

축열조를 채용한 복합 포물형 태양열 집열기(CPC) 시스템의 연중 열적 성능 해석

임석규¹ · 정영관² · 김경훈^{2,†}

¹금오공과대학교 대학원, ²금오공과대학교 기계공학과

Thermal Performance Analysis of Compound Parabolic Collector (CPC) System Employing Storage Tank Through a Year

SOK-KYU LIM¹, YOUNG GUAN JUNG¹, KYOUNG HOON KIM^{2,†}

¹Graduate School, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

†Corresponding author :
khkim@kumoh.ac.kr

Received 26 July, 2019
Revised 3 August, 2019
Accepted 31 August, 2019

Abstract >> This paper presents of thermal performance analysis by using mathematical models for a compound parabolic collector (CPC) system employing heat storage tank. The thermal performance including insolation energy, heat loss from collector system, useful energy, collector efficiency, and temperature of storage tank were theoretically investigated through a year using monthly-average meteorological data at Seoul. The simulated results showed that the CPC systems are suitable for the applications of higher temperature than flat plate collector (FPC) systems.

Key words : Compound parabolic collector(복합 포물형 태양열 집열기), Heat storage tank(축열조), Useful energy(유용에너지), Collector efficiency(집열기 효율)

1. 서론

비집중식 태양열 집열기는 태양 복사의 입사면적과 흡수면적이 동일한 반면에 집중식 태양열 집열기는 일반적으로 오목한 반사면을 통해 직달 일사를 입구에 비하여 좁은 흡수면에 집중시킴으로써 복사 플럭스를 높일 수 있기 때문에 비집중식에 비해 높은 온도의 응용 분야에 적합하다^{1,2)}. 복합 포물형 태양열 집열기(compound parabolic collector, CPC)는

구조가 단순하고 지속적인 태양 추적 시스템이 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 최근 CPC를 기반으로 하는 태양열 집열기 시스템은 일반적으로 200-250℃의 온도로 열을 공급할 수 있는 최적의 시스템 중 하나로 인식되고 있으며 이에 대한 성능 해석이나 설계 등 다양한 연구가 보고되고 있다³⁻⁵⁾.

CPC의 반사기는 포물선 끝에서의 완만한 각도로 인해서 개구 면적의 큰 감소 없이 반사기를 중간에서 절단할 수 있으며, 이러한 절단으로 반사기의 크

기를 줄이고 경제성을 높일 수 있다. Rabl⁶⁾이 CPC에서 다양한 절단 비율에 따른 반사기에서의 평균 반사 회수 및 기하학적 특성에 대해 해석 결과를 보고한 이래 CPC에서 절단비 등 다양한 설계변수에 따른 시스템의 광학적, 열적 및 경제적 성능 특성과 최적 설계에 관한 연구 결과들이 보고되고 있다⁷⁻⁹⁾.

태양열 집열기 시스템에서 축열조(storage tank)의 채용은 수집한 태양에너지를 저장할 뿐만 아니라 태양 복사가 불충분할 때에 안정적으로 에너지를 공급해 주는 역할을 한다¹⁰⁾. Tripanagnostopoulos와 Souliotis¹¹⁾는 2개의 축열조가 설치된 저비용 프로토타입 CPC에 대해 실험적 연구 결과를 보고하였으며, Kessentini와 Bouden^{12,13)}은 2개의 기본 및 이중 글레이징 축열조로 구성된 CPC 시스템의 성능 특성을 시뮬레이션, 설계 및 실증 실험을 통한 연구 결과를 보고하였다. Lim 등¹⁴⁾은 기상 조건과 축열조 용량에 따른 CPC 시스템의 동적 성능을 해석하였다.

본 연구에서는 축열조를 채용한 CPC 집열기 시스템에서 서울을 모델로 하여 1월부터 12월까지 월평균 수평지표면 태양 복사량과 하루 최고 및 최저 기온 등 관측 데이터를 바탕으로 집열기에서 태양 복사, 유용에너지, 집열기 열손실 및 효율 등의 하루 동안 시간에 따른 동특성을 수치적으로 해석한다. 또한 매일 평균일을 기준으로 하루 동안의 집열기에서 태양 복사량과 유용에너지 및 집열기 효율 등 시스템의 성능 특성을 해석한다.

