

태양열이용 Baffle형 축열탱크를 갖는 온수난방시스템의 열성능 해석

서정세^{*†}, 이중섭^{**}

^{*}경상대학교 기계항공공학부, ^{**}경상대학교 BK21사업단(첨단기계)

Analysis of Thermal Performance of Solar Hot-Water and Heating System with Baffle Storage Tank

Jeong-Se Suh^{*}, Chung-Seub Yi^{**}

^{*}School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

^{**}2nd Stage BK21(AMAEPP), Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

ABSTRACT: A numerical study has been performed to investigate the thermal Performance of Solar heating system with baffle type of storage tank by using the commercial code TRNSYS. As a result, the solar fraction depends strongly on the efficiency and heat loss coefficient of solar collector as well as the heating capacity of house and the water temperature supplied to the shower. In addition, the solar fraction has been basically ranked to higher level in baffle type of storage tank than typical type of single storage tank for the range of operation condition.

Key words: Solar Collector(집열기), Storage tank(축열조), Baffle(격막), Hot water(온수), Heating(난방)

기 호 설 명

A_c : 집열면적 [m^2]

C_p : 정압비열 [$J/kg^\circ C$]

F_R : 실제 열전달율비(Heat removal factor)

G_t : 일사량 [W/m^2]

m : 작동유체 유량 [kg/min]

Q_{aux} : 보조열원이 공급한 열량 [W]

Q_{load} : 부하열량 [W]

Q_u : 집열기 획득 가용 열량 [W]

T_a : 대기온도 [$^\circ C$]

T_h : 실내온도 [$^\circ C$]

T_{hw} : 온수 온도 [$^\circ C$]

T_o : 집열기 출구온도 [$^\circ C$]

$\overline{T_p}$: 집열기 표면 평균온도 [$^\circ C$]

U_L : 집열기 열손실계수 [$W/m^2^\circ C$]

그 리 스 문 자

α : 집열기의 흡수율

η_c : 집열기 효율

θ : 입사각

τ : 집열기의 투과율

[†] Corresponding author

Tel.: +82-55-751-5312; fax: +82-55-757-5622

E-mail address: jssuh@gnu.ac.kr

1. 서 론

에너지 수요의 급증은 주요 에너지 공급원인 화석에너지의 고갈 위기와 화석에너지의 사용에 따른 환경오염의 문제를 야기하고 있으며, 환경보존과 에너지원의 효율적인 이용을 위해 기존의 화석에너지 시스템을 환경 친화적인 에너지 활용 시스템으로 대체하고 전환하는 다양한 방법들이 시도되고 있다. 이런 관점에서 청정한 무공해 에너지이며 양에 있어서도 무한한 태양열의 활용 및 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일부는 이미 실용화되어 사용되고 있다. 그러나, 태양열에너지는 비교적 에너지 밀도가 낮고 기상조건에 따른 공급에너지의 불균일성으로 사용에 있어서 제약조건을 가지고 있기 때문에 그 사용조건에 적합한 효율적인 집열시스템의 개발이 필요하다. 기존에는 태양열 집열기를 이용한 온수시스템을 중심으로 주로 연구되어 있으나,⁽¹⁾ 태양에너지의 효율적인 사용을 위해 산업용 공정열 및 가정용 온수급탕과 난방에 적합한 태양열 복합시스템에 대한 연구^(2,3)도 진행되고 있다.

지금까지의 태양열 시스템에 관한 연구를 살펴보면, 대부분의 연구가 집열기의 효율을 향상시키고자 하는 데 주로 이루어져 왔으며,⁽⁴⁻⁷⁾ 태양열 시스템을 구성하는 축열조에 대해서는 현열 축열의 경우에 축열조내의 성층화 향상을 위한 연구가 주로 이루어져 왔다. 그러나, 온수급탕과 난방부하가 동시에 이루어지는 복합시스템의 경우에는 단일축열조를 사용하여 시스템의 성능을 향상시키는 데는 한계가 있으며, 이를 극복하기 위한 방안으로 급탕과 난방용 축열조를 각각 사용하는 2개의 축열조 방식이 채택되어 오고 있으나, 이러한 방식에 대한 체계적인 연구가 아직 보고된 것이 없는 것으로 파악된다.

