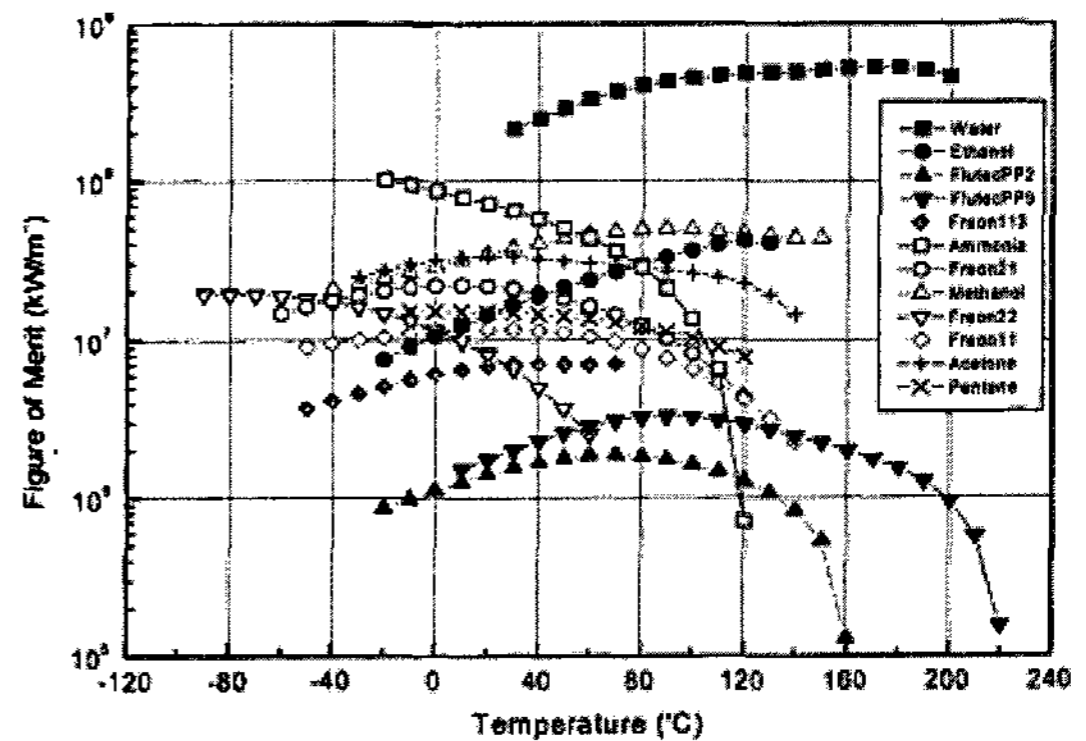


그림 1. 작동매체 종류에 따른 Merit number

본 논문에서는 진공관형 태양열 집열기 히트파이프에 적용될 수 있는 몇 가지 작동유체를 선정하였으며, 그에 따른 집열기의 동특성 및 집열기의 열성능 연구를 수행하였다. 연구에 사용된 작동유체는 물, 에탄올, Flutec-PP9 MA(MA라고 가칭한 작동유체는 MSDS⁴⁾ 및 KDB⁵⁾에 따르면

1) 광희열, 산업용 고효율 태양열집열기 개발 필요성, Solar Energy Vol. 18, No. 2, 1998
 2) 광희열 외, 산업용 진공관형 태양열 집열기 개발, KIER-A04622, 산업자원부, 2000
 3) 부준홍, 정원복, 광희열, 2002, "확관 응축부를 갖는 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프 성능 비교 연구", 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 4, pp.18-25.

4) MSDS (물질안전보건자료, Material Safety Data Sheets)
 5) KDB (한국화학공학연구정보센터, Korea Thermophysical Properties Data Bank)

사용 온도 범위가 $-98^{\circ}\text{C} \sim 233^{\circ}\text{C}$ 로 동결기 결빙 현상에 의한 히트파이프 파손우려가 없고, 구리와 화학적 반응을 일으키지 않아 불응축 가스가 발생되지 않으며, 인체에 무해한 작동매체이다.) 이며 각각의 집열기를 동일한 실험 조건 하에 열성능을 분석하기 위해 외부 환경에 영향을 받지 않는 실내 실험 장치를 설계 및 제작하여 실험적으로 집열기의 동특성 및 열성능을 측정하였고, 이를 통해 히트파이프의 작동유체가 집열기의 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였으며, 진공관형 태양열 집열기 히트파이프 작동매체에 따른 집열기 설계에 유용한 데이터를 확보하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

그림 2는 태양열 집열기 실내 실험 장치를 나타낸 것이다. 실험 장치는 다음과 같은 설계조건에 만족 하도록 설계 하였다.