2. 시스템 해석

본 연구에서 해석하는 CPC와 집열기 시스템은 Fig. 1과 Fig. 2에서 각각 보여준다.

CPC에서 벽면의 형상은 포물선으로 구성되고 태양광은 양쪽 포물선 내부의 벽면에서 반사되어 흡수판의 한 점으로 집광이 된다. 위상 공간 보존의 원리에 의해서 이상적인 집광비의 최대값은 다음과 같다³⁾.

$$C_{ideal} = \frac{A_L}{A_S} = \frac{n}{\sin(\theta)} \quad (1)$$

여기에서 A_L 는 조리개의 입구 면적, A_S 는 흡수

판의 면적, n 은 흡수체를 둘러싸는 매질의 굴절률, θ 는 한계 입사각이다. 한계입사각 θ 내부로 입사된 태양에너지는 조리개 입구를 통해 태양에너지가 전달된다. 입사된 태양에너지는 반사율 ρ_r 의 반사판 R에서 반사되어 흡수판 S에 도달한다. 시스템은 CPC, 축열조 및 순환 펌프 등으로 구성된다.

CPC 집열기 시스템의 모델링은 참고문헌의 방법을 주로 따른다^{1,13)}. 대기권 밖 수직면에서의 일일 일사량 H_o 는 태양상수 G_{sc} , 태양적위 δ , 통산일 N, 위도 L , 일몰 시간각 h_{ss} 의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

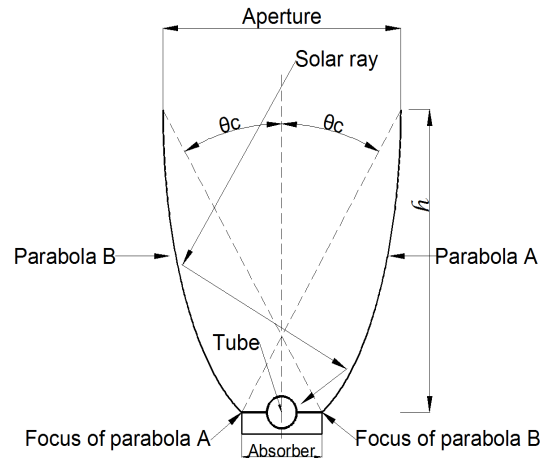


Fig. 1. Schematic of CPC

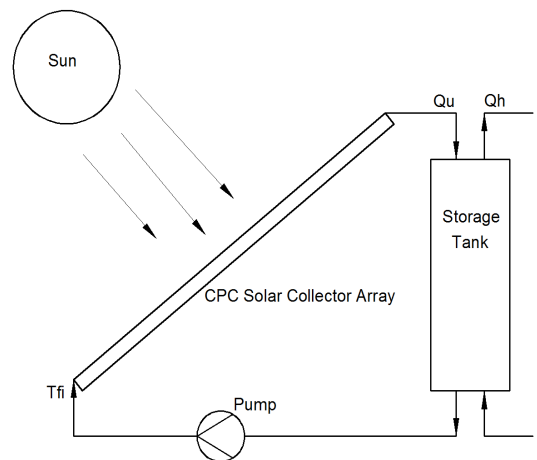


Fig. 2. Schematic of collector system

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] \quad (2)$$

$$\times \left[\cos(L)\cos(\delta)\sin(h_{ss}) + \frac{\pi}{180} \sin(L)\sin(\delta) \right]$$

태양의 직달 일사는 위도와 경도에 따라 변하며 시스템의 집광 효율을 높이기 위해서 집열기판을 경사지게 설치한다. 집열기판의 경사각을 β 라 할 때 경사면에서 집열기가 받는 총일사 G_t 는 직달일사 G_B , 확산일사 G_D 및 반사일사 G_G 와 계수 R_b, R_d 및 R_r 의 향으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_T = G_b R_b + G_d R_d + \rho_G (G_b + G_d) R_r \quad (3)$$

$$R_b = \frac{\sin(\delta)\sin(L-\beta) + \cos(\delta)\cos(h)\cos(L-\beta)}{\sin(L)\sin(\beta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h)} \quad (4)$$

$$R_d = [1 + \cos(\beta)/2] \quad (5)$$

$$R_r = [1 - \cos(\beta)/2] \quad (6)$$

지표면에 도달한 태양에너지는 특정한 위치와 시간에 따라 변한다. 태양에너지 시스템의 설계를 위해 집열기 표면에 도달하는 일사량의 측정이나 계산이 필요하다. 청명지수 K_T 는 대기권 밖 수평면 일사량에 대한 지상 수평면 일사량의 비로 정의된다.

