

## 타워형 태양열 흡수기의 열전달 특성 실험장치에 관한 연구

서 호영<sup>1),2)</sup>, 김 종규<sup>1)</sup>, 강 용혁<sup>1)</sup>, 김 용찬<sup>2)</sup>

### Scale Down Design on Experiment Facility of the Water/Steam Receiver for Solar Power Tower

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

**Key words** : Solar thermal(태양열), Power tower(타워형 발전), Water circulation(수순환), Receiver(흡수기), Pressure drop(압력강하), Boiling(비등), Two-phase flow(이상유동)

**Abstract** : This paper describes an experiment facility to measure the circulation characteristics of a water/steam receiver at various heat fluxes. The natural circulation type receiver was considered in this study. The experiment facility was designed to satisfy circulation balance with an appropriate scale down. As a result, riser tube inner diameter was 7.4 mm and water circulation was 0.319 kg/s. Downcomer tube inner diameter by circulation balance was 9.52 mm and the quality was from 0 to 0.23.

#### Nomenclature

$\alpha$  : Void fraction  
 $\beta$  : Volumetric thermal expansion coefficient  
 $\rho$  : Density, kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_o$  : Mean density of mixed fluid, kg/m<sup>3</sup>  
 $g$  : Gravity, m/s<sup>2</sup>  
 $\dot{m}$  : Mass flow rate, kg/s<sup>2</sup>  
 $\mu$  : Viscosity, kg/ms  
 $u$  : Liquid velocity, m/s  
 $x$  : Quality  
 $D_r$  : Riser inner diameter, mm  
 $D_d$  : Downcomer inner diameter, mm  
 $G$  : Mass velocity, kg/m<sup>2</sup>s<sup>2</sup>  
 $Gr$  : Grashof number  
 $Re$  : Reynolds number  
 $T_o$  : Outlet liquid temperature, °C  
 $T_s$  : Riser surface temperature, °C  
 $\Phi_{fo}$  : Two-phase frictional multiplier

#### subscript

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

#### 1. 서론

타워형(Tower) 태양열 발전 시스템은 수많은 반사판(Heliostat)이 태양을 자동으로 추적하여 한 곳으로 태양광을 집광시켜 그 열원을 이용하여 전기를 생산하는 발전 시스템이다. 타워형 태양열 흡수기는 화력발전에서 보일러(boiler)와 비슷한 구조를 갖고 있으며 역할도 같다. 하지만 일반 발전용 보일러는 열원으로 화석 연료를 연소시켜 열을 얻지만 태양열 흡수기는 집광된 태양열을 열원으로 사용한다는 점이 다르다. 또한 연소열을 이용한 기존의 보일러는 보일러 내의 상승관(riser)에 균일한 열이 가해지지만 태양열을 이용한 흡수기는 낮과 밤, 날씨, 환경 등에 따라 불규칙한 열을 받는다.

본 논문은 1 MW 타워형 태양열 흡수기를 선정하여 열유속의 변화를 주었을 때, 각 관별 증기발생량에 따른 유량의 변화와 순환량을 분석하기 위해 실 흡수기의 스케일(scale)을 줄이고 구성을 단순화 시켰다. 따라서 본 논문에서는 위와 같은 실험장치 구성과 실험조건을 선정하는 방법에 대하여 논하고자 한다.

