

유전알고리즘 이용 경제적 평가기준에 따른 태양열급탕시스템 최적화 설계에 관한 연구

최두성* · 고명진*** · 박광태***

*청운대학교 건축설비소방학과

** (주)나비환경설비컨설팅

*** (주)CNI엔지니어링

Optimization Design of Solar Water Heating System based on Economic Evaluation Criterion using a Genetic Algorithm

Choi Doosung* · Ko Myeongjin*** · Park Kwang-Tae***

*Department of Building Equipment & Fire Protection System, Chungwoon University

**Nabi ENG.

***CNI Engineering CO., LTD.

†Corresponding author: whistlej@nate.com

Abstract

To assure maximum economic benefits and the energy performance of solar water heating systems, the proper sizing of components and operating conditions need to be optimized. In recent years, a number of studies to design optimally solar water heating systems have been tried. This paper presents a design method for optimizing the various capacity-related and installation-related design variables based on life cycle cost using a genetic algorithm. The design variables considered in this study included the types and numbers of solar collector and auxiliary heaters; the types of storage tanks and heat exchangers; the solar collector slope; mass flow rates of the fluid on the hot and cold sides. The suggested method was applied for optimizing a solar water heating system for an elementary school in Seoul, South Korea. In addition, the effectiveness of the proposed optimization method was assessed by analyzing the obtained optimal solutions of six case studies, each of which was simulated with different solar fractions. It is observed that a trade-off between the equipment cost and the energy cost results in an optimal design that yields the lowest life cycle cost. Therefore, it could be helpful to apply the optimal solar water heating system by comparing the various design solutions obtained by using the optimization method instead of the engineer's experience and intuition.

Keywords: 태양열급탕시스템(Solar water heating system), 유전알고리즘(Genetic algorithm), 최적화(Optimization), 총생애비용(Life cycle cost), 초등학교(Elementary school)



OPEN ACCESS

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.36, No.5, pp.73-89, A 2016
<http://dx.doi.org/10.7836/kjes.2016.36.5.073>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 31 August 2016

Accepted: 17 October 2016

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기호설명

- A : 면적 (m^2)
- $A_{R,max}$: 보조금 지급 최대 집열기 면적 (m^2)
- C : 비용 (KRW)
- C_E : 태양열시스템 에너지비 (KRW)
- C_I : 태양열시스템 초기투자비 (KRW)
- C_{LCC} : 태양열시스템 총생애비용 (KRW)
- C_M : 태양열시스템 유지관리비 (KRW)
- C_R : 태양열시스템 교체비 (KRW)
- C_S : 태양열시스템 보조금 (KRW)
- c_{ELE} : 전기요금 단가 (KRW/Wh)
- c_{LNG} : 가스요금 단가 (kRW/ m^3)
- $C_{hex,ho}$: 열교환기 고온측 열용량을 ($W/^\circ C$)
- $C_{hex,co}$: 열교환기 저온측 열용량을 ($W/^\circ C$)
- C_p : 순환유체 비열 ($kJ/kg^\circ C$)
- EIR : 에너지 투입 비율 (-)
- F : 연료소비량 (kWh or m^3)
- F_S : 태양열급탕시스템 의존율 (%)
- g : 중력가속도 (m/s^2)
- H : 순환펌프 수두 (m)
- i : 실질할인율 (%)
- I_T : 경사면 일사량(W/m^2)
- $m_{coll,u}$: 집열기 순환유량 (kg/sm^2)
- m_d : 축열조 과열방지 배출수량 (kg/s)
- $m_{hex,co}$: 열교환기 저온측 순환유량 (kg/s)
- m_L : 급탕량(kg/s)
- m_{Ls} : 축열조 부하측 공급유량 (kg/s)
- m_{pump} : 순환유체 유량 (kg/s)
- N : 기기 수 (ea)
- n_p : 총생애비용 분석기간 (year)

$n_{i,c}$: 개별 구성기기 내용연수 (year)
 $n_{r,c}$: 개별 구성기기 교체횟수 (-)
 PEF : 1차에너지 환산계수 (-)
 PLR : 부분 부하율 (-)
 q_{aux} : 보조가열기 공급 에너지 (W)
 q_d : 축열조 과열방지 배출에너지 (W)
 q_{hex} : 축열조로 공급된 태양열에너지 (W)
 q_l : 축열조가 손실한 태양열에너지 (W)
 q_L : 급탕부하 (W)
 q_{Ls} : 축열조가 공급한 태양열에너지 (W)
 Q_{LHV} : 천연가스 저위발열량 (W/m³)
 R_I : 직접비 대비 간접비 비율 (%)
 R_M : 연간 유지관리비 비율 (%)
 R_S : 보조금 비율 (%)
 T : 온도 (°C) 또는 타입 (-)
 T_{amb} : 주위 온도 (°C)
 T_L : 급탕설정온도 (°C)
 T_m : 급수온도 (°C)
 U : 열통과율 (W/m²°C)
 UPA^* : 에너지요금 균등현가계수 (-)
 V : 체적 (m³)

그리스 문자

β : 경사각 (°)
 ρ : 밀도 (kg/m³)
 ϵ : 열교환기 유용도 (-)
 η : 효율 (-)

하첨자

aux : Auxiliary heater

c : Component
coll : Collector
hex : Heat exchanger
in : Input
j : *j*th device type
LHV : Lower heating value
LNG : Liquefied natural gas
motor : Circulation pump's Motor
p : Parallel
peak : Peak load
pump : Circulation pump
sys : System
tank : Storage tank
w : Water

1. 서론

건물의 열에너지 공급을 위한 화석에너지 소비를 절감하고 온실가스의 배출을 저감하기 위한 방안으로 태양열이 효과적인 대체 에너지원 중 하나로 적용되고 있다¹⁾. 특히 태양열급탕시스템은 태양열을 이용하는 에너지시스템 중 세계적으로 가장 보편화된 시스템으로²⁾, 국내에서도 1970년대 후반부터 많이 보급되고 있다.

