

평판형 태양열 집열기의 연중 열적 성능의 모델링 해석

김규덕¹ · 박배덕¹ · 김경훈^{2†}

¹금오공과대학교 대학원, ²금오공과대학교 기계공학과

Modeling Analysis for Thermal Performance of Solar Flat Plate Collector System Through a Year

GEW DEOK KIM¹, BAE DUCK PARK¹, KYOUNG HOON KIM^{2†}

¹Grad. School of Kumoh National Institute of Technology

²Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61, Daehak-ro, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do, 730-701, Korea

Abstract >> The monthly-average meteorological data, in particular, the monthly average daily terrestrial horizontal insolation are required for designing solar thermal energy systems. In this paper, the dynamic thermal performance of a flat plate solar collector system is numerically investigated through a year from the monthly average insolation data in Seoul. For a specified data set of solar collector system, the dynamic behaviors of total solar radiation on the tilted collector surfaces, heat loss from the collector system, useful energy and collector efficiency are analyzed from January to December by a mathematical simulation model. In addition, the monthly average daily total solar radiation, useful energy, and daily collector efficiencies through a year are estimated. The simulated results show that the average total radiation is highest in March and the useful energy is highest in October, while the total radiation and the collector efficiency are lowest in July.

Key words : Solar(태양), Flat plate collector(평판형 태양 집열기), Insolation(일사량), Useful energy(유용 에너지), Collector efficiency(집열기 효율)

Nomenclature

A_p : area, m^2

C_p : specific heat, kJ/KgK

D_o : outer diameters

F_c : collector efficiency factor

F_R : heat removal factor

G_{0n} : extraterrestrial normal radiation, kW/m^2

G_{sc} : solar constant, kW/m^2

H : monthly average daily total radiation on a terrestrial horizontal surface, kJ/m^2 -day

H_0 : daily total radiation on the extraterrestrial horizontal surface, kW/m^2

H_d : monthly average daily diffuse radiation on horizontal surface, kJ/m^2 -day

h : hour angle, degree

h_{ss} : hour angle at sunset, degree

I : average hourly total radiation on terrestrial horizontal surface, kJ/m^2 -day

I_b : hourly beam radiation, kJ/m^2 -day

[†]Corresponding author : khkim@kumoh.ac.kr

[접수일 : 2014.09.25 수정일 : 2014.10.21 게재확정일 : 2014.10.31]

Copyright © 2014 KHNES

- I_d : hourly diffuse radiation on terrestrial horizontal surface, $\text{kJ/m}^2\text{-hr}$
 K_T : monthly average clearness index
 k_i : thermal conductivity of insulation
 L : latitude, degree
 N : day of the year
 Q_h : heat load, kW
 Q_u : useful energy, kW
 R_b : tilt factor for beam radiation
 R_d : diffuse radiation factor
 R_r : reflection radiation factor
 r : ratio of hourly total radiation to daily total radiation
 r_d : ratio of hourly diffuse radiation to daily diffuse radiation
 S : incident solar flux absorbed in the absorber plate, $\text{kJ/m}^2\text{-hr}$
 T_a : ambient temperature, K
 T_L : temperature, K
 U_b : bottom heat loss coefficient, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
 U_L : overall loss coefficient, $\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$
 U_s : heat loss coefficient form the collector edges, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
 U_t : top loss coefficient, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
 V : wind velocity, m/s
 W : tube spacing, m
 β : incident angle, degree
 δ : solar declination, degree
 δ_d : thickness of the insulations of bottom
 δ_p : thermal conductivity of absorber plate
 θ : incident angles on the tilted, degree
 θ_s : incident angles on horizontal surfaces, degree
 ρ : reflectivity
 $(\tau\alpha)_b$: transmittance for beam radiation
 $(\tau\alpha)_d$: transmittance for diffuse radiation
 $(\tau\alpha)_r$: transmittance for reflection radiation