1) 한국에너지기술연구원 태양열·수력연구센터  
E-mail : sshama@hanmail.net

Tel : (042)860-3515 Fax : (042)860-3739

2) 고려대학교 기계공학과

E-mail : yongckim@korea.ac.kr

Tel : (02)3290-3366 Fax : (02)921-5439

## 2. 대상 흡수기 선정

실험장치의 구성에 앞서 대상이 되는 태양열 흡수기를 먼저 살펴보았다. 실제 태양열 흡수기는 1 MW의 전력을 생산하는 타워형 태양열 발전 시스템에 이용되는 흡수기로서 기본 형식은 기존 화력 발전용 보일러의 자연순환형 수관식 보일러와 같은 형식을 취하고 있다. 작동 유체로는 물/증기를 이용하며 설계 압력은 40 bar, 흡수기 드럼(drum) 출구 증기 온도는 250°C이며, 과열기(superheater)를 통해 터빈(turbine)으로 들어가는 증기의 온도는 350°C이다. 물순환량은 370 t/h, 증기발생량은 8.4 t/h이고, 건도는 0.02이며 순환비는 44이다. 상승관의 표면온도는 약 300°C, 1개의 상승관에서 흡수되는 열은 53.2 kW, 열유속은 27.59 kW/m<sup>2</sup>이다.

Fig. 1을 참고로 상승관을 살펴보면 외경은 76.2 mm, 두께는 4 mm, 길이는 9 m, 총 상승관의 개수는 75개이며 25개씩 3개의 판넬(Panel)로 나뉘어져 있다.

