



## 파사드 일체형 자연순환 태양열온수기 유동해석

### Flow Analysis of Facade Integrated Solar Water Heater with Natural Circulation

백남춘\* · 이왕제\*\* · 임희원\*\*\* · 신우철\*\*\*\*

Baek, Nam-Choon\* · Lee, Wang-Je\*\* · Lim, Hee-Won\*\*\* · Shin, U-Cheul\*\*\*\*

\* Solar Thermal Laboratory, Korea Institute of Energy Research, South Korea (Baek@kier.re.kr)

\*\* Solar Thermal Laboratory, Korea Institute of Energy Research, South Korea (lwj3116@kier.re.kr)

\*\*\* Department of Architectural Engineering, Daejeon University, South Korea (hee2ws@gmail.com)

\*\*\*\* Corresponding author, Department of Architectural Engineering, Daejeon University, Daejeon, South Korea (shinuc@dju.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** The solar water heater with natural circulation has been used for several decades in the world as it is automatically operated without a pump and controller and is easy to maintain and repair. After the subsidy was offered from 2012, the solar water heater with natural circulation is becoming increasingly popular in Korea. Recently, the development of a wall-integrated solar water heater, which improves the applicability of buildings and prevents the overheating in the summer, is being developed. On the other hand, the design and performance evaluation data of solar water heaters are very inadequate, and analysis of heat and flow is required to develop a new type of solar water heater. **Method:** Therefore, in this study, we proposed a new simplified system analysis model that reflects heat and pressure loss from the test results of KS B ISO 9806-1 (Solar collector test method), assuming that the collector is a simple pipe system, the validity of which was verified through experiments. **Result:** As a result, first, the RMSE of the system circulation flow rate and the average temperature of the inlet and outlet of the collector according to the experimental results and the simulation are 0.05563 and 0.88530, respectively, which are very consistent. Secondly, the mass flow rate is increased linearly with the increase of the solar radiation, and the mass flow rate is 0.0104 ~ 0.0180kg/s in the range of 200 ~ 380W/m<sup>2</sup> of solar irradiance. Compared with the test flow rate 0.0764kg / s of the test collector, it showed a level of less than 20%.

#### KEYWORD

열사이편  
자연순환  
태양열온수기  
파사드 일체형 태양열집열기

Thermosiphon  
Natural Circulation  
Solar Water Heater  
Facade Integrated Solar Collector

#### ACCEPTANCE INFO

Received Nov 17, 2016

Final revision received Dec 16, 2016

Accepted Dec 21, 2016

© 2016 KIEAE Journal

## 1. 서론

자연순환 태양열온수기는 펌프 및 제어장치 없이 자동 운전되며 유지보수가 간편한 단순한 구조로서, 지난 수십 년 동안 사용되고 있다. 2014년 기준으로 전세계 태양열시스템에 의한 연간 에너지 공급량은 약 357TWh<sub>th</sub>이며, 이중 67%가 단독주택에 설치된 급탕용<sup>1)</sup>으로 자연순환 태양열온수기로 추정되고 있다. 국내에서도 2012년부터 자연순환 태양열온수기의 보급 보조사업이 시작된 이후 점차 보급이 활성화될 것으로 기대되며, 최근에는 기존 태양열온수기의 하절기 과열을 방지하고 시스템의 고장을 원천적으로 차단한 벽체 일체형 자연순환 태양열온수기의 개발이 모색되고 있다.<sup>2)</sup> 이 시스템은 축열조의 위치선택이 자유로우며, 외부노출 배관이 전혀 없는 방식으로 집열기와 축열조가 일체화된 기존 태양열온수기에 비해 건축 의장적 측면에서 우수하고, 유지보수가 용이한 장점을 갖고 있다. 한편 국내 자연순환 태양열온수기의 설계 및 성능평가 자료는 매우 부족한 실정므로, 새로운 형태의 자연순환 태양열온수기 개발과 관련하여 열 및 유동특성에 대한 분석이 요구되고 있다.

