

기상 조건과 축열조 용량에 따른 복합 포물형 집열기(CPC) 시스템의 열적 성능 특성에 관한 연구

임석규¹ · 정영관² · 김경훈^{2,†}

¹금오공과대학교 대학원, ²금오공과대학교 기계공학과

Study on Thermal Performance Characteristics of CPC System Depending on Weather Conditions and Capacity of Heat Storage Tank

SOK-KYU LIM¹, YOUNG GUAN JUNG², 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 23 November, 2018

Revised 11 January, 2019

Accepted 28 February, 2019

Abstract >> Static compound parabolic collectors (CPCs) have advantages such as ease for fabrication and lower cost compared with other concentrating collectors. In this study, thermal performance analysis of CPC employing heat storage tank was carried out. The clearness index and capacity of heat storage tank are taken as the main parameters for numerical simulation. The effects of the parameters on the hourly and daily system performances including the useful energy, heat loss, and collector efficiency were numerically investigated. Results showed that the system has a potential for efficient recovery of solar thermal energy.

Key words : Compound parabolic collector(포물형 태양열 집열기), Daily clearness index(청명계수), Heat storage tank(축열조), Useful energy(유용에너지)

1. 서론

최근 전 세계적으로 무공해 청정 에너지원인 태양 에너지를 이용해서 전력 생산이나 유용한 에너지의 추출을 위한 다양한 기술들이 개발되고 있다. 태양열은 태양의 복사에너지를 태양열 집열기(solar collector)를 통하여 작동 유체에 전달하여 수집한다. 태양열 집열기는 형태와 기능에 따라 평판형 집열기(flat

plate collector, FPC), compound parabolic concentrator (CPC), parabolic trough concentrator (PTC) 등으로 분류할 수 있다¹⁾.

CPC 집열기는 고정식 또는 추적식 집광형 집열기로서 집광을 통하여 태양 복사에너지를 집중함으로써 보다 높은 온도를 얻을 수 있다. Winston²⁾은 CPC의 집열 퍼텐셜 계산 모델을 제시하였으며, Rabl³⁾은 CPC 모델링을 통하여 광학 및 열 속성에 대한 변수

들의 영향을 수치적으로 해석하였다. CPC에서 기본적인 형상의 흡수판 이외에 실린더, V자, 다채널형, 양면흡수형식 등 다양한 흡수판에 대한 연구 결과들이 보고되고 있으며^{4,7)}, CPC와 태양전지를 결합한 PVT 시스템(photovoltaic thermal system)에 대한 연구도 결합형 시스템의 연구도 진행되고 있다⁸⁻¹⁰⁾.

Zheng 등¹¹⁾은 추운 지방을 위한 결빙방지용 S자 방식의 새로운 CPC를 제안하고 수치해석과 실험을 통해 실증하였다. Kim 등¹²⁾은 진공 원형 CPC의 고정식과 추적식에 대한 비교 연구하였으며, 집열기의 경사각을 조정하는 추적식이 고정식에 비하여 태양 입사각도에 따른 열효율이 약 15% 우수한 결과를 보고하였다. Ortega 등¹³⁾은 CPC를 기반으로 하는 암모니아 흡수냉동 시스템에 대한 수치 연구를 통하여 CPC와 전체 시스템의 최고 효율이 각각 43%와 21%에 이른다고 보고하였다.

태양열 집열기는 기상 조건의 변화에 따라 에너지 수집이 불안정해질 수 있다. 집열기 시스템에서 축열조의 채용은 수집한 태양에너지를 저장할 뿐만 아니라 태양 복사가 불충분할 때에 안정적으로 에너지를 공급해 주는 역할을 한다¹⁾. Park 등¹⁴⁾은 기상 조건과 축열조 용량에 따른 평판형 집열기 시스템의 동적 성능을 해석하였다. Kessentini와 Bouden¹⁵⁾은 수치적으로 2개의 축열조로 구성된 CPC 시스템을 실험 및 수치해석으로 연구하였으며 Tripanagnostopoulos와 Souliotis¹⁶⁾는 2개의 축열조가 설치된 저비용 프로토타입 CPC에 대하여 실험적 연구를 수행하였다.