1. 서 론

급속한 산업 발전으로 인해서 에너지의 소비가 증

가하고 이는 또 화석연료 소비의 증가를 가져왔다. 화석연료는 그 한정성 때문뿐만 아니라 CO, CO₂, NO_x, SO_x 등의 환경오염 물질의 배출과 지구 온난화 문제 때문에 대체 에너지의 관심도가 높아지고 신재생 에너지 분야에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. 신재생 에너지 중의 한 분야인 태양 에너지는 본질적으로 무한하여 고갈되지 않고 화석연료와는 달리 특정 지역에 편중되지 않으며 환경오염으로 인한 문제 등 현재 직면하고 있는 다양한 문제들을 동시에 해결할 수 있는 포텐셜을 가지고 있기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다¹⁻³⁾.

태양열 집열기 시스템은 태양으로부터 에너지를 얻는 가장 보편적인 기술이라 할 수 있다. 태양열 집열기 시스템 중 평판형 태양열 집열기는 설치비용이 저렴하고 직달 일사와 확산 복사를 모두 수집할 수 있다⁴⁾. 평판형 태양열 집열기에 설치된 유리덮개는 태양에서 전달된 단파장에는 투명하지만 흡수기 판으로부터 방사된 장파장에 대해서는 거의 불투명한 온실 효과로 인해 집열기의 성능을 향상시킬 수 있다. Tian과 Zhao⁵⁾는 태양열 집열기와 열에너지 저장 시스템을 이용한 태양열 응용 기술을 비교 분석하여 보고하였다.

Rodriguez-Hidalgo 등⁶⁾은 평판형 집열기의 성능을 효율 정규화 곡선(Efficiency Normalization Curve, EMC)를 통하여 모사하였으며 Farahat 등⁷⁾은 액서지 관점에서 최적화 연구를 통해 평판형 집열기 시스템의 설계 파라미터를 제시하였다. Dagdougui 등⁸⁾은 평판형 집열기의 열전달 과정과 열 거동을 연구하였으며 Comkli 등⁹⁾은 경제적이고 효율적인 태양 온수기 시스템을 설계하기 위한 집열기와 저장조의 최적의 크기를 제시하였다. Cruz¹⁰⁾는 집열기에 관련된 식을 최적화하기 위한 절차를 제시하였으며 Lee와 Back¹¹⁾은 일반적으로 사용된 선형 집열기 효율방정식으로부터 입구 유체온도 항 대신에 열 부하 항을 사용한 태양 집열기의 수정된 효율 방정식을 도출하였다.

열저장 시스템은 태양 에너지를 저장하고 태양복

사가 불충분할 때 지속적인 동력을 공급하기 위하여 설치된다. E. Palacios¹²⁾는 태양 냉각 설비의 모델링을 통해 저장 시스템은 태양 냉각 설비의 중요한 요소로서 유용하다는 사실을 보여주었으며 Mosallat 등¹³⁾은 태양 시스템, 제어, 가열부하, 냉각부하 요소의 과도적 모델링에 중점을 두고 평판형 집열기의 모델링, 시뮬레이션, 제어를 수행하였다.

Aompe와 Duffy¹⁴⁾는 아일랜드 더블린에서 한 해 동안 기후조건에서 4평방미터 평판형 집열기를 설치한 태양열 온수기 시스템의 열 성능을 연구하였다. 또한 태양 에너지는 다른 신재생 에너지와 복합하여 사용하면 그 효율성을 더욱 높일 수 있는데 Wang 등¹⁵⁾은 평판형 태양열 집열기를 사용하여 저온 범위에서 태양에너지를 사용하기 위한 재생 유기 랭킨 사이클을 연구하였다.

태양 에너지 시스템의 효율적인 설계와 개발을 위해서는 태양 복사의 최대 가용량과 변동 특성에 대한 지식이 요구된다. 한정된 태양 복사의 계측 자료를 생각하면 기본적인 태양 관측 자료로부터 동적 특성 등 다양한 태양 복사 특성에 대해 예측할 수 있는 기술이 필요하다³⁾.