자연순환 태양열 온수기의 해석과 관련한 연구동향을 살펴보

면, 1960년대 초 Close<sup>3)</sup>에 의해 해석적 연구가 최초로 수행되었으며, 흡열판과 축열조, 연결배관 내 열매체 평균온도가 동일하다는 가정을 전제로 열사이편에 의한 수학적 유동해석모델을 제안하였다. 그 후, Ong 등은<sup>4,5)</sup> 유한차분법(Finite-Difference Method)을 이용하여 열사이편 태양열 온수기의 성능을 이론적으로 평가하였으며, Morrison 등은<sup>6,7)</sup> 장기 열성능과 시스템 모델링 및 운전 특성에 관한 연구를 수행하였다. 앞서의 연구들이 축열조 직접가열방식에 한정되었지만, Rakopoulos 등은<sup>8)</sup> 열교환기 내장형 자연순환 태양열온수기에 대한 해석모델을 개발하고 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였으며, 다양한 부하조건에 대한 열성능을 평가하였다. 이와 같은 간접가열방식의 연구는 다양한 열교환기 코일의 형태에 따라 Koffi 등<sup>9,10)</sup>과 Tse 등<sup>11)</sup>에 의해 추후 발표되었다. 그러나 기존연구의 대부분이 하나의 지관을 집열기 모델로 가정된 상태에서 물질전달에 의한 압력손실과 열전달을 해석하는 방식으로 투과체의 광학적 특성과 주관의 압력손실 등이 시스템 해석에 반영되지 않는 단점을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 집열기를 시스템의 한 배관으로 가정하고 열전달 및 압력손실을 KS B ISO 9806-1(태양열 집열기 시험방법)의 시험결과로부터 반영하는 새로운 시스템 해석 방식을

제안하였다. 이 방식은 기존 해석방식에 비해 단순하나 집열기의 열 및 압력손실 특성이 정확히 반영된 자연순환 태양열온수기의 유동해석 알고리즘으로 본 연구에서는 실험과의 비교·분석을 통해 그 타당성을 검증하였으며, 이에 따른 자연순환 시스템의 열 성능 및 유동특성 등을 고찰하였다.

## 2. 이론해석

자연순환 태양열온수기의 유동해석을 위한 이론해석은 몇가지 가정이 요구된다. 이들 가정의 주요내용을 정리하면 다음과 같다.

- ① 시스템은 준 정상상태(quasi-steady state)이다.
- ② 열매체 유동은 1차원이다.
- ③ 관내부의 유동은 층류이며 균일하게 분포한다.
- ④ 집열기의 유로는 단관이다.
- ⑤ 축열조와 집열기 사이의 배관 열손실은 없다.
- ⑥ 집열기와 축열조 내부의 온도는 선형분포를 갖는다.

열매체의 유동은 고온과 저온 유체의 밀도차에 따라 발생하는 열사이펀 부력(Buoyant Pressure),  $BP$ 와 집열기를 포함한 시스템 유로의 총 압력손실(total pressure loss),  $\Delta P_t$  사이의 열 및 물질 전달 평형상태에 있게 되며, 이때 압력 평형방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$BP = \Delta P_t = \Delta P_d + \Delta P_p + \Delta P_m \quad (1)$$

여기서,  $\Delta P_d$ 은 집열기의 압력손실,  $\Delta P_p$ 은 배관압력손실,  $\Delta P_m$ 은 부차적 손실을 나타낸다.