- 항상 일정한 실험조건
- 외기 환경에 영향을 받지 않는 실내 실험 장치
- 태양에너지에 준하는 인공광원
- 진공관형 집열기의 특성에 적합한 실험 장치
- Ashrae-Standard에 준하는 실험 장치

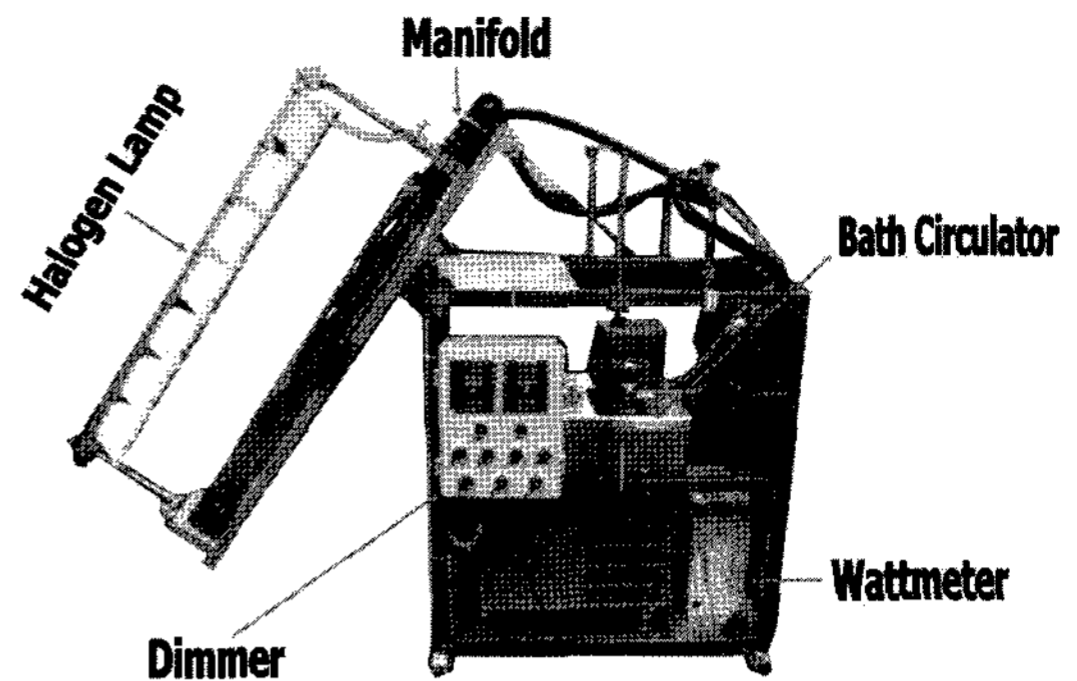


그림 2. 집열기 실내 실험장치

그림 3은 실험장치의 데이터 수집 및 모니터링 화면을 나타낸 것이다. 실험장치의 구성은 인공광원, 항온 수조(Bath circulator), 단일 진공관형 집열기, 매니폴더, 유량계, 조광기, Wattmeter 로 구성되었다. 태양에너지를 대신하는 인공광원으로는 Philips사의 300W 할로겐램프 7개를 사용하였으며, 3 kW 조광기를 사용하여 광원의 세기를 제어하였다. 일사량은 Eppley사의 PSP Radiometer를 사용 하여 $\pm 0.5 \text{ W/m}^2$ 범위에서 일사량을 측정하였다. 또한 단일 진공관형 집열기의 특성상 집열기 각도에 따라 열성능이 변하므로 집열기의 각도를 조절 할 수 있도록 수동 각도 조절장치를 장착하였다.

표 1. 집열기 사양

Collector No.	Length	Diameter	Aperture area	Heat pipe working fluid charging	Heat pipe working fluid
C-1	1200mm	100mm	0.12m^2	14cc	Water
C-2	1200mm	100mm	0.12m^2	14cc	Ethanol
C-3	1200mm	100mm	0.12m^2	14cc	Flutec pp9
C-4	1200mm	100mm	0.12m^2	14cc	MA

