

RETScreen 모델이용 태양열온수시스템 초기설계단계 설계용량 최적화기법의 TRNSYS 모델과의 비교분석

Comparative Study on Size Optimization of a Solar Water Heating System in the Early Design Phase Using a RETScreen Model with TRNSYS Model Optimization

이경호(Kyoung-Ho Lee)[†]

한국에너지기술연구원

Solar Energy Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Republic of Korea

(Received October 14, 2013; revision received November 15, 2013)

Abstract This paper describes a method for size optimization of the major design variables for solar water heating systems at the stage of concept design. The widely used RETScreen simulation tool was used for optimization. Currently, the RETScreen tool itself does not provide a function for optimization of the design parameters. In this study, an optimizer was combined with the software. A comparative study was performed to evaluate the RETScreen-based approach with the case study of a solar heating system in an office building. The optimized results using the RETScreen model were compared to previously published results with the TRNSYS model. The objective function of the optimization is the life-cycle cost of the system. The optimized design results from the RETScreen model showed good agreement with the optimized TRNSYS results for the solar collector area and storage volume, but presented a slight difference for the collector slope angle in terms of the converged direction of the solutions. The energy cost, life-cycle cost, and thermal performance regarding collector efficiency, system efficiency, and solar fraction were compared as well, and the RETScreen model showed good agreement with the TRNSYS model for the conditions of the base case and optimized design.

Key words Solar heating system(태양열시스템), Optimal design(최적설계), Optimal size(최적용량), Conceptual design(개념설계), RETScreen(RETScreen툴)

[†] Corresponding author, E-mail: khlee@kier.re.kr

기호설명

A_c : 집열기 면적 [m^2]
 C_{NG} : 연간 가스 요금 [won]
 C_{SC} : 집열기 초기 투자비 [won]
 C_{Tank} : 축열조 초기 투자비 [won]
 C_{EE} : 연간 전기요금 [won]
 col : 집열기 열적 노드
 I_t : 집열기면의 전일사량 [kWh/m^2]
 i : 실질 할인율 [%]
 J_{OD} : 설계최적화 목적함수
 LCC : 수명년한 현가환산 총비용 [won]
 n : 분석 기간 또는 수명 년한 [year]
 P : 현가환산 비용 [won]
 Q_u : 집열기 집열열량 [kWh]
 Q_{sol} : 태양열 공급열량 [kWh]

Q_d : 열부하량 또는 열요구량 [kWh]
 Q_{aux} : 보조열원기기 공급열량 [kWh]
 $Q_{l,c}$: 집열기 열손실량 [kWh]
 $Q_{l,st}$: 축열조 열손실량 [kWh]
 SF : 태양열 의존율 [%]
 $RETScreen_{opt}$: RETScreen 모델을 이용한 최적화
 η_{col} : 축열조 열적 노드
 spl : 열공급부 열적 노드
 $TRNSYS_{opt}$: TRNSYS 모델을 이용한 최적화
 W_p : 펌프 전력소비량 [kWh]

그리스 문자

η : 집열 효율 [%]
 η_{sys} : 시스템 효율 [%]

1. 서 론

태양열온수시스템의 주요 구성요소는 태양열집열기와 태양열축열조이다. 태양열시스템은 개념설계 단계에서 적용대상에 대한 주요 구성요소의 용량을 산정하고 타당성평가를 거친 후에 상세설계가 이루어질 수 있다. 그러므로 용량산정에 있어서 초기비용과 운전비절감까지 고려하여 경제적 측면에서 가장 적절한 최적의 용량을 산정하여 시스템의 효과를 분석하는 것이 바람직할 것이다.