시스템 내부 열매체 밀도 차에 발생하는 부력을 해석하기 위해서는 시스템 유로 내부 온도차를 파악해야 한다. Fig. 1과 Fig. 2는 자연순환 태양열온수기의 배치(layout)와 Close<sup>3)</sup>이 가정한 순환유로(flow-circuit) 상의 시스템 온도분포를 각각 나타낸 것이다. Close는 Fig. 2에서 ②와 ③사이와 ①과 ⑤사이의 온도차가 없다고 가정할 때, 열사이펀 부력을 다음과 같이 제안하였다.

$$BP = area_{12345} = 0.5(S_1 - S_2) \left[ 2(h_3 - h_1) - (h_2 - h_1) - \frac{(h_3 - h_5)^2}{h_6 - h_5} \right] \quad (2)$$

여기서,  $S$ 는 열매체의 비중(specific gravity)을 나타내며, 온도에 따른 포물선 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$S = AT_m^2 + BT_m + C \quad (3)$$

여기서,  $A = -0.00000405$ ,  $B = -0.00003906$ ,  $C = 1.00026$ 이 되며,  $T_m$ 은 다음과 같다.

$$T_m = \frac{(T_1 + T_2)^2}{2} \quad (4)$$

여기서,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 집열기 입·출구 온도를 나타낸다.

식 (3)을 식(2)에 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$BP = \frac{\rho g}{2} (T_1 - T_2) (2AT_m + B) f(h) \quad (5)$$

여기서,  $g$ 은 중력가속도,  $\rho$ 은 열매체 밀도를 나타내며  $f(h)$ 는 다음과 같다.

$$f_h = 2(h_3 - h_1) - (h_2 - h_1) - \frac{(h_3 - h_5)^2}{h_6 - h_5} \quad (6)$$

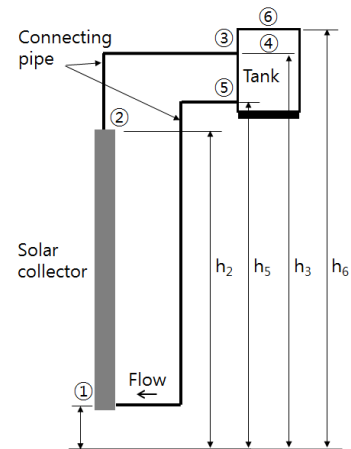


Fig. 1 Schematic layout of typical solar water heater

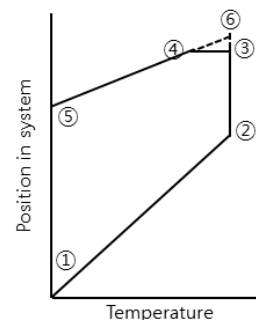


Fig. 2 Hypothetical system temperature distribution

집열기의 압력손실( $\Delta P_d$ )은 KS B ISO 9806-1의 “집열기 압력손실 시험”에 따라 식 (6)과 같이 2차함수로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_d = am^2 + bm + c \quad (7)$$

여기서,  $\dot{m}$ 는 질량유량(kg/s)을 나타낸다.

배관 압력손실,  $\Delta P_p$ 은 Darcy-Weisbach에 따라 다음 식 (8)과 같다.

$$\Delta P_p = f\rho \frac{v^2 l}{2d} = f \frac{l}{d} \frac{\dot{m}^2}{2g\rho^2 A^2} \quad (8)$$

여기서,  $v$ 는 유속,  $f$ 는 마찰계수,  $d$ 는 배관관경,  $l$ 는 배관길이,  $\dot{m}$ 는 질량유속,  $g$ 는 중력가속도,  $A$ 는 배관 단면적,  $\rho$ 는 열유체 밀도를 나타낸다.

배관의 마찰계수는 열매체 유동이 층류인 경우( $Re < 2000$ ) 다음과 같다.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (9)$$

여기서,  $Re$ 는 레이놀드 수(Reynolds number)를 나타낸다.

배관 부속재의 부차적 압력손실,  $\Delta P_m$ 은 다음과 같다.

$$\Delta P_m = \xi\rho \frac{v^2}{2} = \xi \frac{\dot{m}^2}{2g\rho^2 A^2} \quad (10)$$

여기서,  $\xi$ 는 부차적 손실계수(Minor Loss Coefficient)를 나타낸다.