$$K_T = H/H_o \quad (7)$$

CPC의 조리개 표면으로부터 흡수된 태양 복사 플럭스 S 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S = G_t \tau_{cover} \tau_{CPC} \alpha_r \left[1 - \left(1 - \frac{1}{C} \right) \frac{G_D}{G_t} \right] \quad (8)$$

여기에서 G_t 는 총 일사이고 τ_{cover} 는 조리개 덮개의 투과도이다. τ_{CPC} 는 CPC의 유효 투과율이며 반사판의 반사율 ρ_m 과 벽면에서의 평균 반사수 n 의 향으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_{CPC} = \rho_m^n \quad (9)$$

Hsieh와 Mei⁴⁾는 집열기의 총열관류율 U_L 에 대해 다음과 같은 실험식을 제시하였다.

$$U_L = (0.18 + 16.95\epsilon_r)[0.212 + 0.00255 T_a + (0.00186 + 0.000012 T_a(T_r - T_a))] \quad (10)$$

$$[29^\circ\text{C} \leq (T_r - T_a) \leq (137 + 0.0283 T_a - 0.0000616 T_a^2)]$$

$$U_L = (0.18 + 17.16\epsilon_r)[0.086 + 0.00255 T_a + (0.00278 + 0.000014 T_a(T_r - T_a))] \quad (11)$$

$$[(137 + 0.0283 T_a - 0.0000616 T_a^2) \leq (T_r - T_a) \leq 260^\circ\text{C}]$$

관내 유체에 전달되는 유용에너지 Q_u 는 다음과 같이 구한다.

$$Q_u = A_{tot} Fr \left[S - \frac{U_L}{C} (T_{fi} - T_a) \right] \quad (12)$$

여기에서 A_{tot} 는 집열기 전체 면적, Fr 은 열 제거 계수, T_{fi} 는 입구에서의 유체의 온도, T_a 는 대기 온도이다. 집열기 흡수면의 복사에너지로부터 전달 받은 관내 유체의 출구온도 T_{fo} 는 유용에너지 Q_u , 질량유량 \dot{m} 와 비열 c_p 의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{fo} = T_{fi} + \frac{Q_u}{\dot{m}c_p} \quad (13)$$

집열기의 열효율 η 는 집열기 조리개에 들어오는 태양 복사에 대한 유용에너지의 비율로 다음과 같이 정의한다.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_L G_t} \quad (14)$$

본 시스템에서 축열조는 태양에너지의 저장장치로 사용된다. 해석의 편의를 위하여 축열조 내부의 유체는 완전히 혼합되어서 축열조 내부의 온도 구배는 무시할 수 있다고 가정한다. 축열조에서 에너지

평형으로부터 축열조 내부의 유체 온도 T_L 은 다음과 같은 방정식으로 구할 수 있다¹⁵⁾.

$$[(\rho VC_p)_w + (\rho VC_p)_t] \frac{dT_L}{dt} = Q_u - Q_h - (UA)_t(T_L - T_a) \quad (15)$$

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 대기권 밖 수평면 월평균 일일 총 일사량으로부터 수학적 모델링으로 1월부터 12월까지 포물형 집열기의 동적 거동에 대해 해석한다. 기상데이터는 서울(N37.6, E127)을 대상으로 2011년부터 2017년까지 일사량을 산술평균으로 구하였다. 축열조를 포함한 집열기 시스템의 기본 데이터는 참고문헌^{10,15)}과 같으며 CPC의 기본 데이터는 참고문헌¹⁴⁾를 기본으로 한다. 해석을 위한 기본 데이터는 Table 1에서 보는 바와 같다.