태양열급탕시스템의 에너지 및 경제적 성능을 보장하기 위해서는 시스템에 대한 합리적인 설계가 중요하다. 이에 상관성 기반 방법(Correlation-based method) 및 시뮬레이션 기반 방법(Simulation-based method)들이 많은 연구자들에 의해 제안되어 왔다³⁾. 그러나 최근에는 시스템의 다양한 구성과 기상 및 부하 조건의 특성 등에 보다 유연하게 대응할 뿐만 아니라 기본적 설계 정보만을 가지고 단시간 내에 효과적인 설계안을 얻기 위한 최적화 설계 연구에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 최적해 탐색 알고리즘으로 진화알고리즘의 일종인 유전알고리즘을 이용하여 태양열급탕시스템의 용량을 최적화하는 연구들이 증가하고 있다. 이와 관련한 선행연구들을 살펴보면, Loomans와 Visser⁴⁾는 유전알고리즘을 이용하여 최소의 투자비회수기간을 갖는 태양열시스템의 용량을 설계하기 위한 방법을 제안하였다. Kalogirou et al.⁵⁾는 인공신경망과 유전알고리즘을 결합하여 태양열시스템의 생애주기 에너지절감량을 최대화하는 집열기 면적과 축열조 용량을 도출하기 위한 방법을 보고하였다. Atia et al.⁶⁾는 강제순환 태양열시스템의 생애주기비용을 최소화하기 위해 유전알고리즘을 적용한 설계방법을 연구하였다. Ko⁷⁾는 총생애비용에 기반하여 태양열급탕시스템의 주요 구성기기인 집열기와 축열조, 보조가열기의 용량을 도출하기 위한 설계방법을 제안하고 사무소 건물을 대상으로 사례연구를 수행하였다. 그러나 이러한 연구동향에도 불구하고 아직 태양열급탕시스템의 최적화 설계에 관한 연구는 그 중요성에 비해 관련

연구가 매우 드문 실정이다. 아울러 전술한 바와 같이 태양열시스템은 기상 조건 및 부하 조건 등에 의해 상이하게 최적 화됨에 따라 다양한 기상조건과 용도의 건물에 대한 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 선행연구⁷⁾⁸⁾에서 제안한 경제적 평가기준 기반의 태양열급탕시스템 최적화 설계방법을 이용하여 초등학교 건물에 적용된 태양열급탕시스템을 대상으로 최적화 설계 사례연구를 실시하였다. 아울러 실제 실무에서 태양 열급탕시스템 계획 시 설계 기준으로 활용되고 있는 태양열의존율의 변화에 따른 최적설계안의 경제성과 설계변수의 변 화를 분석하였다.

2. 태양열급탕시스템 해석 모델

본 연구의 최적화 설계방법에서는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 집열기, 열교환기, 축열조, 보조가열기로 구성되는 열교 환기 외부설치 축열조 직접이용 태양열급탕시스템을 대상 시스템으로 선정하였다. 아울러 전술한 바와 같이 본 연구에 서는 저자들의 선행연구⁷⁾⁸⁾에서 보고된 태양열급탕시스템 최적화 설계방법을 이용 및 확장함에 따라 이에 대한 내용은 개략적으로 기술하였다.

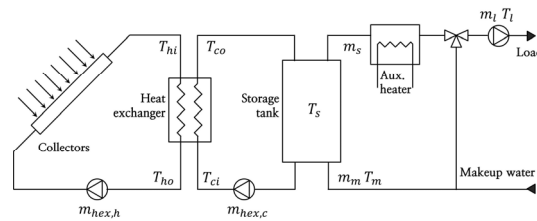


Fig. 1 Schematic diagram of solar water heating system

태양열급탕시스템은 축열조를 중심으로 열원측과 부하측으로 구분됨에 따라 축열조에서의 에너지 균형으로 해석할 수 있다. 임의의 시간에서 축열조 온도(T_{tank})는 축열조로 유입 및 공급, 손실되는 에너지들의 관계에 따라 완전 혼합모 델을 이용하여 식(1)과 같이 계산할 수 있다³⁾.

$$(\rho_w C_{p,w} V_{tank}) \frac{dT_{tank}}{dt} = q_{hex} - q_{Ls} - q_l - q_d \quad (1)$$

식(1)에서 집열기에서 획득되어 열교환기를 통해 축열조로 전달된 에너지(q_{hex})는 다음 식을 통해 계산할 수 있다.

$$q_{hex} = \begin{cases} \epsilon C_{hex,ho} \times (T_{hex,ho,in} - T_{hex,co,in}), & C_{hex,min} = C_{hex,ho} \\ \epsilon C_{hex,co} \times (T_{hex,ho,in} - T_{hex,co,in}), & C_{hex,min} = C_{hex,co} \end{cases} \quad (2)$$

축열조에서 부하측으로 공급한 에너지(q_{Ls})는 식(3)을 이용하여 계산한다.

$$q_{Ls} = m_{Ls} C_{p,w} (T_{tank} - T_m) \quad (3)$$

축열조에서 주변 공간으로의 열손실(q_l)은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$q_l = U_{tank} A_{tank} (T_{tank} - T_{amb}) \quad (4)$$

본 연구에서는 축열조의 과열을 방지하기 위해 내부가 일정 온도 이상을 넘지 않도록 설정하였다. 이에 축열조 과열방지를 위해 배출되는 에너지는 다음 식으로 계산된다.

$$q_d = \begin{cases} m_d C_{p,w} (T_{tank} - 100), & T_{tank} > 100^\circ\text{C} \\ 0, & T_{tank} \leq 100^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

식(1)~(5)의 수식모델은 임의의 시간 간격에서 축열조의 초기 온도에 기반하여 평가된 것으로, 다음 시간에서의 축열조 온도를 알기 위해서는 임의의 시간 간격에서의 축열조 최종 온도($T_{tank,f}$)를 다음 식을 이용하여 계산해야 한다³⁾.