본 논문에서는 평판형 태양열 집열기 시스템에 대해 서울을 모델로 하여 1월부터 12월까지 월평균 수평지표면 태양복사량과 하루 최고 및 최저 기온 등 관측 데이터를 바탕으로 하여 각 달의 평균일에서 하루 동안 시간에 따른 집열기 경사 표면에서 태양 복사, 유용에너지, 집열기 열손실 및 집열기 효율 등의 동특성을 수치적으로 예측한다. 여기에서 평균일은 각 달을 대표할 수 있는 날로 가장 평균되는 기상 조건을 가지는 날짜를 의미하는데 매월 평균일에서 하루 동안의 집열기 경사면 태양복사량과 유용에너지 및 집열기 효율에 대해서도 분석한다.

2. 시스템 해석

Fig. 1은 본 연구에서 해석하는 평판형 태양열 집

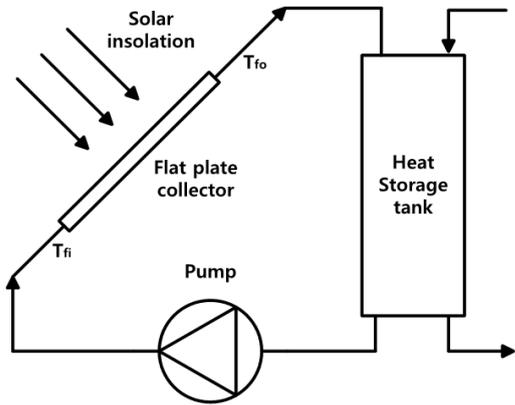


Fig. 1 Schematic diagram of the system

열기 시스템의 개략도를 보여준다. 시스템은 평판형 태양열 집열기, 저장조, 순환펌프로 구성되어 있다. 평판형 태양열 집열기의 주요 구성 요소는 유리덮개, 열 제거 유체 통로, 흡수판, 헤더 또는 매니폴더, 단열재, 콘테이너로 구성된다.

시스템의 열 성능 모델링은 아래와 같다^{2,4)}. 연중 통산일 N 에서 대기권 밖의 수직 복사 G_{0n} 와 대기권 밖의 수평면에서 총 복사 H_0 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_{0n} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360N}{365} \right) \right] \quad (1)$$

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} [\cos(L) \cos(\delta) \sin(h_{ss}) + \frac{\pi h_{ss}}{180} \sin(L) \sin(\delta)] \quad (2)$$

G_{0n} 은 연중 통산일 N 에서 대기권 밖의 수평면에서의 복사이며 태양적위 δ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (3)$$

지표면 월평균 일일 총 복사 H 를 이용하여 지상 수평면 시간당 총 복사 및 확산 복사 I 및 I_d 는 다음

과 같이 계산 할 수 있다.

$$R_r = \rho \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (13)$$

$$\frac{H_d}{H} = 1.390 - 4.027K_T + 5.531K_T^2 - 3.108K_T^3 \quad (4)$$

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos(h) - \cos(h_{ss})}{\sin(h_{ss}) - \left(\frac{2\pi h_{ss}}{360} \right) \cos(h_{ss})} \quad (5)$$

$$r = \frac{I}{H} = r_d [\alpha + \beta \cos(h)] \quad (6)$$

여기서, 청명지수 K_T 는 다음으로 정의된다.

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (7)$$

경사면이 시간당 받는 복사는 다음으로 계산한다.

