

타워형 태양열 발전 흡수기의 열유속에 따른 수순환 특성 연구

서호영*, 김종규**, 강용혁***, 김용찬****

*한국에너지기술연구원, 고려대학교 기계공학과(sshama@korea.ac.kr),
한국에너지기술연구원(rnokim@kier.re.kr), *한국에너지기술연구원(yhkang@kier.re.kr), ****고려대학교
기계공학과(yongckim@korea.ac.kr)

Water Circulation Characteristics of a Water/Steam Receiver for Solar Power Tower System at Various Heat Fluxes

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

*Dept. of Solar Thermal Research Center, KIER
& Dept. of Mechanical Eng., Korea University(sshama@korea.ac.kr),
**Dept. of Solar Thermal Research Center, KIER(rnokim@kier.re.kr),
***Dept. of Solar Thermal Research Center, KIER(yhkang@kier.re.kr),
****Dept. of Mechanical Eng., Korea University(yongckim@korea.ac.kr)

Abstract

This paper describes water circulation characteristics of a water/steam receiver at various heat fluxes. The water/steam receiver for a solar tower power system is a natural circulation type. Experimental conditions of water and steam were set at a pressure of 5 bar and temperature of 151.8°C. The experimental device for the water/steam receiver consisted of a steam drum, upper/lower header, riser tubes, and downcomer tube. The experiments were conducted by varying heat fluxes in terms of mass flow rate in each riser tube. However, the total mass flow rate on the riser tubes was fixed at 217.4 g/s. For the uniform heat flux, while the water temperature of the steam drum and upper header were kept at steady state, the temperature of the lower header was fluctuated. For the non-uniform heat flux, while the temperature of the steam drum was kept at steady state, the temperature difference increased in the right and left side of the upper header, and the temperature of the lower header was fluctuated.

Keywords : 태양열(Solar thermal), 타워형발전(Power tower), 수순환(Water circulation), 흡수기(Receiver), 압력강하(Pressure drop), 비등(Boiling), 이상유동(Two phase flow)

접수일자 : 2008년 1월 4일, 심사완료일자 : 2008년 2월 14일
교신저자 : 김종규(rnokim@kier@re.kr)

기 호 설 명

g	: Gravity (m/s^2)
h	: Heat transfer coefficient ($W/m^2 \cdot k$)
k	: Conductivity ($W/m \cdot k$)
l	: Tube length (m)
l_o	: Tube length (heated section), (m)
\dot{m}	: Mass flow rate (kg/s)
q_o	: Power (W)
q	: Heat flux (kW/m^2)
r_i	: Inside radius of tube (m)
r_o	: Outside radius of tube (m)
u	: Velocity (m/s)
x_e	: Exit quality
C	: Buoyancy effect parameter
D_r	: Riser tube diameter (m)
T_s	: Tube wall temperature ($^{\circ}C$)
T_o	: Water temperature ($^{\circ}C$)
β	: Volumetric thermal expansion coefficient (k^{-1})
δ	: Conduction thickness (m)
ρ	: Density (kg/m^3)
$\Delta\rho$: Density difference (kg/m^3)
ρ_f	: Density of liquid (kg/m^3)
ρ_g	: Density of vapor (kg/m^3)
ΔH_{fg}	: Latent heat of vaporization (J/kg)
N_{pch}	: Phase change number
N_{sub}	: Subcooling number
Nu	: Nusselt number
Gr	: Grashof number
Pr	: Prandtl number
Re	: Reynolds number

1. 서 론

현대를 살아가는 우리의 생활은 에너지와 밀접한 관계가 있다. 작은 기계부품부터 거대 산업시설까지 에너지가 사용되지 않는 곳은 없으며 에너지도 산업이 발달해 감에 따라 변하였다. 현재 우리가 사용하는 대부분의 에너지는 화석연료가 담당하고 있다. 하지만 화석연료의 급격한 사용으로 인한 고갈의 우려성과 환경에 대한 인식이 높아짐에 따라 대체에너지와 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 태양열은 대표적인 신재생에너지로 현재 개발된 태양열의 이용은 온수, 급탕 시설부터 대규모 발전시스템에 이르기까지 다양하게 연구되고 개발되어지고 있다. 우리나라는 1970년대 말부터 태양열 이용에 관한 연구가 시작되어 현재까지 계속되고 있는데 특히 고온 태양열을 이용한 연구는 1997년 중,고온 집광시스템¹⁾을 개발하면서부터 본격적으로 이루어 졌으며 현재 타워형 태양열 발전시스템(Solar Power Tower System)의 개발을 진행하고 있다.