$$T_{tank,f} = T_{tank} + \frac{(q_{hex} - q_{Ls} - q_l - q_d)3,600}{\rho_w C_{p,w} V_{tank}} \Delta t \quad (6)$$

축열조에서 부하측으로 공급되는 온도가 설정온도 보다 낮을 경우 보조가열기에 의한 추가적인 에너지 공급이 필요하다. 보조가열기 연료소비량은 부분부하율과 에너지투입 비율을 이용하여⁹⁾ 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$q_{aux} = \begin{cases} 0, & T_{tank} > T_L \\ m_L C_{p,w} (T_L - T_{tank}), & T_{tank} \leq T_L \end{cases} \quad (7)$$

$$F_{LNG} = \frac{q_{aux} EIR (PLR_{aux})}{PLR_{aux} \eta_{aux} Q_{LHV}} \quad (8)$$

강제순환식 태양열급탕시스템에서 유체 순환을 위한 펌프 소비에너지는 다음과 같은 개략식을 통해 계산할 수 있다.

$$F_{ELE} = \frac{m_{pump}gH_{pump}}{\eta_{pump}\eta_{motor}} \quad (9)$$

아울러 태양열시스템의 성능평가의 주요 지표로 활용되는 태양열의존율과 태양열시스템 효율은 각각 다음 식을 통해 계산된다.

$$F_S = \left\{ 1 - \sum_1^t \left[\frac{q_{aux}(t)}{q_L(t)} \right] \right\} \times 100 \quad (10)$$

$$\eta_{sys} = \left\{ \frac{\sum_1^t [q_{Ls}(t) - PEF_{ELE}F_{ELE}(t)]}{\sum_1^t [A_{coll}N_{coll}I_T(t)]} \right\} \times 100 \quad (11)$$

3. 태양열급탕시스템 최적화 방법

3.1 최적화 알고리즘

최적화란 주어진 제약조건을 만족시키면서 목적함수의 값이 최대 또는 최소가 되는 결정변수의 값을 결정하는 과정이다¹⁰⁾. 본 연구에서는 총생애비용(Life cycle cost)을 최소화하는 태양열급탕시스템 설계변수를 도출하는 것으로 최적화 문제를 설정하였다. 최적화 알고리즘으로는 최근 에너지시스템의 설계 문제에 적합한 최적화 알고리즘으로 그 우수성을 인정받고 있는 유전알고리즘을 이용하였으며¹¹⁾, Fig. 2는 제안한 알고리즘의 프로세스를 나타낸다.

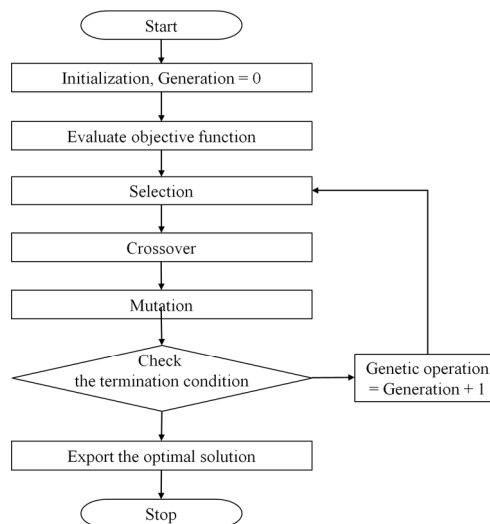


Fig. 2 Genetic algorithm flowchart

3.2 결정변수

본 연구에서 결정변수는 최적화를 통해 도출된 설계안이 태양열급탕시스템 계획 단계에서 요구하는 실질적 정보를 반영할 수 있도록 하였다. 용량관련 결정변수에는 주요 구성기기인 집열기와 열교환기, 축열조, 보조가열기의 타입과 수량이 포함된다. 이때 태양열급탕시스템의 현장 적용시 열교환기와 축열조는 일반적으로 단일 장비로 설치되는 점을 고려하여 수량은 1개로 고정하였다. 운전조건 관련 설계변수의 경우 집열기 설치 경사각과 집열기 단위면적당 순환유량, 열교환기 저온측 순환유량으로 설정하였다. 이때 집열기 단위면적당 순환유량은 집열기의 수량과 연결방식에 따라 고온측 순환유량으로 환산될 수 있다. 다음 식은 전술한 결정변수로 구성된 결정벡터를 나타낸다.

$$x = (T_{coll}, N_{coll}, T_{hex}, T_{tank}, T_{aux}, N_{aux}, \beta_{coll}, m_{coll,u}, m_{hex,c}) \quad (12)$$

3.3 목적함수

태양열급탕시스템 최적화의 평가기준, 즉 목적함수는 실제 설비시스템 투자 시 경제적 판단기준으로 활용되고 있는 평가법에 의한 총생애비용으로 설정하였다.

총생애비용의 비용항목은 초기투자비, 유지관리비, 교체비, 에너지비, 보조금으로 구성하였다. 비용항목별 산정식은 아래와 같다. 비용항목별로 산정방법을 살펴보면, 초기투자비는 시스템 주요 구성기기의 구입비용을 나타내는 직접비용과 이 비용에 비례하여 발생하는 간접비용의 합으로 계산하였다. 유지관리비는 초기투자비에 대한 일정 비율로 매년 발생하는 것으로 설정하였다. 교체비는 주요 구성기기인 집열기와 열교환기, 축열조, 보조가열기의 내용연수에 따라 생애비용 분석기간 동안 발생하는 교체비용을 합산하여 계산하였다. 보조금은 태양열시스템 설치 관련 지원금을 수령할 수 있는 집열기 최대 설치면적과 지원비율에 따라 계산된다.

