

# 태양열 집열기용 히트파이프 응축부 형상 변화에 따른 열성능 연구

곽희열\*, 주홍진\*\*

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

## A Study on Thermal Performance of Heat Pipes with Different Condenser Shape for Evacuated Tubular Solar Collector

Kwak, Hee-Youl\*, Joo, Hong-Jin\*\*

\*Solar Thermal Research Center, KIER(korea Institute of Energy Research, hykwak@kier.re.kr)  
\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Inha University(joo@inhaian.net)

### Abstract

The purpose of this study was experimentally to investigate thermal performance of heat pipe for evacuated tubular solar collector. Two sets of evacuated tubular solar collector with different condenser shape of heat pipe were prepared. The experiments were performed under the same operating condition with an indoor testing apparatus. Also, the experiments were carried out various testing conditions including inclination, flow rate, and incident heat flux.

The results of thermal performance of collector with enlarged condenser showed that  $F_R(\tau\alpha)$  was 0.6572 and  $F_R U_L$  was -2.0086 at 40°. And the results of thermal performance of collector with straight condenser showed that  $F_R(\tau\alpha)$  was 0.6233 and  $F_R U_L$  was -1.4996 at the same inclined angle.

Keywords : 진공관형 태양열집열기(Evacuated tubular solar collector), 열성능(Thermal performance) 히트파이프(heat pipe), 응축부(condenser), 집열 효율(Collector efficiency)

### 기 호 설 명

$T_I$  : Inlet temperature [°C]

$T_O$  : Outlet temperature [°C]

$T_a$  : Ambient temperature [°C]

$\dot{m}$  : Mass flow rate [kg/s]

$A_c$  : Aperture area [m<sup>2</sup>]

$C_p$  : Specific heat [J/kg · °C]

$\tau_a$  : Transmittance-absorptance product

접수일자 : 2008년 1월 30일, 심사완료일자:2008년 3월 17일  
교신저자 : 곽희열(hykwak@kier.re.kr)

$F_R$  : Heat removal factor  
 $U_L$  : Overall heat transfer coefficient  
 $I_T$  : Irradiation on a collector surface [ $W/m^2$ ]  
 $\eta$  : Efficiency [%]

## 1. 서 론

태양열 집열기술 중에서 단일 진공관형 집열기는 비교적 적은 온도차에서도 열 수송능력과 열응답성이 빠른 고효율 전열소자인 히트파이프를 사용함으로써 중온범위에서 안정적으로 작동하며, 또한 진공기술을 사용함으로써 흡수면에서의 대류 열손실을 줄일 수 있어 중온영역에서도 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 선행 연구<sup>1)2)</sup>가 있었다.

현재 상용화 되어있는 단일 진공관형 집열기의 히트파이프는 응축부와 매니폴더 사이의 열전달 면적을 증가시키기 위해 확관형 응축부를 사용하고 있다. 확관형 응축부를 사용한 집열기는 효율적인 측면에서는 많은 이점이 있으나, 제작비가 많이 들며 제작 공정이 다소 복잡하다. 또한 단일 진공관형 집열기의 특성상 히트파이프의 응축부와 열매체간의 직접 열교환 방식이 아닌 매니폴더와 히트파이프 응축부간의 Metal-to-Metal 방식을 사용함으로써 매니폴더와 응축부 사이에서 발생하는 접촉 열저항에 따른 열저항이 발생되며 응축부의 면적이 커질수록 접촉 열저항<sup>3)</sup>도 증가한다.

따라서 본 연구에서는 단일 진공관형 태양열 집열기의 제작비를 30% 줄일 수 있는 직관 응축부를 갖는 집열기와 기존의 확관 응축부를 사용한 집열기의 열성능 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 단일 진공관형 집열기

