

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 20, No. 2, 2000

자연대류형 태양열온수기의 특성별 성능평가에 관한 연구

강용혁, 곽희열, 유창균, 윤환기, 강명철, 이동규

*한국에너지기술연구소

Performance Ratings According to Characteristics of Thermosyphon Solar Hot Water System

Y.H.Kang, H.Y.Kwak, C.G.Yoo, H.G.Yoon, M.C.Kang, D.G.Lee

**Korea Institute of Energy Research*

Abstract

To obtain thermal performance data, an experiment was performed with the two selected thermosyphon systems. The system parameters obtained by experimental data were used to perform TRNSYS simulation and verified TRNSYS model of thermosyphon solar hot water system.

The thermosyphon solar hot water system was TYPE 145 which is modified from non-linear model. This model can describe heat exchange type and non-linear efficiency equation. It is possible to analyze the annual energy rate with efficiency equation and system specification.

In this paper, we could compare the annual performance of the coil heat exchanger with that of the tank-in-tank heat exchanger. Under the same efficiency and parameter, heat exchange, drain, initial tank temperature, ratio of tank volume over collector area(V/A_c), regional annual performance rating were performed.

기 호 설 명

- T_k : temperature in i-node
- T_a : ambient temperature
- T_i : initial temperature
- T_{ci} : collector initial temperature
- T_w : working fluid temperature
- T_e : effective environment temperature
- A_c : collector area
- U_L : overall loss coefficient
- F' : collector efficiency factor
- F_R : heat removal factor
- $\tau\alpha$: transmittance-absorptance
- \dot{m} : flow rate
- Q_u : useful energy
- α : solar altitude angle
- β : slope
- k_T : daily clearness
- I_d : diffuse radiation
- V : tank volume

1. 서 론

세계적으로 환경규제가 보다 강화되는 시점에서 이를 해결할 미래 청정에너지원으로써의 태양에너지가 각광을 받는 상황에서 국내 태양열에너지의 보급을 주도하고 있는 태양열온수기의 성능향상을 통한 국내보급 및 수출의 활성화를 위해 각 태양열시스템의 장기성능 평가방법의 정립과 이를 통한 성능표준화 및 등급제가 필요하다. 국내 태양열온수기 보급은 1994년까지 10여년동안 3만대가 보급되었으나, 기술의 국산화, 소득수준

향상 및 유가상승에 힘입어 1996년에 4만여대 그리고 1997년에 7만여대로 급격히 증가하였으며, IMF이후에도 온수급탕을 위한 설비형 태양열시스템의 수요는 꾸준히 증가하고 있는 실정에서 보급되는 제품의 평가 및 품질향상을 위한 장기성능평가가 필요하다.

1987년부터 미국 NREL 주도하에 콜로라도대학, 애리조나대학, 위스콘신대학등과 Grey-Box-Model을 이용하여 태양열 온수급탕 시스템의 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 년성능평가 프로그램을 개발중이며, 이를 위해 장기측정을 미국전역의 240개소에서 측정, 수집하고 있고 현재 세계 각국의 제품 및 시스템 80여개의 성능평가 모델을 G.Morrison 수정모델을 이용하여 완성한 상태이다.

미국 SRCC(태양열시스템 검증 평가 기관)에서는 1993년부터 G.Morrison 수정모델을 사용한 태양열 시스템의 등급제인 OG-300기준을 적용하여 60여개의 태양열 시스템을 평가하였다. 미국 FSEC에서도 OG-300을 적용하여 수행중이다.⁶⁾

EC의 독일, 프랑스, 벨기에등 각국에서도 공동연구를 하고 있는 EC의 CSTG(The Collector and System Testing Group)의 B.Bourges등(1991)은 태양열 온수기를 하루종일 시험에 의해 결정되는 input-output parameter들을 갖는 Black Box로 취급하여 성능시험과정을 개발하였다.⁷⁾

태양열 시스템의 장기성능 평가방법의 정립과 이를 통한 성능표준화가 필요하며 이를 위해서는 시스템의 정확한 모델링이 우선되어야 한다. 이런 모델링 및 성능평가의 최선진 기법인 Grey-Box Model을 이용하여 장기 측정 데이터를 G.Morrison 모델에 적용하여 얻을 수 있다.⁵⁾

미국등에서는 Grey-Box Model을 이용한 태양열 온수급탕 시스템의 시뮬레이션에 의한 년성능평가 프로그램을 개발중이고 많은 시스템의 성능

평가 모델을 G.Morrison 수정모델을 이용하여 완성한 상태이다. 그러나 우리 나라인 경우에는 년 성능 평가나 장기성능평가를 위한 장기 측정도 수행된 적이 없다.

태양열 온수급탕 시스템은 PSTAR방법에 따른 시뮬레이션에 기초하고 있으며 년성능 평가는 단기측정에 의한 성능 데이터가 확보되면 TRNSYS시뮬레이션을 통하여 이루어진다.^{4,5,8,9)}

자연 대류형 시스템은 G.Morrison이 개발한 모델에 의하여 시스템 성능평가가 가능하다.^{1,2,3,4,8,9)}

본 연구에서는 자연대류형 시스템의 년성능 평가를 위하여 실험을 통한 성능 데이터를 수집하였고 그 데이터를 이용하여 시스템을 모델링하였다.

2. 성능 실험

태양열 온수기의 년성능 평가를 위해서는 여러 가지 형태의 시스템에 대한 성능 측정을 필요로 한다. 시스템 선정은 일체형 시스템과 평판형 시스템의 두 가지로 나누어 tank-in-tank 열교환 형태의 시스템으로 실험을 수행하였다. 실험 초기 온도는 24°C이고 측정된 하루 일사량은 5,325kcal이다.

그림 1과 그림 2는 집열기의 열성능 곡선을 나타내고 있는데 일사량, 외기온, 탱크온도의 변화를 일체형(판형접합형)과 평판형(지관과 집열판 접합형)을 비교한 그림이다. 그림 1은 일체형 시스템의 열성능 곡선으로 온수온도가 60°C 이상이 되고 ΔT 는 40°C 이상이 된다는 것을 알 수 있다. 그림 2는 판형 시스템의 열성능 곡선을 나타내는 것인데 온수온도는 60°C 이상이 되며 ΔT 는 38°C가 된다는 것을 볼 수 있다. 그림에서 보이는 것처럼 일체형과 평판형을 비교하여 보면 일체형이 온수온도가 높게 나오는 것을 알 수 있다.