$$C_{LCC} = C_I + C_M + C_R + C_E - C_S \quad (13)$$

$$C_I = (C_{coll,j}N_{coll} + C_{hex} + C_{tank} + C_{aux,j}N_{aux}) \times (1 + R_I) \quad (14)$$

$$C_M = C_I R_M \left[\frac{(1+i)^{n_p} - 1}{i(1+i)^{n_p}} \right] \quad (15)$$

$$C_{R,c} = \sum_1^{n_{r,c}} \left\{ C_{I,c} \left[\frac{1}{(1+i)^{(n_{l,c}n_{r,c})}} \right] \right\} \quad (16)$$

$$C_E = \left[\sum_1^{8.760} c_{ELE}(t) F_{ELE}(t) \right] UPA_{ELE}^* + \left[\sum_1^{8.760} c_{LNG}(t) F_{LNG}(t) \right] UPA_{LNG}^* \quad (17)$$

$$C_S = \begin{cases} C_I R_S, & A_{R, \max} > A_{coll, j} N_{coll} \\ C_I R_S \text{floor} \left(\frac{A_{R, \max}}{A_{coll, j} N_{coll}} \right), & A_{R, \max} \leq A_{coll, j} N_{coll} \end{cases} \quad (18)$$

3.4 제약조건

최적화 과정에서 발견되어 다음 세대로 진화하거나 결과로서 제시되는 해들은 설계안으로서 타당성을 확보하기 위해 제약조건을 만족해야 한다. 이에 본 연구에서는 급탕부하와 태양열 의존율, 집열기 설치가능 면적, 집열기 경사각 범위, 순환유체 유량 범위 등을 다음 식과 같이 제약조건으로 설정하였다.

$$q_{L, peak} \leq q_{aux, j} N_{aux} \quad (19)$$

$$F_{S, \min} \leq 1 - \frac{Q_{aux, year}}{Q_{L, year}} \leq F_{S, \max} \quad (20)$$

$$0 \leq \beta_{coll} \leq 90 \quad (21)$$

$$0.005 \leq m_{coll, u} \leq 0.025 \quad (22)$$

$$0.5 A_{coll, j} m_{coll, u} N_{coll, p} \leq m_{coll, u} \leq 2.0 A_{coll, j} m_{coll, u} N_{coll, p} \quad (23)$$

4. 태양열급탕시스템 최적화 설계 사례연구 및 결과 분석

4.1 사례연구 개요

경제적 평가기반 최적화 설계방법을 이용하여 서울지역 초등학교 태양열급탕시스템의 최적 용량 및 운전 조건을 도출하는 사례연구를 수행하였다.

시간별 일사량 및 외기 온도는 태양에너지학회의 서울지역 표준기상데이터를 이용하였으며, Fig. 3(a)와 같다. 급수온도는 서울시 상수도사업본부에서 제공받은 강남지역의 일별 상수온도를 활용하였다(Fig. 3(b) 참조). 한편 초등학교의 급탕부하는 급탕량 사용비율과 사용인원수에 의해 산정하였다. 일간 시간별 급탕량 사용비율¹²⁾은 Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같이 주간과, 토요일, 일요일로 구분하여 적용하였다. 사용인원은 학생과 교사를 포함하여 1,000명, 1인 1일 급탕량은 2.5 L/day로 설정하였다. Fig. 4(b)는 급탕량 산정자료와 초등학교 연간 운영스케줄을 반영하여 산출한 시간별 급탕부하를 나타낸다.

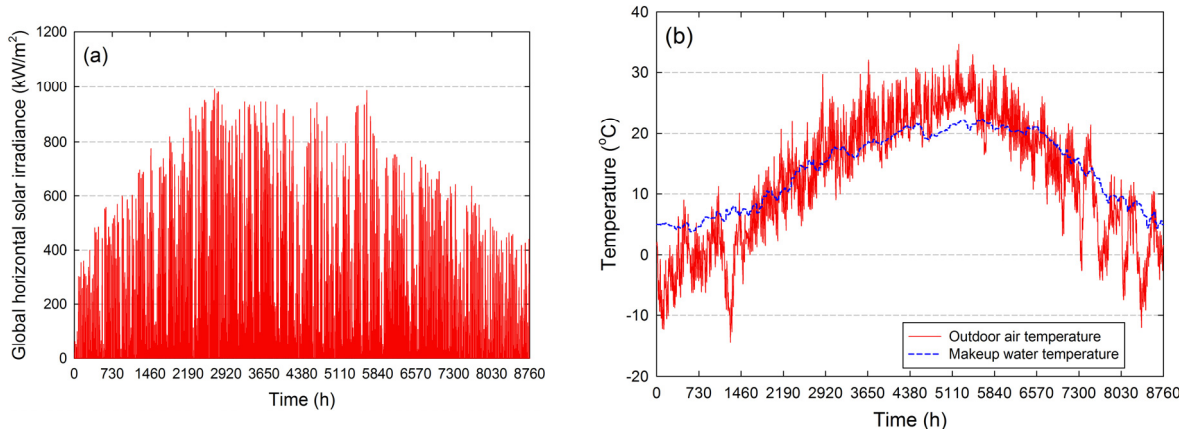


Fig. 3 (a) Hourly global horizontal solar irradiance, and (b) Hourly outdoor air and makeup water temperatures in Seoul, South Korea.

태양열급탕시스템 해석 모델을 이용한 연간 에너지시뮬레이션과 총생애비용의 계산을 위한 주요 구성기기의 기술적, 경제적 데이터는 Table 1~4와 같다. 전기요금은 2013년 11월부터 적용된 교육용(갑) 고압 A 선택 I의 전력량 요금을, 가스요금은 서울도시가스의 2015년 9월부터 적용된 업무난방용 요금인 18.7142 KRW/MJ를 각각 적용하였다. 기타 최적화에 반영된 변수는 Table 5와 같다.

유전알고리즘 변수는 해의 다양성 확보 및 수렴과정 보장을 목적으로 총세대진화의 수는 1,500세대, 군집의 크기는 50개, 교배확률은 0.9, 돌연변이 확률은 0.3으로 설정하였다. 그리고 최적화 알고리즘은 설정한 최대 세대수에 도달하면 종료되도록 하였다.