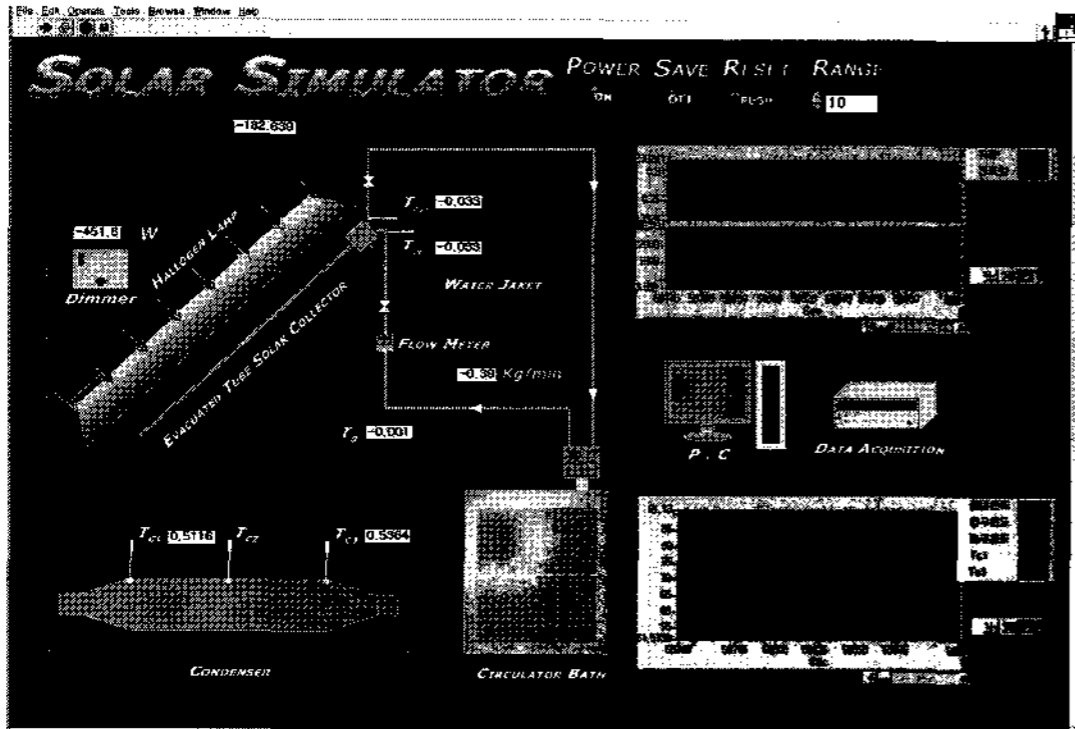


그림 3. 데이터 수집 및 모니터링

본 실험에 사용된 단일 진공관형 집열기의 사양은 표 1과 같다. 집열기의 외부 형상 및 집열 판의 면적, 응축부의 길이, 유리관의 직경, 히트파이프 작동유체 충전량은 네 가지 집열기 모두 동일한 치수로 제작 되었으며, 히트파이프의 작동 유체의 종류만 다르게 제작되었다.

2.2 실험방법

히트파이프의 작동매체 종류에 따른 단일 진공관형 집열기의 열성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서 동일한 실험 조건하에 네 가지 집열기에 대한 실험이 수행되었다.

집열기의 성능 실험 조건으로는 일사량 $850\text{W}/\text{m}^2 (\pm 20\text{W}/\text{m}^2)$, 유량 0.3LPM , 입구온도(25°C , 40°C , 60°C , 80°C)가 일정한 상태에서 매니폴더의 입·출구 온도차의 변화를 바탕으로 집열기의 성능을 알아보았으며, 또한 단일 진공관형 집열기의 특성상 집열기 설치 각도에 따라 성능의 변화가 나타나므로 집열기 설치각도를 20° , 40° , 60° 로 변화 시켜가며 실험하였다. 인공광원의 일사량 측정은 인공광원과 집열기의 수직거리인 400mm 에서 PSP radiometer를 고정 시킨 후 30분 동안 측정된 일사량을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 집열기 동(시동)특성

단일 진공관형 집열기 히트파이프 작동유체의 종류에 따라 인공광원으로부터 집열기에 일사($870\text{W}/\text{m}^2$)가 가해진 순간부터 매니폴더의 출구 온도차가 0.05°C 이하 상태로 유지되는 정상상태 도달 시간을 나타내었다. 정상상태 도달 시간은 히트파이프의 작동유체와 밀접한 관계를 유지하고 있으며 정상상태 도달 시간이 빠를수록 집열기와 열매체간의 열전달이 안정적으로 이루어지는 것을 의미한다.

그림 4는 집열기 경사각 40° 에서 히트파이프의 작동유체로 물을 사용했을 경우의 시동특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 물을 사용했을 경우 히트파이프가 정상상태에 도달하는 시간은 180 초로 나타났으며, 정상상태에서의 매니폴더의 입·출구 온도차는 3.3°C 로 분석되었다.

그림 5는 같은 실험 조건에서 에탄올을 작동유체로 사용했을 경우 집열기의 시동특성을 나타낸 것이다. 에탄올은 정상상태 도달 시간이 490초로 나타났으며 이때 매니폴더의 입·출구 온도차는 3.03°C 로 나타났다.