온수급탕과 난방부하에 동시에 대응하는 태양열 복합시스템을 위해 본연구에서는 Baffle식 축열조를 적용하고자 하며, 이를 통해 태양으로부터 획득한 축열된 열을 급탕 및 난방부하에 요구되는 온도에 따라 효율적으로 활용함으로써 태양열의 활용을 극대화하고자 한다. Baffle식 축열조는 기존의 단일축열조에서 난방중심의 축열조의

경우 축열조 용량이 크게 되고, 일정한 온도이하에서는 축열에너지를 활용할 수 없어 전체적으로 이용율이 저조한 단점을 극복하고, 에너지의 활용을 최대한 높이고자 하는 데서 비롯된다. 즉, 축열조내에 Baffle를 설치하여, 축열조의 온도가 난방에서 요구하는 온도이하의 경우에 Baffle 상단의 축열조만 활용하여 난방을 함으로써 난방보조열원의 추가적인 에너지 소요를 최소화하고, 반면 급탕의 경우에는 축열조 전체의 에너지를 활용함으로써 급탕보조열원의 추가 소요량을 극소화하여, 전체적으로 복합시스템의 효율을 향상시키고자 한다.

본 연구에서는 온수급탕과 난방부하에 동시에 대응할 수 있는 태양열 복합시스템에서 Baffle식 축열조를 적용하였을 경우에 대해 시스템의 열성능을 TRNSYS를 이용하여 평가하고자 한다. 부가적으로 주어진 조건에서 집열기의 효율 및 손실률, 급탕 및 난방의 요구온도에 따른 시스템의 열성능변화를 태양열 의존률을 중심으로 알아보고자 한다.

2. 태양열이용 온수난방 복합시스템

2.1 Baffle식 축열시스템

본 연구에서 예측하고자하는 온수급탕 및 난방용 태양열 복합시스템을 Fig. 1(a)에 나타내었다. 복합시스템은 기본적으로 크게 집열부, 축열부, 부하부로 크게 나눌 수 있으며, 입사한 태양열을 집열기를 통해 흡수하여 시스템의 축열부에 저장하였다가 온수 및 난방 부하부에 전달하는 구조이다. 추가적으로 온수급탕에서 요구하는 온도(T_{hw}) 및 난방장치에서 요구하는 온도(T_r)를 맞추기 위해서는 반드시 보조열원이 요구된다.

축열시스템은 Fig.1에서 보듯이 집열시에 집열기로부터의 열을 Baffle의 상하 축열조에 동시에 최대한 축열하고, 축열된 열이 온수급탕과 난방부하부로 방열하게 되면서 축열조의 온도가 전체적으로 낮아지게 작동된다. 그러나, 난방부하의 경우에 축열조의 온도가 점차 낮아져 난방부의 출구온도보다 낮아지는 경우(온도역조 현상)에

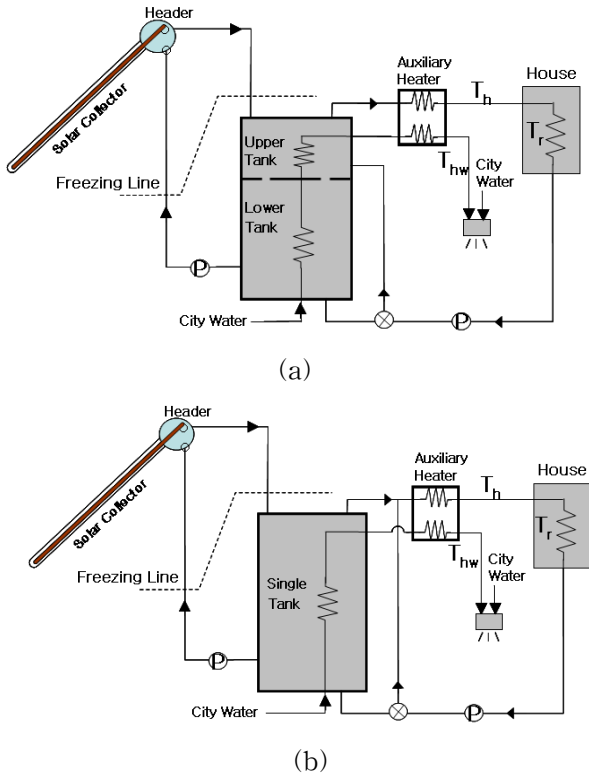


Fig. 1 Schematic diagram of solar system with storage tank: (a) baffle type of tank, (b) typical type of single tank