통상적인 태양열온수시스템의 용량산정 방법은 주어지는 연간 열부하량에 대하여 태양열의존율(Solar fraction)을 결정하고 이를 위한 집열기 설치면적과 적절한 집열면적 대비 축열조용량 비를 적용하여 축열조 용량을 구하는 것이다. 더욱 구체적인 상세설계를 위해서는 시뮬레이션 툴을 이용할 수 있다. 적용가능한 소프트웨어 툴로는 TRNSYS,⁽¹⁾ EnergyPlus⁽²⁾와 같은 상세한 시스템 시뮬레이션 툴이 있으며, 이들 툴을 이용하여 집열기면적과 축열조 용량을 적절히 산정할 수 있으며, 이러한 방식으로 최적용량을 결정하기 위한 방법에 대한 연구⁽³⁻⁶⁾가 수행되었다. 그렇지만, 이러한 상세 시스템 시뮬레이션 툴은 사용이 간단하지 않고 사용자의 툴에 대한 이해도와 숙련도 등이 높지 않은 경우에 작업에 많은 시간과 노력이 소비된다는 단점이 있다. 한편 월별로 에너지를 분석하는 수준의 간단화한 타당성평가 툴이 개발되어 보급되고 있으며, RETScreen⁽⁷⁾은 대표적인 신재생에너지 설비의 타당성평가 툴로서 사용이 매우 간단하여 상세 시뮬레이션을 하기 전에 간편하게 타당성을 분석하는데 효과적으로 활용할 수 있다. 그렇지만 RETScreen에는 설계최적화를 위한 기능을 갖추고 있지 않으므로 태양열온수시스템 설계자나 설치를 고려하는 이를 위하여 검토 초기단계에서 신뢰할 수 있는 수준에서 최적설계용량을 결정하고 에너지 절감, 비용, 경제성 등을 포함한 타당성을 평가할 수 있는 방법을 제시하는 연구가 필요하다.

본 논문은 신재생에너지시스템 타당성 평가 툴인 RETScreen을 기반으로 용량 최적화를 위한 Lee et al.⁽⁸⁾ 등이 제안한 기법을 태양열온수시스템에 적용하여 시스템의 초기 타당성을 평가하고자 하는 개념설계 단계에서 적용가능한 실용적이면서도 유용한 최적화 기법을 제시하고 평가하고자 한다. 평가를 위한 비교대상으로는 태양열시스템에 대한 TRNSYS 시뮬레이션 및 최적화 결과에 대한 Ko et al.⁽⁵⁻⁶⁾ 등의 연구결과를 활용하였다.

2. RETScreen 모델이용 설계용량 최적화 및 TRNSYS 모델최적화와 비교를 통한 평가 방법

본 연구에서는 Lee et al.⁽⁸⁾ 등이 제안한 RETScreen을

이용한 하이브리드 시스템의 용량 최적화기법을 태양열온수시스템에 대하여 적용하고 그 성능을 TRNSYS 시뮬레이션 툴을 이용한 결과⁽⁵⁾와 비교하는 방식으로 평가하고자 한다.

2.1 최적화 방법

RETScreen은 캐나다의 NRC(Natural Resource Canada)에서 개발한 프로그램으로서, Microsoft 엑셀을 기반으로 하여 월간 에너지 분석이 가능한 시뮬레이션 툴이다. 태양열시스템의 분석은 기본적으로 F-chart 기법⁽⁹⁾을 사용하고 있다. 이 프로그램에 최적화기능은 제공되지 않고 있지만, 기본적으로 엑셀에서 제공하는 추가기능을 적용한 설계용량 최적화 기법을 Lee et al.⁽⁸⁾이 제안한 바 있다. 본 연구에서는 이 기법을 태양열온수시스템에 적용하고자 하며 Fig. 1에 스프레드시트 프로그램을 기반으로 한 RETScreen 모델의 최적화를 위한 개념을 나타내었다. 이를 위해서는 RETScreen 작업환경에서 태양열온수시스템에 대한 프로젝트를 먼저 작성한 후 최적화를 위한 엑셀프로그램 시트를 별도로 작성하여 상호 연동함으로써 최적화를 수행할 수 있다. 최적화를 위한 목적함수, 그리고 설계변수와 제약조건 등을 해찾기(Solver optimizer) 기능에서 설정하여 최적화를 수행할 수 있고 이 외에도 스프레드시트 프로그램 기반의 최적화 알고리즘을 수행할 수 있는 최적화 툴과 연계하여 적용이 가능하다.

본 연구에서 최적설계값을 구하기 위한 방법은 두 가지 단계로 구성하였다. 첫 번째 단계는 전역(global) 검색단계로서 진화적 알고리즘(Evolutionary algorithm)을 적용하여 전역 최적해에 근접하는 해를 찾을 수 있도록 하고, 이 해를 구배(Gradient) 기반의 GRG 비선형 알고리즘의 초기값으로 적용하여 최종적인 최적해를 구하는 단계를 거치도록 하였다. 한편, 비교대상기준인 TRNSYS를 이용한 태양열시스템 최적화기법⁽⁵⁾은 GenOpt 프로그램을 이용하여 Hooke-Jeeves 기법을 적용하였다.