그림 6은 Flutec-pp9을 작동매체로 사용한 경우의 집열기 시동특성을 나타낸 것이다. Flutec-pp9은 정상상태 도달 시간이 370초로 나타났으며 이때 매니폴더의 입·출구 온도차는 2.48°C 로 나타났다. Flutec-pp9의 경우 밀도가 물의 2배, 끓는점이 155°C 로 매우 높아 히트파이프의 성능이 낮은 영역에서 낮게 나오는 것으로 사료된다.

그림 7은 MA를 작동매체로 사용한 경우의 집열기 시동특성을 나타낸 것이다. MA의 경우 집열기가 정상상태에 도달 시간이 300초가 소요되었으며, 정상상태에서의 Manifold 입·출구 온도차는 3.19°C 로 나타났다.

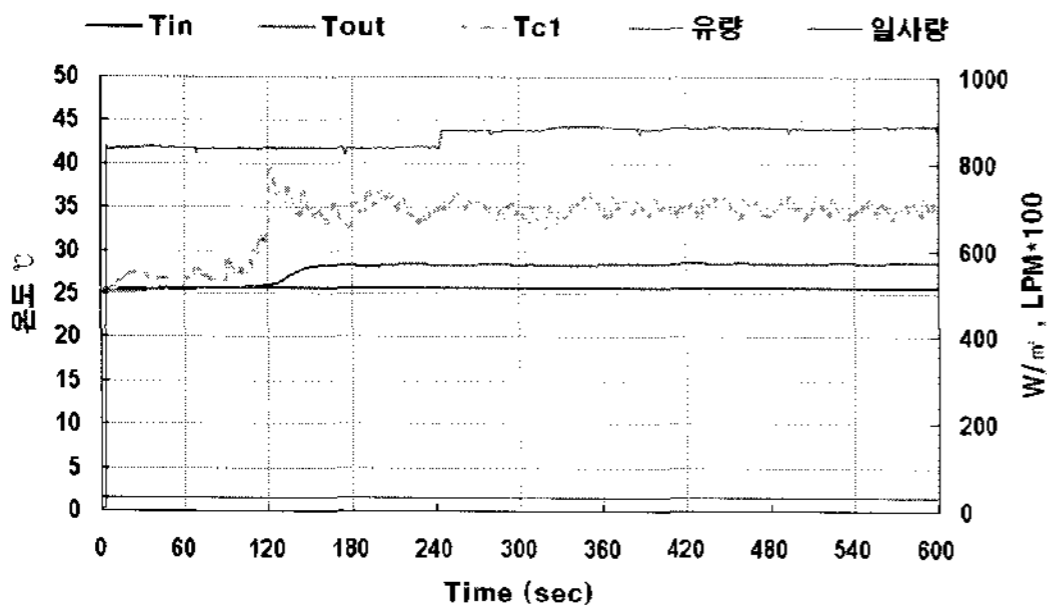


그림 4. 물의 시동특성

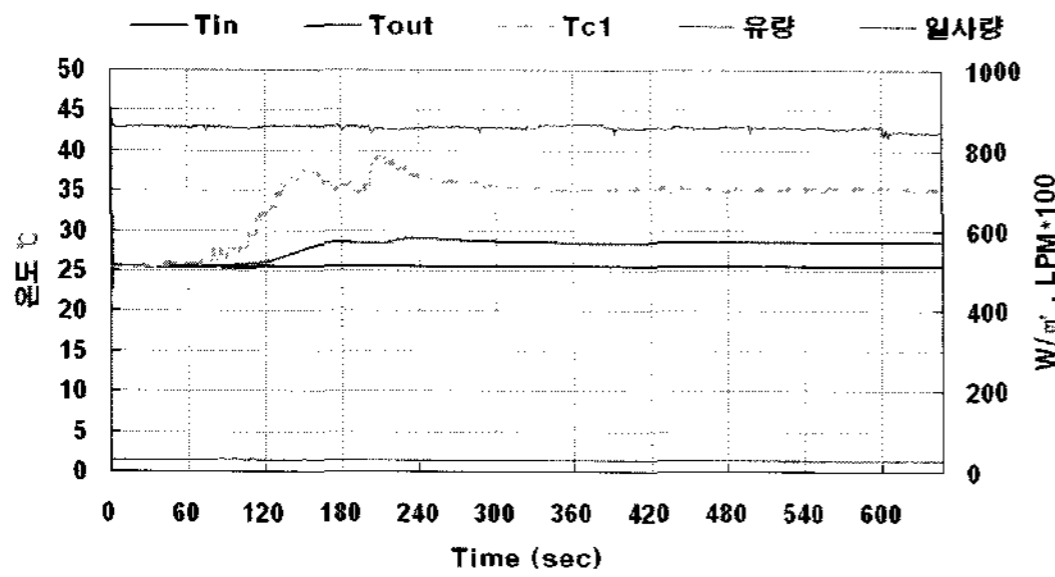


그림 5. 에탄올의 시동특성

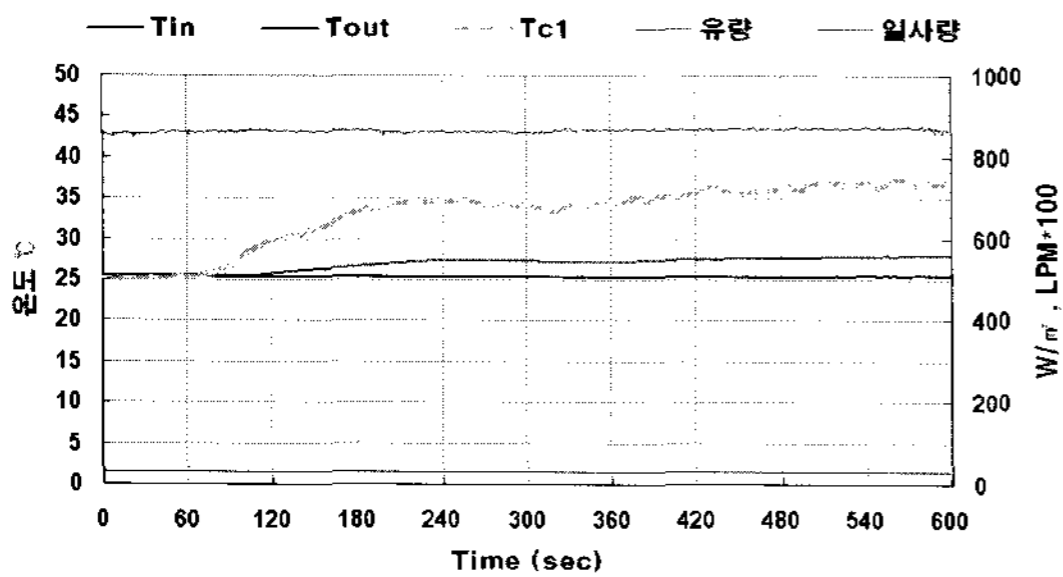


그림 6. Flutec-pp9의 시동특성

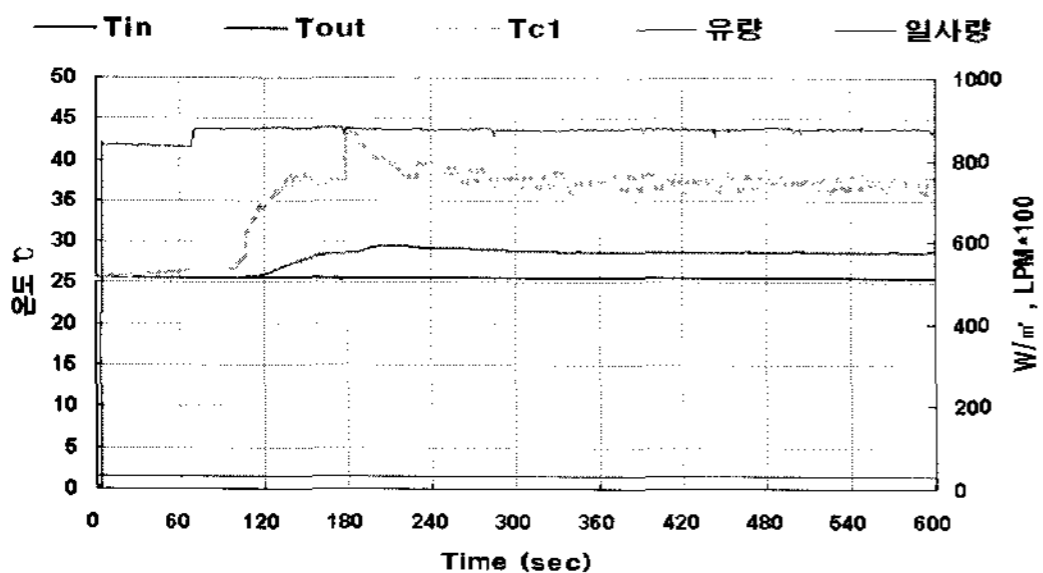


그림 7. MA의 시동특성

표 2는 집열기 경사각 40°에서 입구 온도(25°C, 40°C, 60°C, 80°C)에 따른 집열기의 동특성을 나타낸 표이다.