지금까지 우리나라의 축열조를 채용한 CPC 시스템의 성능 특성에 관한 연구보고는 매우 부족한 상황이었다. 본 연구에서는 청명계수(daily clearness index, K_T)와 축열조 용량의 변화에 따른 CPC 집열기 시스템의 시간 및 일평균 열적 성능 특성을 수치적으로 해석한다. 시간에 따른 흡수판과 탱크 내부의 온도, 집열기 경사판에 들어오는 총 복사, 유용 에너지, 집열기와 축열조에서의 열손실 등의 동적 특성을 분석하고 시간에 대한 적분을 통하여 하루 동안의 유용에너지와 집열기 효율을 예측한다.

2. 시스템 해석

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

CPC에서 벽면의 형상은 포물선으로 구성되며, 입사된 태양광은 양쪽 포물선 내부의 벽면에서 반사되어 흡수판의 한 점으로 집광이 된다. 위상 공간 보존의 원리에 의한 이상적인 집광비의 최대값은 다음과 같다²⁾.

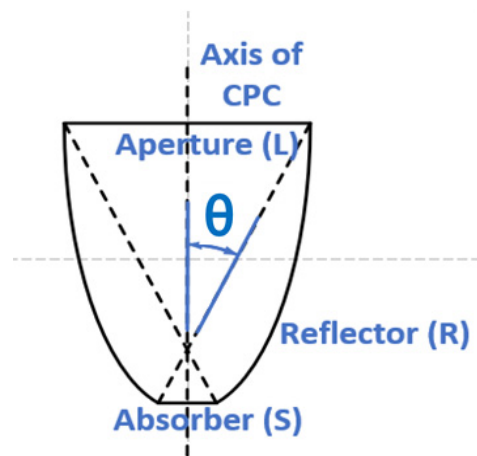


Fig. 1. Schematic of CPC

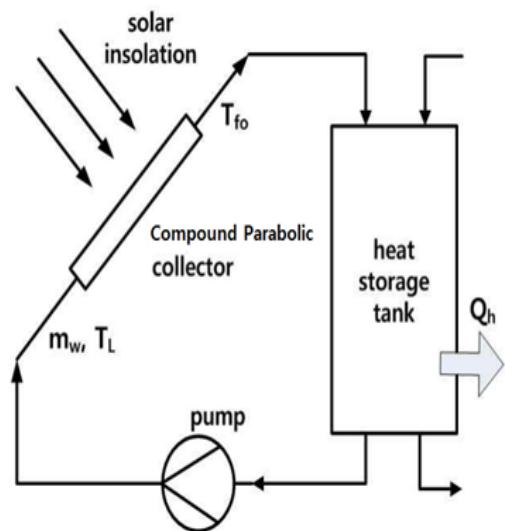


Fig. 2. Schematic of system

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

여기에서 A_L 는 조리개의 입구 면적, A_S 는 흡수판의 면적, n 은 흡수체를 둘러싸는 매질의 굴절률, θ 는 한계 입사각이다. 한계 입사각 θ 내부로 입사된 태양에너지는 조리개 입구를 통하여 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 따른다¹⁾. 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.

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] \times \left[\cos(L) \cos(\delta) \sin(h_{ss}) + \frac{\pi}{180} \sin(L) \sin(\delta) \right] \quad (2)$$

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 함수로 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 위하여 집열기 표면에 도달하는 일사량의 측정이나 계산이 필요하다. 청명지수 K_T 는 대기권 밖 수평면 일사

량에 대한 지상 수평면 일사량의 비로 정의된다.

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

CPC의 조리개 표면으로부터 흡수된 태양복사 플럭스 S는 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 함수로 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

Hsieh와 Mei¹⁷⁾는 집열기의 총 열관류율 U_L 에 대하여 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 Kalogirou¹⁾의 식 (3.86)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_u = F_r [S A_L - A_S U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (12)$$

여기에서 F_r 은 열제거계수(heat removal factor), T_{fi} 는 입구에서의 유체의 온도, T_a 는 대기 온도이다. 집열기 흡수면의 복사에너지로부터 전달받은 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 나타낼 수 있다¹⁸⁾.

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

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 수학적 모델링을 이용하여 축열조 용량과 청명지수의 변화에 따른 CPC 태양열 집열기의 성능 특성을 해석한다. 서울(N37.6, E127)을 대상

지역으로 하며 해석에 사용된 CPC의 기본 데이터는 Table 1에 표시하였다.