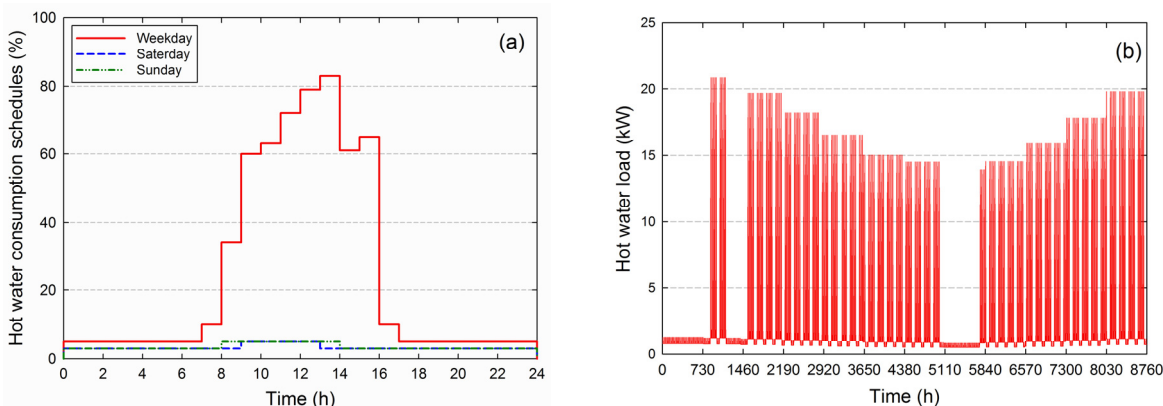


Fig. 4 (a) Hourly hot water consumption schedules over one day, and (b) hot water load over one year in case study elementary school.

Table 1 Technical and economic specification of solar collectors for the optimization design

Parameters	Device types				
	1	2	3	4	5
Intercept of collector efficiency (-)	0.7445	0.7208	0.7200	0.7109	0.7043
Negative of slope of collector efficiency ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	4.8483	4.7999	4.0900	5.0050	4.5368
Flow rate of fluid under standard conditions (kg/s)	0.0381	0.0373	0.0400	0.0368	0.0368
Overall height (m)	2.00	2.00	2.00	2.02	2.00
Overall width (m)	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
Lifetime (year)	20	20	20	20	20
Purchase cost (1,000 KRW/ea.)	545	530	520	545	540

Table 2 Technical and economic specification of counter-flow-type heat exchangers for the optimization design

Parameters	Device types									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Overall heat transfer coefficient-area product ($W/^\circ C$)	465	698	930	1,163	1,454	1,745	2,326	2,908	3,489	4,071
Total heat transfer area (m^2)	0.1768	0.2652	0.3094	0.3536	0.4420	0.5304	0.7072	0.8398	1.0608	1.2376
Area per plate (m^2)	0.0442	0.0442	0.0442	0.0442	0.0442	0.0442	0.0442	0.0442	0.0442	0.0442
Total number of plates (ea.)	6	8	9	10	12	14	18	21	26	30
Lifetime (year)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Purchase cost (1,000 KRW/ea.)	490	520	530	540	570	590	640	670	730	780

Table 3 Technical and economic specification of storage tanks for the optimization design

Parameters	Device types								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tank volume (m^3)	0.96	1.72	2.65	3.76	4.91	5.54	6.21	6.92	9.58
Heat loss coefficient ($W/^\circ C$)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Overall height (m)	1.22	1.52	2	2.44	2.44	2.44	2.44	3.05	3.05
Overall diameter (m)	1	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	1.7	2
Lifetime (year)	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Purchase cost (1,000,000 KRW/ea.)	7.15	9.49	10.73	12.65	15.88	17.33	18.02	18.98	24.20

Table 4 Technical and economic specification of auxiliary heaters for the optimization design

Parameters	Device types					
	1	2	3	4	5	6
Rated heating capacity (kW)	15.12	18.61	23.26	29.08	34.89	58.15
Rated efficiency (%)	83	84	85	86	86	82
Lifetime (year)	15	15	15	15	15	15
Purchase cost (1,000 KRW/ea.)	807.4	844.8	909.7	964.7	1,039.5	2,291.3

Table 5 Optimization parameters considered in case study

Parameters	Values	Parameters	Values
Azimuth of collector array (°)	0	Head of pump on hot side of heat exchanger (m)	80
Meridian altitude in winter (°)	29	Head of pump on cold side of heat exchanger (m)	15
Desired hot water temperature (°C)	60	Project lifetime (years)	40
Maximum allowable tank temperature (°C)	100	Real discount rate (%)	2.91
Temperature of surrounding tank (°C)	20	Electricity cost escalation rate (%)	4.00
Specific heat of collector fluid (J/kg·°C)	3,843	Gas cost escalation rate (%)	4.00
Specific heat of water (J/kg·°C)	4,153	Maximum capacity available to receive subsidy (m ²)	500
Density of collector fluid (kg/m ³)	1,032	Area available to install solar collectors (m ²)	10,000
Density of water (kg/m ³)	991	Supplementary cost ratio against purchase cost (%)	30
Pumping efficiency of circulation pump (%)	60	Maintenance cost ratio against initial cost (%)	1.5
Motor efficiency of circulation pump (%)	80	Subsidy cost ratio against initial cost (%)	50

4.2 최적화 설계 결과 및 고찰

본 연구에서 제안한 유전알고리즘 이용 최적화 설계방법에 따라 초등학교 건물의 태양열급탕시스템을 대상으로 최적화 설계를 수행하였다. 아울러 태양열의존율이 40%에서 90%까지 10% 단위로 변화함에 따른 최적 설계안을 각각 도출하여 태양열의존율 변화에 따른 태양열급탕시스템의 경제성 변화 및 도출된 설계변수들의 특성을 분석하였다.