표 2. 작동유체에 따른 집열기 동특성

조건	작동 유체	q (W)	Time (초)	유량 (LPM)	ΔT (°C)	입구 (°C)	출구 (°C)
입구 온도 25°C 경사각 40°	물	69.2	180	0.3	3.30	25.46	28.76
	에탄올	69.7	490	0.3	3.33	25.64	28.50
	Flutec-pp9	21.9	370	0.3	2.48	25.38	27.86
	MA	66.5	300	0.3	3.19	24.99	28.18
입구 온도 40°C 경사각 40°	물	61.4	290	0.3	2.93	39.43	42.36
	에탄올	56.6	360	0.3	2.68	40.21	42.89
	Flutec-pp9	54.5	340	0.3	2.61	39.39	42.01
	MA	59.8	480	0.3	2.92	39.52	42.44
입구 온도 60°C 경사각 40°	물	46.5	410	0.3	2.22	58.99	61.21
	에탄올	52.2	410	0.3	2.49	60.67	63.20
	Flutec-pp9	36.9	380	0.3	1.78	58.75	60.53
	MA	46.5	540	0.3	2.22	58.99	61.21
입구 온도 80°C 경사각 40°	물	39.6	500	0.3	1.92	78.66	80.59
	에탄올	41.4	280	0.3	2.00	79.67	81.67
	Flutec-pp9	24.2	400	0.3	1.18	78.81	79.99
	MA	37.9	360	0.3	1.82	79.70	81.52

3.2 집열기 효율 곡선

집열기의 효율은 흡수표면 전체에 걸친 일사량과 실제 열전달률의 비이며 태양열 집열기의 효율은 KS6) 기준에 의해 식(1)과 같이 집열기 입구에서의 유체 온도, 주위 온도, 그리고 일사량으로 이루어진 종속변수로서 표시되어 진다.

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A_c I_T}$$

6) 태양열 집열기 성능시험을 위한 KS 기준, KS Standard #9806-3

$$\begin{aligned}
 &= \frac{F_R [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)]}{I_T} \\
 &= F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{I_T} \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

집열기 성능 시험은 투과면적(Aperture area)의 크기에 따라 결정되는 유량 (집열기 단위 투과면적당 0.02 kg/s)으로 고정된 상태에서 수행되어 지므로, 집열기 입구에서의 유체 온도에 따라 얻어진 열량과 그 순간의 태양열 일사량에 의한 최대 가능 열전달량의 비로서 나타나게 된다. 이렇게 얻어진 입구온도에 따른 효율 결과를 그래프 상에 표시하고, 표시된 결과를 이용하여 수식화하여 식 (1)의 형태로 나타내게 된다. 식 (1)에서 보듯이 F_R 과 총열관류율 U_L 의 곱의 항은 집열기의 손실에 관련된 항이라 할 수 있으며, $F_R(\tau\alpha)$ 는 집열기의 열 획득에 관련된 항이라 할 수 있다. 집열기 열성능은 일사량과 대기온도, 작동유체 유입온도와 연계된 순간 효율 값에 의해 결정된다. 모든 측정값들은 준 정상상태에서 측정되며, 얻어진 Data로 식 (1)를 이용하여 집열기 효율을 얻는다.

그림 8부터 그림 10까지는 집열기 설치 경사각이 20°, 40°, 60°에서 각각의 집열기 효율 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 히트파이프 작동유체 중에서 효율이 가장 높은 것은 물로 나타났으며, 이는 세 종류의 작동매체 중 Merit number가 가장 높기 때문으로 사료된다. 또한 에탄올의 경우 낮은 영역에서는 비교적 효율이 낮게 나타난 반면 높은 온도에서는 효율의 감소가 적어 작동매체 중에서 $F_R U_L$ 값이 -0.6365(집열기 경사각 40°)로 가장 적게 나타났다. MA의 경우 낮은 영역에서는 효율이 에탄올 보다 높은 반면 높은 영역에서는 비교적 적은 효율 값으로 물이나 에탄올에 비해 상대적으로 효율곡선의 기울기 값이 크게 나타났다.

Flutec-pp9의 경우 위에서 언급한 바와 같이 밀도와 끓는점 및 점성이 높아 히트파이프 내에서 증발된 기체가 응축되어 다시 증발부로 되돌아가는 상변화 과정이 경사각이 작을수록 원활하지 못하기 때문에 경사각에 따른 집열기 효율 변화가 매우 뚜렷하게 나타난 것으로 사료된다.