Fig. 3에서는 2018년 9월 15일 서울의 기상청 자료를 기준으로 4시 최저 온도 21.0°C, 14시 최고 온도 26.0°C일 때 시간에 따른 대기 온도를 보여준다. 시뮬레이션을 위한 하루 동안 시간에 따른 대기 온도는 일일 최고 및 최저 온도 및 발생시간으로부터 Degelman¹⁹⁾의 대기 온도 모델을 이용하여 구하였다.

Fig. 4에서는 청명계수의 값이 0.2부터 0.8까지 변할 때 시간에 따른 집열기 경사면에 들어오는 총 복

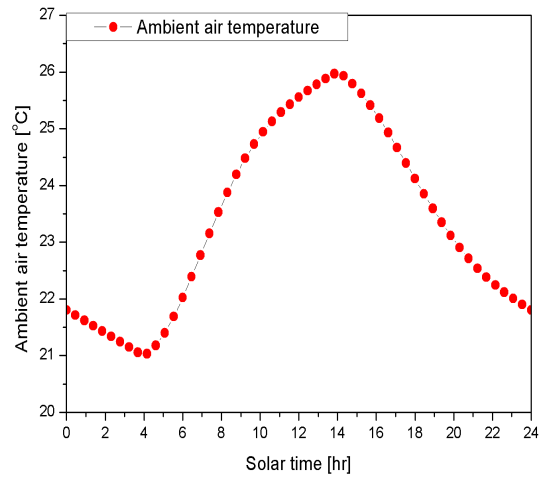


Fig. 3. Plot of ambient temperature

Table 1. Basic data for simulation

Aperture area (m ²)	3.86
Receiver area (m ²)	1
Number of collectors	150
Tilted angle	30°
Acceptance angle	30°
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 diameter (m)	0.1

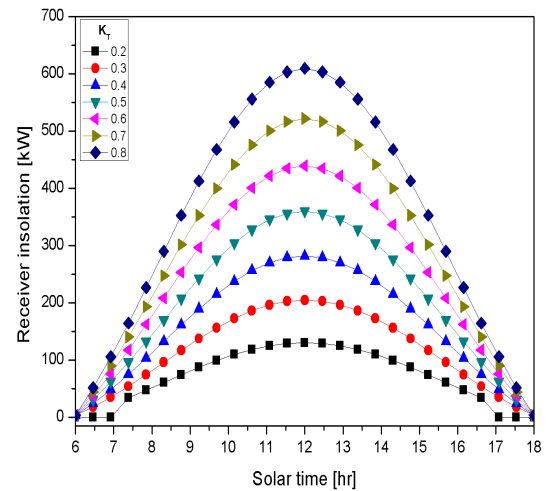


Fig. 4. Plot of total receiver insolation

사에너지를 보여준다. 9월 15일 기준 서울 지역의 일출 시각은 5시 53분, 일몰 시각은 18시 06분이고 경사면에서는 6시 00분, 18시 00분이다. 일출 시각 이후 정오까지 증가하는 경향을 보이며 최대값을 가진 후 일몰 시각까지 감소한다. 시간이 동일할 때 청명계수의 값이 증가하면 총 복사에너지도 증가한다. 정오 기준으로 청명계수가 0.2일 때 130 kW로 가장 낮고 0.8일 때 784 kW로 가장 높은 값을 보인다.