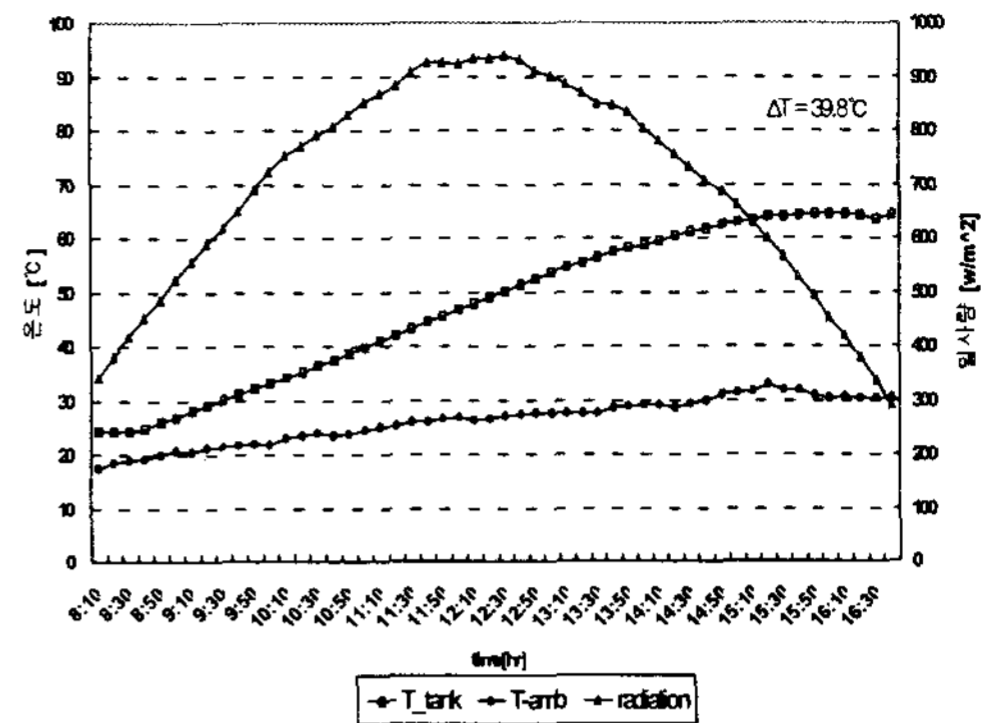


Fig. 1. Thermal performance of welding steel type solar collector

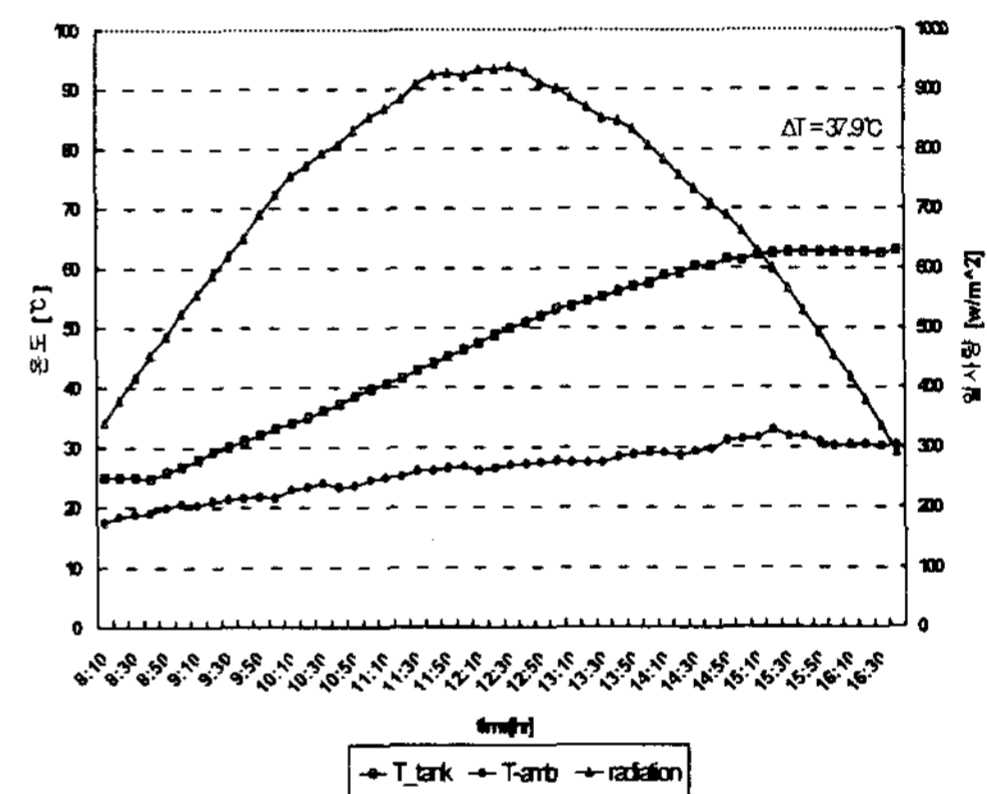


Fig. 2. Thermal performance of flat-plate solar collector

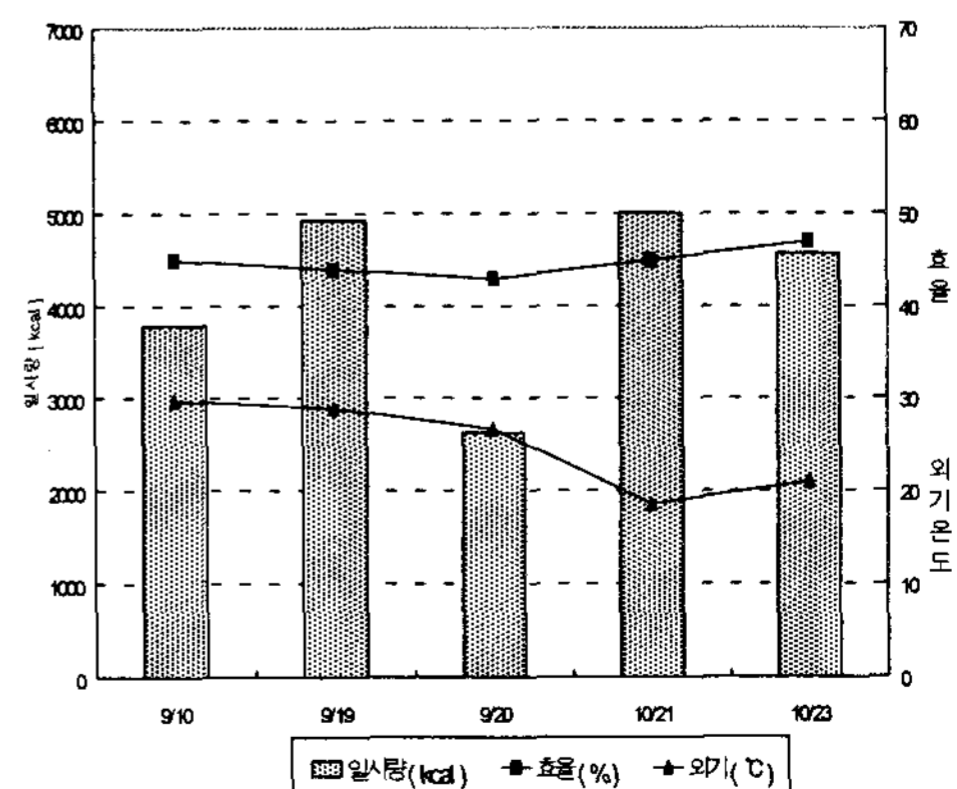


Fig. 3. Change of Efficiency during insolation and ambient temperature

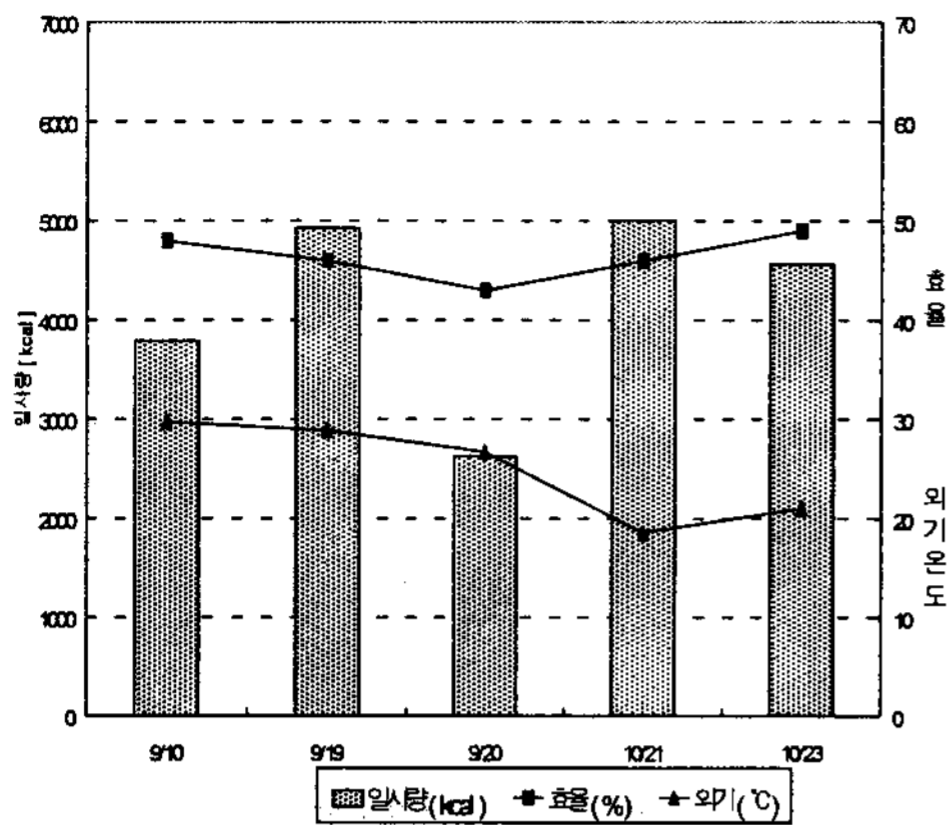


Fig. 4. Change of Efficiency during insolation and ambient temperature

그림 3과 그림 4는 일체형 시스템과 평판형 시스템의 일사량과 외기온, 효율의 관계를 나타낸 그림이다. 그림 3은 일체형 시스템의 일사량과 외기온에 따른 효율의 변화를 보여주고 있는데 일사량과 외기온의 변화에 따라 효율이 다소 차이가 남을 알 수 있다. 그림 4는 평판형 시스템에서의 관계인데 일체형과 비교하여 효율이 다름을 보여준다. 이렇게 일사량과 외기온의 변화에 의해서 효율에는 상당한 차이가 난다는 것을 알 수 있다.

3. 자연대류형 태양열 온수기 모델링

대부분의 태양열 시스템은 표준 시스템의 실험적 평가에 근거를 두어왔다. 다양한 일사량에 대한 장기적 성능을 평가하는데 한계가 있으므로 단기 시험에 의한 시스템 성능 데이터가 확보되면 이를 이용하여 년성능평가를 TRNSYS 시뮬레이션을 통하여 가능해졌다.^{5,8,9)}

3.1 집열기 모델

집열기의 열성능 묘사는 집열기를 똑같은 크기