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + (I_b + I_d) R_r \quad (8)$$

G_{oH} 와 C_1 은 다음과 같이 계산한다.

$$G_{oH} = G_{on} C_1 \quad (9)$$

$$C_1 = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (10)$$

직달, 확산 및 반사 복사에 대한 계수 R_b , R_d 및 R_r 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_b &= \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \\ &= \frac{\sin(\delta) \sin(L - \beta) + \cos(\delta) \cos(h) \cos(L - \beta)}{\sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h)} \end{aligned} \quad (11)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (12)$$

흡수판에서 흡수된 태양복사 플럭스는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + [I_d R_d + (I_b + I_d) R_r] (\tau\alpha)_d \quad (14)$$

총 손실계수 U_L 는 다음으로 계산 할 수 있다.

$$U_L = U_b + U_t + U_s \quad (15)$$

열의 유동이 1차원이라면, 집열기 캐싱 하부에서 대류 저항은 무시할 수 있고 손실 계수는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$U_b = \frac{k_i}{\delta_b} \quad (16)$$

$$U_s = \frac{(L_1 + L_2) L_3 k_i}{L_1 L_2 \delta_s} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} U_t &= \left[\frac{M}{\left(\frac{C}{T_p} \right) \left(\frac{T_p - T_a}{M + f} \right)^{0.33} + \frac{1}{h_f}} \right]^{-1} \\ &\quad + \left[\frac{\sigma (T_p^2 + T_a^2) (T_p + T_a)}{\frac{1}{\epsilon_p + 0.05M(1 - \epsilon_p)} + \frac{(2M + f - 1)}{\epsilon_g}} - M \right] \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, 계수 f 와 C 는 다음과 같이 정의 된다.

$$f = (1 - 0.04h_w + 0.0005h_w^2)(1 + 0.091M) \quad (19)$$

$$C = 365.9(1 - 0.00883\beta + 0.0001298\beta^2) \quad (20)$$

집열기의 유용에너지 Q_u 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_u = m_w C_p (T_{fo} - T_{fi}) = F_R A_p [S - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (21)$$

여기서, 환효율 F , 집열기 효율계수 F_c , 열제거 계수 F_R 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F = \frac{\tan(m(W - D_o)/2)}{m(W - D_o)/2} \quad (22)$$

$$F_c = \frac{1}{WU_L \left[\frac{1}{U_L[(W - D)F + D_o]} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right]} \quad (23)$$

$$F_R = \frac{m_w C_p}{U_L A_p} \left[1 - \exp\left(-\frac{F_c U_L A_p}{m_w C_{pw}}\right) \right] \quad (24)$$

여기서, 계수 m 은 다음과 같이 주어진다.

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k_p \delta_p}} \quad (25)$$

집열기에 흡수된 총 태양 복사 Q_p 와 Q_c 는 다음으로 계산할 수 있다.

$$Q_p = S \times A_p \quad (26)$$

$$Q_c = Q_p - Q_u \quad (27)$$

3. 결과 및 토의

본 논문에서는 지상 수평면 월평균 일일 총일사량으로부터 수학적 모델링을 이용하여 1월부터 12월까지 평균일에서 평판형 태양열 집열기의 동적 거동을

Table 1 Monthly average daily total insolation on a terrestrial horizontal surface and recommended average day for each month

Month	Average day of the month	Average maximum temperature (°C)	Average minimum temperature (°C)	H (Wh/(m ² -day))
January	17	0.3	-6.6	2177.3
February	16	2.8	-4.9	2964.8
March	16	10.8	0.7	4433.1
April	15	15.0	5.7	4498.6
May	15	23.6	13.7	5132.0
June	11	29.2	20.5	5074.3
July	17	28.3	23.4	2684.8
August	16	21.1	24.8	4205.7
September	15	25.9	18.0	3688.2
October	15	21.2	10.9	3727.9
November	14	10.7	2.1	2339.4
December	10	3.5	-3.5	2024.2