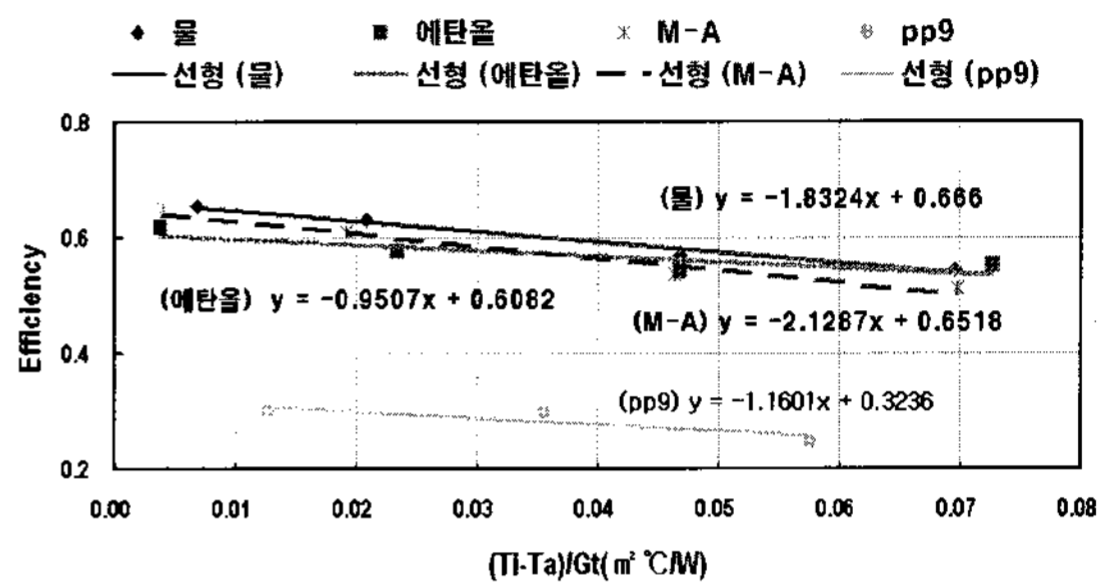


그림 8. 경사각 20°에서의 집열기 효율곡선

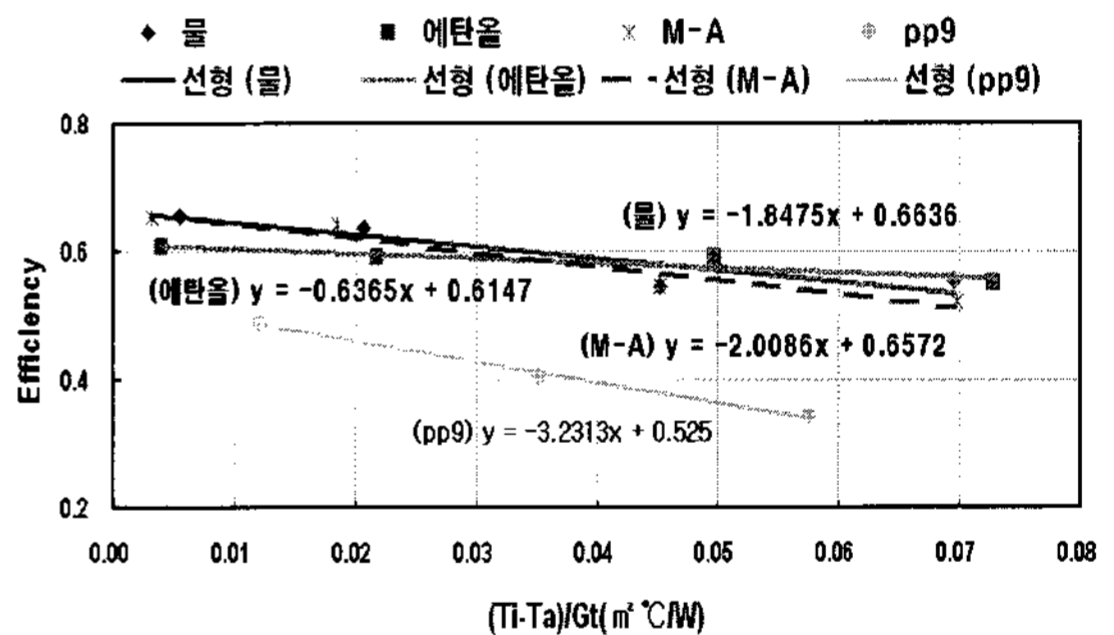


그림 9. 경사각 40°에서의 집열기 효율곡선

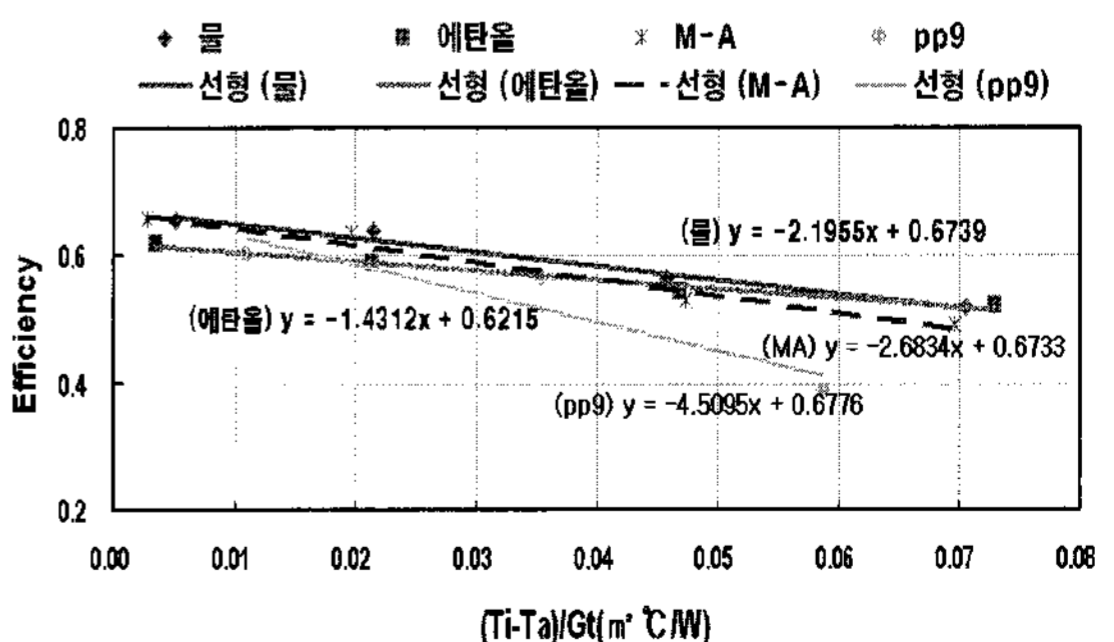


그림 10. 경사각 60°에서의 집열기 효율곡선

4. 결론

본 논문에서는 히트파이프의 작동유체 종류에 따른 단일 진공관형 집열기의 열성능 실험을 수행하기 위해 네 가지(물, 에탄올, Flutec-pp9, MA) 각각의 다른 작동유체를 사용한 집열기를 제작하였으며, 각각의 집열기를 동일한 실험 조건 하에 열성능을 분석하기 위해 외부 환경에 영향을 받지 않는 실내 실험 장치를 설계 및 제작하여 실험적으로 집열기의 열성능 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 집열기 경사각이 40°일 때 MA를 히트파이프의 작동유체로 사용한 단일 진공관형 집열기의 $F_R(\tau\alpha)$ 는 0.6572, $F_R U_L$ 는 -2.0086로 나타났으며, 물을 사용한 집열기의 $F_R(\tau\alpha)$ 는 0.6636, $F_R U_L$ 는 -1.8457, 에탄올을 사용한 집열기의 $F_R(\tau\alpha)$ 는 0.6147, $F_R U_L$ 는 -0.6365, Flutec-pp9을 사용한 집열기의 $F_R(\tau\alpha)$ 는 0.525, $F_R U_L$ 는 -3.2313으로 나타났다.