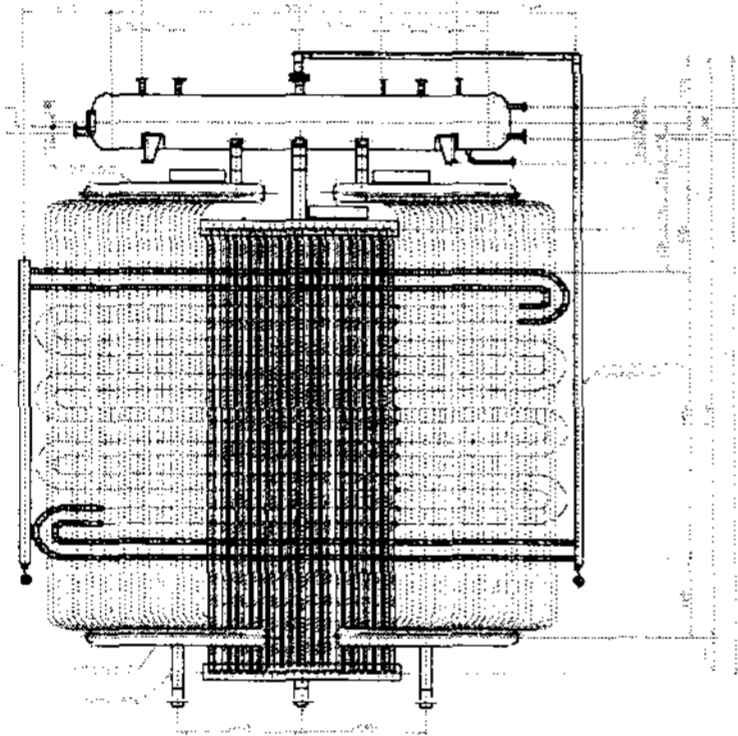


Fig. 1 Solar receiver

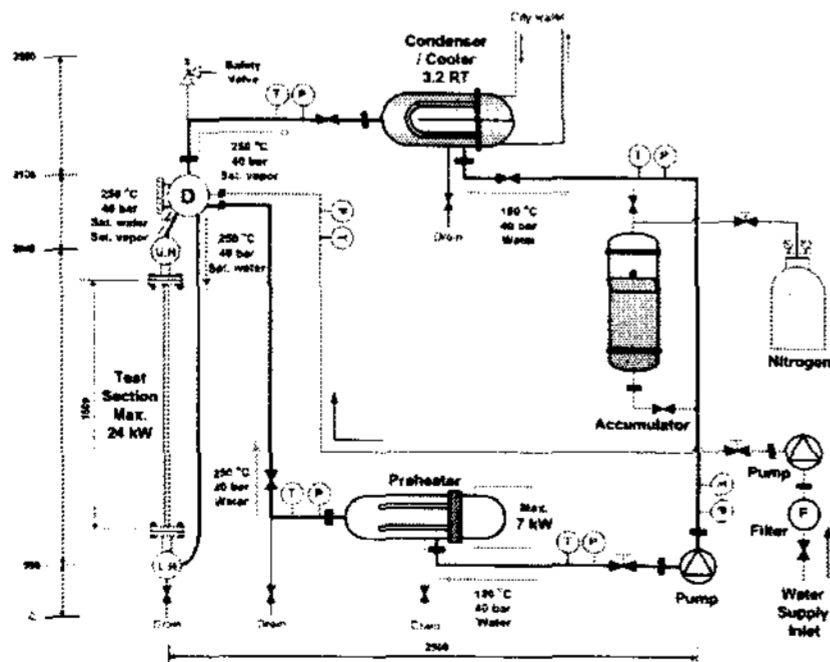


Fig. 2 Schematic of experimental setup

## 3. 실험 장치의 구성

본 연구를 위해 실험장치의 기본적인 구성을 보면 Fig. 2와 같이 시험부(test section), 응축기(condenser), 예열기(preheater)로 구성되어 있

다. 시험부는 태양열 흡수기에 해당하고 여기에 발생된 증기는 응축기를 지나면서는 물로 응축되고 다시 예열기를 통과하면서 일정한 온도의 물이 시험부에 있는 증기드럼으로 들어간다. 실험장치의 설계 압력은 40 bar, 시험부 출구 증기 온도는 250°C로 실제 흡수기와 같은 증기 조건으로 설정하였다.

## 4. 실험장치 설계

### 4.1. Scale down

스케일을 줄이기 위해서 단상(single-phase)일 때와 이상(two-phase)일 때를 나누어 고려해 보았다. 먼저 단상의 경우를 고려한 것은 건도가 0.02로 아주 낮기 때문에 거의 단상으로 봐도 무난하다고 보았다. 이러한 경우에는 부력 효과(bouyancy effect)에서 Grashof 수와 Reynolds 수를 이용하여 내부유동의 거동을 살펴볼 수 있다.

$$Gr_D = \frac{g\beta(T_s - T_o)D_r^3}{\nu^2} \quad (1)$$

$$Re_D = \frac{\rho u D_r}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi \mu D_r} \quad (2)$$

이와 같은 두 무차원수를 비교하여 실 흡수기의 부력효과 계수를 살펴보면  $Gr_D / (Re_D)^2 = 0.22$ 와 같은 결론을 얻는다. 또한 위의 관계를 이용하여 실험장치의 유량과 상승관 직경과의 관계를 다시 나타내면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{\pi^2 g \beta \rho_o^2 (T_s - T_o) D_r^5}{3.52}} \quad (3)$$

이상의 경우는 건도를 0.2까지 높였을 때, 발생하는 증기의 양을 무시할 수 없다. 따라서 Ishii<sup>(1)</sup>가 제시한 무차원수를 이용하였다.

- Phase change number :  $N_{pch}$
- Subcooling number :  $N_s$
- Drift flux number :  $N_d$
- Density number :  $N_\rho$
- Friction number :  $N_f$

이러한 무차원수를 이용하여 유량과 상승관의 관계를 얻어 이를 기준으로 나머지 실험 장치에 필요한 부분들을 결정 하였다.

### 4.2. 상승관 및 하강관 압력강하

시험부의 상승관 및 하강관(downcomer)을 순환하는 물 및 증기는 적정량의 유량을 갖으면서 관로개통을 순환한다. 이 때, 비중차에 의한 순환력과 관로에서의 압력강하는 서로 평형을 이루게 된다. 이러한 평형하에서 적정량의 유량을 유지하도록 하기 위해서는 관의 수 및 크기를 알맞게 조절해야 하며, 이를 위하여 순환계통의 압력강하 예측은 반드시 필요하다. 먼저 상승관은

이상유동이 일어나는 부분으로 마찰, 가속, 중력(수두)에 의한 압력손실을 고려하고 하강관에서는 단상의 의한 마찰과 중력을 통한 압력손실을 고려하여 순환 밸런스를 맞춘다.