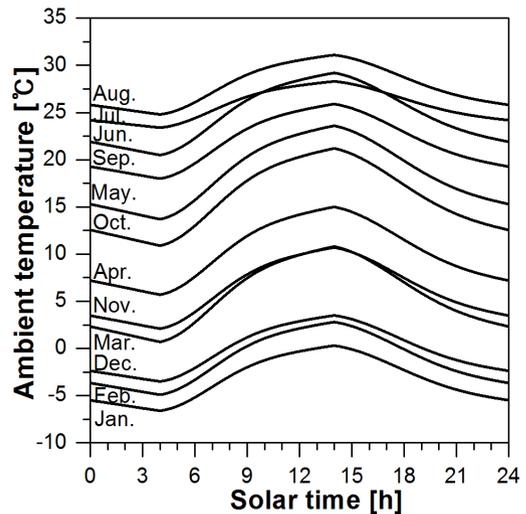


Fig. 2 Plot of ambient temperature

해석한다. 또한 외기 온도로는 일일 최고온도와 최저 온도 및 발생 시각으로부터 Degelman¹⁶⁾의 모델을 이용한 설계용 외기온도를 사용하였다. 기상 데이터는 2013년도 서울(N37.6°, E127°)을 대상으로 하며 Table 1에서는 각 달의 평균일과 평균일에 대한 지상 수평면에 월간 평균 일일 총 일사량과 최고온도와 최저

온도를 보여준다¹⁷⁾. Fig. 2는 각 월의 평균일 별 공조 설계용 대기온도 분포를 보여주며 여기서 최저기온과 최고기온의 발생시각은 각각 4:00와 14:00라고 가정하였다¹⁸⁾.

시뮬레이션을 위한 기초 데이터 값은 다음과 같고 대부분의 데이터는 참고문헌¹²⁾과 동일하게 설정되었다; $\beta=37.6^\circ$, $L_1=1.1$, $L_2=1.6\text{m}$, $L_3=0.2\text{m}$, $M=2$, $k_f=5\text{W/mK}$, $\delta_i=0.05\text{W/mK}$, $h_f=320\text{W/m}^2\text{K}$, $N_p=300$, $D_o=$

0.015m , $D_i=0.0135\text{m}$, $\epsilon_g=0.88$, $W=0.12\text{m}$, $\delta_p=0.0005\text{m}$, $k_p=385\text{W/mK}$, $\rho=0.5$, $\epsilon_p=0.1$, $V=2.5\text{m/s}$, $n=1.526$, $K_{gc}=0.037$, $\alpha_n=0.91$ 이다.

Fig. 3은 각 월의 평균일 별 하루 동안 집열기의 열손실을 보여준다. 집열기 열손실은 집열기에 흡수된 총 태양 복사와 집열기가 유체에 전달한 열량의 차이이다. 순간 최고 손실이 87.3kW로 7월이 가장 낮게 나왔다. 1월의 경우 순간 최고 손실은 142.7kW로 가장 높게 나왔다. Fig. 4는 각 월의 평균일별 하루 동안 집열기가 받는 총 복사 변화를 보여준다. 정오까지 꾸준히 증가하고 정오 이후 감소한다. 3월의 경우 집열기가 받는 순간 총 복사가 416.8kW로 가장 높게 나왔고, 7월의 경우 168.9kW로 열두 달 중 가장 낮게 나왔다.

Fig. 5는 각 월의 평균일 별 하루 동안 유용에너지의 변화를 보여준다. 정오까지 꾸준히 증가하고 이후 감소한다. 10월의 경우 순간 최고 유용 에너지가 204.4kW로 가장 높게 나왔고 7월의 경우 37.7kW로 가장 낮게 나왔다. 유용 에너지의 양의 값을 가지는 시간 분포는 집열기가 받는 총복사의 시간분포에 비해 시간이 상대적으로 짧다. 7월의 경우 집열기가 받는 총복