보조열원이 오히려 축열조의 온도를 높이는 데 사용되므로써, 에너지 손실을 가속화 시킨다. 이러한 온도역조 현상에는 축열조가 오히려 난방 부하를 증가시키므로, 난방수의 축열조 통과를 최소화하는 것이 필요하다. 따라서, 이러한 온도 역조 현상이 나타나면은 Baffle식 축열조의 경우에 Fig.1(a)에서 보듯이 Baffle 상단부로만 난방수가 통과하도록 함으로써 축열조로 인한 난방부하 증가를 최소화한다. 한편, 온수급탕의 경우는 시수의 온도가 축열조의 온도보다 상당히 낮아 축열조의 Baffle 상하단 축열조 전체와 열교환하는 것이 유리하며, 특히 Baffle식 축열조의 경우 시수를 상대적으로 높은 온도를 유지하고 있는 Baffle 상단부 축열조로 통과시킴으로써, 높은 온도를 요구하는 급탕공급시 보조열원의 순간 열공급량을 최소화할 수 있는 장점을 가지고 있다.

반면, 기존의 단일축열조 방식에서는 온도역조 현상이 나타나는 경우에 Fig. 1(b)에서 보듯이 난방수가 축열조를 경유하지 않고, 바로 보조열원

으로 들어가게 됨으로써, 축열조의 열을 전혀 이용하지 못하게 된다. 동시에 급탕수의 공급시 축열조내 고온수가 없어, 급탕수의 온도가 높은 경우에는 보조열원의 열공급량이 상당히 높아지게 된다.

한편, 본 연구에서 적용된 태양열 복합시스템의 주요 구성 장치들은 기본적으로 중소형 온수난방 장치에 적합하도록 시스템 용량을 구성하였다. 난방부하는 10평규모의 주택을 기준으로 하여 적절히 설정하였으며, 이를 Table 1에 나타내었다. 온수급탕의 사용시간은 오후6시~10시(4시간)기간에 사용하는 것으로 설정하였으며, 축열조의 크기는 500 l (0.5m³)로 하였다. 보조열원은 온수급탕 및 난방부하의 요구조건에 충분히 만족되도록

Table 1 Characteristics of the solar hot-water and heating system

Parameter		Specification
Collector	$F_R(\tau\alpha)$	0.65
	$F_R U_L$	0.2
	Area	25 m ²
	Slope	35°
	Max Flowrate	30 kg/hr
$\Delta T_{on}, \Delta T_{off}$		10°C, 3°C
Storage Tank	Initial Temperature	30°C
	Upper Tank Volume	0.15m ³
	Lower Tank Volume	0.35m ³
	Heat Loss Coeff.	3.0kJ/hr · m ² K
Auxiliary Heater	Capacity	3.0 kW
Hot Water	City Water Temperature	15°C
	Outlet Temperature (T _{hw})	40°C
	Max Flowrate	10 kg/hr
House	Heat Conductance	50kJ/hr°C
	Heat Capacity	1000kJ/°C
	Room Temperature (T _r)	22°C
	Supply Temperature(T _h)	60°C
	Max Flowrate	50 kg/hr
$\Delta T_{on}, \Delta T_{off}$		3°C, 0°C

가열능력 3kW의 전기히터를 사용하는 것으로 하였으며, 기타의 구성품들의 세부사양들이 Table 1에 제시되었다. 집열부 및 축열이용부의 작동유체는 물로 하였으며,

2.2 관계식 및 수치해석방법

임의의 시간동안에 태양열 집열기가 획득하는 가용 에너지는 집열기가 흡수한 에너지에서 주위로 방열되는 에너지를 뺀 값이며,⁽⁵⁾

$$Q_u = A_c F_R [G_t (\tau \alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (1)$$

이며, 여기서 T_i 는 집열기의 입구온도이다. 집열기 효율은 태양열 집열기에 입사한 태양에너지와 작동유체가 얻은 에너지의 비이며,

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c G_t} = F_R (\tau \alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_t} \quad (2)$$

이며, U_L 은 집열기의 열손실계수이다.