1) 마찰압력 손실 (Friction loss)

마찰에 의한 압력강하는 단상에서의 마찰 압력강하에서 이상유동 마찰에 따른 승수를 곱해서 얻을 수 있다.

$$-\left(\frac{dP}{dz} F_r\right) = \left(\frac{2f_o G^2 v_f}{D_r}\right) \Phi_{fo} \quad (4)$$

여기서, 이상유동 마찰에 따른 승수는 여러 가지 실험식에 의해 정의 할 수 있는데 대표적인 Lochhart-Martinelli<sup>(2)</sup> 관계식을 이용하였고, Friedel<sup>(3)</sup> 관계식을 이용하여 다시 한번 검증 하였다.

2) 가속압력 손실 (Acceleration loss)

가속압력 손실은 물에서 증기가 발생함에 따라 생기는 손실이다.

$$-\left(\frac{dP}{dz} A_r\right) = G^2 v_f \left[ \frac{x^2}{\alpha} \left(\frac{v_g}{v_f}\right) + \frac{(1-x^2)}{(1-\alpha)} - 1 \right] \quad (5)$$

여기서  $\alpha$ 는 공극률(void fraction)을 나타내며 공극률은 Butterworth's grneral form에서 Lockhart-Martinelli 분리유동 계수에 의해 정의 된다.

3) 중력(수두)압력 손실 (Gravitation loss)

중력에 의한 압력손실은 또 다른 의미로 수두 차에 의한 압력손실이라고 볼 수 있다.

$$-\left(\frac{dP}{dz} Z_r\right) = g[(1-\alpha)\rho_f + \alpha\rho_g] \quad (6)$$

4) 하강관에서의 압력 손실

하강관에 대한 압력강하는 단상만이 존재하기 때문에 마찰과 중력(수두)에 의한 압력손실만을 고려하였다.

4.3. 순환 밸런스

순환 밸런스는 상승관을 기준으로 하강관의 크기를 결정하고 순환력<sup>(4)</sup>에 관한 부분도 이 관계를 통해서 이루어진다.

$$\left(\frac{dP}{dz} Z_d\right) - \left(\frac{dP}{dz} Z_r\right) \geq \left(\frac{dP}{dz} F_d\right) + \left(\frac{dP}{dz} F_r\right) + \left(\frac{dP}{dz} A_r\right) \quad (7)$$

이는 하강관과 상승관에서 중력(수두)에 의한 압력강하의 차는 상승관과 하강관의 마찰과 가속에 의한 압력강하의 합보다 크거나 같아야 한다. 이러한 관계를 만족하면 비등이 일어남에 따라 하강관에서 물을 상승관쪽으로 밀어주는 역할을 하게 되고 순환력이 발생하게 된다.

4.4. 시험부

시험부는 흡수기의 형태를 최대한 단순화 시켰다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 상·하부헤더(Upper-Lower header) 사이에 상승관 6개, 하부헤더와 증기드럼 사이에 하강관 1개, 그리고 증기드럼으로 구성되어 있다. 가열 방식은 상승관

자체 전기저항을 이용한 직가열방식을 사용하였으며 상승관을 각각 개별적으로 가열할 수 있게 하였다. 각 상승관에 흐르는 유량의 측정은 피토프관(Pitot tube)을 이용 하였으며, 차압을 측정하여 유량을 산출하는 방식을 채택하였다.

