

## 타워형 태양열 흡수기의 시동특성에 관한 연구

\*서 호영<sup>1)</sup>, 김 종규<sup>2)</sup>, \*\*강 용혁<sup>3)</sup>

### A Study on the Start-up of the Water/Steam Receiver for Solar Power Tower

\*Ho-Young Seo, Jong-Kyu Kim, \*\*Yong-Heack Kang

**Key words** : Solar thermal(태양열), Power tower(타워형 발전), Start-up(시동), Receiver(흡수기), Pressure drop(압력강하)

**Abstract** : Solar receiver in the solar power tower system has a similarity to a boiler of the thermal power plant in many aspects. However Boiler is operated long time without stopping while solar receiver repeats start and stop every day. The objective of this study is to investigate start-up characteristics of solar receiver. The experimental device was constructed in a bench scale. Basic experimental condition of water/steam was set by 25 bar and 223℃. Initially, the heat was added into risers only, then another experiment with input into drum additionally was done. When the heat flux was valid only risers, it took about 300 minutes until the water temperature in drum reached 223℃. Water temperature of drum was increased by 44℃/hr with 91.14 g/s of water circulation. With additional heat input into drum, 200 minutes was required to reach 223℃. In this case temperature was increased 66℃/hr with 96.5 g/s of water circulation.

#### Nomenclature

h : heat transfer coefficient, W/m<sup>2</sup> · K  
k : conductivity, W/m · K  
r<sub>i</sub> : inside radius of tube, m  
r<sub>o</sub> : outside radius of tube, m  
D<sub>i</sub> : riser tube diameter, m  
T<sub>o</sub> : riser outlet water temperature, ℃  
Pr : Prandtl number  
Re : Reynolds number

#### Subscrip

r : riser  
d : downcomer  
f : liquid  
g : vapor

### 1. 서론

태양열의 이용은 온수, 급탕 시설부터 대규모 발전시스템에 이르기까지 다양하게 연구되고 개발되어지고 있다. 우리나라는 1970년대 말부터

태양열 이용에 관한 연구가 시작되어 현재까지 계속되고 있는데 이중 고온 태양열을 이용한 연구는 1997년 중, 고온 집광시스템<sup>1)</sup>을 개발하면서부터 본격적으로 이루어 졌다. 이후 고온의 집광 시스템을 바탕으로 화학반응 등에 이용하거나 스텔링 엔진(Stirling Engine)을 통한 전력의 생산을 비롯해 현재 대규모의 타워형 태양열 발전시스템(Solar Power Tower System)의 개발이 진행되고 있다. 타워형 태양열 발전시스템은 태양광을 집광시키는 헬리오스타트, 집광된 태양열을 작동유체로 열교환 시키는 흡수기, 흡수기에서 받은 열을 저장하는 저장소, 전력을 생산하는 터빈 등으로 구성되어 있다. 타워형 태양열 흡수기는 작동유체의 종류와 순환방식 등에 따라 여러 가지로 구분할 수 있다. 작동유체의 종류로는 물/증기(Water/Steam), 용융염(Molten Salt), 공기(Air) 등이 이용되며 순환방식으로는 강제순환형과 자연순환형이 있다.

타워형 태양열 흡수기<sup>2)</sup>는 화력발전의 보일러와 유사한 구조와 기능을 갖추고 있는데 보일러의 경우는 한번 시동하게 되면 장시간을 운전한다. 반면 태양열 흡수기는 기본적으로 하루를 주기로 운전과 정지를 반복하게 되므로 매일 시동을 해야 하는 특징이 있기 때문에 시동에 대한 연

구는 중요하다.

따라서 본 연구에서는 1MW급 태양열 흡수기를 대상으로 실험장치를 구성하여 시동에 따른 특성을 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 태양열 흡수기를 나타내는 시험부와 시험부에서 발생된 증기를 다시 응축시켜서 시험부로 보내는 장치들로 구성되어 있다. 실험방법으로는 상승관에 열유속을 주어 포화온도가 되기까지의 소요시간에 따른 특징과 보조열원을 이용했을 때의 특징에 대해 알아보았다.