2.2 성능평가 방법

본 연구에서는 RETScreen 툴과 최적화기법의 연계 기법의 성능평가를 위하여 TRNSYS 시뮬레이션 모델로부터의 계산결과⁽⁵⁾와 비교한다. 동일한 설계조건에서 TRNSYS 모델과 RETScreen 모델에서 계산된 에너지비용, LCC 총 비용, 연간 집열기 효율, 연간 시스템 효율, 태양열의존율 등을 비교한다. TRNSYS를 이용한 태양열온수시스템에 대한 시뮬레이션 연구사례⁽⁵⁾에서 적용한 기후조건, 온수부하조건, 기본 설계조건 즉, 집열기의 면적, 집열기의 경사각, 축열조의 체적, 60%의

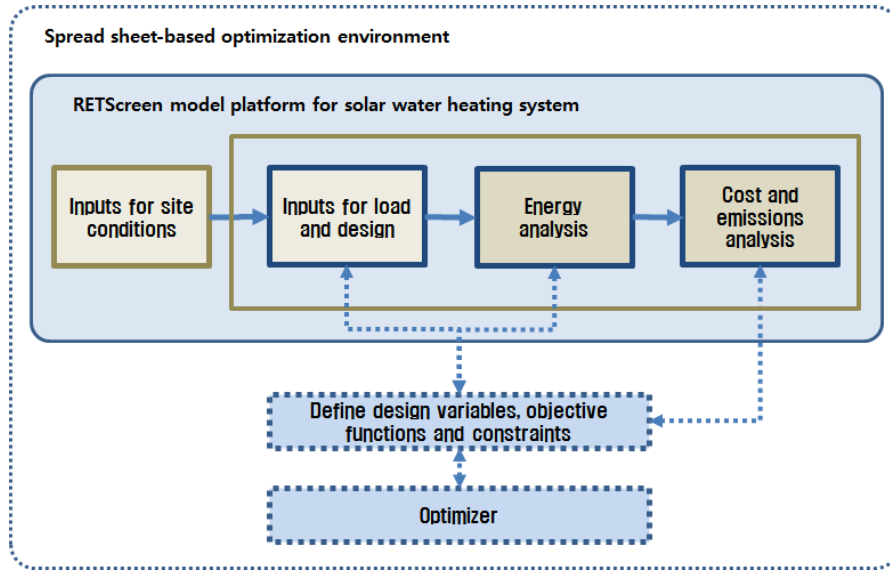


Fig. 1 Process flow diagram for optimizing design variables of RETScreen model for solar water heating system.

태양열의존율 조건 등을 동일하도록 RETScreen 모델을 구성한다. 태양열온수시스템의 비용분석을 위해서는 Ko et al.⁽⁵⁾의 연구에서 적용한 LCC(Life cycle cost) 분석방법을 적용한다. 비용분석에 적용된 파라미터로 이자율(Interest rate) 6.41%, 인플레이션율 3.16%, 실질할인율(Real discount rate) 3.15%, 수명년한 20년을 적용하고, 연료비용으로 전기요금단가 68.9 원/kWh와 가스요금단가 778.28 원/m³을 적용하였다. 또한 시스템의 초기비용은 집열기와 축열조에 대하여 Ko et al.⁽⁵⁾이 제시한 집열기 면적에 대한 집열기 비용함수와 축열조 체적에 대한 축열조 비용함수를 본 연구에서도 동일하게 적용하였다.