Fig. 3은 연중 각 월별로 공조 설계용 대기 온도의 변화를 보여준다. Degelam의 모델¹⁶⁾을 이용하여 하루의 최저 및 최고기온과 발생시각으로부터 설계용 온도 분포를 계산하였다. 최저온도와 최고온도의 발생시간은 4:00시와 14:00시라고 가정하였다.

Fig. 4는 각 월별 하루 동안의 평균 일일 총 일사

량, 청명계수 그리고 확산 일사의 비를 보여준다. 일일 총일사량은 1월부터 증가하다 5월에 5,206 Wh/m²로 최대가 되며 강수량이 많은 7월과 8월에는 5월에 비해 현저하게 감소하고 12월에 1,819 Wh/m²로 최소가 된다. 7월과 8월에 청명계수는 최소가 되는 반면에 확산 일사의 비는 최대가 된다.

Fig. 5는 하루 동안 각 월별로 시간에 따라 집열기에 들어오는 총 복사에너지의 변화를 보여준다. 일출과 함께 총 복사에너지의 공급이 시작되며 점차

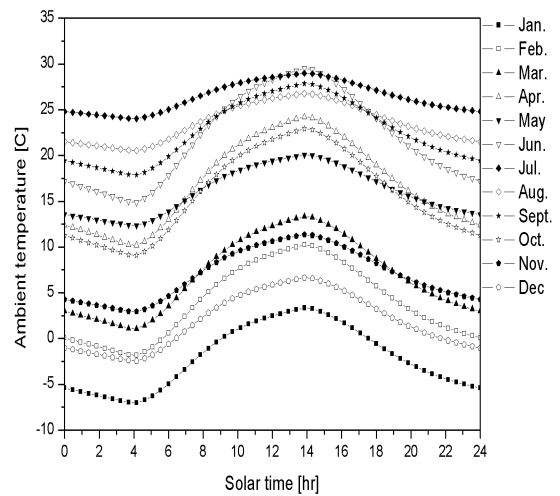


Fig. 3. Plot of ambient temperature

Table 1. Basic data for simulation

Aperture area (m ²)	3.86
Receiver area (m ²)	1
Number of collectors	150
Tilted angle	40o
Acceptance angle	30o
Concentration ratio	3.86
Avg. number of reflection	0.902
Reflectivity of mirror	0.9
Transmissivity of glass	0.9
Emissivity of absorber	0.9
Absorptivity of absorber	0.9
Pipe inner diameter (m)	0.01
tank inner diameter (m)	1.70
tank total length (m)	6.00

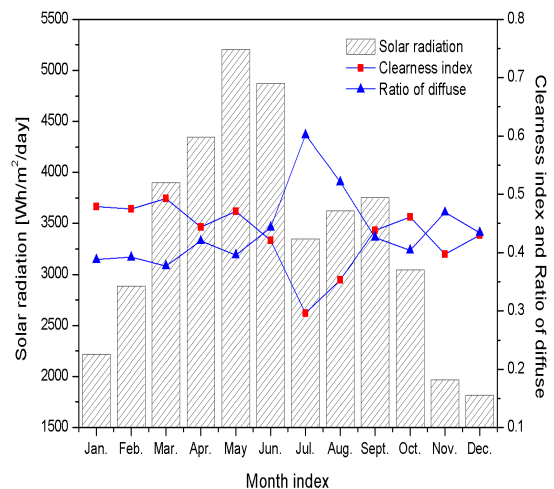


Fig. 4. Plot of solar radiation and index

증가하다가 태양시 12시에 최대값을 가진 후 점차 감소하여 일몰과 동시에 에너지 공급은 종료된다. 12시 기준 최대값은 3월에 357 kW를 가지며 최소값은 7월에 208 kW의 값을 가진다. 이는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 연중 7월에 가장 강수량이 가장 많고 청명계수가 낮기 때문이다.