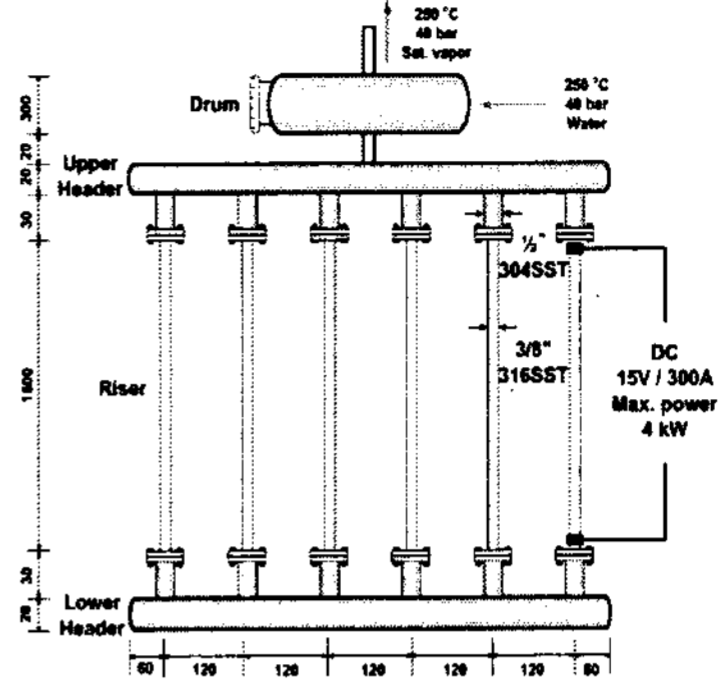


Fig. 3 Schematic of the test section

5. 결과

실 흡수기의 스케일 줄여서 얻은 유량과 상승관의 관계는 상승관 내경이 7.4 mm 일 때, 유량은 0.319 kg/s 이고, 상승관 내경이 9.52 mm 일 때, 유량은 0.598 kg/s 이다. Fig. 4는 상승관과 유량 통해 얻은 건도에 따른 전력량이다.