타워형 태양열 발전시스템²⁾은 태양광을 한 곳으로 집광시키는 헬리오스타트, 집광된 태양열을 작동유체로 열교환 시키는 흡수기, 흡수기에서 받은 열을 저장하는 저장소, 전력을 생산하는 터빈 등으로 구성되어 있다. 이중 타워형 태양열 흡수기는 타워형 발전시스템의 핵심적인 부분으로 화력 발전의 보일러와 유사한 구조와 기능을 가지고 있다. 화력발전용 보일러는 화석연료로 만들어진 균일한 열이 공급된다. 반면에 태양열 흡수기는 고온의 집광된 태양열을 이용한다. 태양열은 날씨, 환경 등의 변화가 심하기 때문에 집광의 특성상 불규칙한 열이 공급된다.

따라서 본 연구에서는 타워형 태양열 발전 흡수기의 연구 개발을 위하여 1 MW급 태양열 흡수기를 대상으로 실험장치를 구성하였고, 다양한 열유속에 따른 수순환 특성에 대해 연구하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치의 설계

열유속에 따른 수순환 특성을 알아보기 위한 실험장치를 구성하기 위하여 먼저 1 MW 급 실제 태양열 흡수기의 유동특성을 기준으로 시험부를 설계하고 제작하였다. 그리고 시험부의 설계조건을 기준으로 나머지 부분들의 용량을 산출하여 하나의 시스템을 구축하였다.

시험부를 설계하기 위하여 먼저 대상 흡수기를 선정하였다. 타워형 태양열 흡수기는 작동유체의 종류와 순환 방식에 따라 구분되 어지는데 본 연구에서는 작동유체로 물/증기를 이용한 자연순환형 구조를 갖는 흡수기를 택하였다. 자연순환형 흡수기의 유체 순환은 펌프를 사용하지 않고 온도에 따른 부력효과를 이용한다. 또한 국부적으로 열을 많이 받는 부분이 있어도 자연적으로 유체의 순환이 조절되기 때문에 온도의 과부하가 걸리지 않는 특징이 있다. 표 1은 대상 흡수기의 설계 조건³⁾이다.

표 1 Design conditions of solar receiver

Item	Specification
Water/Steam pressure	40 bar
Water/Steam temperature	250.35°C
Steam percent	2.26%(weight) 47.68%(volume)
Mass flow rate (one tube)	1.37 kg/s
Circulation ratio	44.19
Riser tube diameter	76.2 mm(out) 68.2 mm(in)
Riser tube length	9 m
Number of tube	75 EA
Heat flux	27.59 kW/m ²

시험부는 증기드림, 상/하부헤더, 6개의 상승관, 하나의 하강관으로 구성되어 있다. 시험부의 설계는 대상 흡수기의 유동특성을 바탕으로 시험부에서의 상승관 직경 크기와 유량과의 관계를 통해 얻을 수 있다. 물은

관로개통을 자연순환⁴⁾하기 때문에 먼저 단상일 때를 기준으로 Grashof 수와 Reynolds 수를 바탕으로 한 부력효과⁵⁾를 이용하여 대상 흡수기를 바탕으로 시험부의 상승관 직경 크기와 유량의 관계를 산출하였다. 식 (3)은 이와 같은 방법을 이용하여 얻은 시험부의 상승관 직경 크기에 따른 유량과의 관계를 나타낸다. 또한 이상유동에서는 Ishii⁶⁾가 제시한 무차원수의 조합과 건도에 따른 밀도차에 대한 관계를 이용하여 앞서 산출한 상승관 직경의 크기와 유량의 관계가 맞는가를 비교하였다. 식 (4), (5), (6)은 Ishii가 제시한 무차원수에 대한 관계를 나타낸다.