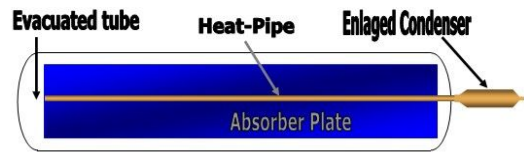


그림 1. 확관형 응축부를 갖는 단일 진공관형 집열기

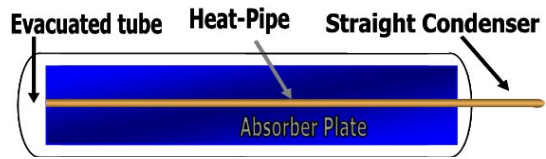


그림 2. 직관형 응축부를 갖는 단일 진공관형 집열기

표 1. 집열기 사양

구분	확관	직관
작동매체	MA	MA
Heat Pipe 형식	Thermosiphon	Thermosiphon
작동유체 충전량	14cc (전체 체적의 20%)	18cc (전체 체적의 20%)
Heat Pipe 전체 체적	$6.857 \times 10^{-5} m^3$	$8.7792 \times 10^{-5} m^3$
Heat Pipe 직경	외경 8mm 내경 7mm	외경 10mm 내경 9mm
Heat Pipe 길이	1380mm	1380mm
응축부 열전달 면적	$0.0069115m^2$ ( $\pi * 0.022m * 0.1m$ )	$0.0031416m^2$ ( $\pi * 0.01m * 0.1m$ )
집열 면적	$0.12m^2$	$0.12m^2$
유리관 직경 및 길이	100mm * 1200mm	100mm * 1200mm

1) 부준홍, 정원복, 곽희열, 2002, "확관 응축부를 갖는 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프 성능 비교 연구", 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 4, pp.18-25.

2) 곽희열 외, 산업용 진공관형 태양열 집열기 개발, KIET -A04622, 산업자원부, 2000

3) G. N. Tiwari, "Solar Energy Fundamentals, Design, Modeling and

Applications", pp149-168,

그림 1과 그림 2는 확관형 응축부를 갖는 단일 진공관형 집열기와 직관형 응축부를 갖는 단일 진공관형 집열기를 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸바와 같이 단일 진공관형 태양열 집열기는 유리관, 집열관, 히트파이프로 이루어져 있다.

본 연구에서 사용된 확관형 응축부를 사용한 집열기의 히트파이프 직경은 외경 8mm, 내경 7mm, 길이 1380mm, 응축부 면적 0.0069115 m<sup>2</sup>, 작동유체 충전량은 전체 체적의 20%인 14cc이며, 직관형 응축부를 사용한 집열기의 히트파이프 직경은 외경 10mm, 내경 9mm, 길이 1380mm, 응축부 면적 0.0031416m<sup>2</sup>, 작동유체 충전량은 전체체적의 20%인 18cc이며, 두 가지 집열기 모두 동일한 Thermosiphon 형식의 히트파이프이며, 집열기 사양은 표 1과 같다.

## 2.2 실험 장치

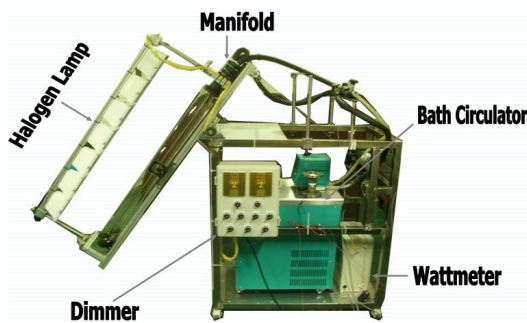


그림 3. 집열기 실내 실험장치

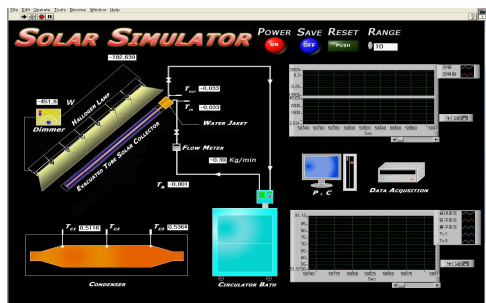


그림 4. 데이터 수집 및 모니터링

그림 3과 그림 4는 본 연구에서 사용된 집열기 실내 실험장치 및 모니터링 화면을 나타낸 것이다. 실험장치의 구성은 인공광원, 항온 수조(Bath circulator), 단일 진공관형 집열기, 매니폴더, 유량계, 조광기, Wattmeter로 구성되었다. 태양에너지를 대신하는 인공광원으로는 Philips사의 300W 할로겐램프 7개를 사용하였으며, 3 kW 조광기를 사용하여 광원의 세기를 제어하였다. 일사량은 Eppley사의 PSP Radiometer를 사용하여 ±0.5 W/m<sup>2</sup> 범위에서 일사량을 측정하였다. 또한 단일 진공관형 집열기의 특성상 집열기 각도에 따라 열성능이 변하므로 집열기의 각도를 조절할 수 있도록 수동 각도 조절장치를 장착하였다.