설계최적화 목적함수는 현가로 환산한 LCC 총 비용으로 다음과 같이 표현된다.⁽⁵⁾

$$J_{OD} = P = C_{SC} + C_{Tank} + (C_{EE} + C_{NG}) \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (1)$$

성능을 평가하기 위한 지표로 집열기 효율(η), 시스템 효율(η_{sys}) 그리고 태양열의존율(SF)은 다음과 같이 정의⁽⁵⁾된다.

$$\eta_{col} = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int I_t dt} \quad (2)$$

$$\eta_{sys} = \frac{\int Q_{sol} dt - \int W_p dt}{A_c \int I_t dt} \quad (3)$$

$$SF = \frac{\int Q_d dt - \int Q_{aux} dt}{\int Q_d dt} \quad (4)$$

위의 수식에서 표현한 집열기효율, 시스템 효율, 그리고 태양열의존율을 개념적으로 표현하기 위한 에너지흐름도를 개략적으로 Fig. 2에 나타내었다.

3. TRNSYS 모델 최적화결과와의 비교를 통한 RETScreen 모델이용 설계용량 최적화 결과분석

3.1 대상 태양열시스템

본 연구에서 대상으로 한 태양열시스템⁽⁵⁾은 사무용 건물에 적용한 온수급탕용 태양열시스템이다. 기후는 서울지역을 대상으로 하였다. 건물의 연면적은 10,368 m²로 유효면적은 60%이며 유효면적당 인원수는 0.2 인/m², 1인당 급탕량 10 ℓ/day를 고려하여 1일 최대급탕량은 12,441.6 ℓ/day이다.

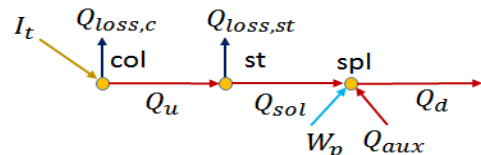


Fig. 2 Simplified energy flow in solar water heating system.

태양열시스템의 기본설계(Base design) 조건은 태양열의존율은 60%로 하여 집열기 개당 설치면적은 2 m²이며, 총 100개를 설치경사각 40°로 설치하는 조건이며, 여기에서 ‘기본설계’ 조건이란 비용최적화가 이루어지지 않은 설계조건을 의미한다. 축열조의 체적은 15 m³이다.

3.2 RETScreen 모델 입력조건

RETScreen 모델에서 기후 데이터는 월간 평균 값의 형태로 전세계 다양한 지역에 대하여 마련되어 있으며, 사용자가 입력하여 변경할 수도 있다. 본 연구에서는 Ko et al.⁽⁵⁾의 연구에서 적용한 서울지역 기후 데이터를 활용하여 월간 평균값을 계산한 후에 월평균 기온과 일간 일사량값을 RETScreen에 입력하였다.

태양열온수시스템의 RETScreen 모델은 TRNSYS에 비하여 입력요소가 단순하다. 태양열온수시스템에 대한 RETScreen 모델과 TRNSYS 모델에 대한 파라미터 입력내용을 Table 1에 나타내었다. 온수부하조건은 월별 온수사용 비율을 고려하였고, 건물 내 상주인원 수는 TRNSYS 모델과 동일하게 1,245명, 일일 평균 온수

사용량은 부하보정계수를 적용하여 7,677 ℓ/day로 설정하였으며, 부하보정계수는 RETScreen에서 계산한 태양열의존율이 대상시스템의 기본설계조건에서 태양열의존율인 60%가 되도록 부하보정계수를 1.624값으로 결정하였다. 년 간 열부하량은 115.97 MWh로 계산되었다.

RETScreen 모델에서 입력하여야 요소 중 집열기 열손실율, 축열조 및 배관에서의 열손실율 등이 있다. RETScreen 툴⁽⁷⁾에서는 집열기의 열손실율은 3~10%, 축열조 및 배관 열손실율은 9~18%의 범위로 권장하고 있다. 본 연구에서는 권장값의 평균 값을 적용하여 집열기의 열손실율은 6.5%, 축열조 및 배관 열손실율은 13.5% 하였으며, 펌프 소비전력은 주어진 기본설계조건으로부터 25.4 W/m²로 하였고, 가스보일러효율은 85%로 입력하였다.