Fig. 6은 하루 동안 각 월별로 시간에 따라 집열기에서 발생하는 열손실의 변화를 보여준다. 열손실은 일출 후 시간에 따라 총 복사에너지가 증가하면서

손실에너지도 증가하다가 최대값을 보인 후 다시 감소한다. 열손실이 최대가 되는 시간은 오후 2시에서 3시 사이로 총 복사에너지가 최대로 되는 시간보다 지체된다. 이는 대기 온도가 오후 2시경에 최대가 되긴 하지만 집열기 흡수판의 온도 상승 효과가 더 크며 총 복사에너지가 최대가 된 후 집열기 흡수판의 온도가 최대가 되는 시간의 지체가 있기 때문이다.

Fig. 7은 하루 동안 각 월별로 시간에 따른 유용에너지의 변화를 보여준다. 유용에너지는 총 복사에너지

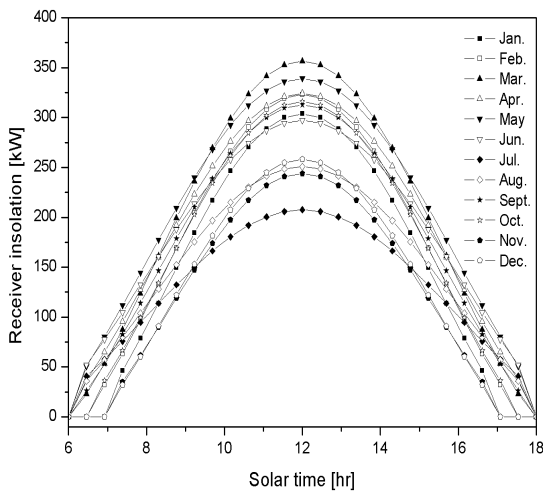


Fig. 5. Plot of receiver insolation

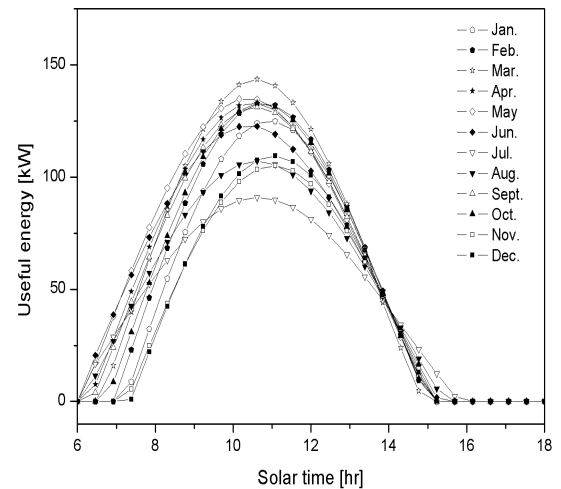


Fig. 7. Plot of useful energy

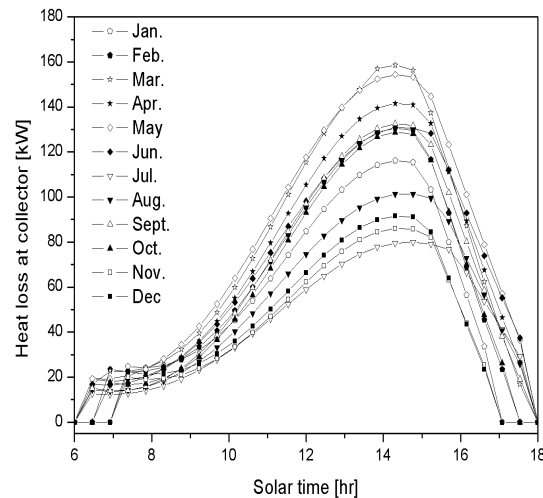


Fig. 6. Plot of heat loss at collector

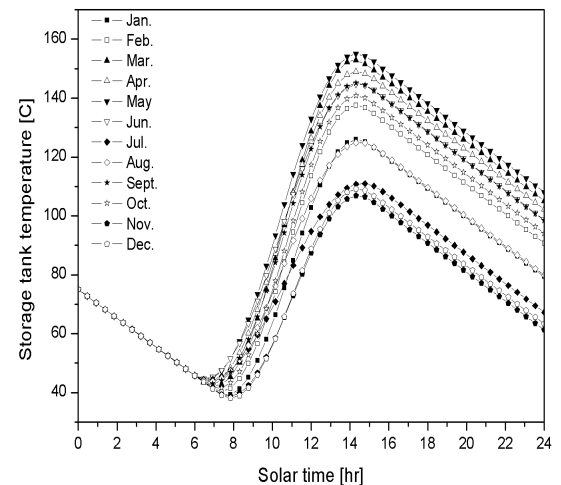


Fig. 8. Plot of storage tank temperature

지에서 손실에너지를 뺀 양으로서 일출과 함께 증가하다 최대값을 가진 후 다시 감소한다. 일일 최대 유용에너지는 3월에 144 kW로 가장 크고 7월에 91 kW로 가장 낮다. 유용에너지의 최대값은 태양시로 오전에 발생하는데, 이는 총 복사에너지는 정오에 최대가 되지만 열손실이 시간차를 가지고 오후에 최대가 되기 때문이다.

Fig. 8은 각 월별로 축열조 내부 온도의 하루 동안의 시간에 따른 변화를 보여준다. 축열조 온도는 일

몰 후 태양에너지 공급이 없는 시간에는 열손실로 인해 시간에 따라 감소한다. 일출과 함께 집열기로부터 에너지를 공급받아 축열조 내부 온도는 시간에 따라 상승하며 최대값을 보인 후 다시 감소한다. 축열조의 온도가 최고가 되는 시간은 시차 효과로 인하여 정오보다 늦은 시간에 발생한다. 축열조의 최고 온도는 5월에서 14시 20분경 155°C로 최고가 되고 11월에 14시경 106°C로 최저가 된다. 이와 같은 축열조의 온도는 CPC 시스템이 고온의 응용 분야에