최적화 시뮬레이션은 Window 7 운영체제 i5-2310 @2.90GHz_CPU 4 GB 메모리의 컴퓨터 사양에서 50개의 군집에 대해 1,500세대 동안 진화시킨 결과, 약 16.4분의 연산시간이 소요되었다. 이에 제안한 최적화 알고리즘은 초당 약 76개의 설계안들을 평가할 수 있는 연산능력을 나타내었다.

(1) 태양열의존율에 따른 태양열급탕시스템 경제성 변화

Fig. 5와 Table 6은 6가지 설계 목표 태양열의존율 조건(e.g. $60 \pm 2\%$)하에서의 목적함수 즉 총생애비용의 수렴 과정과 도출된 최적 설계안의 특성을 각각 나타낸다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 총 1,500세대의 진화 과정에서 약 150세대까지 목적함수의 개선이 뚜렷하게 발생하나 이후에는 개선 효과가 저감되며 점차 수렴하는 것으로 나타났다.

서로 다른 태양열의존율 조건하에서 경제적 평가 기준에 기반을 두어 수행된 최적화 설계 결과, 태양열의존율이 90%인 사례에서 가장 높은 162.3백만 원의 총생애비용이 발생하였으며, 태양열의존율이 50%인 사례에서 118.6백만 원의 가장 낮은 생애비용이 발생하였다. Table 6에서 확인할 수 있듯이 태양열의존율과 총생애비용이 선형적인 관계로 변화하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 관계에 대한 분석을 위해 태양열의존율 변화에 따른 총생애비용의 변화를 에너지 비용과 장비 관련 비용으로 구분하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 태양열에너지를 통한 공급 비중이 증가함에 따라 에너지비용은 대체로 선형적으로 감소하지만, 초기투자비 및 유지관리비, 교체비 등의 장비관련 비용은 더욱 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 수행한 최적화 설계사례의 경우 태양열의존율이 40~70%까지는 의존율 증가에 따른 장비관련 비용의 증가와 에너지 비용의 절감이 유사하여 총생애비용은 거의 유사하게 나타났다.

그러나 태양열의존율이 80%와 90%인 사례의 경우, 태양열의존율이 50%인 경우와 대비하여 장비 관련 비용은 103.1%와 189.1% 증가한 반면 에너지비용은 51.9%와 69.1% 감소하는 데 그쳐 총생애비용은 각각 11.7%와 36.9% 증가하였다.

Table 6 Characteristics of the optimal solar water heating systems for the different solar fractions

Parameters	Design solar fraction (%)					
	40	50	60	70	80	90
Type of solar collector (-)	5	5	5	5	5	5
Number of the j th device of solar collectors (ea)	19	25	31	43	61	91
Type of heat exchanger (-)	2	5	6	8	8	9
Type of storage tank (-)	1	1	2	3	4	6
Type of auxiliary heater (-)	4	3	3	3	3	3
Number of the j th device of auxiliary heaters (ea)	1	1	1	1	1	1
Slope of the collector array ($^{\circ}$)	38	35	34	33	38	42
Mass flow rate per unit area of the collector fluid (kg/sm^2)	0.008	0.013	0.013	0.016	0.012	0.010
Mass flow rate on the load side of the heat exchanger (kg/s)	0.082	0.247	0.308	0.504	0.519	0.606
Hot water load (kWh/year)	28,309	28,309	28,309	28,309	28,309	28,309
Solar radiation on the tilted collector array (kWh/year)	46,021	60,900	75,630	105,045	147,753	218,153
Solar energy supplied to a storage tank (kWh/year)	12,311	15,546	17,942	21,488	24,651	27,984
Heat loss of a storage tank (kWh/year)	334	414	560	850	1,234	1,504
Discharged heat to avoid overheating of a tank (kWh/year)	4	33	22	38	48	74
Solar energy extracted from the tank to the load (kWh/year)	11,890	14,720	17,007	19,998	22,503	24,970
Auxiliary heating energy (kWh/year)	16,419	13,588	11,302	8,311	5,805	3,339
Annual average storage tank temperature ($^{\circ}\text{C}$)	41.5	46.8	50.2	55.5	61.0	67.8
Annual solar fraction (%)	42.0	52.0	60.1	70.6	79.5	88.2
Life cycle cost (million KRW)	124.8	118.6	120.0	121.9	132.5	162.3

