

사무소 건물 태양열급탕시스템의 LCC 최적화에 따른 에너지성능 변화 분석

고명진*, 최두성**, 장재동***, 김용식****

*인천대학교 건축공학과(whistlemj@incheon.ac.kr), **청운대학교 건축설비소방학과(trebelle@chungwoon.ac.kr),
캔사스대학교 건축대학(jdchang@ku.edu), *인천대학교 건축공학과(newkim@incheon.ac.kr)

Energy Performance Variation of Solar Water Heating System by LCC Optimization in an Office Building

Ko, Myeong-Jin* Choi, Doo-Sung** Chang, Jae-Dong*** Kim, Yong-Shik****

*Dept. of Architectural Engineering, University of Incheon(whistlemj@incheon.ac.kr),
**Dept. of Building Equip. & Fire Protection System, Chungwoon University(trebelle@chungwoon.ac.kr),
***School of Architecture, Design & Planning, University of Kansas(jdchang@ku.edu),
****Dept. of Architectural Engineering, University of Incheon(newkim@incheon.ac.kr)

Abstract

This study examined the energy performance according to the main design parameters of a solar water heating system for an office building using the life cycle cost (LCC) optimization simulations. The LCC optimization simulations of the system were conducted with TRNSYS and GenOpt employing the Hooke-Jeeves algorithm for cases where water temperature was 60°C and 50°C. The results showed that for water temperature at 60°C and 50°C the global radiation incident on the collector could be decreased by 16.98% and 28.52%, collector useful energy gain could be decreased by 15.04% and 22.59%, energy to load from storage tank could be decreased by 10.86% and 18.06% and AH energy to load could be increased by 16.86% and 38.50% respectively compared to a non-optimized system. The annual average collection efficiency of the collector was increased by 0.88% for 60°C and 2.78% for 50°C because of increase of collector slope and decrease of the mass flow rate per collector area. The annual average efficiency of the system was increased by 1.74% and 3.47% compared to the basis system. However, the annual solar fraction of the system was decreased by 6.68% for 60°C and 11.26% for 50°C due to decrease of collector area and storage tank volume.

Keywords : 사무소 건물(Office building), 태양열급탕시스템(Solar water heating system),
생애주기비용(Life cycle cost), 최적화(Optimization), 에너지성능(Energy performance)

투고일자 : 2011년 2월 17일, 심사일자 : 2011년 2월 25일, 게재확정일자 : 2011년 4월 21일
교신저자 : 김용식(newkim@incheon.ac.kr)

기 호 설 명

A_c	: 집열기 면적 (m^2)
A	: n년간 계속되는 일정 기말 지불액 (won)
C_{EE}	: 전기에너지 단가 (won/kWh)
C_{NG}	: 가스에너지 단가 (won/ m^3)
C_{EE}	: 연간 전기 요금 (won)
C_{NG}	: 연간 가스 요금 (won)
C_{SC}	: 집열기 초기투자비 (won)
C_{Tank}	: 축열조 초기투자비 (won)
E_{el}	: 연간 전기에너지 소비량 (kJ)
F	: n년 후 기말지불액 (won)
F_R	: 집열효율 수정계수
F_{sol}	: 태양열 의존율 (%)
i	: 실질 할인율 (%)
i'	: 이자율 (%)
I_t	: 집열기 투자 일사량 (W/m^2)
j	: 물가상승율 (%)
LHV_{NG}	: 천연가스 저위발열량 (kWh/m^3)
\dot{m}_{HW}	: 급탕 사용량 (kg/hr)
n	: 분석기간 (year)
P	: 현재 가치 (won)
Q_{AH}	: 보조가열기 연간 가스에너지 소비량 (kJ)
Q_{aux}	: 보조가열기 공급 에너지 (W)
Q_d	: 총 급탕에너지 (W)
Q_p	: 펌프 소비동력 (W)
Q_{sol}	: 태양열시스템을 통한 공급 에너지 (W)
Q_u	: 집열기 유효 집열에너지 (W)
T_a	: 외기 온도 (K)
T_i	: 집열기 입구측 온도 (K)
T_p	: 흡열판 평균 온도 (K)
U_L	: 집열기 총괄열전달계수 (W/m^2K)
V_{Tank}	: 축열조 용적 (liter)
η_c	: 집열기 효율
η_{AH}	: 보조 가열기 효율
η_{sys}	: 태양열급탕시스템 효율
$\tau\alpha$: 집열기 투과율-흡수율