$$Buoyancy\ effect\ parameter = \frac{Gr_D}{(Re_D)^2} = C \quad (1)$$

$$\frac{Gr_{D,real\ receiver}}{(Re_{D,real\ receiver})^2} = \frac{Gr_{D,test\ section}}{(Re_{D,test\ section})^2} = C \quad (2)$$

$$m = \sqrt{\frac{\pi^2 g \beta \rho^2 (T_s - T_o) D_{r.test\ section}^5}{16 C}} \quad (3)$$

$$N_{pch} = \left(\frac{4q_o \delta_o}{du_o \rho_f h_{fg}} \right) \left(\frac{\rho_{fg}}{\rho_g} \right) \quad (4)$$

$$N_{sub} = \left(\frac{\Delta h_{sub}}{h_{fg}} \right) \left(\frac{\rho_{fg}}{\rho_g} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta \rho x_e}{\rho_g} = (N_{pch} - N_{sub}) \quad (6)$$

상승관 직경 크기와 유량의 관계가 결정되면 상승관의 개수와 길이, 하강관의 직경과 길이를 결정해야 하는데 이를 결정하기 위해서는 상승관과 하강관에서의 압력손실⁷⁾을 이용하여 순환 밸런스를 통해 얻을 수 있다. 상승관은 열유속에 의해 증기가 발생하기 때문에 이상유동에서의 압력손실을 고려해야 한다. 따라서 이상유동에 따른 마찰, 가속, 중력에 의한 압력손실을 알아보았다. 하강관에서의 압력손실은 단상유동만이 존재하므로 마찰과 중력에 대한 압력손실만을 고려하였다.

순환 밸런스는 상승관을 기본으로 하강관의 크기를 결정하고 순환력에 관한 부분도 이 관계를 통해서 이루어진다. 즉 하강관과 상승관에서 중력에 의한 압력손실의 차는 상승관과 하강관의 마찰과 가속에 의한 압력손실의 합보다 크거나 같아야 한다. 이는 상승관에서 비등이 일어남에 따라 비중의 차로 인해 하강관에서 상승관 쪽으로 물을 밀어주는 역할을 하게 되고 자연스럽게 순환이 일어나게 된다. 그림 1은 시험부의 형상을 나타내며 표 2는 시험부의 크기를 나타낸다.

2.2 실험장치의 구성

실험장치는 태양열 흡수기를 나타내는 시험부, 시험부에서 발생된 증기를 응축시키는 응축기, 응축된 물을 다시 증기드럼으로 보내는 순환펌프, 증기드럼으로 들어가는 물의 온도를 일정하게 하기 위한 예열기 등으로 구성되어 있다. 시스템의 압력을 일정하게 유지시키기 위하여 축압기를 설치하였다.

각 부분의 제어는 별도의 제어반을 설치하여 각 부분의 온도 및 압력에 대한 상황을 볼 수 있으며, 펌프, 예열기 등을 제어할 수 있게 하였다. 그림 2는 실험장치에 대한 개략도를 나타내며 그림 3은 실험장치의 사진을 나타낸다.

시험부 상승관의 가열구간은 1100 mm이고 가열 방식은 전기저항을 이용한 직가열 방식으로 2개의 상승관을 한 조로 3대의 전력공급장치를 연결하여 개별적으로 상승관을 가열할 수 있다. 상승관 가열구간에는 220 mm 간격으로 열전대 부착하여 상승관 관외벽 온도를 측정할 수 있게 하였다. 또한 상승관 입/출구 물의 온도를 측정하기 위해 가열부 시작과 끝부분에 열전대를 삽입하였다. 상/하부 헤더는 중앙부에서부터 좌우 160 mm 지점에 열전대를 삽입하여 하였으며, 증기드럼에 있는 물의 온도와 증기의 온도를 측정하기 위하여 증기드럼 상하부에 중앙으로부터 105 mm 지점에 열전대를 부착하였다.