## 2.3 실험방법

히트파이프의 응축부 형상에 따른 단일 진공관형 집열기의 열성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서 동일한 실험 조건하에 두 가지 집열기에 대한 실험이 수행되었다.

집열기의 성능 실험 조건으로는 일사량 850W/m<sup>2</sup>(±20W/m<sup>2</sup>), 유량 0.3LPM, 입구온도 (25℃, 40℃, 60℃, 80℃)가 일정한 상태에서 Manifold의 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 400mm에서 PSP radiometer를 고정 시킨 후 30분 동안 측정된 일사량을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

집열기의 효율은 흡수표면 전체에 걸친 일사량과 실제 열전달률의 비이며 태양열 집열기의 효율은 KS<sup>4)</sup> 기준에 의해 식(1) 과 같

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

이 집열기 입구에서의 유체 온도, 주위 온도, 그리고 일사량으로 이루어진 종속변수로서 표시된다.

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

집열기 성능 시험은 투과면적(Aperture area)의 크기에 따라 결정되는 유량(집열기 단위 투과면적당 0.02 kg/s)으로 고정한 상태에서 수행되므로, 집열기 입구에서의 유체 온도에 따라 얻어진 열량과 그 순간의 태양열 일사량에 의한 최대 가능 열전달량의 비로서 나타난다.

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,  $F_R(\pi\alpha)$ 는 집열기의 열 획득에 관련된 항이라 할 수 있다. 집열기 열 성능은 일사량과 대기온도, 작동유체 유입온도와 연계된 순간 효율 값에 의해 결정된다. 모든 측정값들은 준 정상상태에서 측정되며, 얻어진 Data로 식(1)을 이용하여 집열기 효율을 얻는다.

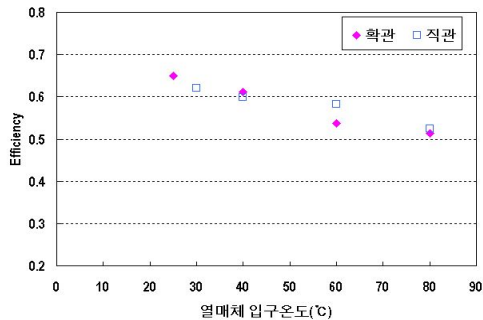


그림 5 경사각 20도

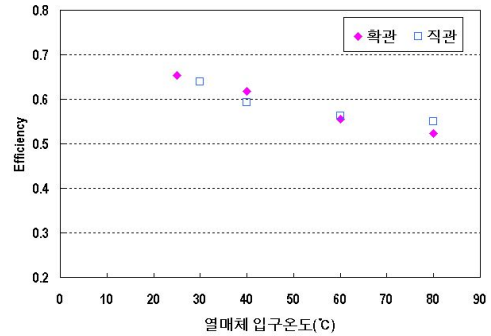


그림 6 경사각 40도

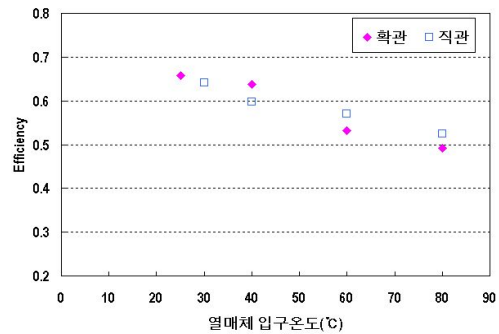


그림 7 경사각 60도

그림 5부터 7까지는 각각의 집열기 설치 경사각도에서 열매체 입구온도에 따른 집열기의 효율을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는바와 같이 열매체 입구 온도가 50°C 이하에서는 확관형 응축부를 갖는 집열기의 효율이 직관형 응축부를 갖는 집열기에 비하여 높게 나타났다. 이는 열매체의 온도가 낮기 때문에 응축부와 매니폴더 사이의 갭에서 발생하는 접촉 열저항이 적음으로 응축부의 열 전달 면적이 넓은 확관형 응축부 타입의 집열기가 직관형 응축부 타입의 집열기 보다 효율이 높게 나타나는 것으로 사료된다. 그러나 열매체의 온도가 50°C 이상에서는 확관형 응축부 타입의 집열기 보다 직관형 응축부 타입의 집열기가 접촉 열저항에 따른 열 손실이 적음으로 확관형 응축부 타입의 집열기 보다 직관형 응축부 타입의 집열기의 효율이 높게 나타나는 것으로 사료되었다. 각

각의 히트파이프 응축부에 사용된 동관의 표면은 0.05mm 클리어런스로 확관형 및 직관형 모두 동일한 표면을 갖으며, 응축부와 매니폴더 사이에서 발생하는 열저항을 최대한 줄일 수 있도록 Dow Corning사의 DC 340 열전도성 컴파운드를 사용하였다. DC 340 열전도성 컴파운드는 MSDS<sup>5)</sup>에 따르면 사용 온도 범위가 -45℃부터 200℃까지 사용 가능하며, Thermal Conductivity는 0.55 W/m · K이다.