3.3 RETScreen 모델 최적화 및 결과 분석

대상 태양열시스템에 대한 RETScreen 모델을 이용하여 Fig. 1에서 나타낸 방법을 적용하여 최적화 목적함수인 LCC 비용을 최소화하기 위한 설계변수 최적화

Table 5 Comparison of input parameters for base design of TRNSYS and RETScreen models for solar water heating system([*] indicates the tuned parameters for RETScreen model)

Components	Parameter	TRNSYS model ⁽⁵⁾	RETScreen model
Collector	Fr($\tau\alpha$)	0.793	0.793
	FrUL	5.1758 W/m ² °C	5.1758 W/m ² °C
	Area	2 m ² /ea	2 m ² /ea
	Unit	100 ea	100 ea
	Azimuth	0°	0°
	Slope	40°	40°
	Flow rate	0.018 kg/m ² s	-
	Miscellaneous losses	-	6.5%
Storage tank	Capacity	15 m ³	15 m ³ (75 ℓ/m ²)
	Loss	2.0 W/m ² K	-
	Height	3.6 m	-
	Inlet	0.2 m	-
	Outlet	1.8 m	-
	Heat exchanger effectiveness	0.82	0.82
Miscellaneous losses	-	13.5%	
Pumps	Pump power	Solar loop pump	3 kW
		Storage loop pump	1.1 kW
Auxiliary heater	Efficiency	-	85%
	Capacity	175 kW	-

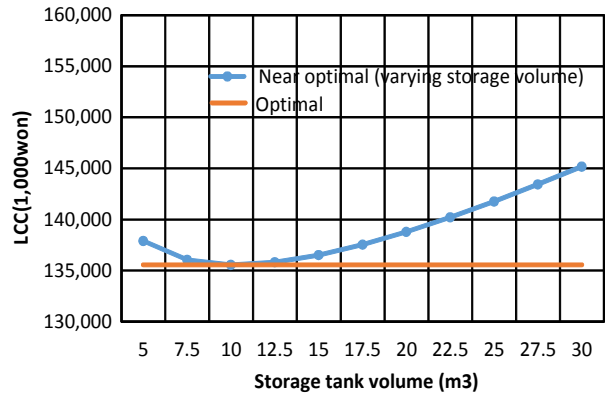
를 수행하였다. 본 연구에서는 최적화를 위한 설계변수로 태양열 집열기의 설치면적, 태양열 집열기의 설치 경사각, 태양열 축열조의 체적으로 하였으며, 각 설계변수의 제약조건으로 하한값과 상한값은 집열기 경사각의 경우 0°와 90°, 집열기 면적의 경우 100 m²과 300 m², 축열조 체적은 5 m³와 30 m³으로 하였다. Table 2에 집열기 경사각과 설치면적 그리고 축열조 체적에 대하여 Ko et al.⁽⁵⁾의 연구에서 적용한 기본설계값, TRNSYS 모델에서의 최적설계값 그리고 본 연구를 통하여 RETScreen 모델로부터 구한 최적설계값을 나타내었다. RETScreen 모델에서 최적화된 설계값은 집열기 설치경사각 36.0°, 집열기 설치면적 177.41 m², 축열조 체적 10.20 m³으로서 목적함수인 LCC 비용은 135,552 천 원으로 결정되었다. TRNSYS 모델 및 RETScreen 모델을 이용한 설계용량 최적화 결과 중 집열기 설치면적과 축열조 용량은 기본설계값으로부터 감소하는 방향으로 수렴하여 결정되었고, 두 모델에서 동일한 경향을 발견할 수 있었다. 그렇지만 집열기 경사각은 RETScreen 모델을 이용한 경우에는 기본설계값인 40°로부터 각도를 낮추는 방향으로 해가 도출되어 TRNSYS 모델 최적화와는 상반되는 경향을 보였다. 이것은 RETScreen 모델에서 177.41 m²와 10.20 m³의 집열기 면적 및 축열조 체적조건에서 36.20°의 집열기 경사각 조건을 갖는 경우에 집열량이 최대가 되는 것으로 계산되기 때문이며, 에너지 비용 또한 최소화되는 조건이므로 최적조건으로 결정된 것이다.