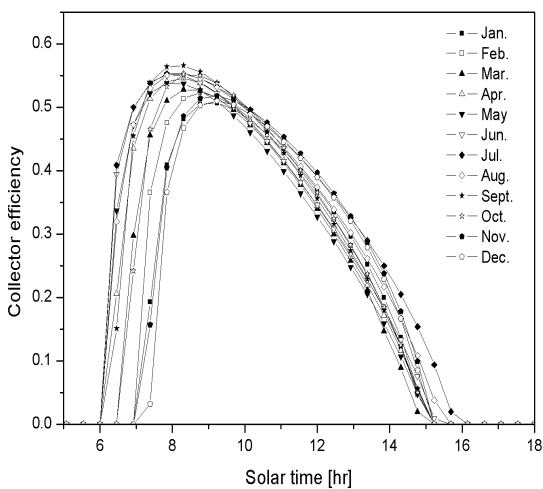


Fig. 9. Plot of collector efficiency

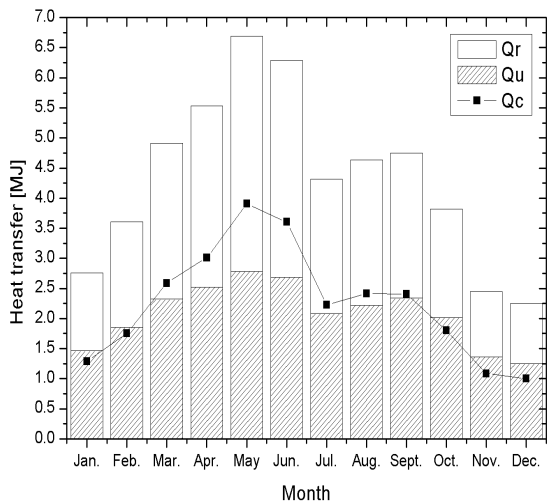


Fig. 11. Plot of monthly heat transfer with tilt angle of 0°

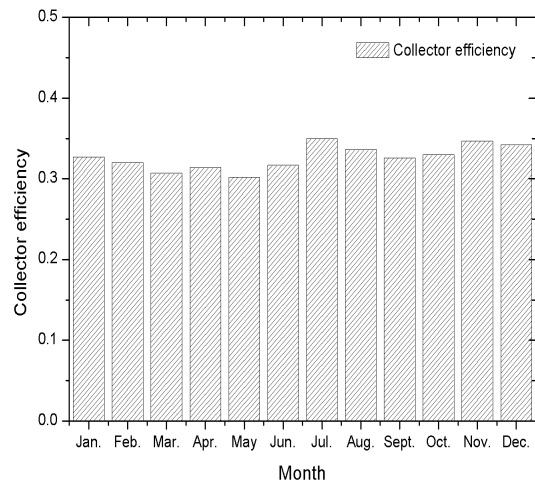


Fig. 10. Plot of monthly average collector efficiency

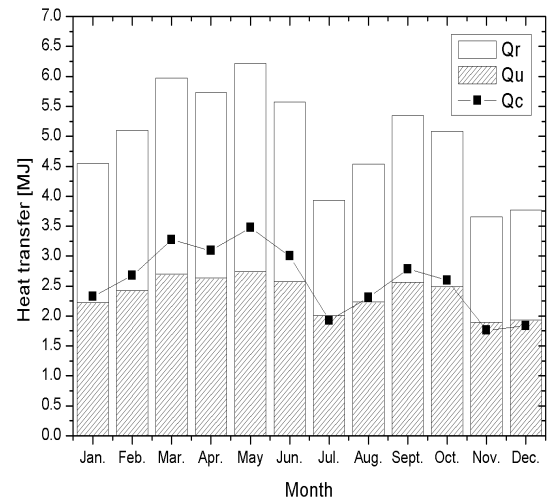


Fig. 12. Plot of monthly heat transfer with tilt angle of 40°

유리하다는 사실을 보여준다.

Fig. 9는 각 월별로 하루 동안 집열기 효율의 시간에 따른 변화를 보여준다. 집열기 효율은 식 (14)에서 보는 바와 같이 총 복사에너지에 대한 유용 에너지의 비로 정의된다. 총 복사에너지는 12시에 최대가 되지만 유용에너지는 오전에 최대가 되기 때문에 집열기 효율도 오전에 최대가 된다. 집열기 효율은 일출시간이 빠른 하절기(5월, 6월, 7월)에서 먼저 상승하고 일출시간이 늦은 동절기(1월, 2월, 3월)에는 늦게 상승한다. 하루 중 집열기의 최대효율은 9월에 56.6%로 가장 높고 1월에 50.7%로 가장 낮다.

Fig. 10은 각 월의 평균 일일 집열기 효율을 보여준다. 일일 집열기 효율은 7월에 35.0%로 가장 높고 5월에 30.7%로 가장 낮으며 전반적으로 큰 차이가 없는 경향을 보인다.