하루 동안 총 집열된 에너지는

$$Q_{u,a} = \sum_{h=1}^{24} Q_u \quad (3)$$

이며, 여기서 Q_u 는 매시간의 집열량이다.

하루동안의 부하에 만족하기 위해 공급된 보조 열원의 공급에너지 Q_{aux} 는

$$Q_{aux} = Q_{load} - (Q_{u,a} - Q_{loss}) \quad (4)$$

이며, 여기서, Q_{load} 는 부하로 요구되는 에너지, Q_{loss} 는 축열조 및 난방부에 의해 손실된 에너지에 대한 하루 동안의 열량이다.

수치해석방법으로, 본 연구의 대상인 태양열 복합시스템은 열적으로 비정상상태 변화가 이루어지며, 이를 효과적으로 처리하기 위해 연속 대입법(successive substitution method)를 사용하였다. 매시간의 시간 증분은 1시간 단위로 하였으며, 적분오차 및 수렴은 상대적 차이가 0.1%이내이면 이루어지는 것으로 판단하였다. 계산시간은 1년간의 시간 즉, 8760시간 동안 시간단위로 이루어

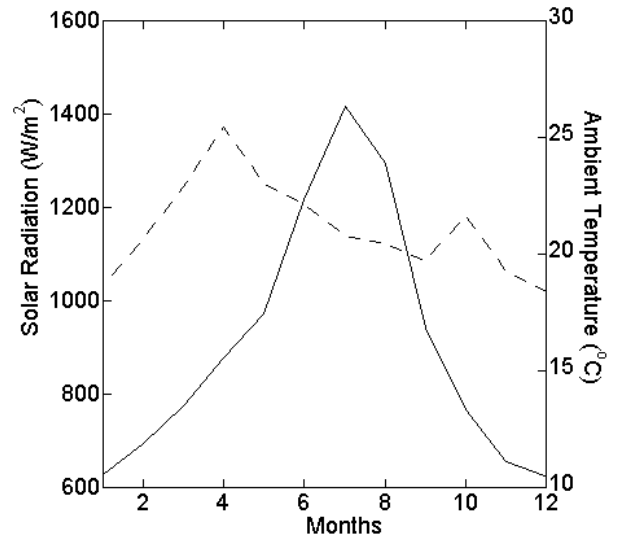


Fig. 2 Monthly variation of solar irradiation and ambient temperature in Jinju city

졌으며, 본 연구방법에 기초하여 상업코드인 TRNSYS를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

한편, 본 연구에서 적용된 기상 데이터는 Fig. 2와 같이 기상청에서 제공하는 1년간의 진주시역 기상자료를 기초로 하였으며, 대기온도는 연중 오전 10시에서 4시까지의 평균온도를 나타낸 것이며, 일사량은 700 W/m² 이상 되는 맑은 날 정오 전후시간에 측정된 값들을 평균하였다.⁽⁶⁾ 일사량이 연초부터 5월까지의 점차 증가하다가 6월과 7월에 최대를 보인 후에 감소하는 경향을 보였다.

3. 결과 및 토의

3.1 축열조 형식의 비교

본 연구에서 적용하고 있는 Baffle형 축열조와 기존의 단일 축열조를 Fig. 1에서와 같이 각각 사용하는 경우에 대해 시스템의 연중 태양열 의존율의 변화를 Fig.3에 나타내었다. 축열조이외의 다른 조건들은 모두 동일하게 적용하였다. 그림에서 실선은 Baffle식 축열조를 사용한 경우이며, 점선은 기존의 단일 축열조를 적용한 경우를 각각 나타낸다. 태양열 의존율은 동절기로 갈수록 전체적으로 태양열 의존율이 기존의 단일 축열조보다 Baffle식 축열조에서 높게 나타나고 있다.

특히, 두시스템에 대해 춘추절인 4-5월과 9-10월에 태양열 의존율의 차이가 가장 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Baffle식 축열조의 상부축열부에서의 축열온도가 온수급탕 및 난방에 가장 적절한 온도로 유지되면서 활용되는 시간이 증대되면서 비롯된 것이다.

결국, 본 연구의 적용 조건내에서 단일축열조에 비해 Baffle식 축열조를 이용한 축열시스템이 태양열 의존율이 높게 나타나고 있으며, 열성능면에서 높은 것으로 확인되고 있다. 따라서, Baffle식 축열조를 갖는 태양열 축열시스템에 대해 시스템에 미치는 인자들에 대해 알아보하고자 한다.