표 2 Size of the test section

Item	Size(mm)		Item	Size(mm)	
Drum	Dia.(out)	120	Riser (6EA)	Dia.(out)	9.75
	Dia.(in)	80		Dia.(in)	7.4
	Length	580		Length	2300
Header	Dia.(out)	33.4	Down-comer	Dia.(out)	12.9
	Dia.(in)	25		Dia.(in)	10.8
	Length	980		Length	2560

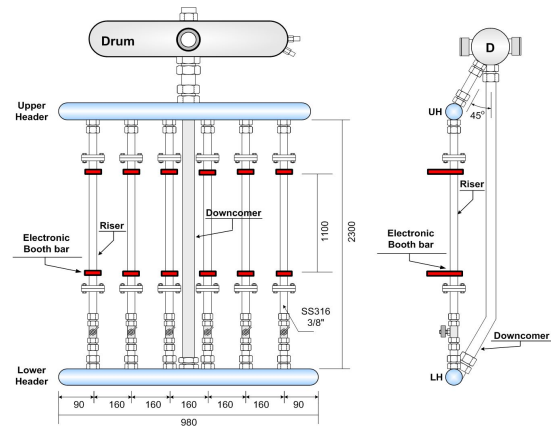


그림 1 Schematic diagram of the test section

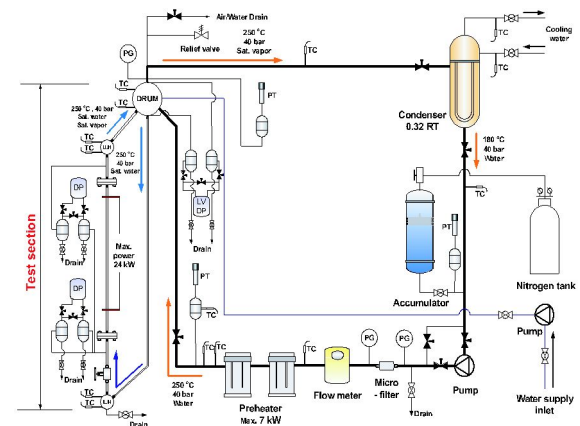


그림 2 Schematic diagram of the experimental setup



그림 3 Photograph of experiment facility

2.3 실험조건 및 방법

본 연구에서 이용되는 물과 증기의 기본적인 조건은 압력이 5 bar, 포화온도는 151.8℃이다.

실험장치의 시운전을 위해 6개의 상승관에 균일한 열유속을 포화 온도까지 주어 단상에서의 각 상승관에 흐르는 유량을 산출하였다. 또한 상승관 내의 순환특성을 알아보기 위하여 균일 열유속을 일정한 건도조건까지 주고 증기드럼 및 상/하부 헤더 물의 온도와 상승관 관외벽 온도를 측정하였다.

불균일 열유속을 위해 균일 열유속을 기준으로 각 상승관의 열유속을 5%, 10%, 15%씩 차등을 주어 각 부분의 온도를 측정하였다. 불균일 열유속을 주는 방식은 균일 열유속을 기준으로 중앙 2개의 상승관은 일정한 비율로 열유속을 증가시키고 나머지 4개의 상승관은 감소시키는 방식(Case 1, 2, 3)을 선정하였다. 불균일 열유속을 주었을 때, 열유속의 평균은 균일 열유속과 동일하게 설정하였다. 표 3은 각각의 조건에 따른 열유속 분포를 나타내고 있다.

표 3 Input heat flux with riser tubes (kW/m²)

Riser tube	A	B	C	D	E	F
Heat flux - Single phase	20	20	20	20	20	20
Heat flux - Two phase	30	30	30	30	30	30
Heat flux Case 1 (5%)	28.5	28.5	33	33	28.5	28.5
Heat flux Case 2 (10%)	27.2	27.2	36.34	34.34	27.2	27.2
Heat flux Case 3 (15%)	26.25	26.25	39	39	26.25	26.25

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험장치의 시운전 특성

열유속에 따른 순환특성을 알아보기에 앞서 시운전을 통하여 실험장치의 특성에 대하여 알아보았다. 상승관에 주어진 열유속은 상승관에서 비등이 일어나지 않는 최대한의 범위인 20 kW/m²을 모든 상승관에 균일하게 주었다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 증기드럼 물의 평균온도는 114℃, 상부헤더 물의 평균온도는 119℃, 하부헤더 물의 평균온도는 103℃이다. 상승관에서 가열된 물은 상부헤더에서 먼저 모이게 되므로 가장 높은 온도를 보여주고 있다. 상/하부 헤더 좌우 물의 온도분포를 보면 차이가 없이 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있는데, 이는 여섯 개의 상승관에서 치우침 없이 일정하게 물이 순환된다고 볼 수 있다.