### 2.1 실험장치의 구성

전체적인 구성을 보면 태양열 흡수기를 나타내는 시험부와 시험부에서 발생하는 증기를 물로 다시 응축시키는 응축기, 응축된 물을 다시 시험부로 보내는 순환펌프, 시험부로 들어가는 물의 온도를 일정하게 유지시켜주는 예열기가 있다. 또한 물을 급수하고 일정한 압력까지 올려주는 급수/가압펌프, 압력을 일정하게 유지시켜주는 축압기가 있다. 각 부분의 제어는 별도의 제어반을 설치하여 온도 및 압력에 대한 상황을 볼 수 있으며 펌프, 예열기, 히터 등을 제어할 수 있게 하였다. Fig. 1은 실험장치에 대한 개략도를 나타낸다.

시험부를 살펴보면 실제 1MW의 전력을 생산하는 타워형 태양열 발전 시스템에 이용되는 태양열 흡수기를 기준으로 구성을 단순화 시켰다. 순환방식은 자연순환형으로 증기드림, 상/하부헤더와 6개의 상승관, 그리고 하강관으로 구성되어 있다. 열을 주는 방식으로는 전기저항을 이용한 직가열 방식으로 2개의 상승관이 한조로 3대의 전력공급장치와 연결되어 있으며 개별적으로 상승관을 가열할 수 있다. 가열구간은 1100 mm이다. 가열구간에는 220 mm 간격으로 상승관 관외벽에 열전대를 부착하였고 상승관의 입구 및 출구의 물 온도를 측정하기 위해 가열부를 기준으로 시작과 끝부분에 상승관 안쪽으로 열전대를 삽입하였다. 상/하부헤더는 중앙부에서부터 좌우 160 mm 지점에 열전대를 삽입하였으며 증기드림은 중앙으로부터 105 mm 지점에 상부와 하부에 열전대를 삽입하여 물과 증기의 온도를 측정할 수 있다. 또한 보조열원으로 Ceramic band 형식 히터를 장착하였다. Table 1은 시험부의 제원을 나타낸다.

### 2.2 실험조건 및 방법

본 연구에서 이용되는 물과 증기의 조건은 압력이 25 bar, 포화온도는 223°C이다.

먼저 6개의 상승관에 균일한 열유속을 단계별로 증가시키면서 포화온도까지 주었다. 각 부분이 정상적으로 작동하는지를 확인하고 상승관의 역류에 대한 방지를 위해서 1 kW/m<sup>2</sup>의 열유속을 주었다. 이후 열유속은 시험부의 온도가 1분당 1°C씩 증가<sup>4)</sup>하게 하기 위해 5 kW/m<sup>2</sup>씩 증가시켜서 상승관 출구 물이 포화온도가 되면 일

Table 1 Test section size and capacity

Item	Specification	
Drum	Diameter	80 mm
	Length	580 mm
Header	Diameter	25 mm
	Length	980 mm
Riser (6EA)	Diameter	7.4 mm
	Length	2300 mm
Downcomer	Diameter	10.8 mm
	Length	2560 mm
Main power supply	Max. power	24 kW
	Input V	AC 3-phase 380 V (only)
	Output V/A	15V/600A
Drum heater	Max. power	3 kW
	Heater type	Ceramic band
	Max. heating range	0 ~ 400°C

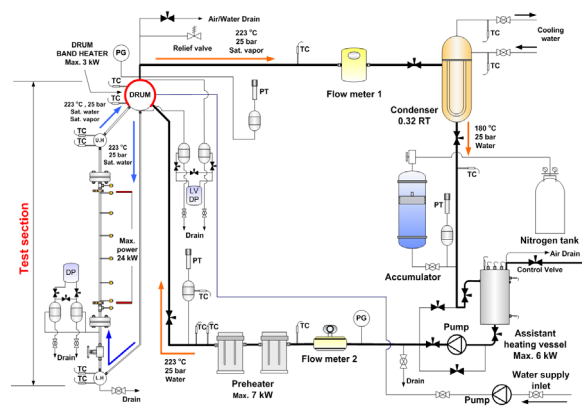


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

Table 2 Input heat flux with time

Time (min)	Riser input heat flux (kW/m <sup>2</sup> )		Drum input heat flux (kW/m <sup>2</sup> )
	Non drum heating	drum heating	
0 ~ 10	1	1	
10 ~ 35	15	15	
35 ~ 50	20	20	
50 ~ 75	25	25	80
75 ~ 90	30	30	80
90 ~ 105	35	35	80
105 ~ 135	40	40	80
135 ~ 155	45	45	80
155 ~ 170	50	50	80
170 ~ 190	55	55	80
190 ~ 205	60	55	80
205 ~ 300	60	55	80