식 (5)와 식 (7), 식 (8), 식 (10)을 식 (1)에 대입하면 다음과 같은 2차 방정식으로 정리할 수 있다.

$$\left[ \frac{\xi}{2g\rho^2 A^2} + f \frac{l}{d} \frac{1}{2g\rho^2 A^2} + a \right] \dot{m}^2 + b\dot{m} + c \quad (11)$$

$$= \frac{\rho g}{2} (T_1 - T_2) (2A T_m + B) f(h)$$

전술한 바와 같이 본 연구에서 집열기의 유로를 단관으로, 그 내부의 온도를 선형적으로 가정할 경우 KS B ISO 9806-1에 따른 시험결과로부터 집열기 출구 온도를 해석할 수 있다.

집열기의 순간효율,  $\eta$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I_t} = \frac{\dot{m} c_p (T_2 - T_1)}{A_c I_t} \quad (12)$$

여기서,  $Q_u$ 는 집열기 집열열량,  $A_c$ 는 집열기 면적,  $I_t$ 는 입사면 총일사량,  $c_p$ 는 열유체 비열을 나타낸다.

KS B ISO 9806-1에서는 평판형 집열기에 대한 표준 시험방법을 제안하고 있다. 일반적인 시험과정은 거의 정상상태의 시험장치 내에서 집열기를 작동시키고 분석에 필요한 데이터를 측정하게 되며, 일정범위의 유입온도 변화에 따른 순간효율,  $\eta$ 를 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 광학적 최고효율,  $F_R(\tau\alpha)$ 와 열손실계수,  $F_R U_L$ 는 선형 회귀분석을 통해 계산하게 된다.

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_1 - T_{amb}}{I_t} \quad (13)$$

여기서,  $T_{amb}$ 는 외기온을 나타낸다.

식 (13)을 식 (12)에 대입할 때 총 집열열량,  $Q_u$ 와 집열기 출구온도,  $T_2$ 는 식 (14)와 식 (15)에 따라 각각 계산된다.

$$Q_u = A_c (F_R(\tau\alpha) I_t - F_R U_L (T_2 - T_{amb})) \quad (14)$$

$$T_{out} = \frac{Q_u}{C_p \dot{m}} + T_{in} \quad (15)$$

자연순환 태양열온수기의 유동해석을 위해서는 커플링된 식 (11)과 식 (14)이 동시에 해석되어야 한다. 본 연구에서는 Newton-Raphson을 이용하여 식 (11)의 해를 구하고, 그 해를 식 (14)에 대입하는 반복법을 통하여 시스템의 유동을 해석하였다.

### 3. 실험 및 결과분석

#### 3.1. 시험장치 개요 및 실험방법

Fig. 3과 Fig.4는 자연순환 태양열시스템 시험장치의 개념도와 설치현장을 나타낸 것이다. 집열기가 설치되는 프레임은 일사 조건에 따라 설치 각도를 임의로 변경할 수 있도록 제작하였으며, 그 상부에 종형과 횡형의 축열조를 병렬로 배치하였다.

Table 1과 Table 2는 Fig. 1에 따른 시스템의 높이와 시험장치의 측정센서를 나타낸 것이다. Fig. 3에 표시된 바와 같이 4개의 RTD 온도센서를 집열기와 축열조의 입-출구 배관에 각각 설치하였으며, 전자식 유량계는 축열조로부터 집열기로 유입되는 배관에 배치하였다. 또한 일사계는 ISO 9060에 규정된 1 등급으로 집열기의 입사면과 동일한 각도로 집열기 측면에 고정하였다.