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

환경보호 및 에너지절약 등의 관점에서 태양열급탕시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 태양열급탕시스템 적용 시 급탕부하의 크기 및 발생형태, 사용온도, 주요 구성기기의 설치 및 제어 방식 등에 따라 다양한 형태의 시스템 구성이 가능하므로 적용현장의 여건 및 지역적 특성 등을 충분히 반영할 필요가 있다. 한편, 태양열급탕시스템의 설계는 현재까지 표준화된 설계기준 없이 관련업체의 경험에 의존하여 이뤄지고 있는 실정이며, 이로 인해 과소 또는 과다 설계된 시스템은 초기투자비나 유지관리비의 비효율화를 야기하여 결과적으로 시스템에 대한 신뢰성 저하 및 적용활성화의 걸림돌로 작용할 가능성이 높다. 특히, 초기투자비가 시스템 보급의 걸림돌로 작용하는 신재생에너지시스템 중 하나인 태양열급탕시스템에 있어 시스템의 합리적 설계 및 적용은 매우 중요하다고 할 수 있다.

이러한 배경에서 본 연구진은 사무소 건물에 적용되는 태양열급탕시스템을 대상으로 시스템의 LCC 최적화 시뮬레이션을 실시하고, LCC 최적화에 따른 시스템 설계변수의 변화 및 LCC 변화에 대하여 검토를 실시하고 그 결과를 보고한 바 있다¹⁾. 본 논문에서는 선행연구에 대한 후속 연구의 일환으로서 태양열급탕시스템의 LCC 최적화에 따른 시스템 설계변수의 변화가 시스템의 에너지성능 등에 미치는 영향에 대하여 검토를 실시하고 그 결과를 보고한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 경기도에 위치한 지상 8층 규모의 사무소 건물에 적용되는 태양열급탕시스템을 대상으로, 국내외 전문 기술자료와 관련 업체의 적용 실적 등을 참고하여 기준시스템을 설계하고, 기준시스템에 대한 LCC 최

1) 고명진 외, 사무소건물 태양열급탕시스템의 LCC 최적화 시뮬레이션, 설비공학논문집, 제22권, 제12호, 2010.12.

적화 시뮬레이션을 실시하였다. LCC 최적화의 변수로는 시스템 성능에 영향을 미치는 주요 인자인 집열기 면적 및 설치경사각, 열매체 순환유량, 축열조 용적 등을 설정하였으며, LCC 최적화의 기준으로는 초기투자비와 운전비 등 항목으로 구성되는 LCC 비용식을 사용하였다. 이를 통하여 LCC 최적화에 따른 시스템 설계변수의 변화 및 시스템 경제성 변화에 대하여 검토한 결과를 기술하였다.

본 논문에서는 이를 바탕으로 시스템의 LCC 최적화에 따른 설계변수의 변화가 시스템의 에너지성능에 미치는 영향에 대하여 검토를 실시하였다. 먼저, 태양열급탕시스템의 태양에너지 집열량 및 부하측으로의 공급량에 대하여 그 연간 변화 및 계절별 특성에 대하여 검토를 실시하였다. 또한, 태양열급탕시스템 에너지효율(태양열집열기 효율, 태양열급탕시스템 효율)의 연간 변화 및 계절별 특성 등에 대하여 검토를 실시하였다. 아울러, 태양열급탕시스템에 대한 건물 급탕부하의 의존율에 대해서도 검토를 추가하였다.

2. 태양열급탕시스템 LCC 최적화 개요

2.1 태양열급탕시스템

태양열급탕시스템의 LCC 최적화에 따른 에너지성능 분석에 필요한 시스템의 구성 및 모델링 세부사항은 선행연구에서 상세히 언급된 바 있으며¹⁾, 본 논문에서는 주요사항인 급탕 부하, 시스템 구성 및 제원 등에 대하여 개괄적으로 기술한다. 그림 1은 검토대상 사무소 건물의 급탕사용량을 나타낸다. 급탕부하는 평일 06시~22시, 주말을 제외한 주간에 발생하는 것으로 설정하였고 적용 태양열급탕시스템은 중대규모 건물에 일반적으로 적용되고 가장 많은 적용실적을 보이는 열교환기 외부 설치 축열조 직접이용 방식으로 구성하였다. 그림 2는 시스템 구성도²⁾를 나타낸다.