RETScreen 모델에서 구한 최적설계값이 전역에 걸쳐서 목적함수를 최소화하는 최적값인지를 확인하기 위하여 세 종류의 설계파라미터 중 두 종류의 값을 각각의 최적값에서 고정시키고 다른 한 설계파라미터를 제약조건 범위에서 변화시켜가며 구한 목적함수값을 최적조건에서의 목적함수값과 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 집열기 설치면적과 축열조 체적을 177.41 m²와 10.20 m³으로 고정한 후에 집열기 경사각을 0°에서 90°까지 변화시키며 목적함수인 LCC 비용을 나타낸 것이다. 주어진 모든 경우에서 최적조건

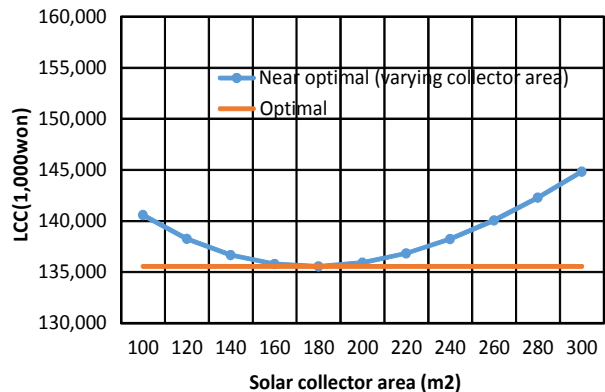
에서의 목적함수보다 높은 값을 나타내었다. Fig. 3(b)는 집열기 설치면적을 100 m²에서 300 m²까지 변화시켰으며, (c)는 축열조 체적을 5 m³에서 30 m³까지 변화시켜 비교한 것이다. 주어진 구간에서 최적조건에서의

Table 2 Comparison of design variables for base and optimal designs

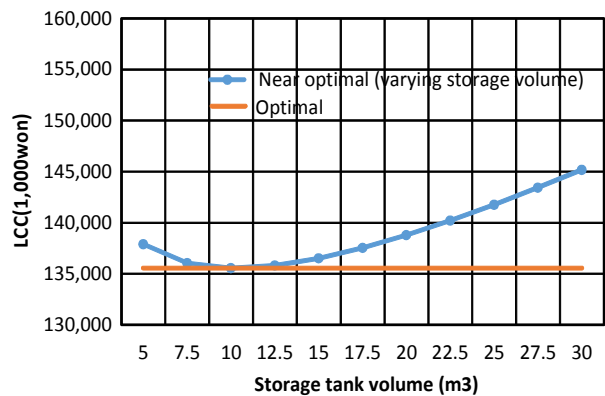
Design variables	TRNSYS		RETScreen
	Base	Optimal ⁽⁵⁾	Optimal
Slope (°)	40.0	43.0	36.0
Collector area (m ²)	200.0	166.75	177.41
Storage volume (m ³)	15.0	7.66	10.20



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Comparison of objective function (LCC) values with varied design variables of (a) slope angle, (b) collector area(m²), and (c) storage tank volume(m³).

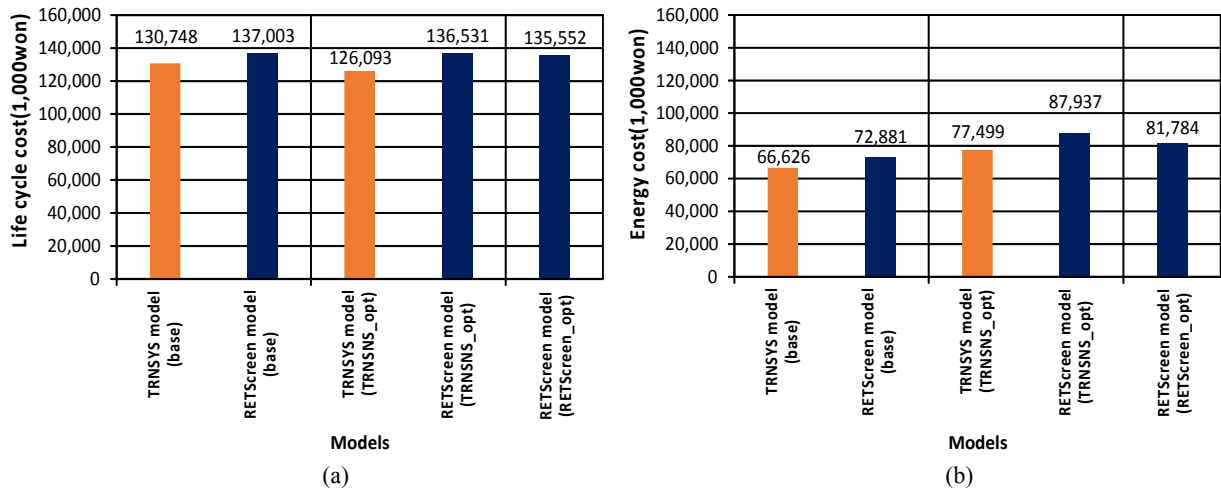


Fig. 4 Comparison of calculated life cycle cost and energy cost for different design conditions with TRNSYS model⁽⁵⁾ and RETScreen model, (a) LCC and (b) energy cost.