Fig. 11와 Fig. 12는 집열기 경사각이 각각 0°와 40°일 때 각 월의 평균 일일 일사량 Q_r , 유용에너지 Q_u 및 열손실 Q_c 를 보여준다. 경사각이 0°일 때 집열기 개구부가 흡수한 총 에너지는 1월부터 5월까지 증가하고 이후 감소하는 경향을 보여준다. 하지만 경사각이 40°인 경우에는 3월과 5월에서 높은 값을 가지며 11월과 12월 작은 값을 가진다. 유용에너지는 경사각이 0°인 경우 5월에 최대값 2.78 MJ을 가지며 경사각이 40°인 경우 3월에 최대값 2.74 MJ을 갖는다. 하절기의 경우 유용에너지의 차이가 미미하지만 동절기의 경우는 최대 150% 차이가 발생한다.

4. 결론

본 논문에서는 축열조를 채용한 CPC 시스템에 대해 서울을 모델로 하여 1월부터 12월까지 월평균 수평 지표면 태양 복사량과 일일 최고 및 최저기온 등 관측 데이터를 바탕으로 각 달의 평균일에서 하루 동안 시간에 따른 시스템의 열적 성능 특성과 일일 총 복사에너지, 유용에너지, 열손실 그리고 집열기 열효율 등을 수치적으로 예측하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 태양시 기준으로 태양 총 복사에너지는 정오에

최대가 되나 집열기의 열손실과 축열조 온도는 오후에 최대가 되고 유용에너지와 집열기 효율은 오전에 최대가 된다.

- 2) 일일 총복사량은 5월에 최대 12월에 최소가 된다. 7월과 8월에 청명계수는 최소가 되는 반면에 확산 일사의 비는 최대가 된다.