- (2) 단일 진공관형 집열기의 히트파이프 작동유체로 구리와 화학적 반응이 없어 불응축 가스가 생기지 않으며, 사용온도범위가 넓은 MA를 사용할 경우 안정적으로 작동되는 것으로 나타났다.

- (3) 단일 진공관형 집열기 히트파이프의 작동매체로 Flutec-pp9를 사용한 경우 밀도와 끓는점 및 점성이 높아 집열기 효율이 집열기 설치 경사각에 따라 매우 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 광희열, 산업용 고효율 태양열집열기 개발 필요성, Solar Energy Vol. 18, No. 2, 1998
2. 광희열 외, 산업용 진공관형 태양열 집열기 개발, KIER -A04622, 산업자원부, 2000
3. 부준홍 외, “확관 응축부를 갖는 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프 성능 비교 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 4, pp.18-25, 2002.
4. MSDS (물질안전보건자료, Material Safety Data Sheets)
5. KDB(한국화학공학연구정보센터, Korea Thermophysical Properties Data Bank)
6. 태양열 집열기 성능시험을 위한 KS 기준, KS Standard #9806-3
7. 주홍진, 광희열, 김종보, “진공관형 태양열집열기의 히트파이프 열성능 연구” 한국태양에너지학회 2007년도 춘계학술발표대회 논문집, pp. 16 ~ 22, 2007.