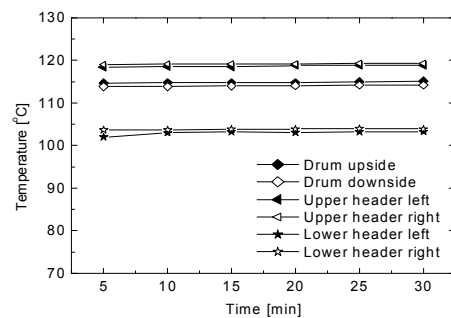


그림 4 Distribution of temperature in drum and header at heat flux of 20 kW/m²

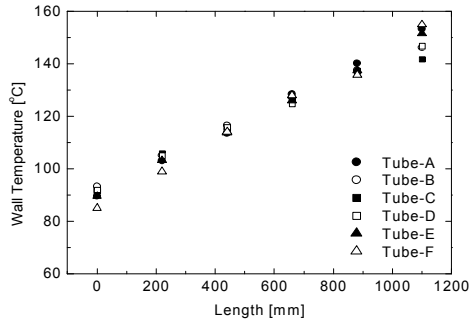


그림 5 Distribution of outside wall temperature in drum and header at heat flux of 20 kW/m²

그림 5는 상승관 하부에서부터 높이에 따른 관외벽 온도 분포를 나타내고 있다. 각 상승관 동일 위치별 관외벽 온도는 일정한 간격으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

위의 순환특성을 바탕으로 상승관에 흐르는 물의 유속을 구하기 위해서 다음과 같은 과정을 수행하였다. 먼저 상승관의 외벽온도에서 상승관 내벽온도를 산출하였다. 관에 균일한 열유속을 가하고 외부가 단열이라는 조건을 이용하면 식 (7)로부터 상승관 내벽온도를 구할 수 있다(식 (8)).

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (7)$$

$$T(r_i) = \frac{\dot{q}}{4k} (r_o^2 - r_i^2) + \frac{qr_i^2}{2k} (\ln r_i - \ln r_o) + T_o \quad (8)$$

이렇게 구해진 상승관의 내벽온도와 물의 출구 온도를 이용하여 상승관 입구 물의 온도를 산출하였고 이를 바탕으로 Nusselt 수를 구하였다. 또한 Dittus-Boelter correlation⁸⁾의 정의를 이용하여 앞서 구한 Nusselt 수를 기준으로 상승관의 유속을 산출하였으며, 이를 통해 상승관의 유량을 구하였다.

$$q = h\Delta T \quad (9)$$

$$Nu = \frac{hD_i}{k} = 0.0234 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (10)$$

표 4는 균일 열유속을 포화온도까지 주었을 때, 각 상승관의 유량을 나타낸다. 중앙에 위치한 관 C와 D의 유량은 중앙에서 먼 관 A와 F보다 많으며 관 C의 유량은 관 F보다 약 13.58 g/s가 더 많이 흐르는 것을 알 수 있다. 또한 시험부에 흐르는 총 유량은 217.4 g/s, Gr 수는 1.8×10^5 , Re 수는 33200이다.