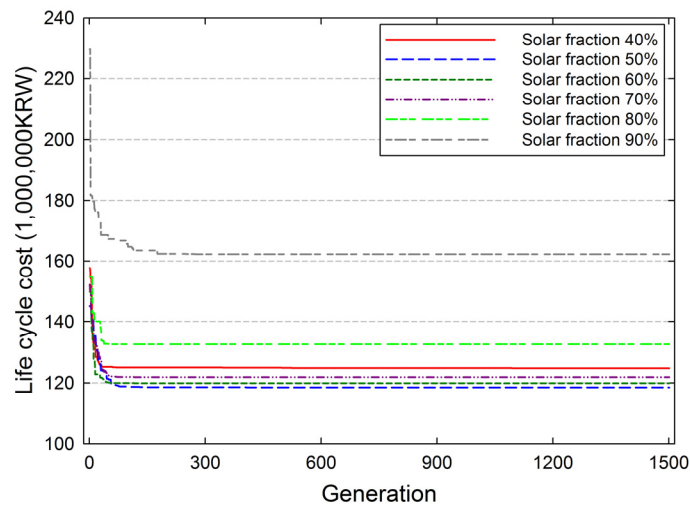


Fig. 5 Evolution of objective function for the different solar fractions

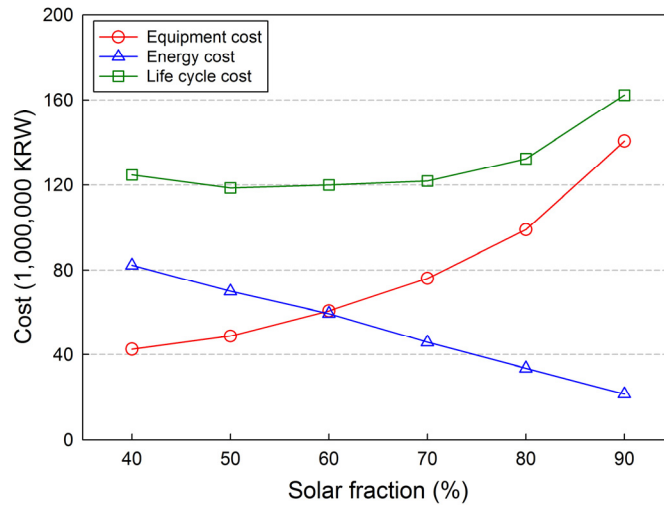


Fig. 6 Variation of costs for the different solar fractions

이러한 분석을 통해 태양열급탕시스템의 장비관련 비용과 에너지절감 비용 사이의 상충관계를 확인할 수 있으며, 본 연구에서 제안한 설계방법은 전술한 상충관계를 기반으로 최적의 설계변수들을 조합함으로써 가장 경제적인 시스템을 도출함을 알 수 있다. 아울러 설계자의 경험 및 직관에 주로 의존하여 시스템을 설계하는 대신에 최적화 설계를 통해 다양한 설계안들을 비교 평가하고 전역 최적 설계안을 도출함으로써 경제적인 태양열급탕시스템의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

(2) 태양열의존율에 따른 태양열급탕시스템 설계변수 변화

태양열의존율의 증감에 따른 최적 설계안의 총생애비용 변화는 도출된 설계변수에 의해 야기됨에 따라 이에 대한 분석을 실시하였다. Fig. 7(a)는 6가지 목표 태양열의존율 설계조건에서 구성기기의 용량 산출결과를 나타낸 것이다. 태양열의존율이 증가함에 따라 집열기와 열교환기, 축열조 용량이 모두 증가함을 알 수 있다. 아울러 이때 3가지 구성기기의 용량은 일률적으로 증가하지 않고 설정된 태양열의존율을 가장 경제적으로 달성할 수 있는 구성기기 용량 조합이 도출됨을 알 수 있다. 한편 보조가열기는 태양열의존율 설정에 관계없이 최대 급탕부하를 만족하도록 설계됨에 따라 6개 사례에서 거의 동일한 용량의 보조가열기가 도출되었다.

Fig. 7(b)는 태양열급탕시스템의 운전 관련 설계변수의 변화를 나타낸다. 일반적으로 급탕 목적의 태양열집열기 설치각도는 해당지역 위도를 기준으로 결정됨을 고려할 때, 6개 분석사례들의 집열기 경사각은 서울지역 위도 37°를 기준으로 $\pm 5^\circ$ 범위에 해당한다. 그러나 세부적으로 살펴보면 태양열의존율이 70%인 경우 경사각은 33°이며 90%인 경우 경사각은 42°로 약 9°의 차이를 보였다. 최적화를 통해 도출된 경사각의 이러한 차이는 각 태양열의존율에서 효율적인 시스템을 얻기 위함으로 판단된다. Table 6에서 확인할 수 있듯이, 연간 태양열의존율이 70%까지는 여름철과 중간기 더 많은 일사량 획득을 위해 경사각이 감소하지만, 태양열의존율이 80% 이상에서는 여름철과 중간기의 태양열의존율이 설정한 의존율을 상당 부분 만족함에 따라 상대적으로 의존율이 낮은 동절기에 많은 일사량을 획득하는 것이 효율적이기 때문으로 판단된다.

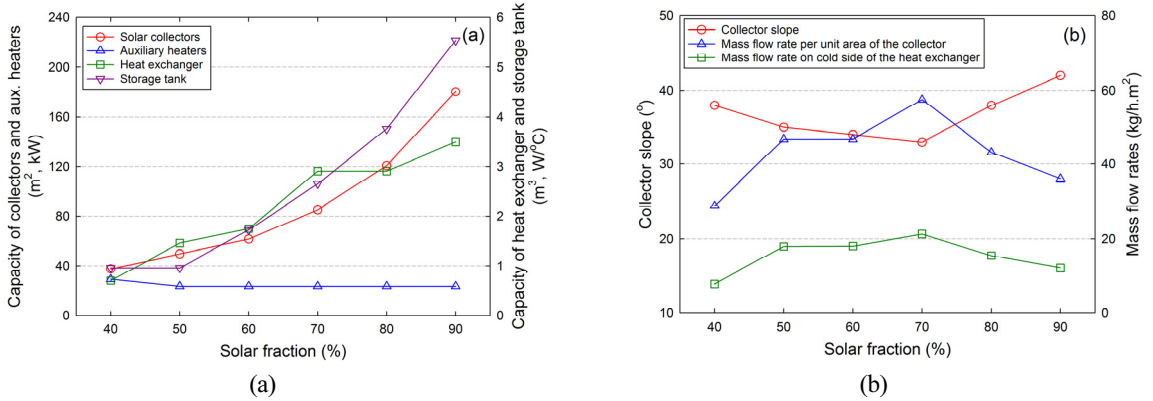


Fig. 7 Variation of (a) capacity-related decision variables and (b) operation-related decision variables for the different solar fractions