LCC 비용함수보다 높은 값을 나타내었음을 확인할 수 있다. 설계변수의 가능한 모든 경우를 비교한 것은 아니지만, 이로부터 최적화로부터 구한 설계값은 전역해에 근접한 결과라고 할 수 있을 것이다.

Fig. 4에 RETScreen 모델에서 계산한 LCC 비용과 에너지 비용을 TRNSYS 모델에서의 값들과 비교하였다. Fig. 4(a)는 LCC 비용을 나타내었고, Fig. 4(b)는 에너지비용을 비교하였으며, 기본설계조건에서 두 모델에서 계산한 LCC 비용, TRNSYS 모델 이용 최적설계조건에서 두 모델로부터 계산된 LCC 비용, RETScreen에서 구한 최적설계조건에서의 LCC 비용을 차례로 나타낸 것이다. 기본설계조건과 TRNSYS 모델이용 최적

설계조건을 RETScreen 모델에 입력하여 계산한 LCC 비용은 TRNSYS 모델에서의 결과와 비교하여 오차는 약 4.8와 8.3%이었고, RETScreen 모델 최적화에서의 LCC 비용은 7.5%의 오차를 나타내었다. 에너지 비용 또한 각각 9.4%, 13.5%, 5.50%로 15% 미만의 정확성을 보여주었다.

Fig. 5에는 집열효율, 시스템효율 그리고 태양열의존율에 대한 RETScreen 모델의 계산결과를 TRNSYS 모델 계산결과와 비교하기 위하여 나타내었다. 기본설계조건에서 RETScreen 모델의 계산결과는 TRNSYS 모델에 비하여 집열효율, 시스템효율 및 태양열의존율을 계산결과에서 6.0%, 9.8%, 0.0%의 오차를 각각 나타내었고, TRNSYS 모델이용 최적설계조건에서 7.5%, 14.3%, 5.9%를 보였으며, RETScreen 모델의 최적설계조건에서는 7.4%, 14.1%, 1.5%를 각각 나타내었다. 집열효율과 태양열의존율은 TRNSYS 모델에 대하여 8% 이내의 오차를 나타내며 15% 미만의 오차를 보인 시스템효율보다는 더 정확한 결과를 나타내었는데, 이것은 시스템 효율에 펌프의 성능과 손실 등이 고려되기 때문에 더 오차가 크게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

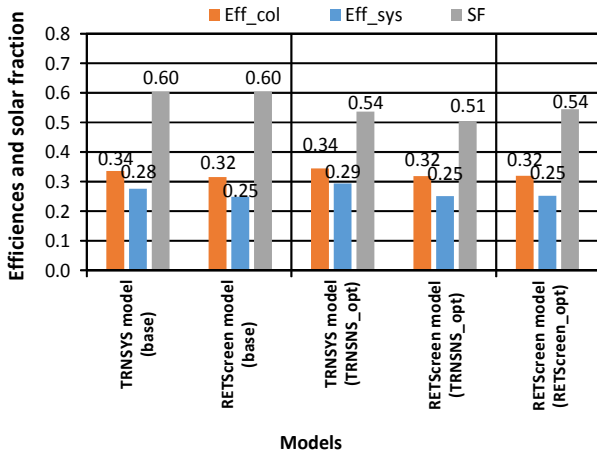


Fig. 5 Comparison of calculated thermal performances for different design conditions with TRNSYS model⁽⁵⁻⁶⁾ and RETScreen model.