정하게 유지시켰다. 그리고 증기드럼의 온도가 포화온도까지 상승하기까지의 시간과 증기드럼, 상/하부헤더, 상승관내의 물의 온도를 측정하였으며 각 상승관에서의 유량을 산출하였다.

두번째로 열유속은 앞서 실행 것과 같은 방식으로 주면서 보조열원인 증기드럼에 장착된 히터를 가동하였다. 보조열원의 열유속은 증기드럼내의 물 온도를 넘지 않는 수준에서 단계별로 80 kW/m<sup>2</sup>씩 주었다. Table 2는 시간별 상승관에 주어진 열유속과 보조열원의 열유속을 나타낸다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 태양열 흡수기의 시동특성

태양열 흡수기의 시간에 따른 시동 특성을 알아보기 위하여 6개의 상승관에 균일한 열유속을 시간에 따라 주었다. 먼저 1kW/m<sup>2</sup>의 열유속을 주어 각 부분의 정상적인 작동을 확인하였다. 다음은 열유속을 15kW/m<sup>2</sup>로 주었다. 이후 각 열유속은 5kW/m<sup>2</sup>씩 늘었다. 각 열유속의 설정은 증기드럼의 급속온도를 기준으로 흡수기의 현재 상태등을 고려하여 일반적으로 100℃ 이하에서는 28℃/hr, 100℃ 이상에서는 55℃/hr로 온도를 상승하도록 설정한다. 그러나 본 실험에서는 동일하게 60℃/hr로 온도가 상승하고 상승관에서 비등이 발생하지 않는 범위로 설정하였다.

Fig.2는 시간에 따른 증기드럼과 상/하부헤더 물의 온도를 나타낸다. 증기드럼 물의 온도가 포화온도인 223℃가 되는데 걸린 시간은 약 300분이다. 열유속을 주기 시작하여 포화온도까지 각 부분의 온도는 선형적으로 증가하며 시간에 따른 온도는 44℃/hr로 증가하였다. Fig. 3은 각 상승관의 입,출구 물의 온도를 나타내고 있다. 상승관 출구 물 온도는 약 220분이 지나면서부터 포화온도에 도달하였고 이후 포화온도를 유지하는 것을 볼 수 있다. 상승관 입구 물 온도는 약 220분을 전후로 28℃/hr에서 45℃/hr로 늘어났다.

각 상승관에 흐르는 유량을 산출하기 위하여 다음과 같은 과정을 수행하였다. 먼저 상승관 관외벽온도를 기준으로 관내벽 온도를 산출하였다. 상승관 입,출구 물의 온도와 Nusselt 수, Dittus-boelter correlation<sup>3)</sup>의 정의를 이용하여 상승관에 흐르는 유속을 산출하였으며 이를 통해 유량을 구하였다.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (1)$$

$$T(r_i) = \frac{\dot{q}}{4k} (r_o^2 - r_i^2) + \frac{q r_i^2}{2k} (\ln r_i - \ln r_o) + T_o \quad (2)$$

$$q = h \Delta T \quad (3)$$

$$Nu = \frac{h D_i}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (4)$$

각 상승관에 흐르는 유량을 산출한 결과 하나의 상승관에 흐르는 평균 유량은 15.2 g/s이고 순환되는 총 유량은 91.14 g/s이다. Table 3은 각 상승관에 흐르는 유량을 나타낸다.