의 노드(node)로 분할해서 해석을 한다. 집열기의 열 성능은 Hottel-Whillier 방정식에 의해서 묘사되고 분할된 i 번째 노드에서의 중앙온도는 다음의 식으로 표현된다.^[3,8,9]

$$T_k = T_a + \frac{I_T F_R U_L}{F_R (\tau \alpha)} + (T_i - T_a - \frac{I_T F_R U_L}{F_R (\tau \alpha)}) \quad (1)$$

$$* \exp\left(-\frac{F U_L A_c}{\dot{m} C_p} \frac{(k-1/2)}{N_c}\right)$$

$$F U_L = -\frac{\dot{m}_T C_p}{A_c} \ln\left(1 - \frac{F_R U_L A_c}{\dot{m}_T}\right) \quad (2)$$

변수 $F_R (\tau \alpha)$ 는 수직 입사각에 대한 효율식에서 효율축 절편값, $F_R (\tau \alpha)_n$ 과 입사각 수정계수 $\frac{(\tau \alpha)}{(\tau \alpha)_n}$ 로부터 계산된다. 그러므로 집열기로부터 총괄 이용 가능한 에너지는

$$Q_u = r A_c [F_R (\tau \alpha) I_T - F_R U_L (T_{ci} - T_a)] \quad (3)$$

로 표현되고 여기서 r 은 다음과 같다.

$$r = \frac{F_R |_{use}}{F_R |_{test}} = \frac{\dot{m}(1 - \exp(-\frac{F U_L A_c}{\dot{m} C_p}))}{\dot{m}_T(1 - \exp(-\frac{F U_L A_c}{\dot{m}_T C_p}))} \quad (4)$$

그리고 기존 모델은 선형 효율식에 근거를 두지만 수정된 모델에서는 다음과 같은 비선형 효율식을 사용할 수 있다.