Table 3은 시험장치의 주 배관과 배관 부속재의 규격을 나타낸 것이다. 공급 및 환수배관의 총 길이는 각각 8m와 4.4m이며 관경은 22mm(외경)로 동일하다. 배관 부속재는 90° 엘보 8개와 리듀서 2개 등 총 10개가 배관연결에 사용되었다.

Table 4와 는 시험장치에 설치된 평판형 집열기의 규격과 KS B ISO 9806-1에 따른 열성능을 나타낸 것이다. 전면적이 4m<sup>2</sup>인 대면적 집열기로 지관의 길이는 3.8m이다.

Fig. 5는 KS B ISO 9806-1에 의해 측정된 이 집열기의 압력 손실을 나타낸 것이다. 질량유량에 대한 압력손실로 표시된다.

Fig. 6은 측정자료의 모니터링 화면을 나타낸 것이다. 모든 센서는 1분 간격으로 측정되고 저장된다. 본 연구에서는 청명한 2016년 8월 24일의 측정 자료를 기준으로 파사드 일체형 자연순환 태양열온수기의 유동을 분석하였다.

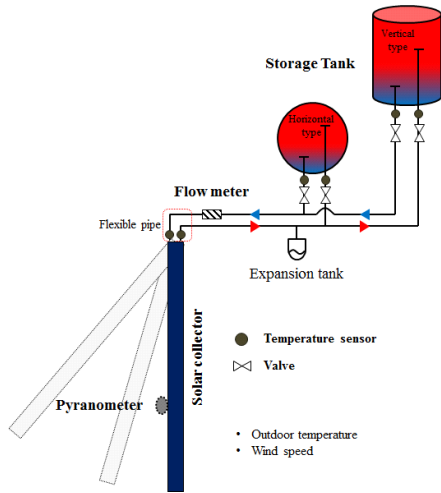


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up



Fig. 4. Natural circulation solar hot water system installation

Table 1. System height

H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>6</sub>
0m	3.8m	4.88m	5.55m	5.8m

Table 2. Sensors type and measuring devices

Item	Model	Quantity	Error (%)
Temperature	RTD	4	±0.0001~0.0005°C
	T-type	1	0.4%
Flowmeter	VN10	1	±2.0 RS%
Pyranometer	CMP11	1	< 1%

Table 3. Technical characteristics of the system

Item	Content
Pipe Diameter	20mm
Supply pipe	8.0m
Return pipe	4.4m
90° Elbow	8
Reducer	1
Expansion	1
Ball valve	2

Table 4. Collector dimension & thermal performance

Item	Content
Dimension	1,000 <sup>mm</sup> × 4,100 <sup>mm</sup> × 70 <sup>mm</sup>
Absorber area	4m <sup>2</sup>
$F_R(\tau\alpha)$	0.7083
$F_R U_L$	3.4058W/m <sup>2</sup> K
Tested mass flow rate	0.0764kg/s
Heat storage tank capacity	Vertical type 250liter