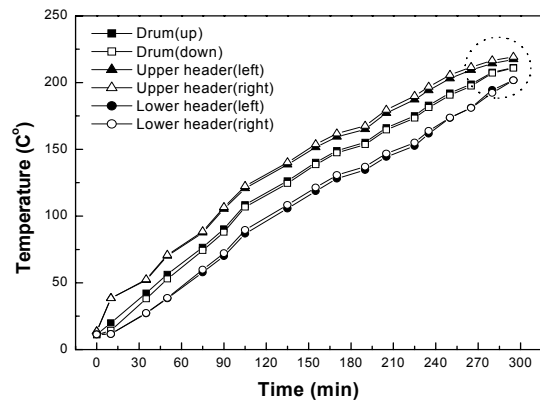


Fig. 2 Distribution of temperature with drum and header

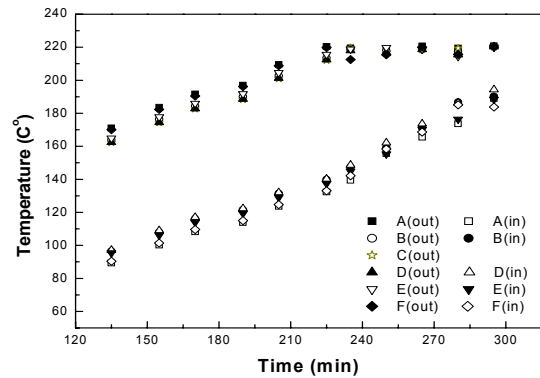


Fig. 3 Distribution of temperature with riser inner water

Table 3 Mass flow rate with riser tube

Riser tube	A	B	C	D	E	F
Mass flow rate(g/s)	13.8	15.5	16.6	15.8	16.3	13.3

#### 3.2 보조열원에 따른 시동특성

상승관에 주어지는 열유속은 앞서 실시한 방법과 같이 주었다. 보조열원의 열유속은 상승관 출구 물의 온도가 약 100℃가 되는 50~75분경부터 주었다. 이는 100℃ 이하에서 증기드럼의 외부 급속온도가 급격하게 증가하는 것을 방지하기 위함이다. 그리고 열유속의 설정은 증기드럼 물의 온도를 넘지 않게 하였으며 포화온도인 223℃부터는 일정하게 유지시켰다.

시간에 따른 증기드럼, 상/하부헤더 물의 온도를 나타내는 Fig. 4를 보면 증기드럼 물의 온도가 포화온도인 223℃가 되는데 걸린 시간은 약 200분이다. 열유속을 주기 시작하여 포화온도까지 각 부분의 온도는 선형적으로 증가하며 포화온도에 도달한 약 200분 이후에는 거의 일정하게 유지되고 있다. 시간에 따른 온도는 66℃/hr로 증가하였다. Fig. 5는 각 상승관의 입,출구 물의 온도를 나타내고 있다. 상승관 출구 물의 온도는

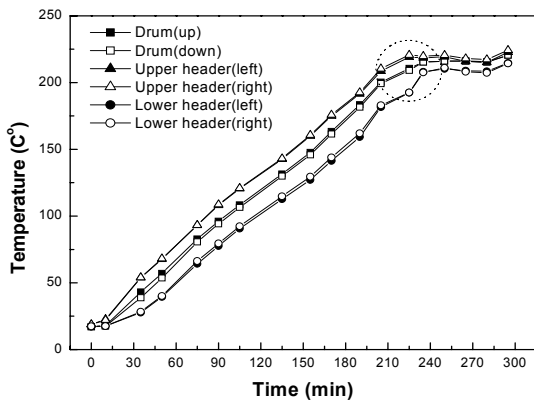


Fig. 4 Distribution of temperature with drum and header

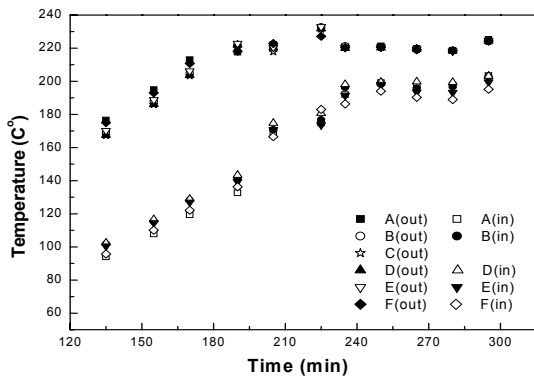


Fig. 5 Distribution of temperature with riser inner water

Table 4 Mass flow rate with riser tube (using drum heater)

Riser tube	A	B	C	D	E	F
Mass flow rate(g/s)	11.3	16.0	18.5	17.7	18.6	14.3

약 190분이 지나면서부터 포화온도에 도달하였고 이후 포화온도를 유지하는 것을 볼 수 있다. 상승관 입구 물 온도는 43°C/hr로 증가하였으며 약 250분 이후로는 일정하게 유지되고 있는 것을 볼 수 있다. 각 상승관에 흐르는 유량을 산출하면 하나의 상승관에 흐르는 평균 유량은 16.1 g/s이고 순환되는 총 유량은 96.5 g/s이며 Table 4는 각 상승관에 흐르는 유량을 나타낸다.