태양열급탕시스템 유량 관련 설계변수의 경우, 집열기 단위면적당 열교환기 저온측 순환유량은 $28.8 \sim 57.6 \text{ kg/hm}^2$ 범위의 값으로 도출되었으며, 이는 선행연구들에서 집열기 순환회로의 적정 유량으로 제시되고 있는 $18 \sim 48 \text{ kg/hm}^2$ ¹³⁾, $20 \sim 40 \text{ kg/hm}^2$ ¹⁴⁾과 대체로 일치한다. 열교환기 고온측 순환유량 또한 $7.6 \sim 21.3 \text{ kg/hm}^2$ 범위의 값을 갖는 것으로 도출되어 권고 설계유량인 $7.2 \sim 28.8 \text{ kg/hm}^2$ ¹⁵⁾를 만족하는 것으로 나타났다. 아울러 최적화 알고리즘은 저온측 순환유량을 고온측 순환유량에 비해 2.6~3.7배 높게 도출함으로써 열교환기의 열용량율은 낮추고 전달단위수는 증대시켜 열교환기 유용도 증대하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 경제적 평가기준 태양열급탕시스템 최적화 설계방법을 제안하고, 초등학교 태양열급탕시스템을 대상으로 6가지 태양열의존율 조건에서 최적화 설계를 수행한 후 태양열의존율 변화에 따른 시스템 경제성 및 설계변수의 특성을 분석하였다. 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 태양열급탕시스템 최적화 설계방법을 상용 컴퓨터에서 수행한 결과 약 16분에 최적안을 도출할 수 있는 연산능력을 보임에 따라 향후 다양한 태양열급탕시스템 설계안을 도출하고 타당성을 평가하는 업무에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 6가지 설계 목표 태양열의존율 조건에서 최적화 설계를 수행한 결과, 태양열의존율이 50%인 조건에서 총생애비용이 가장 낮은 설계안이 도출되었다. 태양열의존율이 60~70%의 범위까지는 총생애비용의 차이가 약 2.8% 이내로 큰 차이를 보이지 않은 반면 태양열의존율이 40% 조건에서는 5.2%, 80%와 90%에서는 11.7%와 36.9% 그 차이가 크게 나타났다. 이를 통해 설계자의 경험 및 직감에 의한 시스템의 설계보다 다양한 조건에서 최적화 설계를 수행한 후 전역 최적 설계안을 도출하는 것이 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 태양열급탕시스템 설계변수 검토 결과, 설정된 의존율을 가장 경제적으로 달성하기 위한 기기 용량 조합이 도출

되었다. 집열기 경사각은 6개 분석사례에서 해당지역 위도인 $37 \pm 5^\circ$ 의 범위에서 도출되었으나, 설정된 태양열 의존율 조건을 만족하면서 보다 효율적으로 집열에너지를 증가시키기 위해 각각 상이한 경사각이 도출됨이 확인되었다. 유량 관련 설계변수의 경우, 도출된 값들은 선행연구에서 권고하는 범위를 만족하였으며, 특히 열교환기 유용도 증대를 위해 열교환기 저온측 순환유량이 고온측에 비해 약 2.6~3.7배 높게 도출되는 특성을 나타내었다.

향후 연구에서는 경제적 평가기준 외에 기술적, 환경적 평가기준을 추가로 반영하여 다양한 관점에서 태양열급탕시스템을 최적화할 수 있는 방법을 개발할 예정이다. 아울러 태양열급탕시스템의 최적 설계안과 그 성능에 대한 기상 및 부하 조건 등의 영향을 정량적으로 분석할 계획이다.

후기

본 연구는 중소기업청의 연구마을지원사업의 연구비 지원에 의해 연구된 결과임(C0363142).

REFERENCES

1. Balusamy, T. and Sathishkumar, S., Performance improvement in solar water heating systems – A review. *Renewable Sustainable Energy Review*, Vol. 37, pp. 191-198, 2014.
2. Islam, M. R., Sumathy, K., and Khan, S. U., Solar water heating systems and their market trends. *Renewable Sustainable Energy Review*, Vol. 17, pp. 1-25, 2013.
3. Kulkarni, G. N., Kedare, S. B., and Bandyopadhyay, S., Determination of design space and optimization of solar water heating systems. *Solar Energy*, Vol. 81, No. 8, pp. 958-968, 2007.
4. Loomans, M. and Visser, H., Application of the genetic algorithm for optimization of large solar hot water systems. *Solar Energy*, Vol. 72, No. 5, pp. 427-439, 2002.
5. Kalogirou, S. A., Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms. *Applied Energy*, Vol. 77, No. 4, pp. 383-405, 2004.
6. Atia, D. M., Fahmy, F. H., Ahmed, N. M., and Dorrah, H. T., Optimal sizing of a solar water heating system based on a genetic algorithm for an aquaculture system, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 55, No. 3-4, pp. 1436-1449, 2012.
7. Ko, M. J., Analysis and optimization design of a solar water heating system based on life cycle cost using a genetic algorithm, *Energies*, Vol. 8, No. 10, pp. 11380-11403, 2015.
8. Ko, M. J., A novel design method for optimizing an indirect forced circulation solar water heating system based on life cycle cost using a genetic algorithm, *Energies*, Vol. 8, No. 10, pp. 11592-11617, 2015.
9. Henderson, H., Huang, Y. J., and Parker, D., Residential equipment part load curve for use in DOE-2: Technical report LBNL-42175, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 1999.
10. Deb, K., *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, Chichester, Wiley, 2009.
11. Konak, A., Coit, D. W., and Smith, A. E., Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, No. 9, pp. 992-1007, 2006.
12. Deru, M., Field, K., Studer, D., Benne, K., Griffith, B., Torcellini, P., Liu, B., Halverson, M., Winiarski, D., Yazdani, M., Huang, J., and Crawley, D., U.S. Department of energy commercial reference building models

off the national building stock, National Renewable Energy Laboratory, USA, 2011.

13. Baughn, J. W. and Young, M. F., The calculated performance of a solar hot water system for a range of collector flow rates. *Solar energy*, Vol. 32, pp. 303-305, 1984.
14. Hobbi, A. and Siddiqui, K., Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS. *Solar energy*, Vol. 83, pp. 700-714, 2009.
15. Kim, Y. D., Thu, K., Bhatia, H. K., and Bhatia, C. S., Thermal analysis and performance optimization of a solar hot water plant with economic evaluation. *Solar energy*, Vol. 86, pp. 1378-1395, 2012.