Fig. 5에서는 다양한 청명계수의 값에 대하여 시

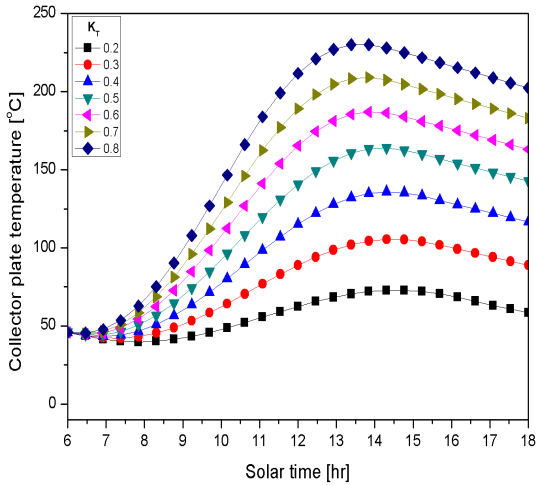


Fig. 5. Plot of collector plate temperature

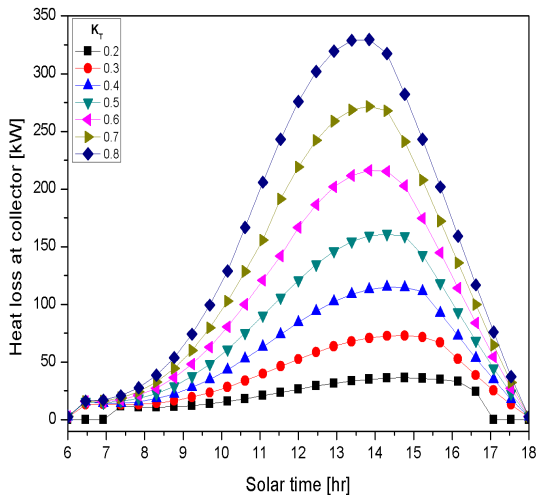


Fig. 6. Plot of heat loss at collector

간에 따른 하루 동안의 집열기 흡수판의 온도 T_p 의 변화를 보여준다. 흡수판의 온도는 평판형 집열기에 비하여 온도가 높으며¹⁵⁾, 총 복사에너지의 경우와 마찬가지로 일출 시각 이후 시간에 따라 상승하다가 최대값을 가진 후 감소하는 경향을 보여준다. 청명계수가 증가함에 따라 흡수판의 온도도 상승하지만, 외기온도와의 온도차 관계로부터 시차 효과가 발생하여 총 복사에너지는 12시에 최대가 되지만 집열기 흡수판의 온도는 12시 이후에 최대가 된다. 흡수판의 최고 온도는 청명계수가 0.2일 때 72.7°C이고 14시 40분에 발생하지만 청명계수가 0.8일 때에는 230.2°C이고 13시 40분에 발생한다.

Fig. 6에서는 다양한 청명계수 값에 대하여 시간에 따른 하루 동안의 집열기의 열손실의 변화를 보여준다. 청명계수의 값이 증가할수록 집열기의 온도가 상승하고 이는 집열기의 열손실을 증가시킨다. 집열기의 열손실의 최대값은 13시 50분 329 kW로 흡수판과 마찬가지로 시차 효과가 발생된다.

Fig. 7에서는 다양한 청명계수의 값에 대하여 시간에 따른 하루 동안의 유용에너지의 변화를 보여준다. 유용에너지는 흡수판에 흡수된 복사에너지 중에서 집열기에서의 손실에너지를 제외한 에너지로서 유체에 실제로 전달되는 에너지이다. 시스템 해석에

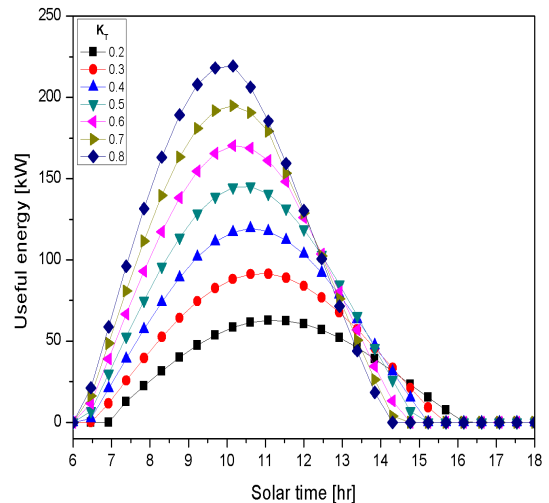


Fig. 7. Plot of useful energy

서는 흡수관에 흡수된 에너지보다 열손실이 더 많아지면 관내 유체를 정지한다고 설정하였다. 유용에너지는 청명계수가 0.8일 때 10시 10분에 최대값 219 kW에 도달하며 이후 급격하게 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 8에서는 청명계수가 0.6일 때 하루 동안 집열기에서 발생하는 각 열전달 모드를 비교해서 보여준다. 여기에서 Q_r 는 집열기 경사면에 들어오는 총 복사에너지, Q_b 는 직달 일사, Q_d 는 확산복사, Q_p 는 집열기 흡