표 4 Mass flow rate with riser tube

Riser tube	A	B	C	D	E	F
Mass flow rate(g/s)	31.24	35.86	44.2	38.08	37.4	31.14

3.2 균일 열유속에 따른 순환 특성

균일 열유속에서 비등이 일어나는 순간의 순환특성을 알아보기 위하여 모든 상승관에 동일하게 30 kW/m²의 열유속을 주고 각 부분별 온도분포를 기준으로 순환 특성을 알아보았다. 그림 6은 증기드럼과 상/하부헤더 물의 온도를 나타내고 있다. 증기드럼 물의 평균온도는 144°C, 상부헤더 물의 평균온도는 149.3°C이다. 하지만 하부헤더 물의 온도는 133.5°C에서부터 137.9°C까지 좌우가 다르게 상승과 하강을 반복하고 있다.

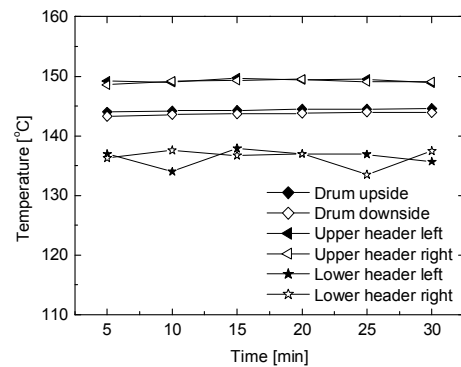


그림 6 Distribution of temperature in drum and header at heat flux of 30 kW/m²

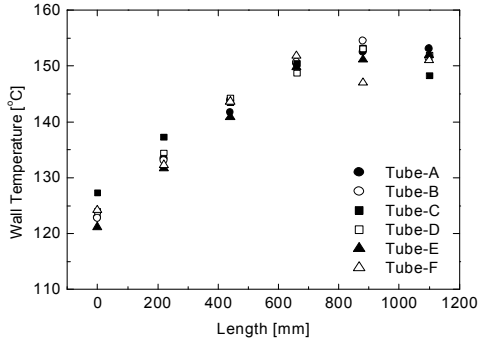


그림 7 Distribution of outside wall temperature in drum and header at heat flux of 30 kW/m²

상승관에서 위치별 관외벽 온도를 나타내는 그림 7을 보면 관 A의 경우 0 mm 지점의 온도는 130°C 이고 이후 선형적으로 증가하였다. 관 B의 경우 0 mm 지점 온도는 122.8°C 이며 선형적으로 증가하다가 880 mm 지점에서 154.4°C로 최고온도를 나타내고 가열부 끝지점인 1100 mm 에서는 151.3°C로 감소하였다. 관 C, D, E는 관 B와 같은 온도 분포를 보이고 있으며 관 F는 660 mm 지점에서 151.8°C로 최고 온도를 보이다가 880 mm 지점에서는 147°C로 감소하며 다시 1100 mm 지점에서 151.5°C로 증가하였다.

관 A부터 관 E는 일반적으로 관에 균일한 열유속을 가할 때, 비등이 일어나는 관외벽 온도분포와 유사한 모습을 보이고 있다. 균일한 열유속에서 비등이 일어날 때의 전체적인 경향을 본다면 증기드럼이나 상부헤더 물의 온도는 변함없이 일정하게 유지되는 반면 하부헤더 물의 온도는 상승과 하강을 반복하고 있다. 이는 상승관에서 비등이 일어남에 따라 유동하는 물의 순환력이 변하여 하부헤더의 좌우 균형이 깨지면서 상승과 하강을 반복하는 것으로 보인다.

3.3 불균일 열유속에 따른 순환 특성

불균일 열유속에 따른 순환 특성을 알아보

기 위하여 투입된 열은 표 3과 같이 차등을 주었다. 이는 중앙 2개의 상승관은 높이고 나머지 4개의 관은 낮추었기 때문에 높은쪽과 낮은쪽의 열유속의 차는 15%의 차등이라도 실제로는 45%가 난다. 이렇게 다른 열유속을 주었을 때의 순환 특성을 알아보기 위하여 증기드럼과 상/하부헤더 물의 온도를 알아보았다.

그림 8은 열유속의 차등을 5% 주었을 때, 증기드럼과 상/하부헤더 물의 온도를 나타내고 있다. 증기드럼의 평균 물 온도는 147.4°C, 상부헤더 물의 평균온도는 150°C, 하부헤더 물의 평균온도는 146.8°C이다. 증기드럼과 상부헤더 물의 온도차는 약 3°C 이고 증기드럼과 하부헤더 물의 온도는 거의 없다. 시험부에서의 순환력은 상부헤더와 하부헤더 물의 온도차가 클수록 커지는데 지금의 경우는 차이가 거의 없다. 이는 상승관에서의 순환이 줄어든 것으로 보인다.