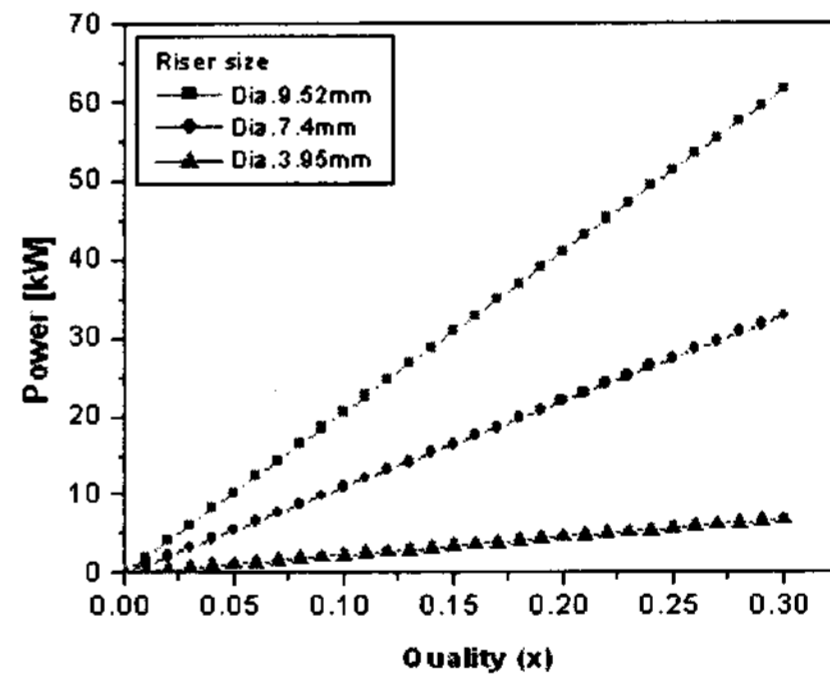


Fig. 4 Expected input power to riser

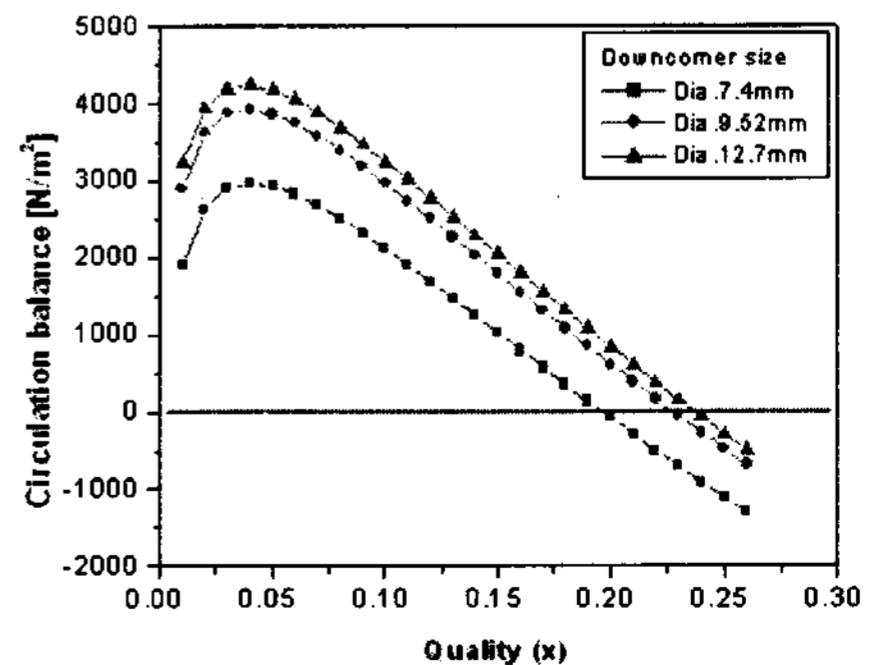


Fig. 5 Expected circulation balance when riser diameter is 7.4 mm

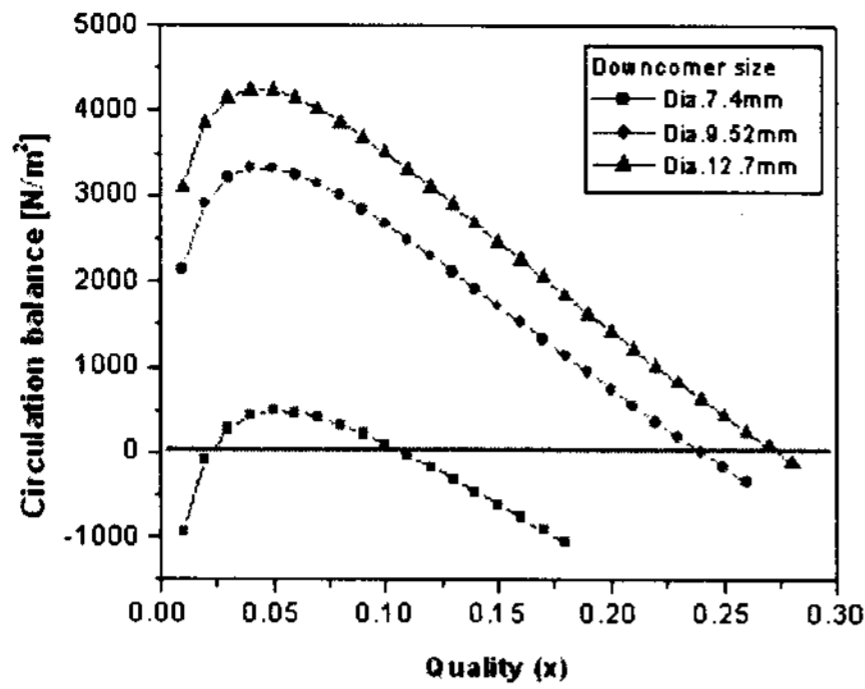


Fig. 6 Expected circulation balance when riser diameter is 9.52 mm

상승관의 크기, 유량 및 전력량을 기준으로 하강관 크기를 결정 했다. 하강관의 크기를 결정하는 중요한 요소는 압력강하에 따른 순환 밸런스이다. 건도에 따른 순환력은 식 (7)에서 우변항을 좌변으로 이항해서 정리하면 0보다 클 때 발생한다. Fig. 5와 6은 상승관 내경이 7.4 mm와 9.52 mm일 때, 하강관의 크기에 따른 순환 밸런스를 나타낸다. Fig. 5는 하강관의 크기 따라 순환력이 발생하는 건도는 0에서 약 0.23이다. 반면에 Fig. 6은 상승관의 크기가 9.52 mm로 늘어났을 때, 하강관 내경이 9.52mm와 12.7 mm일 때는 순환력이 발생하는 건도의 범위가 0에서 약 0.27로 더 늘어나지만 하강관 내경이 7.4 mm로 상승관 내경보다 작은 경우에 순환력이 발생하는 건도 조건은 0.02에서 약 0.1이다. 이러한 조건을 기준으로 실험장치의 크기와 용량을 결정하면 Table 1과 같다.

Table 1 System capacity and size

Facility	Size and Capacity	
Riser	Inner dia.	7.4 mm
	Length	1500 mm
Downcomer	Inner dia.	9.52 mm
	Length	1513 mm
Steam drum	Size	360 mm × 300 mm
	Location	1950 mm
Condenser	Capacity	3.2 RT
	Location	2300 mm
Accumulator	Capacity	100 kg/cm <sup>2</sup>
	Size	320 mm × 130 mm
Upper/Lower header	Size	20 mm × 720 mm
Riser maximum power	Capacity	24 kW
Preheater	Capacity	7 kW

## 6. 결론

본 연구는 1MW 타워형 태양열 흡수기를 선정하여 스케일을 줄였을 때, 상승관의 내경과 유량이 결정되고 순환 밸런스를 이용하여 하강관의 크기와 건도 조건을 얻었다. 이것을 요약하면 다음과 같다.

1) 흡수기에서 순환되는 물/증기의 무차원수를 비교하여 실험장치의 상승관 내경 및 유량을 산출하고, 건도를 높이기 위해 이용되는 전력량을 알아보았다. 그 결과, 상승관 내경은 7.4 mm, 유량은 0.319 kg/s 이고 상승관에 작용하는 최대 전력량은 24 kW 이다.