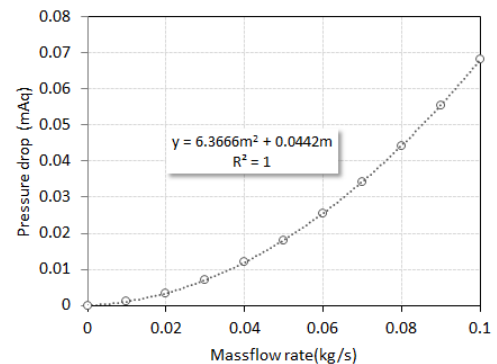


Fig. 5 Pressure drop in collector

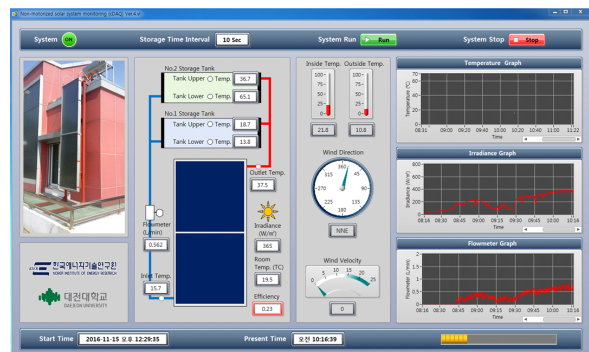


Fig. 6. Monitoring system

### 3.2. 이론해석의 타당성 검토

Fig. 7은 실험결과와 시뮬레이션에 따른 시스템 순환유량을 비교한 것이다. 두 결과의 오차(error)에 의해 발생된 표준편차를 의미하는 RMSE(Root Mean Square Error)는 0.05563 l/min이며, 오차율이 커지는 저 유량상태에서도 최대 상대오차는 10% 미만인 것으로 나타났다. 일사가 380W/m<sup>2</sup> 일 때 작동유량은 1.95 liter/min로, 이 때 메인배관에서 0.05m/s의 유속이 발생하였다. 본 실험에서는 일사량 100W/m<sup>2</sup>이하에서는 유동이 발생하지 않았으나, 이러한 일사조건에 따른 유동현상은 축열조 온도(집열기 작동온도에 영향을 미침)와 외기온도에 따라 다소 차이가 있을 수 있다.

Fig. 8은 집열기 입·출구온도의 평균값을 비교한 것으로, 두 결과의 RMSE는 0.88530°C이다. 실험과 이론해석의 최대 오차는 ±3% 미만으로 거의 유사한 것으로 나타났다. 본 연구에서 집열기 입·출구 평균온도는 축열조의 평균온도를 의미하는 것으로, 오전 9시 40°C에서 오후 5시 60°C까지 상승하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 이론해석에 따른 질량유량을 일사량에 따라 나타낸 것으로, 일사량의 증가에 따른 질량유량은 선형적 증가형태를 보이고 있다. 일사량이 350W/m<sup>2</sup>일 때 질량유량은 0.017kg/s로서, Table 4의 집열기 열성능 시험유량 값인 0.0764kg/s의 20% 수준으로 나타났다.

Fig. 10은 자연순환에 따른 집열기의 작동효율을 나타낸 것이다. Table 4의 집열기 열성능( $F_R(\pi) = 0.7083$ ,  $F_R U_L = 3.4058 \text{ W/m}^2\text{K}$ )과 비교할 때 작동성능이 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 자연순환에 의한 유속저하(순환유량 감소)로 집열기의 작동온도가 증가하였기 때문인 것으로 분석되었다.

Fig. 11은 자연순환 유량이 1.014liter/min인 상태에서 시스템 요소별 압력손실을 해석한 결과이다. 여기서 총 압력손실, 0.008728은 시스템의 부력(buoyance pressure)과 동일하며, 평형상태에 있게 된다. 압력손실분포를 살펴보면 배관의 압력손실이 40%를 차지하고 있으며, 배관 부속재 35%, 집열기 25%의 순으로 나타났다.

Fig. 12는 자연순환 유량이 0.744liter/min로 감소할 때, 시스템 요소별 압력손실을 비교한 것이다. 총 압력손실이 0.005280인 상태에서, 배관의 압력손실이 49%로 증가하는 반면 배관 부속재는 29%로 감소하였으며, 집열기 22%는 거의 동일한 수준으로 나타났다.