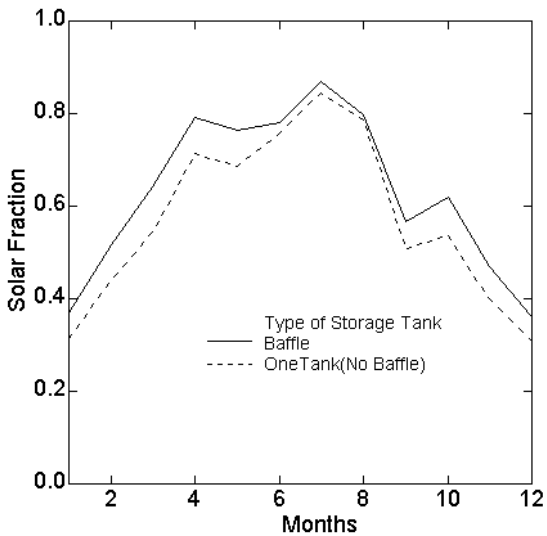


Fig. 3 Comparison of baffle-tank system to normal one-tank system for solar fraction

3.2 집열기 및 부하의 영향

시스템 열성능은 대표적인 성능평가의 주요 지표인 연 평균 태양열의존률(solar fraction), f_{solar} 로 나타낼 수 있다. 태양열 의존도는 총 부하중 태양열로 공급되는 비율로서 관계식은 식 (10)와 같다. 여기서 태양으로부터 획득한 총에너지량은 Q_{load} 에서 Q_{aux} 를 뺀 값이며, Q_{load} 는 시스템에 필요한 총열부하량을 가리킨다.

$$f_{solar} = \frac{\int Q_{load} dt - \int Q_{aux} dt}{\int Q_{load} dt} \times 100 \quad (5)$$

이러한 태양 의존률 범위 안에서, 태양열 난방시스템에 대응할 수 있는 태양열의 공급이 이루어지게 되는 것이다.

Fig. 4는 집열기의 열손실이 태양열 난방시스템의 태양열의존률에 미치는 영향을 월별 평균으로 나타낸 것이다. 그림에서 집열기의 열손실률이 증가할수록 태양열의존률이 상당히 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이는 태양으로부터 집열한 열이 난방 시스템의 가동에 소요되기 전에 손실된다면은 전체적인 태양열의 활용이 이루어지지 않는 것이 되며, 이러한 손실이 많을수록 보조열원의 부담률이 증가함을 의미한다. 특히, 집열기에서 집열된 열이 1차적으로 축열조에 저장된 후에 난방부하에 요구되는 열을 공급하게 되는 데, 집열기의 열손실이 많이 이루어진다면, 축열조의 집열되는 열량이 줄어들어, 축열조에 축적되는 열량이 줄어들게 되고, 이로 인해 축열조의 온도상승이 줄어들게 된다. 난방시스템의 가동을 위해서는 일정한 온도이상의 고온수가 항상 필요하게 되는 데, 축열조의 온수 온도가 이를 충족하지

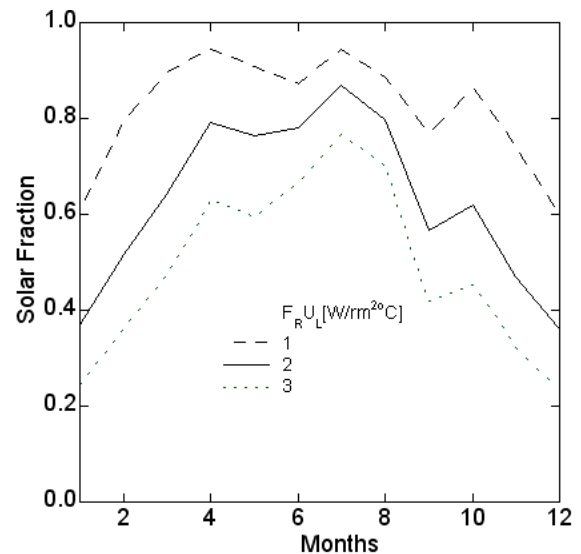


Fig. 4 Monthly variation of solar fraction for several values of heat loss coefficient of collector