2) 상승관과 하강관의 건도에 따른 압력강하를 통해 얻는 순환 밸런스를 기준으로 하강관 크기를 얻었고 그 크기는 9.52 mm 이다. 또한 건도 조건은 0에서 0.23 이다.

## References

- [1] M. Ishii, 1984, "Scaling laws for thermal-hydraulic system under single phase and two-phase natural circulation," Nuclear Engineering and Design 81 (1984) 411-425.
- [2] Tae-Kuk Kim, Gyu-Ik Han, Seok-ho Seu, Si-Deok Oh, Yong-Ho Kwon, Hyo-Sun Pang, 1995, "Development of a rating/sizing program for a naturally circulation water tube type waste heat recovery boiler by considering the heat transfer steam-water circulation," 대한기계학회 1995년 추계학술대회논문집(II) pp. 682-687.
- [3] A.K. Nayak, P.K. Vijayan, V. Hain, D. Saha, R.K. Sinha, 2003, "Study on the flow-pattern-transition instability in natural circulation heavy water moderated boiling light water cooled reactor," Nuclear Engineering and Design 225, pp.159-172.
- [4] T.K Kim, M.H. Cho, D.R. Kim, D.H. Min, 1997, "Study on water-steam circulation analysis for high temperature high pressure power boiler," 대한기계학회지 1997년 추계학술대회 논문집 B pp. 832-837.
- [5] A.K. Nayak, P. Dubey, D.N. Chavan, P.K. Vijayan, 2007, "Study on the stability behaviour of two-phase natural circulation system using a four-equation drift flux model," Nuclear Engineering and Design 237, pp.386-398.
- [6] M.E. Vieira, P.O.O. Duarte, H.L.B. Buarque, 2000, "Determination of the void fraction and drift velocity in a two-phase flow with a boiling solar collector," Solar Energy Vol. 69, No. 4, pp. 315-319.