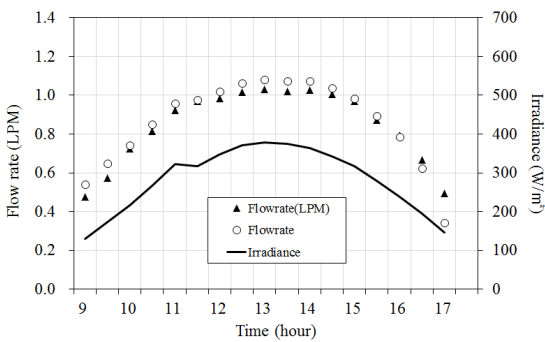


Fig. 7 Flow rate between experimental result and theoretical prediction

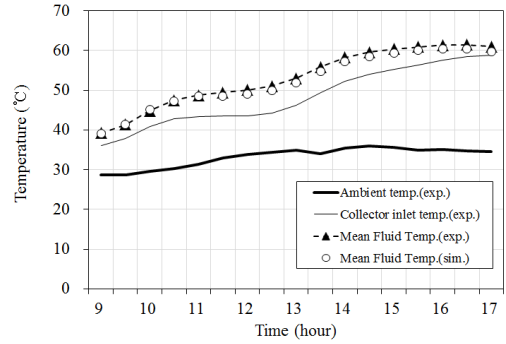


Fig. 8 Mean fluid temperature between experimental result and theoretical prediction

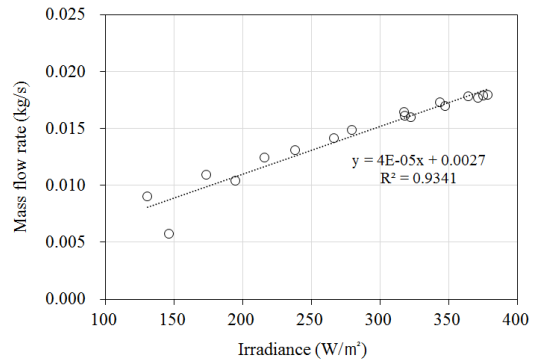


Fig. 9 Mass flow rate with irradiance at simulation

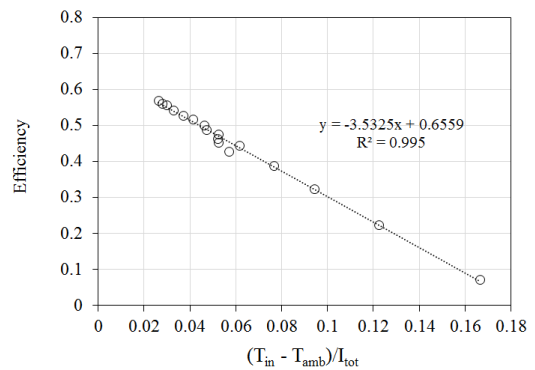


Fig. 10 Collector's thermal efficiency

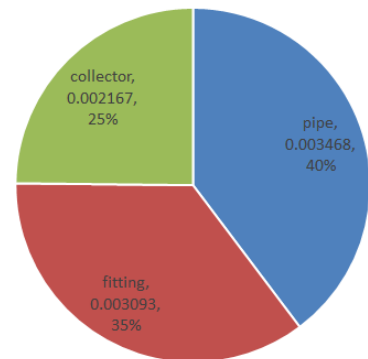


Fig. 11 System pressure loss at simulation

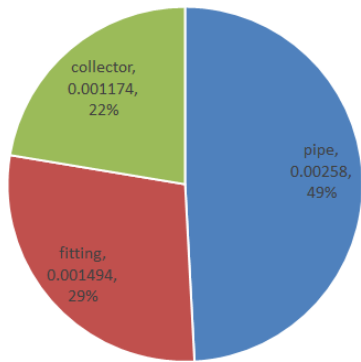


Fig. 12 System pressure loss at simulation

#### 4. 결론

본 연구에서는 열사이폰에 의해 작동하는 파사드 일체형 자연순환 태양열온수기의 약산화된 유동해석 알고리즘을 제안하고 그 타당성을 실험결과와 비교·분석하였다. 이 방식은 집열기를 시스템의 한 배관으로 가정하고 열전달 및 압력손실을 KS B ISO 9806-1(태양열 집열기 시험방법)의 시험결과로부터 반영하는 새로운 시스템 해석 방식으로 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 실험결과와 시뮬레이션에 따른 시스템 순환유량과 집열기 입출구 평균온도를 비교하면 RMSE는 각각 0.05563와 0.88530로서 상당히 일치된 결과를 나타냈다.