- 3) 일일 최대 열손실과 유용에너지는 3월에 가장 크고 7월에 가장 작으며, 일일 최대 집열기 효율은 9월에 가장 높고 8월에 가장 낮다.

- 4) 월 평균 일일 집열기 효율은 7월에 35.0%로 가장 높고 5월에 30.7%로 가장 낮지만 전반적으로 큰 차이는 없다.

- 5) CPC 시스템의 축열조의 최고 온도는 5월에 155°C로 가장 높고 11월에 106°C로 가장 낮으며 고온 응용 분야에 유리한 사실을 확인하였다.

References

1. A. Kalogirou, "Solar energy engineering", 2nd ed., Academic Press, USA, 2014.
2. T. B. Seo, G. Y. Han, and Y. Kim, "An evaluation on thermal performance of CPC solar collector", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 4, 2008, pp. 446-457, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.09.007>.
3. R. Winston, "Principles of Solar Concentrator of a Novel Design", *Solar Energy*, Vol. 16, No. 2, 1974, pp. 89-95, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(74\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(74)90004-8).
4. C. K. Hsieh and F. M. Mei, "Empirical equations for calculation of CPC collector loss coefficients", *Solar Energy*, Vol. 30, No. 5, 1983, pp. 487-489, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90121-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(83)90121-4).
5. A. Baccioli, M. Antonelli, and U. Desideri, "Dynamic modeling of a solar ORC with compound parabolic collectors: Annual production and comparison with steady-state simulation", *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 148, 2017, pp. 708-723, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.025>.
6. A. Rabl, "Optical and Thermal properties of Compound Parabolic Concentrators", *Solar Energy*, Vol. 18, No. 6, 1976, pp. 497-511, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90069-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90069-4).
7. H. P. Baum and J. M. Gordon, "Geometric characteristics of ideal nonimaging (CPC) solar collectors with cylindrical absorber", *Solar Energy*, Vol. 33, No. 5, 1984, pp. 455-458, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90198-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90198-1).

8. A. Ustaoglu, M. Alptekin, J. Okajima, and S. Maruyama, "Evaluation of uniformity of solar illumination on the receiver of compound parabolic concentrator (CPC)", *Solar Energy*, Vol. 132, 2016, pp. 150-164, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.014>.
9. Q. Wang, J. Wang, and R. Tang, "Design and Optical Performance of Compound Parabolic Solar Concentrators with Evacuated Tube as Receivers", *Energies*, Vol. 9, No. 10, 2016, p. 795, doi: <https://doi.org/10.3390/en9100795>.
10. B. D. Park, G. D. Kim, and K. H. Kim, "Dynamic performance analysis of flat plate solar collector system according to weather conditions and capacity of heat storage tank", *J. Korea Solar Eng.*, Vol. 34, No. 6, 2014, pp. 57-65, doi: <https://doi.org/10.7836/kses.2014.34.6.057>.
11. Y. Tripanagnostopoulos and M. Souliotis, "ICS Solar Systems With Horizontal Cylindrical Storage Tank and Reflector of CPC or Involute Geometry", *Renewable Energy*, Vol. 29, No. 1, 2004, pp. 13-38, doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00139-3).
12. H. Kessentini and C. Bouden, "Numerical and experimental study of an integrated solar collector with CPC reflectors", *Renewable Energy*, Vol. 57, 2013, pp. 577-586, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.015>.
13. H. Kessentini and C. Bouden, "Numerical Simulation, Design, and Construction of a Double Glazed Compound Parabolic Concentrators-Type Integrated Collector Storage Water Heater", *J. Sol. Energy Eng.*, Vol. 138, No. 1, 2016, p. 014501, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4032141>.
14. S. K. Lim, Y. G. Jung, and K. H. Kim, "Study on Thermal Performance Characteristics of CPC system Depending on Weather Conditions and Capacity of Heat Storage Tank", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 30, No. 1, 2019, pp. 58-66, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.1.58>.
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, No. 1, 2013, pp. 816-825, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.08.013>.
16. L. O. Degelman, "Monte Carlo Simulation of Solar Radiation and Dry Bulb Temperatures for Air Conditioning Purpose", Dept. of Arch. Eng., Pennsylvania State Univ., Report No.70-9, 1970.