4. 결 론

본 논문에서는 태양열시스템의 개념설계 단계에서 요구되는 시스템의 용량을 최적화하기 위한 방법을 제안하고 평가하기 위한 목적으로 타당성평가 툴로 사용되고 있는 RETScreen을 이용하여 스프레드시트 기반의 최적화기법을 적용하였으며, 최적화 결과의 성능을 비교평가하기 위하여 선행연구결과⁽⁵⁾인 TRNSYS 모델을 이용한 최적설계결과와 설계조건, 목적함수 그리고

열성능계산결과를 각각 비교하였다. 설계변수로는 태양열집열기 설치경사각, 태양열집열기 설치면적 그리고 축열조의 체적의 세 가지이다. 비교분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) RETScreen 모델이용 태양열시스템의 설계용량 최적화는 TRNSYS 모델에서의 최적화 결과와 비교하여 집열기 설치면적과 축열조 체적은 기본설계조건 값보다 감소하는 방향의 값으로 유사한 결과를 보였으나, 경사각은 반대의 경향을 보여주었다.
- (2) 기본설계조건 및 최적화된 조건에서 RETScreen 모델에서 계산한 에너지 비용 및 LCC 비용은 TRNSYS 모델과 비교하여 오차수준이 9% 및 14% 이내의 결과를 보여주었다.
- (3) 기본설계조건 및 최적화된 조건에서 RETScreen 모델에서 계산한 집열효율 및 태양열의존율은 8% 및 6% 이내의 오차로 정확한 성능을 나타내었고, 시스템효율은 15% 이하의 오차수준으로서 타당성설계 틀로서 충분한 성능을 보여주었다고 사료된다.

이상을 종합하면 RETScreen 기반의 태양열시스템 모델은 개념설계 단계 최적화에서 TRNSYS 모델에서의 최적설계조건과 상당히 근접한 결과를 나타내며, 이에 따른 목적함수 및 열성능에 있어서도 매우 유사한 결과를 나타내었다. 그렇지만 집열기 경사각의 최적설계값의 수립방향이 TRNSYS 모델에서의 결과와 달리 도출된 것에 대한 추가적인 검토가 필요하다. 혹은 집열기 경사각은 설치지역 위도의 값과 유사한 값으로 두는 것이 일반적인 설계이므로 설계변수를 집열기 설치면적과 축열조 체적으로 선정하는 방식으로 적용하는 것도 고려할 수 있을 것이다.

태양열시스템의 설계자가 시스템의 용량을 최적의 설계값을 결정할 수 있는 간편하면서도 신뢰성있는 방법을 수립하기 위한 연구가 지속적으로 필요할 것이다. 본 연구와 관련하여서는 RETScreen 모델에서 보조열원기기와 펌프의 성능모델을 심화하여 평가 및 개선사항을 도출하고 주택 및 사무용건물 등 다양한 적용대상과 지역을 대상으로 한 연구 그리고 다양한 최적화 알고리즘에 따른 성능평가 등의 연구가 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 대덕특구진흥재단 지원사업(NP2013-0020)과 한국에너지기술연구원 주요사업(JP2013-0003)의 지원으로 수행한 결과입니다.

Reference

1. TRNSYS, University of Wisconsin at Madison, Solar Energy Laboratory.
2. EnergyPlus, U.S. Department of Energy.
3. Kalogirou, S., 2004, Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms, *Applied Energy* Vol. 77, pp. 383-405.
4. Lima, J. B. A., Prado, R. T. A., and Taborianski, V. M., 2006, Optimization of tank and flat-plate collector of solar water heating system for single-family households to assure economic efficiency through the TRNSYS program, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 1581-1595.
5. Ko, M. J., Choi, D. S., Chang, J. D., and Kim, Y. S., 2010, Optimizing the life cycle cost of a solar water heating system in an office building through simulation, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 22, No. 12, pp. 859-866.
6. Ko, M. J., Choi, D. S., Chang, J. D., and Kim, Y. S., 2011, Energy performance variation of solar water heating system by LCC optimization in an office building, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 31, No. 2, pp. 89-98.
7. RETScreen, Natural Resource Canada, <http://www.retscreen.net>.
8. Lee, K. H., Lee, D. W., Baek, N. C., Kwon, H. M., and Lee, C. J., 2012, Preliminary determination of optimal size for renewable energy resources in buildings using RETScreen, *Energy*, Vol. 47, pp. 83-96.
9. Duffie, J. and Beckman, W., 2006, *Solar engineering of thermal processes*, Third edition, Wiley.