그림 9는 열유속의 차등을 10% 주었을 때, 증기드럼과 상/하부 헤더 물의 온도를 보여준다. 증기드럼 물의 평균온도는 146°C, 상부헤더 좌우 평균 물의온도는 151.2°C이며 하부헤더 좌우 평균 물의 온도는 137°C이다. 상부헤더와 하부헤더 물의 온도차가 약 14°C가 생겼다. 이는 앞선 결과보다 상부와 하부헤더 물의 온도차가 커졌다. 이는 그만큼 순환이 늘었다는 것을 보여준다.

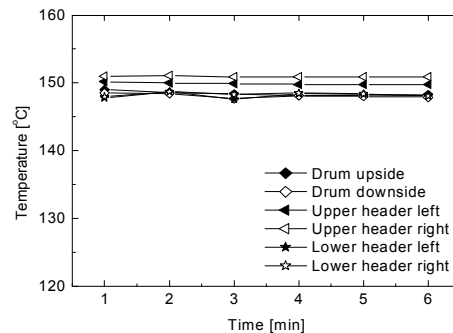


그림 8 Distribution of temperature in drum and header at non-uniform heat flux (Case 1)

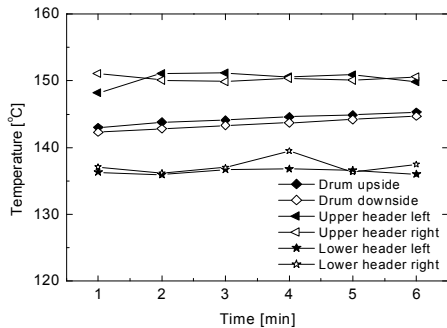


그림 9 Distribution of temperature in drum and header at non-uniform heat flux (Case 2)

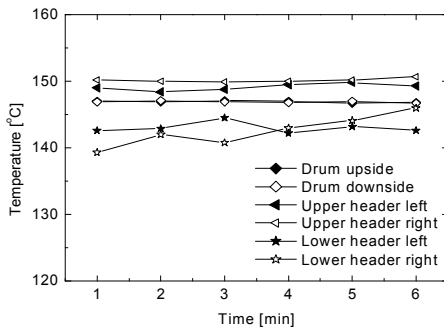


그림 10 Distribution of temperature in drum and header at non-uniform heat flux (Case 3)

마지막으로 그림 10은 열유속의 차등을 15% 주었을 때의 결과를 나타낸다. 증기드럼 물의 평균온도가 147°C, 상부헤더 좌우 물의 평균온도는 149.5°C, 152.1°C이며 하부헤더 좌우 물의 평균온도는 142.3°C, 143.3°C이다. 상부헤더는 우측 물의 온도가 약 3°C가 높게 나왔으며 하부헤더는 상승과 하강을 반복한다. 앞선 결과와의 차이를 본다면 상부헤더 좌우 물의 온도가 다르게 나왔고 하부헤더 좌우 물의 온도 역시 앞선 결과보다는 큰 폭으로 상승과 하강을 반복하고 있다. 이는 상승관 내의 유동도 불균일한 것으로 사료되며 상승관 내에 증기가 발생함으로 인해 증기드럼내의 물이 하강관을 통해 빠르게 유입되는 것으로 보인다.