Efficiency mode 1

$$\eta = a - b(T_i - T_a)/I \quad (5)$$

Efficiency mode 2

$$\eta = a - b(T_w - T_e)/I - c(T_w - T_e)^2/I \quad (6)$$

Efficiency mode 3

$$\eta = a - b(T_w - T_e)/I - c(T_w^4 - T_e^4)/I \quad (7)$$

여기에서 T_e 는 복사에 의한 열손실을 고려한 effective environment temperature를 나타내고 T_w 는 집열기 입·출구의 열매체 온도의 평균값을 나타낸다.

3.2 축열조 모델

자연대류형 태양열 온수기의 축열조내 온도분포는 집열기 입구 온도와 유량에 주요한 영향을 끼친다. 그러므로 축열조내의 성층화 현상을 정확히 묘사해 주어야만 집열기 입구 온도와 유량 예측이 정확해 진다. 자연대류형 루프에서 유량은 비교적 낮고 이러한 유량에 적합한 모델로서 Plug flow 모델을 사용하였다.^{8,9)} 이러한 모델은 축열조내로 들어오는 유체와 축열조내에 있는 유체는 혼합되지 않는다고 가정을 한다. 이런 가정을 함으로 해서 에너지 평형식은 움직이는 부분 요소에 대해서 대류항이 나타나지 않는다. Plug flow 탱크 모델은 처음에 온도 T_i 체적 V_i 를 네 개의 부분으로 나눈다. 한 간격 시간 동안에 집열기에서 온도 T_h 체적 $\dot{m}_h \Delta t / \rho$ 와 같은 V_h 가 전달된다. 이러한 체적은 탱크의 상층부에 더해지게 되고 이러한 시간 간격 전에 형성되었던 온도 분포는 새로운 온도 분포로 바뀌게 된다.

3.3 일사량 분석

태양열 시스템은 일사량 변화에 가장 큰 영향을 받는다. 그러므로 정확한 일사량 데이터를 제공해 주어야만 신뢰할 수 있는 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 일사량 데이터는 한 시간 간격으로 수평면에서 측정된 데이터를 이용한다. 그러나 TRNSYS 시뮬레이션에서는 한 시간 이외의 시간간격(time step)에

서 일사량 데이터가 필요하고 필요에 따라 경사면에서의 일사량 정보를 원한다. 이러한 경우 TRNSYS의 TYPE16(일사량 분석)이 제공된 일사량 데이터를 보간(interpolation)하고 태양의 위치변화에 따른 고정된 표면에서의 일사량 계산을 수행한다. 그리고 이용할 수 있는 일사량 데이터가 수평면 전 일사량인 경우 경사면에서의 전 일사량을 구하기 위해서는 수평면에서 직달일사량(beam radiation)과 산란일사량(diffuse radiation)으로 구분해 주어야 한다. 수평면 전일사량 분석모델은 Reindle모델에 적용하였다.

$$\frac{I_d}{I} = 1.020 - 0.254k_T + 0.0123 \sin(\alpha) \quad \text{for} \\ 0 \leq k_T \leq 0.3, I_d/I \leq 1.0 \quad (8)$$

$$\frac{I_d}{I} = 1.4 - 1.749k_T + 0.177 \sin(\alpha) \quad \text{for} \\ 0.3 < k_T < 0.78, 0.1 \leq I_d/I \leq 0.97 \quad (9)$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.486k_T - 0.182 \sin(\alpha) \quad \text{for} \\ 0.78 < k_T, 0.1 \leq I_d/I \quad (10)$$

여기에서 α 는 태양 고도각(solar altitude angle)을 나타낸다. 그리고 경사면 일사량 모델은 측정된 값과 일치한 isotropic sky 모델을 사용하였다.^{4,8,9)} 수평면 전일사량에 대한 경사면 산란 일사량의 비율, R_d 를 정의하면,

$$R_d = 0.5(1 + \cos \beta) \quad (11)$$

경사면에서의 산란 일사량은, $I_{dT} = I_d \cdot R_d$ 로 계산된다.