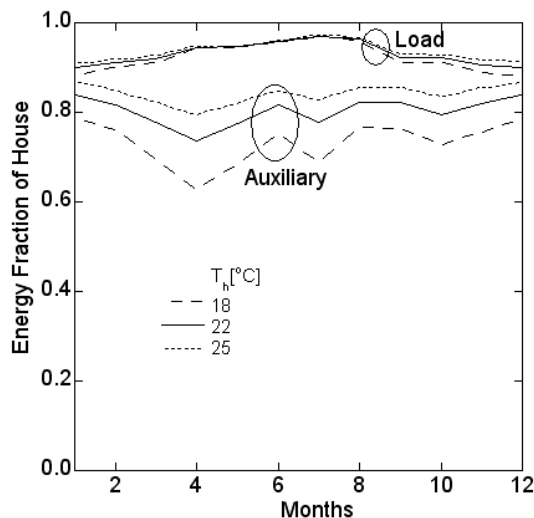


Fig. 5 Monthly variation of energy fraction of house heating load for several values of room temperatures

못하면은 난방시스템의 가동에 사용되지 못하게 되고, 이는 난방시스템의 가동을 위한 태양열 의존률의 감소를 의미한다. 그림에서 열손실계수 ($F_R U_L$)가 $3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{oC}$ 인 경우에는 태양열 최대 의존률이 0.4이하로 감소하게 되어, 시스템의 전체적인 에너지 대체율이 상당히 감소함을 의미한다. 그림에서 태양열 의존률이 열손실계수의 값에 따라 12~1월의 변화경향이 다르게 나타나고 있다. 이는 이전에 언급하였듯이, 열손실로 인한 축열온도의 변화에 따라, 일정한 온수온도 이상의 값을 요구하는 난방시스템에 온수의 활용비율이 달라지면서 나타나는 것에 기인하는 것이다.

Fig. 5에 온수 및 난방부하의 에너지 부담률을 월별로 나타내었다. 그림에서 보면은 온수 및 난방을 겸용으로 적용하는 태양열 시스템에서 난방에 대한 부하 부담률이 90%이상이며, 역시 보조 열원의 부담이 대부분 난하에 요구되고 있음을 알 수 있다. 결국, 난방부하의 변화가 집중적으로 태양열 의존률에 상당히 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 태양열집열시스템을 이용한 온수난방시스템에서 태양열시스템의 열성능을 평가

하고, 이를 바탕으로 TRNSYS를 이용하여 집열 시스템 효율 및 태양열 의존도를 알아보았다. 온수난방 겸용시스템을 위한 태양열시스템의 의존률이 7~8월에 가장 높게 나타났으며, 집열기의 효율 및 열손실계수가 상당히 영향을 미침을 알 수 있었다. 동시에 온수 및 난방수의 공급온도도 의존률에 상당히 영향을 미침을 확인하였다.

후 기

본 연구의 일부는 2단계 BK21 대학원 육성사업 및 공학연구원, 세운전재의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Duffie and Beckman, 1991, "Solar Engineering of Thermal Process", John Wiley & Sons, pp.250-329.
2. Bae, C.H., Kang, C.H. and Suh, J.S., 2004, "An Experimental Study of the Utilization of Heat Pipes for Solar Collectors with Type of Heat Pipe", Proceeding of the SAREK 2004 Winter Annual Conference. pp.451-456.
3. Kwak, H.Y. Boo, J.H., and Chung, W.B., 2003, "Development and Application of Evacuated Tube Solar Collector with Heat Pipe in Korea", The 7th International Heat Pipe Symposium, pp.373-376.
4. Chi S.W., 1976, Heat Pipe Theory and Practice, Willey, pp.15~34.
5. S. B. Riffat, X. Zhao and P.S. Doherty, 2005, Developing a theoretical model to investigate thermal performance of a thin membrane heat pipe solar collector, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp.899-915.
6. G. L. Morrison, I. Budihardjo and M. Bhnia, 2004, Water in glass Evacuated Tube Solar Water Heaters, Solar energy, Vol. 76. pp.135-140.
7. S. A. Kalogirou, 2003, The potential of solar industrial process heat applications, Applied Energy, Vol. 76, pp.337-361.