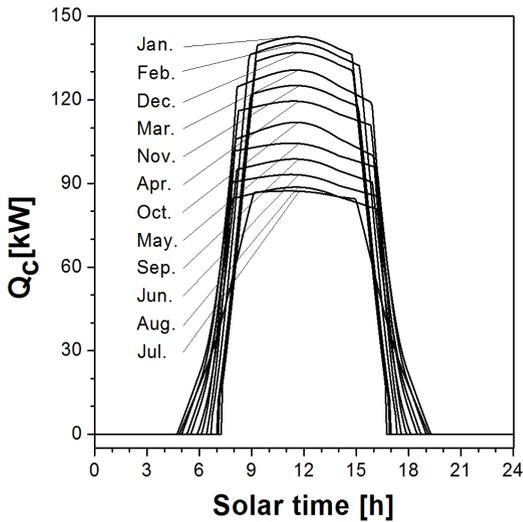


Fig. 3 Plot of heat loss at collector

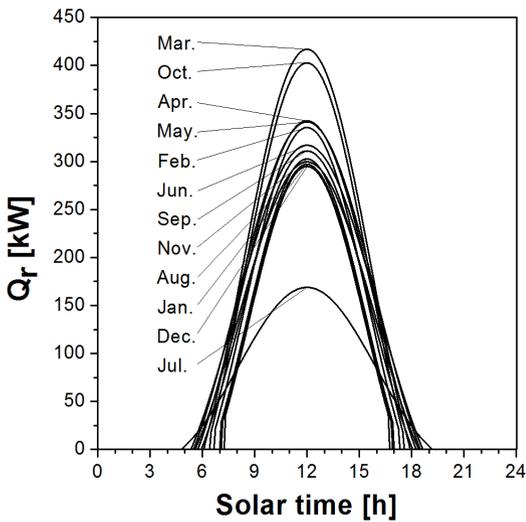


Fig. 4 Plot of total insolation on collector loss

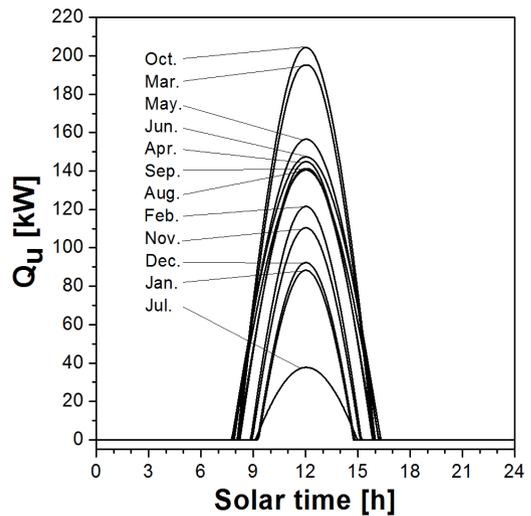


Fig. 5 Plot of useful energy

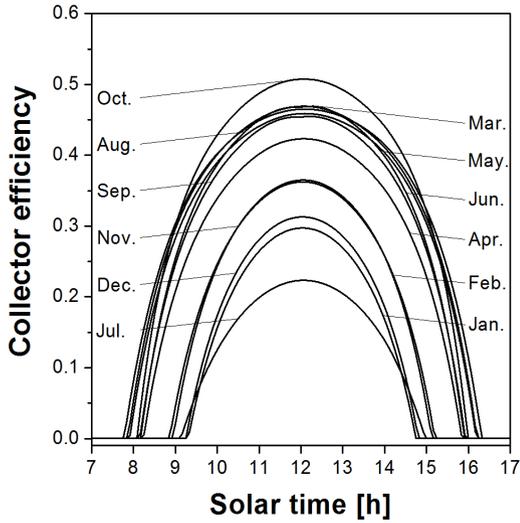


Fig. 6 Plot of collector efficiency

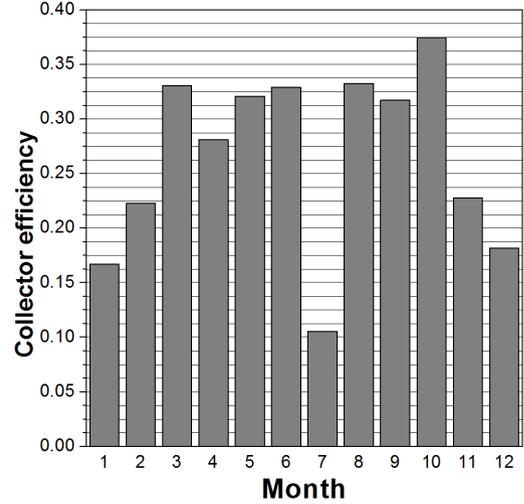


Fig. 8 Plot of collector efficiency

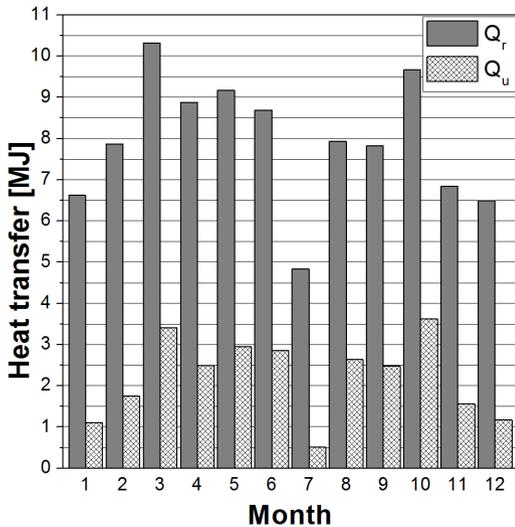


Fig. 7 Plot of total insolation in the collector surface and usefull heat

사의 시간분포는 약 5시30분부터 18시30분 까지 13 시간이며 유용에너지의 시간 분포는 약 8시에서 16 시30분 까지 8시간 30분으로 더 짧으며 이는 집열기의 상부, 측면, 하부로의 열손실 때문이다.

Fig. 6는 각 월의 평균일별 하루 동안 집열기의 효율 변화를 보여준다. 10월의 경우 순간 최고 효율이 50.8%로 가장 높게 나왔다. 7월의 경우 순간 최고 효