3.4 모델의 타당성 입증

자연대류형 태양열 온수기와 같이 모델링이 된

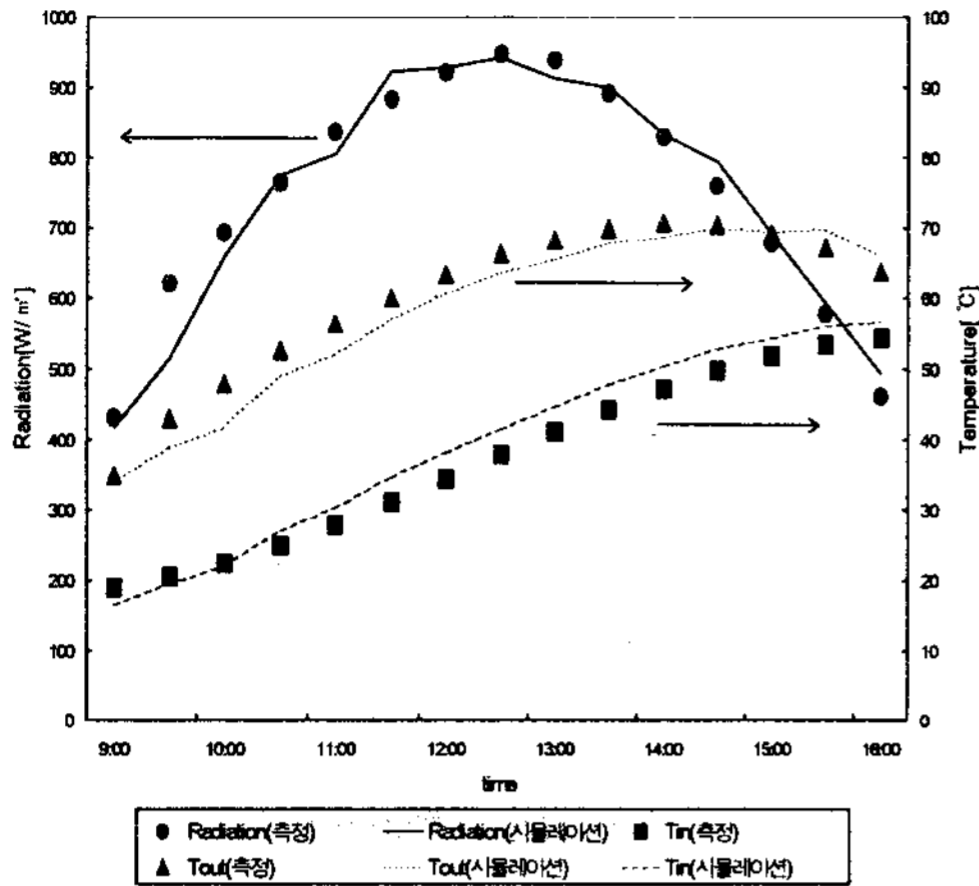


Fig. 5. Comparison of measured and simulated collector inlet, outlet and insolation

경우 시험 결과를 이용하여 모델을 입증할 수 있다. TRNSYS를 사용하여 측정된 실험 데이터와 비교하였다. 그림 5는 자연대류형 태양열 온수기 시스템 사양과 측정된 성능 데이터로부터 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하기 위해서 실험값과 시뮬레이션 결과를 비교한 그림이다. 그림에서 보는 것과 같이 실험값과 시뮬레이션 결과가 비교적 일치함을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과 분석

4.1 열교환기 형태

탱크 내 코일 형태의 열교환기를 내장한 시스템과 이중 탱크형 열교환 시스템의 년성능을 비교 평가하였다. 그림 6은 두 시스템에 대한 월평균 집열효율과 월평균 일사량을 보여주고 있다. 이중 탱크형 열교환 시스템의 열교환율이 높기 때문에 집열기 입구온도가 낮게 유지되고 집열효율이 높게 나타났다.