둘째, 일사량의 증가에 따른 질량유량은 선형적 증가형태로 보이고 있으며, 200 ~ 380W/m<sup>2</sup>의 일사량 범위에서 질량유량은 0.0104 ~ 0.0180kg/s로 나타났다.

셋째, 자연순환에 따른 집열기의 작동효율은 시험유량이 0.0764kg/s로 일정한 상태에서 측정된 KS B ISO 9806-1의 인증효율에 비해 다소 떨어지는 것으로 나타났으며, 이는 자연순환의 유속저하에 기인한다.

넷째, 시스템의 요소별 압력손실 분포는 순환유량에 따라 변화하는 것으로 나타났다

결론적으로 본 연구를 통해서 제안된 파사드 일체형 자연순환 태양열온수기의 해석모델은 비교적 타당성이 입증되었다고 볼 수 있다.

#### Acknowledgements

This work was supported by the New & Renewable Energy Core Technology Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 20133030080840)

#### Reference

[1] Franz Mauthner, Werner Weiss, Monika Spörk-Dür, Solar Heat Worldwide : Markets and Contribution to the Energy Supply 2014,

IEA Solar Heating & Cooling Programme, May 2016.  
 [2] 백남춘, 김성범, 신우철, “벽체일체형 자연순환 태양열온수기의 동적 거동과 열성능에 관한 실증연구”, 한국태양에너지학회논문집, Vol. 36, No. 6, 2016. // (Nam-Choon Baek, Sung-Bum Kim, U-Cheul Shin, “An Empirical Study on the Thermal Performance and Dynamic Behavior of Wall Integrated Thermosiphon Solar Water Heater”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 36, No. 6, 2016)  
 [3] Close D.J., “The Performance of Solar Water Heaters with Natural Circulation”, Sol. Energy, Vol. 6, No. 1, 33-40, 1962.  
 [4] Ong K.S., “A Finite-Difference Method to Evaluate the Thermal Performance of a Solar Water Heater”, Solar Energy, Vol. 16, No. 1, 137-147, 1974.  
 [5] Ong K.S., “An Improved Computer Program for the Thermal Performance of a Solar Water Heater”, Solar Energy, Vol. 18, No. 1, 183-191, 1976.  
 [6] Morrison, G.L., and Tran, H.N., “Simulation of the long term performance of the thermosiphon solar water heaters”, Solar Energy, Vol. 33, 515-526, 1984.  
 [7] Morrison G.L., Braun J.E., “System modeling and operation characteristics of thermosiphon solar water heaters”, Solar Energy, Vol. 34, 389-405, 1985.  
 [8] Rakopoulos C.D., Vazeos E., “A theoretical and experimental investigation of thermosiphon solar domestic water heaters, with indirect heating, under hot water withdrawal conditions”, Energy Conversion and Management, Vol. 26, No. 1, 95-101, 1986.  
 [9] Koffia P.M.E., Andoh H.Y., Gbaha P., Toure S., Ado G., “Theoretical and experimental study of solar water heater with internal exchanger using thermosiphon system”, Energy Conversion and Management, Vol. 49, No. 8, 2279-2290, 2008.  
 [10] Koffia P.M.E., Koua B.K., Gbaha P., Toure S., “Thermal performance of a solar water heater with internal exchanger using thermosiphon system in Côte d'Ivoire”, Energy, Vol. 64, No. 1, 187-199, 2014.  
 [11] Tse Ka-Kui, Chow Tiin-Tai, “Dynamic Model and Experimental Validation of an Indirect Thermosiphon Solar Water Heater Coupled with a Parallel Circular Tube Rings Type Heat Exchange Coil”, Solar Energy, Vol. 114, 114-133, 2015.