율이 22.3%로 가장 낮게 나왔다. Fig. 7은 각 달의 평균일별 하루 동안 집열기가 받는 총 일사량과 총 유용 에너지의 비교를 보여준다. 3월의 경우 일간 총 일사량은 10.3MJ로 가장 높았다. 일간 총 유용에너지는 10월이 3.6MJ로 가장 높았다. 7월에 일간 총 일사량과 총 유용에너지는 각각 4.8MJ, 0.5MJ로 열두 달 중 가장 낮았다. 이는 7월의 강수량이 0.1mm이상 인 일수가 25일간으로 가장 잦고 평균 운량은 8.5할로 가장 높고 한 달 동안 일조시간은 101.0시간으로 가장 낮아서 월평균 수평 지표면 태양 복사가 상대적으로 낮기 때문이다¹⁷⁾. Fig. 8은 각 달의 평균일별 하루의 평균 집열기 효율을 보여준다. 10월의 경우 37.5%로 가장 높은 효율을 보여주고 7월의 경우 10.6%로 가장 낮은 효율을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 평판형 태양열 집열기 시스템에 대해 서울을 모델로 하여 1월부터 12월까지 월평균 수평지표면 태양복사량과 하루 최고 및 최저 기온 등 관측 데이터를 바탕으로 하여 각 달의 평균일에서 하루 동안 시간에 따른 집열기 경사 표면에서 태양

복사, 유용에너지, 집열기 열손실 및 집열기 효율 등의 동특성을 수치적으로 예측하였다.