4.2 배수 형태

배수 형태는 탱크내 온도분포에 큰 영향을 미

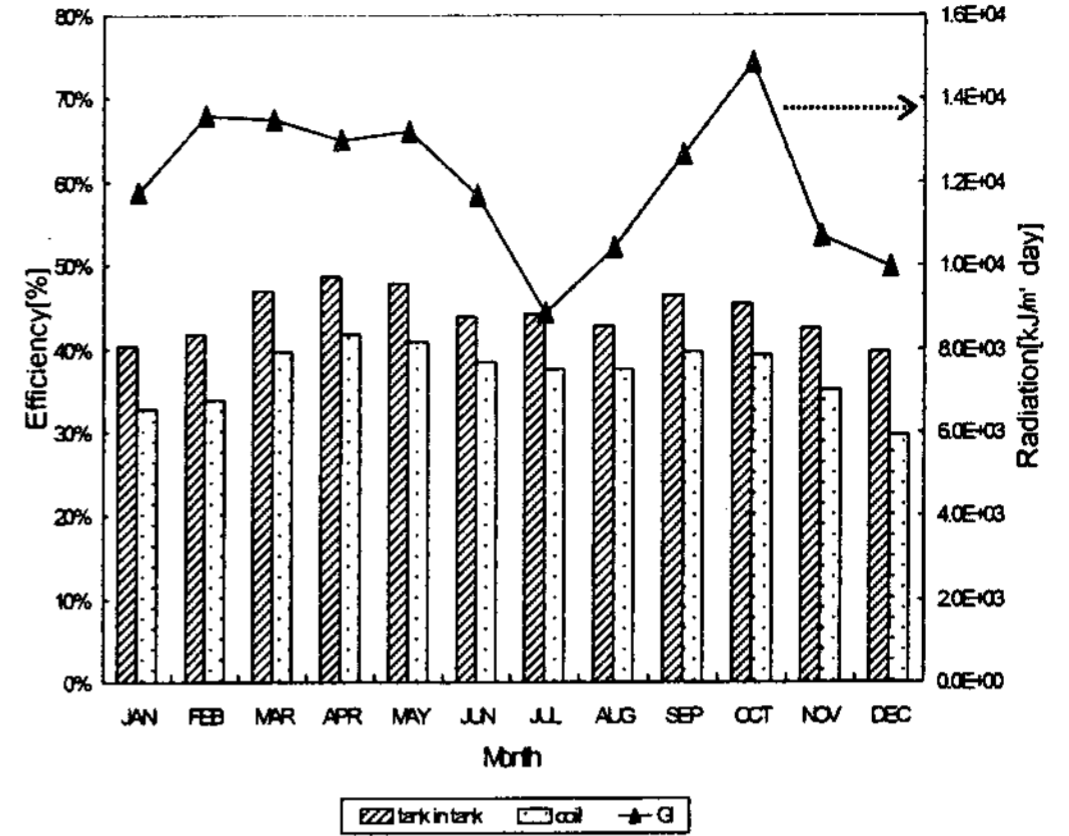


Fig. 6. Month Average Efficiency and Radiation by heat exchanger type

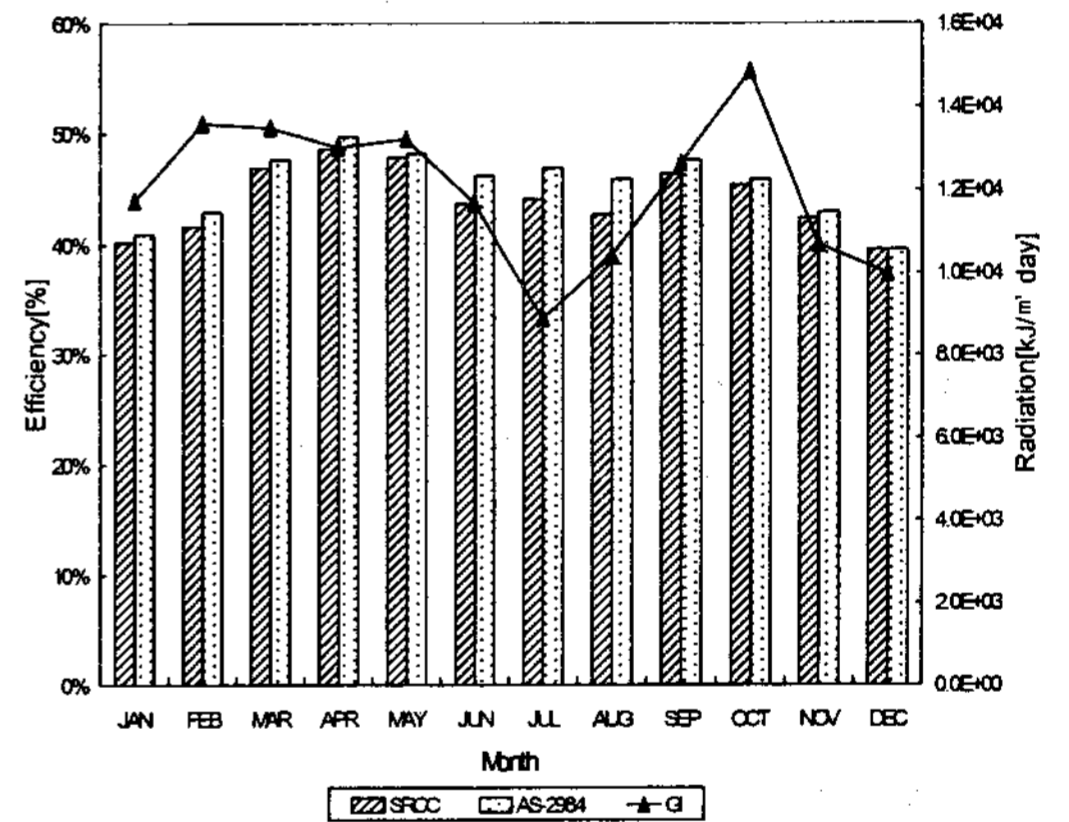


Fig. 7. Change of the month average efficiency and radiation for drain type

치므로 시스템 성능과 관련이 있다. 배수되는 총량은 같으나 배수형태가 다를 경우 시스템 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 그림 7은 배수 형태에 대한 집열 효율과 월평균 일사량의 변화를 나타내고 있다.