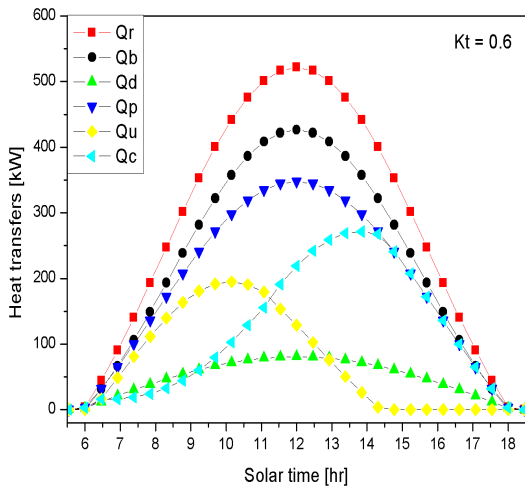


Fig. 8. Plot of heat transfer at collector

수관에 흡수되는 총 복사에너지, Q_u 는 유용에너지 그리고 Q_c 는 집열기의 열손실이다. Q_r, Q_b, Q_d, Q_p 는 모두 평판형 집열기에 비하여 크며 그 최대값들은 12시 기준으로 522.1 kW, 426.7 kW, 80.86 kW, 347.9 kW이다. 하지만 Q_u 의 최대값 발생은 10시 10분 195 kW이며, Q_c 의 최대값 발생은 13시 50분 271.6 kW이다.

Fig. 9는 다양한 청명계수값에 대하여 시간에 따른 하루 동안의 집열기 효율의 변화를 보여준다. 집열기 효율을 식 (14)로 계산하였다. 집열기의 최대 효율은 청명계수가 0.8일 때 7시 20분 0.584이며 이후 급격하게 감소한다. 8시까지 대기온도와 집열기 온도의 차이가 적어 집열기 열손실이 평균 20 kW인데 비해서 8시 이후의 열손실은 평균 200 kW로 10배의 차이가 발생한다. 증가한 열손실은 유용에너지를 감소시켜 집열기의 효율을 급격하게 감소시킨다.

Fig. 10은 청명계수 변화에 따른 하루 동안의 축열조 내부의 유체 온도 변화를 보여준다. 축열조 내부 온도도 평판형 집열기에 비하여 높으며, 유용에너지가 축열조 내부로 유입되기 전까지는 축열조 외부로의 열손실로 온도가 떨어지다가 유용에너지가 유입되면 증가하여 최대값을 가진 다음 감소한다.