집열기가 받는 총 복사는 3월의 순간 복사가 416.8kW로 가장 높게 나왔으며 유용에너지의 경우 10월이 204.4kW로 가장 높게 나왔다. 평균일별 하루 동안 집열기가 받는 총 복사는 3월이 10.3MJ로 가장 높게 나왔으며 평균일별 하루 동안 총 유용에너지는 3.6MJ로 10월이 가장 높게 나왔다. 7월의 경우 잦은 비와 많은 운량의 영향으로 월평균 수평 지표면 태양 복사가 상대적으로 낮기 때문에 집열기가 받는 총 복사와 유용에너지는 각각 4.8MJ과 0.5MJ로 가장 낮았다. 하루 평균 집열기 효율은 37.5%로 열두 달 중 10월이 가장 높고 7월의 경우 10.6%로 가장 낮은 효율을 보여준다.

후 기

이 논문은 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2010-0007355).

References

1. M. S. Hossain, R. Saidur, H. Fayaz, N. A. Rahim, M.R. Islam, J.U. Ahamed and M.M. Rahman, "Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe", *Hydrogen and Human Life, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, 2011, pp. 3801-3812.
2. K. Komakli, U. cakil, M. Kaya and K. Bakirci, "The relation of collector and storage tank size in solar heating systems," *Energy Conves. Mgmt.*, Vol. 63, 2012, pp. 112-117.
3. A. K. Yadav, S. S. Chandel, "Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 23, 2013, pp. 503-513.
4. A. Kalogirou, "Solar energy engineering," Academic Press, 2009.
5. Y. Tian and C. Y. Zhao, "A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications", *Applied Energy*, Vol. 104, 2013, pp. 538-553.
6. M. C. Rodríguez-Hidalgo, P. A. Rodríguez - Aumente, A. Lecuona, G.L. Gutiérrez - Urueta and R. Ventas, "Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, 2011, pp. 2394-2404.
7. S. Farahat, F. Sarahaddi and H. Ajam, "Exergetic optimization of flat plate solar collectors", *Renewable Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 1169-1174.
8. H. Dagdougui, A. Ouammi, M. Robba and R. Sacile, "Thermal analysis and performance optimization of a solar water heater flat plate collector: Application to Te'touan (Morocco)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, 2011, pp. 630-638.
9. K. Comaklı, U. Cakir, M. Kaya and K. Bakirci, "The relation of collector and storage tank size in solar heating systems", *Energy Conversion and Management*, Vol. 63, 2012, pp. 112-117.
10. F. Cruz - Peragon, J. M. Palomar, P. J. Casanova, M. P. Dorado and F. Manzano - Agugliaro, "Characterization of solar flat plate collectors", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, 2012, pp. 1709-1720.
11. K. H. Lee and N. C. Baek, "A modified efficiency equation of solar collectors", *Energy Procedia*, Vol. 48, 2014, pp. 145-149.
12. E. Palacios, D. M. Admiraal, J. D. Marcos and M. Izquierdo, "Experimental analysis of solar thermal storage in a water tank with open side inlets", *Applied Energy*, Vol. 89, 2012, pp. 401-412.
13. F. Mosallat, T. ELMekkawy, D. L. Friesen, T. Molinski, S. Loney and E.L. Bibeau, "Modeling, simulation and control of flat panel solar collectors with thermal storage for heating and cooling applications", *Procedia Computer Science*, Vol. 19, 2013, pp. 686-693.

14. L. M. Ayompe and A. Duffy, "Analysis of the thermal performance of a solar water heating system with flat plate collectors in a temperate climate", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 58, 2013, pp. 447-454.
15. M. Wang, J. Wang, Y. Zhao, P. Zhao, and Y. Dai, "Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collectors", *App. Therm. Eng.*, Vol. 50, 2013, pp. 816-825.
16. L. O. Degelman, "Monte corlo simulation of solar radiation and dry bulb temperatures for air conditioning purposes", Dept. of Arch. Eng., Pennsylvania State Univ., 1970, Report No.70-9.
17. Korea Meteorological Administration, "Annual Climatological Report," 2013.
18. L. O. Degelman, "Monte Carlo simulation of solar radiation and dry bulb temperatures for air conditioning purposes," Dept. of Arch. Eng., Pennsylvania State Univ. 1970, Report No.70-9.