각 실험에 따른 전체적인 순환특성은 시험부의 상승관에 균일하게 열유속을 주었을 때, 시간에 따른 증기드럼과 상/하부 헤더 물의 온도는 일정하게 유지되는 반면 불균일한 열유속을 주었을 때는 증기드럼 물의 온도는 일정하게 유지되었지만 각 상승관에서 발생하는 비등이 차이로 인해 상하부 헤더에서 좌우 물의 온도차가 생겼다. 특히 하부헤더 물의 온도는 상승과 하강을 반복하였다. 이렇게 불규칙한 열유속을 주었을 때, 열유속의 차등을 15% 준 Case 3의 경우가 증기드럼 물의 온도는 가장 안정적이며 상승관 내의 순환은 활발한 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구는 타워형 태양열 발전용 흡수기를 개발하기 위하여 실험장치를 구성하여 열유속에 따른 순환 특성을 알아보았다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 열유속을 포화온도 부근인 20 kW/m²을 균일하게 주었을 때, 증기드럼에서의 물 평균온도는 114°C, 상/하부헤더 물의 평균온도는 각각 119°C와 103°C이다. 상승관 관외벽 온도와 각부분의 물 온도를 기준으로 각 상승관에 흐르는 유량을 산출하였고 상승관에 흐르는 총 유량은 217.4 g/s으로 나타났다.
- (2) 열유속을 비등이 일어나는 30 kW/m²을 균일하게 주었을 때, 증기드럼에서의 물 평균온도는 144°C, 상부헤더 물의 평균온도는 149.3°C이다. 하부헤더 물의 온도는 상승관에 비등이 일어남에 상승관의 순환력이 변하면서 하부헤더 좌우의 균형이 깨지며 상승과 하강을 반복하였다.
- (3) 불규칙 열유속에 따른 순환특성은 각 상승관에 차가 적은경우엔 오히려 순환이 감소하나 그 차가 더 커지면 순환도 더 많이 발생하고 상승관내의 유동도 불균일하다는 것을 알 수 있다. 상부헤더 좌

우 물의 온도가 다르고 하부헤더 물의 온도는 상승과 하강을 반복하지만 증기드럼 물의 온도는 거의 일정하게 유지되었다.

- (4) 다양하게 열유속을 주었을 때, 상승관 관외벽 온도나 하부헤더 물의 온도는 시간에 따라 다양하게 분포하지만 상부헤더와 증기드럼 물의 온도는 크게 변하지 않았다. 높은 열유속을 받은 부분의 물은 빠르게 흐르고 낮은 열유속을 받은 물은 느리게 흐름으로서 전체적인 균형이 맞추어 진다고 볼 수 있는데 이는 태양열 흡수기에 불규칙한 열유속이 집광되어도 증기드럼에는 영향을 끼치지 않으며 안정적으로 증기를 생산한다는 것을 보여준다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지·자원기술개발 사업(2005-N-SO17-P-01-0-000)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 강용혁, 태양열 발전시스템의 종류 및 기술동향, 대한설비공학회, 설비저널 제33권 제10호, pp. 34-44, 2004
2. W. Grasse, PHOEBUS international 30 MWe solar tower plant, Solar Energy Materials, 24, pp. 82-94, 1991
3. A.K. Nayak, P. Dubey, D.N. Chavan, P.K. Vijayan, Study on the stability behavior of two-phase natural circulation systems using a four-equation drift flux model, Nuclear Engineering and Design, 237, pp. 386-398, 2007
4. 김태국, 조명환, 김동률, 민동호, 고온 고압 발전용 보일러의 수순환 밸런스 분석에 관한 연구, 대한기계학회 1997년도 추계학술대회논문집B, pp. 832-837, 1997
5. M.R. Gartia, P.K. Vijayan, D.S. Pilkhwal, A generalized flow correlation for two-phase natural circulation loops, Nuclear Engineering and Design, 236, pp. 1800-1809, 2006
6. M. Ishii, Scaling laws for thermal-hydraulic system under single phase and two-phase natural circulation, Nuclear Engineering and Design 81, pp. 411-425, 1984
7. G. Ribatski, L. Wojtan, J.R. Thome, An analysis of experimental data and prediction methods for two-phase frictional pressure drop and flow boiling heat transfer in micro-scale channels, Experimental Thermal and Fluid Science, 31, pp. 1-19, 2006
8. G. Hetsroni, D. Mewes, C. Enke, M. Gurevich, A. Mosyak, R. Rozenblit, Heat transfer to two-phase flow in inclined tubes, International Journal of Multiphase Flow 29, pp. 173-194, 2003