4.3 탱크 설정 온도

탱크 설정 온도는 탱크의 초기 온도를 나타낸다. 이 온도를 기준으로 보조열원이 작동된다. 그림 8은 탱크내 설정 온도에 따른 연간 태양의

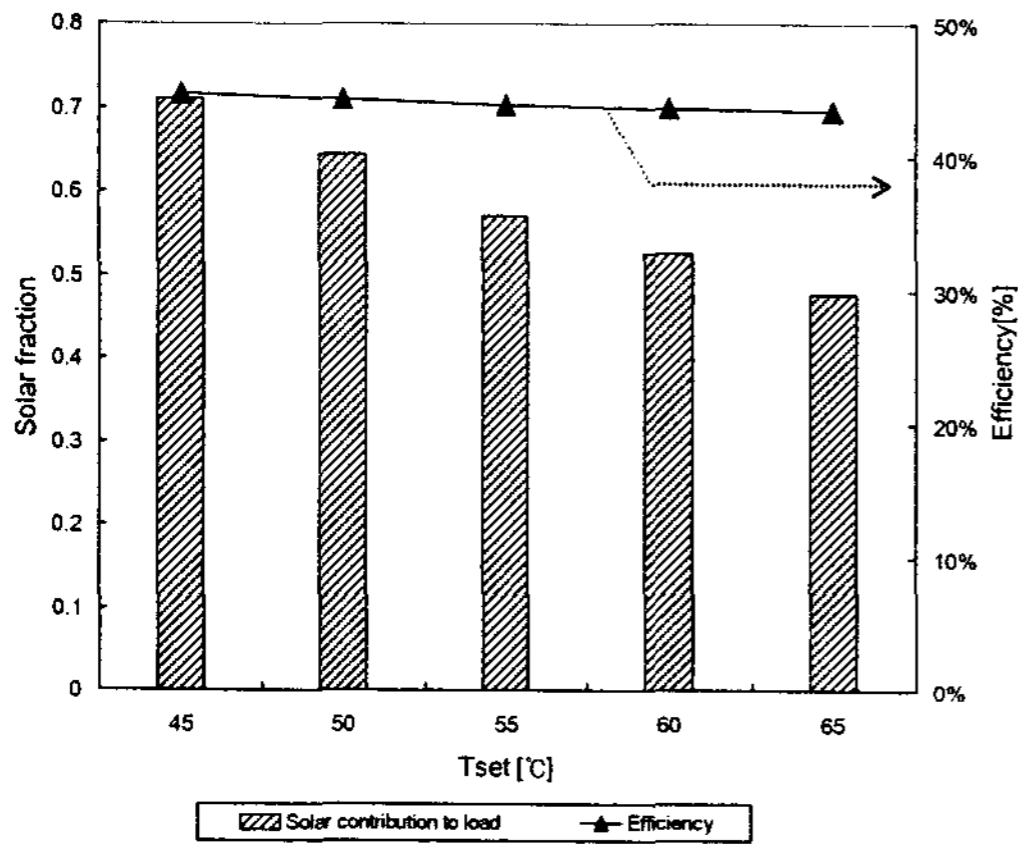


Fig. 8. Change of the annual solar fraction and efficiency by Tset

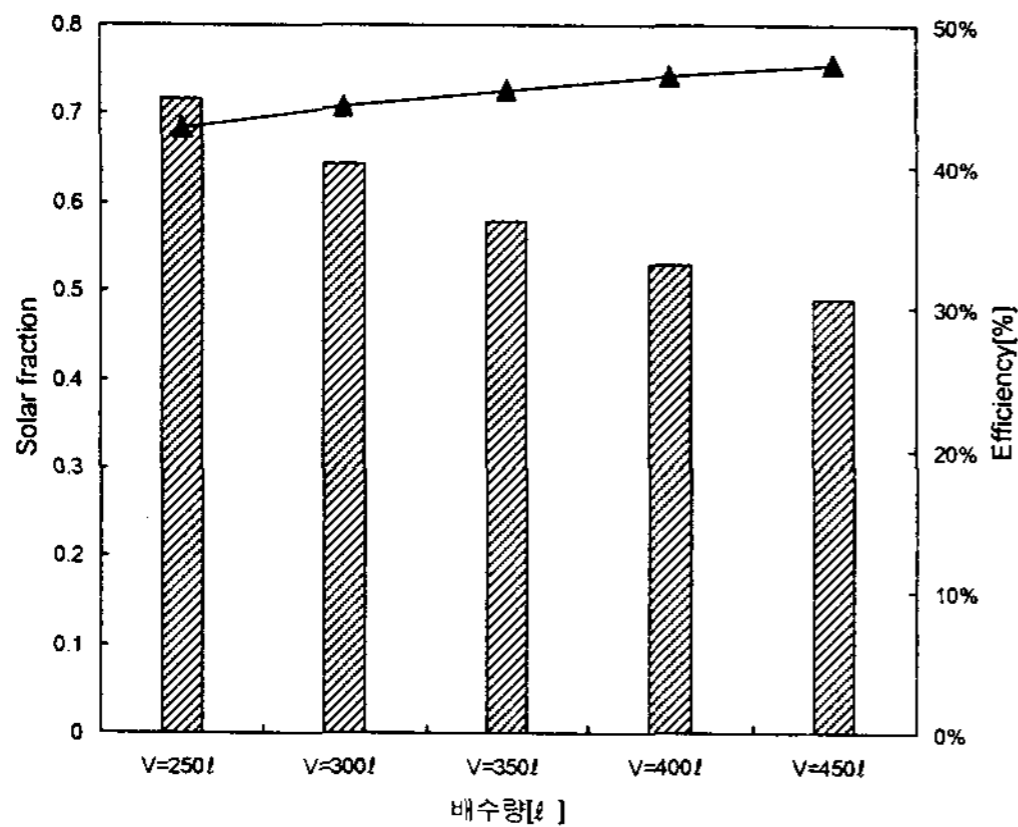


Fig. 9. Change of the annual solar fraction and collector by drain rate

존율과 집열 효율을 나타내고 있다. 집열 효율은 일정한 값을 유지하는 반면 태양의존율은 탱크내 설정 온도가 증가할수록 감소하였다.

4.4 배수량

탱크 체적이 일정한 경우 배수되는 양에 따라서 부하량, 보조열원 사용량이 변화한다. 그러므로 일정한 집열면적에 대한 배수량의 결정은 최적 시스템을 구성하는 중요한 요소이다. 그림 9는 배수량 변화에 대한 연간 태양의존율과 집열 효

율을 보여주고 있다. 집열 효율과 태양의존율은 비례관계에 있으나 배수량이 증가함에 따라 집열 효율은 증가를 하고 태양의존율은 감소를 하는 반비례 관계를 보여주었다.

4.5 집열면적에 대한 탱크 체적비(V/A_c)

집열 면적에 대한 탱크 체적이 작을 경우 시스템 작동온도가 높아져 집열 효율이 급격히 감소하고 탱크 체적이 너무 클 경우는 보조열원 사용량이 높아지게 된다. 시스템 성능을 향상시키기 위해서는 집열면적에 대한 탱크 체적비의 결정이 중요한 요소가 된다. 그림 10은 V/A_c 의 변화에 대한 연간 태양의존율과 집열 효율을 나타내고 있다. V/A_c 가 20에서 30으로 증가할 때 태양의존율은 0.46에서 0.55, 집열 효율은 32.8%에서 38%로 증가폭이 높았다. 그리고 V/A_c 가 60으로 증가할 때까지 태양의존율과 집열 효율은 서서히 증가하고 V/A_c 가 60이상일 때는 비슷한 값을 보였다.