그림 8부터 그림 10까지는 각각의 집열기 설치 경사각(20°, 40°, 60°)에 따른 확관 및 직관형 응축부를 갖는 집열기의 효율곡선을 나타낸 것이다. 집열기 설치 경사각 20°에서의 확관형 응축부타입 집열기의  $F_R(\pi)$ 는 0.6518,  $F_R U_L$ 은 -2.1287이며 직관형 응축부를 갖는 집열기의 경우  $F_R(\pi)$ 는 0.626,  $F_R U_L$ 은 -1.5883으로 나타났다.

집열기 설치 경사각 40°에서는 확관형 응축부타입 집열기의 경우  $F_R(\pi)$ 는 0.6572,  $F_R U_L$ 은 -2.0086이며 직관형 응축부를 갖는 집열기의 경우  $F_R(\pi)$ 는 0.6239,  $F_R U_L$ 은 -1.4996으로 나타났다. 집열기 설치 경사각 60°에서는 확관형 응축부타입의 집열기일 경우  $F_R(\pi)$ 는 0.6733,  $F_R U_L$ 은 -2.6834이며 직관형 응축부를 갖는 집열기의 경우  $F_R(\pi)$ 는 0.632,  $F_R U_L$ 은 -1.9267로 나타났다.

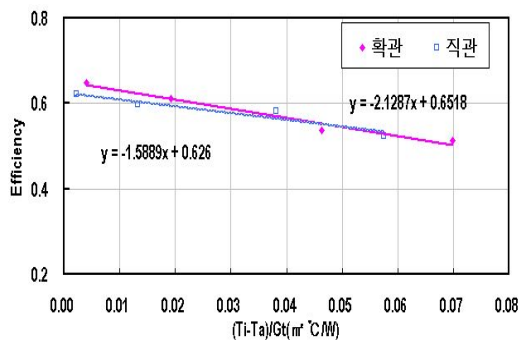


그림 8 경사각 20도

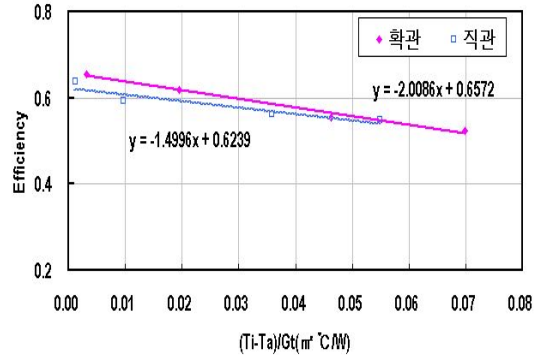


그림 9 경사각 40도

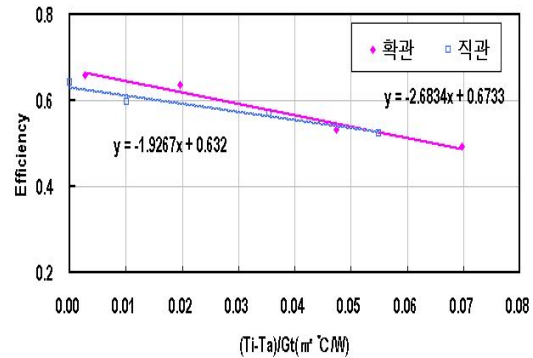


그림 10 경사각 60도

앞서 언급한 바와 같이 확관형 응축부 타입의 집열기는 매니폴더에 유입되는 열매체의 온도가 낮을 경우 비교적 응축부와 매니폴더 사이에서 발생하는 접촉 열저항에 따른 열저항 적기 때문에 집열기 효율이 직관형 응축부 타입의 집열기 보다 높지만 열매체의 온도가 높아짐에 따라 열저항이 커져 직관형 응축부에 비해 열손실이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 집열기 효율곡선에서 기울기 값인  $F_R U_L$ 이 직관형 응축부 타입에 비하여 확관형 응축부 타입의 집열기가 더 큰 것을 알 수 있다.