상승관에 열유속을 주었을 때와 보조열원을 주었을 증기드럼 물이 포화온도가 되기까지 걸린 시간은 약 300분과 약 200분으로 보조열원을 같이 주었을 때가 적은 시간이 소요되었고 시간당 온도의 증가도 44°C/hr과 66°C/hr로 높았다. 상승관 출구 물의 온도가 포화온도가 되는 시간은 약 220분과 약 190분으로 비슷하지만 증기드럼 물이 포화온도가 되기까지 걸린 시간의 차는 약 80분과 약 10분으로 보조열원을 같이 이용했을 때 큰 폭으로 줄어든 것을 볼 수 있다. 그러나 상승관에 흐르는 유량 비슷하다. 이는 보조열원을 같이 이용하게 되면 상승관에서의 변화는 크

게 없으나 상승관 물이 포화온도에 도달하게 되면 증기드럼 물은 빠른 시간에 포화온도에 도달하게 되어 시동 시간을 줄이는 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 타워형 태양열 흡수기의 시동특성을 알아보기 위하여 실험장치를 구성하여 시간에 따라 열유속을 증가 시켰을 때의 특성과 보조열원을 이용했을 때의 특성을 알아보았다. 이를 요약하면 다음과 같다.

1) 상승관에 일정한 열유속을 주었을 때, 포화온도가 되기까지의 시간과 각 부분에 대한 온도를 측정하였다. 그 결과 증기드럼 물이 포화온도가 되기까지 걸린 시간은 약 300분이고 시간에 따른 온도는 44°C/hr로 증가하였다. 상승관 출구 물의 온도는 약 220분경에 포화온도가 되었으며 상승관 입구 물의 온도는 220분경을 기준으로 28°C/hr에서 45°C/hr로 증가하였다. 상승관에 흐르는 평균 유량은 15.2 g/s이며 순환하는 총 유량은 91.14 g/s이다.

2) 상승관에 보조열원으로 증기드럼에 일정한 열유속을 주었을 때, 증기드럼 물이 포화온도가 되기까지 걸린 시간은 약 200분이고 시간에 따른 온도는 66°C/hr로 증가하였다. 상승관 출구 물의 온도는 190분경에 포화온도가 되었으며 시간에 따른 온도는 43°C/hr로 증가하였다. 상승관에 흐르는 평균 유량은 16.1 g/s이며 순환하는 총 유량은 96.5 g/s이다.

3) 보조열원의 이용은 상승관 물이 포화온도가 됐을 때 증기드럼 물을 빠르게 포화온도에 도달하게 하여 시동 시간을 단축시키는 것을 알 수 있다.

#### 후기

본 연구는 산업자원부 에너지·자원기술개발 사업(2005-N-S017-P-01-0-000)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### References

- [1] 강용혁, 2004, "태양열 발전시스템의 종류 및 기술동향", 대한설비공학회, 설비저널 제 33권 제10호, pp. 34-44, 2004.
- [2] W. Grasse, 1991, "PHOEBUS international 30 MWe solar tower plant", Solar Energy Materials, 24, pp. 82-94, 1991.
- [3] G. Hetsroni, D. Mewes, C. Enke, M. Gurevich, A. Mosyak, R. Rozenblit, 2003, "Heat transfer to two-phase flow in inclined tubes", International Journal of Multiphase Flow 29, pp. 173-194, 2003.
- [4] 류현균, 이재혁, 황동환, 변정남, 1993, "퍼지 논리를 이용한 드럼형 보일러의 자동기동에 관한 연구", 전자공학논문집 제30권 제2호, pp.87-96, 1993.