Fig. 11은 축열조의 용량과 청명계수 변화에 따른

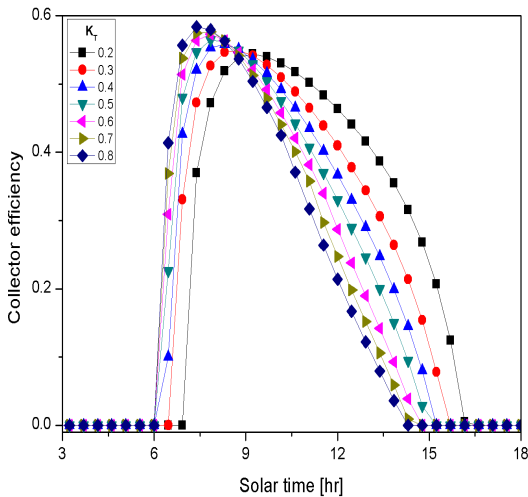


Fig. 9. Plot of collector efficiency

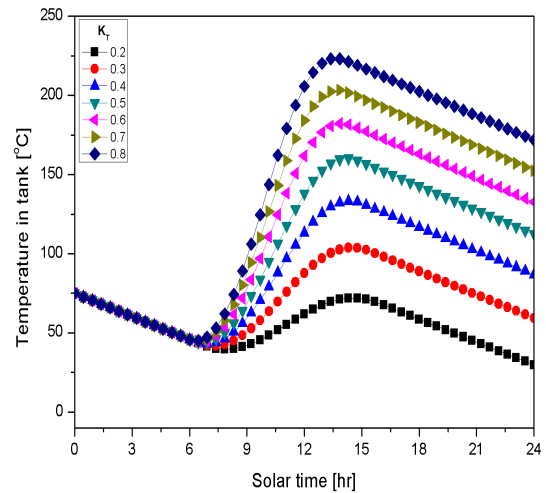


Fig. 10. Plot of temperature in the storage tank

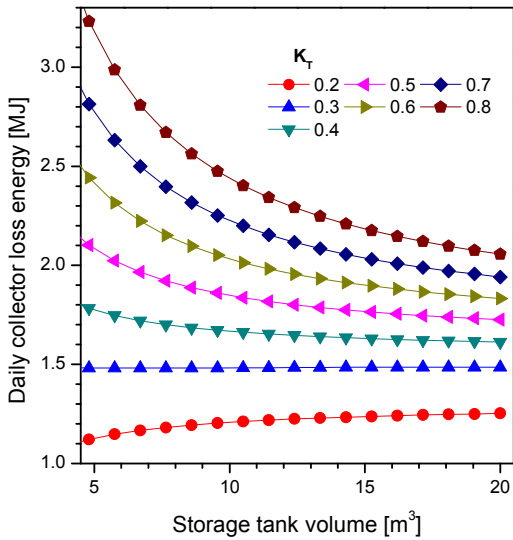


Fig. 11. Plot of daily collector loss in the storage tank

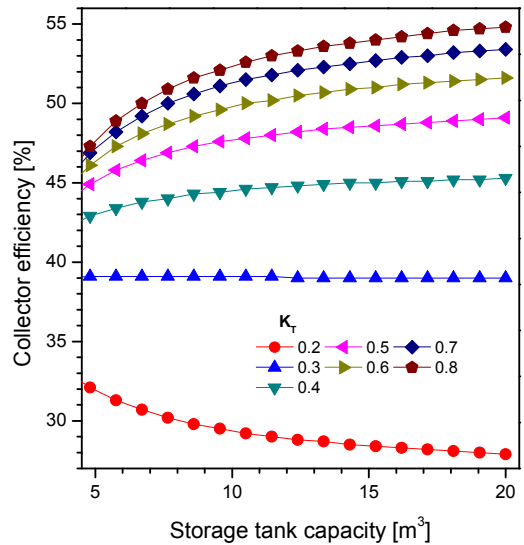


Fig. 13. Plot of daily collector efficiency

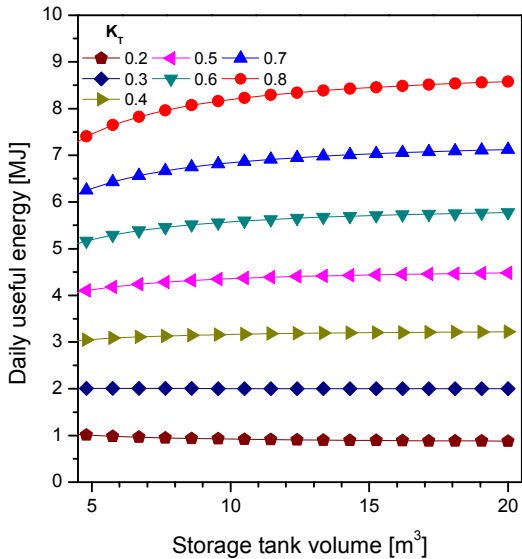


Fig. 12. Plot of daily useful energy in the storage tank

집열기에서 열손실의 변화를 보여준다. 하루 동안 집열기의 열손실은 시간에 따른 열손실을 0시부터 24시까지 태양시에 대하여 적분하여 구한다. 집열기의 열손실은 청명계수가 낮아질수록 감소하는데 이는 집열기에 들어오는 태양 총 복사량이 감소하면서 집열기 흡수판에서 온도가 내려가고 주위와의 온도차가 작아지기 때문이다. 또한 집열기에서의 열손실은 축열

조의 용량이 증가함에 따라 청명계수가 높은 경우에는 감소하나 청명계수가 낮은 경우에는 반대로 증가한다.

Fig. 12와 Fig. 13은 축열조의 용량과 청명계수 변화에 따른 일일 유용에너지와 집열기 효율의 변화를 보여준다. 유용에너지는 청명계수의 값이 낮아질수록 집열기에 유입되는 태양 복사량이 줄어들면서 감소한다. 또한 유용에너지는 축열조의 용량이 커짐에 따라 증가하지만 그 증가율은 청명계수가 낮아짐에 따라 감소한다. 일일 집열기 효율은 하루 동안 집열기에 들어오는 총 복사량에 대한 유용에너지의 비율로 정의된다. 주어진 축열조 용량에서 일일 집열기 효율은 청명계수가 낮아질수록 감소하며 그 감소율도 커진다. 또한 일일 집열기 효율은 축열조의 용량이 커짐에 따라 증가하지만 그 증가율은 청명계수가 낮아질수록 감소한다. 청명계수가 0.2와 같이 매우 낮은 경우에 일일 집열기 효율은 축열조 용량이 커짐에 따라 오히려 감소한다.