표 2는 경사각 및 입구온도에 따른 집열기 효율 및 집열기 투과흡수율  $F_R(\pi)$ , 집열기 열손실율  $F_R U_L$ 를 나타낸 것이다.

5) MSDS (물질안전보건자료, Material Safety Data Sheets)

표 2. 경사각에 따른 집열기 효율

	확관		직관	
	입구온도	효율	입구온도	효율
집열기 경사 20°	25℃	64.94%	30℃	62.13%
	40℃	61.07%	40℃	59.91%
	60℃	53.62%	60℃	58.18%
	80℃	51.41%	80℃	52.51%
	$F_R(\tau\alpha)$	0.6518	$F_R(\tau\alpha)$	0.626
	$F_R U_L$	-2.1287	$F_R U_L$	-1.5889
집열기 경사 40°	25℃	65.4%	30℃	63.94%
	40℃	61.79%	40℃	59.24%
	60℃	55.53%	60℃	56.22%
	80℃	52.26%	80℃	54.96%
	$F_R(\tau\alpha)$	0.6572	$F_R(\tau\alpha)$	0.6239
	$F_R U_L$	-2.0086	$F_R U_L$	-1.4996
집열기 경사 60°	25℃	65.79%	30℃	64.19%
	40℃	63.77%	40℃	59.7%
	60℃	53.13%	60℃	57.09%
	80℃	49.19%	80℃	52.43%
	$F_R(\tau\alpha)$	0.6733	$F_R(\tau\alpha)$	0.632
	$F_R U_L$	-2.6834	$F_R U_L$	-1.9267

#### 4. 결론

본 논문에서는 단일 진공관형 히트파이프 응축부 형상에 따른 집열기의 열성능 실험을 수행하기 위해 두 가지 타입의 집열기(확관형 응축부, 직관형 응축부)를 제작 하였다. 각각의 집열기를 동일한 실험 조건 하에 열성능을 분석하기 위해 외부 환경에 영향을 최소화하기 위해 실내 실험 장치를 설계 및 제작하여 실험적으로 집열기의 열성능 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 집열기 설치 경사각 40°에서 히트파이프의 응축부 형상이 확관형일 경우  $F_R(\tau\alpha)$ 는 0.6572,  $F_R U_L$ 은 -2.0086로 나타났으며, 직관형 응축부 집열기의 경우  $F_R(\tau\alpha)$ 는 0.6239,  $F_R U_L$ 은 -1.4996으로 나타났다.
- (2) 단일 진공관형 집열기용 히트파이프의 응축부 형상을 확관에서 직관으로 변경할 경우 매니폴더와 응축부간의 Metal-t

o-Metal 열교환 방식을 사용함으로써 응축부와 매니폴더 사이에서 발생하는 접촉 열저항에 따른 열저항이 확관 응축부의 경우 직관 응축부에 비하여 많은 것으로 분석되었다.

- (3) 직관형 응축부의 경우 열전달 면적은 50%가 감소한 반면 효율은 열매체 유입 온도가 50℃ 이하 낮은 영역에서는 평균 약 3%이하만이 감소한 것으로 나타났으며, 열매체 유입 온도가 50℃ 이상에서는 확관형 응축부에 비하여 열저항이 적어 집열기 열손실 값인  $F_R U_L$  값이 확관형에 비하여 더 낮게 나타났다.
- (4) 단일 진공관형 집열기 히트파이프 응축부의 형상을 확관에서 직관으로 변경할 경우 단일 진공관형 집열기의 제작단가 및 제작 공정을 감소 할 수 있으며, 더 많은 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. 부준홍, 정원복, 곽희열, 2002, “확관 응축부를 갖는 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프 성능 비교 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 4, pp. 18-25.
2. 곽희열 외, 산업용 진공관형 태양열 집열기 개발, KIER -A04622, 산업자원부, 2000
3. G. N. Tiwari, "Solar Energy Fundamentals, Design, Modeling and Applications", pp. 149 ~ 168
4. 태양열 집열기 성능시험을 위한 KS 기준, KS Standard #9806-3
5. MSDS (물질안전보건자료, Material Safety Data Sheets)
6. 주홍진, 곽희열, 김종보, “진공관형 태양열 집열기의 히트파이프 열성능 연구” 한국태양에너지학회 2007년도 춘계학술 발표대회 논문집, pp. 16 ~ 22, 2007.