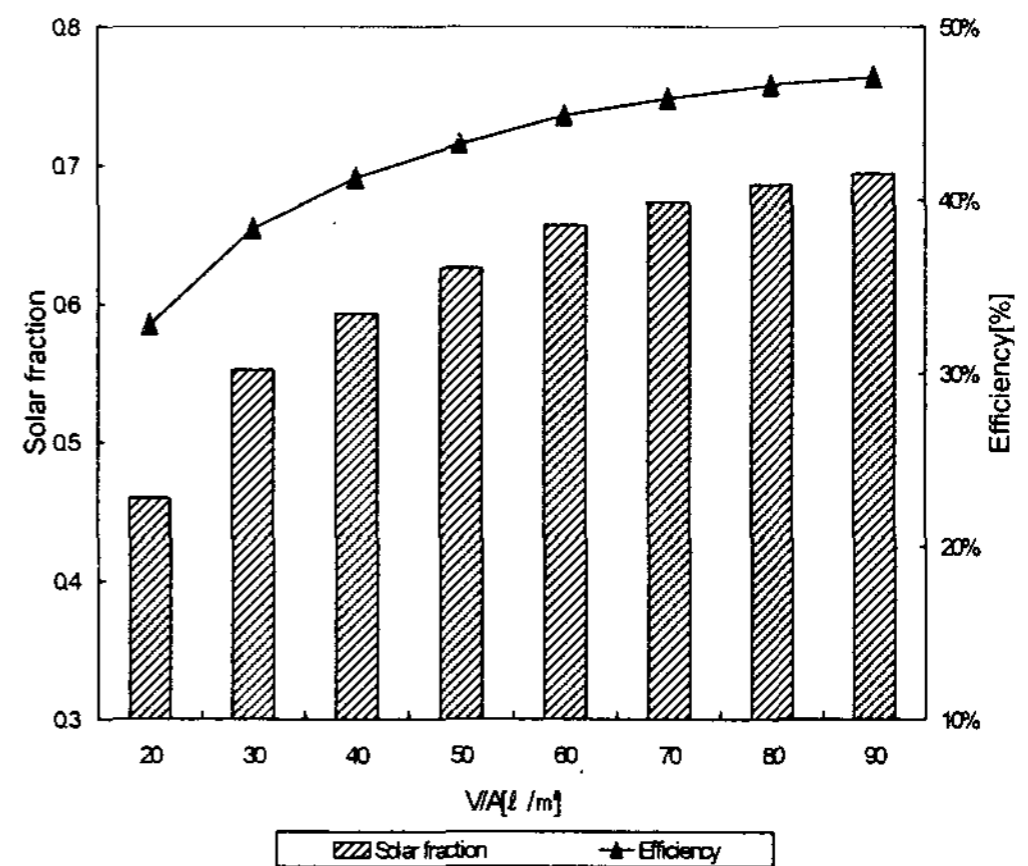


Fig. 10. Change of the annual solar fraction and efficiency by V/A_c

4.6 지역별 년성능 평가

자연대류형 년성능 평가 프로그램을 통하여 정

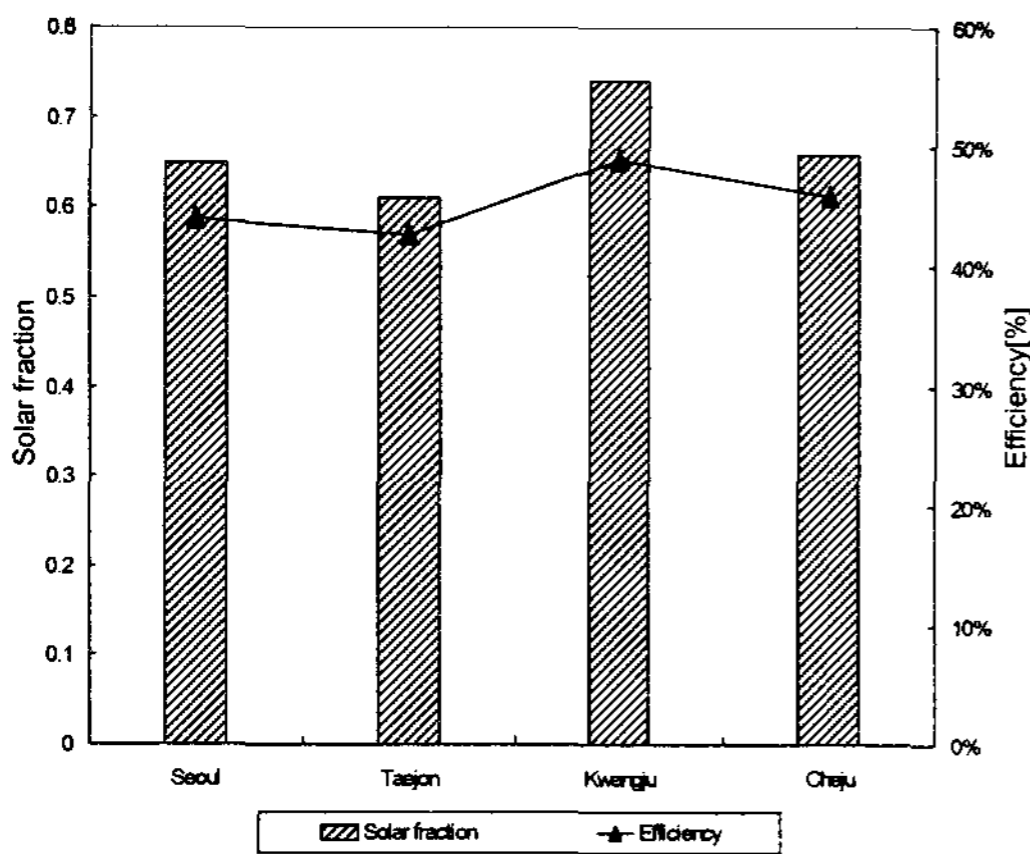


Fig. 11. Regional annual solar fraction and collector efficiency

확한 기상 데이터만 확보되면 지역별로 년성능 평가를 수행할 수 있게 되었다. 그림 11은 각 지역별 연간 태양의존율과 집열 효율을 보여주고 있다. 태양의존율은 광주가 0.74로 가장 높았고 제주 0.66, 서울 0.65, 대전이 0.61로 나타났다. 집열 효율도 광주가 49%로 가장 높았다

5. 결론

자연대류형 태양열 온수기의 실측 데이터를 통하여 모델을 완성하였다. 시뮬레이션은 열교환 형태, 배수 형태, 탱크 설정온도, 배수량, 집열면적에 대한 탱크 체적비, 지역별 년성능 평가를 수행하였다.

- 1) 열교환 형태에서는 이중탱크형 열교환 시스템이 코일 형태 열교환 시스템보다 높은 효율을 보였다.
- 2) 배수 형태는 AS-2984 기준으로 배수했을 때가 집열 효율이 조금 높게 나타났다.
- 3) 탱크내 설정온도에 따른 태양의존율은 설정온도가 증가할수록 감소하였다.
- 4) 배수량이 증가함에 따라 집열 효율은 증가

하나 태양의존율은 감소하는 반비례 관계를 보였다.

- 5) V/A_c 은 60까지 증가할 때는 태양의존율과 집열 효율이 증가하는 경향을 보이지만 60이상이 되면 비슷한 값을 나타냈다. 그러므로 V/A_c 가 50~60으로 설계하는 것이 성능면에서 바람직하다.
- 6) 지역별 년성능 평가는 광주가 태양의존율이 0.74로 가장 높았고 집열효율도 49%로 가장 높았다.

참 고 문 헌

1. G. L. Morrison and C. M. Sappford, "Long Term Performance of Thermosyphon Solar Water Heaters", Solar Energy, Vol. 30, 1983, pp.341~350
2. G. L. Morrison and H. N. Tran, "Simulation of the Long Term Performance of Thermosyphon Solar Water Heaters", Solar Energy, Vol. 33, No. 6, 1984, pp.515~526
3. G. L. Morrison and J. E. Braun, "System Modeling and Operation Characteristics of Thermosyphon Solar Water Heaters" Solar Energy, Vol. 34, No. 4/5, 1984, pp.389~405
4. TRNSYS, A Transient Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, U.S.A, 1996.
5. Burch, J. D., "Reconciliation of a Simulation Model with Performance Data for solar hot Systems, Building and Energy Systems Division, National Renewable Energy Lab., 1993.
6. ASHRAE95-1987, "Method of Testing to Determine the Thermal Performance of

solar Domestic Water Heating system”.

7. Bourges, B., Rabl, A., “Accuracy of the European Solar Water Heater Test procedure. Part I: Measurement Errors and Parameter Estimates”, Solar Energy, Vol.47, No.4, 1991, pp.1~16.

8. 한국에너지기술연구소, “태양열온수급탕 시스템 성능표준화”, 1998

9. 강용혁, “자연 대류형 태양열 온수기 최적 설계에 관한 연구”, 태양에너지, Vol. 18, No. 4, 1998, pp.59~66