4. 결론

본 논문은 서울을 기준으로 전형적인 날씨에 청명

계수와 축열조 용량 변화에 따른 복합 포물형 집열기(CPC) 시스템의 시간 및 일일 열적 성능 특성을 수치적 모델링으로 해석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

1) 평판형 집열기에 비하여 집열기 흡수판의 온도와 축열조 내부 온도도 높고 유용에너지도 크다.

2) 집열기 흡수판 온도, 축열조 온도, 열손실은 오후에 그리고 유용에너지는 오전에 최대값을 가지며, 청명계수가 낮아짐에 따라 최대값의 발생시각이 지연된다.

3) 청명계수가 낮아질수록 일일 집열기 열손실과 유용에너지는 감소하며 집열기 효율은 특히 집열기 효율은 급격히 감소한다.

4) 축열조 용량이 증가하면 청명계수가 높은 경우에는 일일 열손실은 감소하고 유용에너지와 집열기 효율은 증가하나 청명계수가 낮으면 반대가 된다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다 (NRF-2018R1D1A1B07048866).

References

1. A. Kalogirou, "Solar energy engineering", Academic Press, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07038-2>.
2. R. Winston, "Principles of Solar Concentrator of a Novel Design", Solar Energy, Vol. 16, 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).
3. A. Rabl, "Optical and Thermal properties of Compound Parabolic Concentrators", Solar Energy, Vol. 18, 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).
4. 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).
5. N. Fraidenraich, C. Tiba, B. B. Brandão, and O. C. Vilela, "Analytic solutions for the geometric and optical properties of stationary compound parabolic concentrators with fully illuminated inverted V receiver", Solar Energy, Vol. 82, No. 2, 2008, pp. 132-143, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.06.012>.
6. Y. Tripanagnostopoulos and P. Yianoulis, "CPC Solar Collectors With Multichannel Absorber", Solar Energy, Vol. 58, No. 1-3, 1996, pp. 49-61, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(96\)00055-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(96)00055-2).
7. Y. Tripanagnostopoulos Y., P. Yianoulis, S. Papaefthimiou, and S. Zafeiratos, "CPC Collectors With Flat Bifacial Absorbers", Solar Energy, Vol. 69, No. 3, 2000, pp. 191-203, doi: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00061-X).
8. C. Y. Huang, H. C. Sung, and K. L. Yen, "Experimental study of photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system", Int. J. Smart Grid Clean Energy, Vol. 2, No. 2, 2013, pp. 148-151, doi: <http://dx.doi.org/10.12720/sgce.2.2.148-151>.
9. D. Atheaya, A. Tiwari, and G. N. Tiwari, "Exergy analysis of photovoltaic thermal (PVT) compound parabolic concentrator (CPC) for constant collection temperature mode", Solar Energy, Vol. 135, 2016, pp. 222-231, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.055>.
10. D. Su, Y. Jia, X. Huang, G. Alva, Y. Tang, and G. Fang, "Dynamic performance analysis of photovoltaic-thermal solar collector with dual channels for different fluids", Energy Conversion and Management, Vol. 120, 2016, pp. 13-24, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.095>.
11. W. Zheng, L. Yang, H. Zhang, S. You, and C. Zhu, "Numerical and experimental investigation on a new type of compound parabolic concentrator solar collector", Energy Conversion and Management, Vol. 129, 2016, pp. 11-22, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.013>.
12. Y. Kim, G. Han, and T. Seo, "An evaluation on thermal performance of CPC solar collector", International Communications in Heat and Mass transfer, Vol. 35, No. 4, 2008, pp. 446-457, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.09.007>.
13. N. Ortega, O. García-Valladares, R. Best, and V.H. Gómez, "Two-phase flow modelling of a solar concentrator applied as ammonia vapor generator in an absorption refrigerator", Renewable Energy, Vol. 33, No. 9, 2008, pp. 2064-2076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.11.016>.
14. 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>.
15. 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>.
16. Y. Tripanagnostopoulos and M. Souliotis, "ICS solar systems with two water tanks", Renewable Energy, Vol. 31, No. 11,

- 2006, pp. 1698-1717, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.028>.
17. 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).
18. 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>.
19. 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.