태양열급탕시스템 용량은 급탕 부하를 기

준으로 태양열급탕 의존율이 60%를 만족하도록 산정하였으며, 급탕 공급온도는 일반적으로 적용되는 60°C로 설정하였다. 표 1은 시스템 주요 구성기기의 제원을 나타낸다.

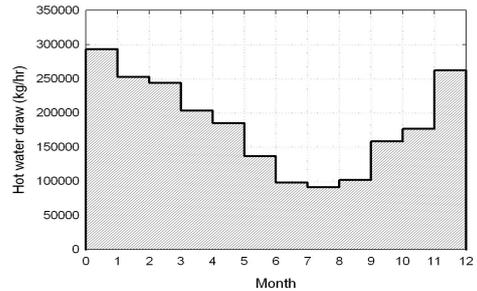


그림 1. 검토대상 사무소 건물 급탕 사용량

표 1. 태양열급탕시스템 제원

구성요소	제원	
집열기	$F_R(\tau\alpha)$	0.793
	$F_R U_L$	5.1758
	Area	2 m ² /ea
	Unit	100 ea
	Azimuth	0°
	Slope	40°
	Flowrate	0.018 kg/m ² s
축열조	Type	Vertical cylinder
	Capacity	15 m ³
	Loss	2.0 W/m ² K
	Height	3.6 m
	Inlet	0.2 m
	Outlet	1.8 m
제어기	Type	on-off differential control
	ΔT_{on}	10 °C
	ΔT_{off}	2 °C
보조 가열기	Type	Master/Slave
	Capacity	175 kW
열교환기	Effectiveness	0.82
	Flow rate	12.960 kg/hr
집열기 순환 펌프	Efficiency	0.5
	Power	3 kW
축열조 순환 펌프	Efficiency	0.5
	Power	1.1 kW
집열기 순환 유체	Density	1,024 kg/m ³
	Specific heat	3.823 kJ/kgK
축열조 순환 유체	Density	1,000 kg/m ³
	Specific heat	4.190 kJ/kgK

2) 한국에너지기술연구원, 태양열설비 시스템 시스템, 지식경제부, 2008.

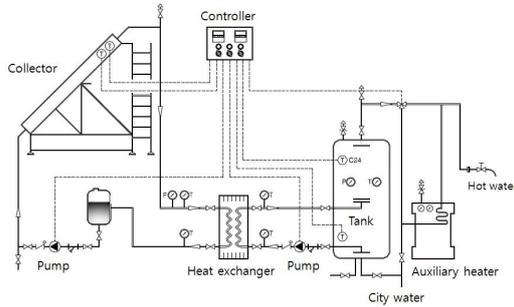


그림 2. 태양열급탕시스템 구성도

2.2 LCC 최적화 개요

태양열급탕시스템의 LCC 최적화는 TRNSYS S³)와 GenOpt⁴) 시뮬레이션 프로그램 조합을 바탕으로 Hooke-Jeeves법을 이용하여 LCC 비용식에 근거하여 실시하였다.

시스템의 경제성 평가를 위한 비용분석 항목으로는 시스템의 주요 구성기기인 집열기와 축열조에 대한 초기투자비와 보조보일러 및 펌프에 의한 운전비로 한정하여 분석을 실시하였으며, 식(1)은 LCC 최적화 비용식을 나타낸다.

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

집열기와 축열조의 초기투자비는 각각 제조업체⁵) 및 한국물가정보⁶) 제공 데이터를 바탕으로 회귀법에 의해 각 구성기기에 대한 비용함수를 도출하여 적용하였으며, 식(2)와 (3)과 같다.

$$C_{SC} = 242,500 \times A_c \quad (2)$$

$$C_{Tank} = 1,017.1 \times V_{Tank} + 365,474 \quad (3)$$

3) Solar Energy Lab, TRNSYS 16.1 reference manual, University of Wisconsin-Madison, 2005.

4) Wetter, M., GenOpt, Generic Optimization Program. User Manual, Lawrence Berkeley National Laboratory, Technical Report LBNL-2077E, 2009

5) <http://www.jehin.co.kr/>.

6) <http://www.kpi.or.kr/>.

태양열급탕시스템에 의한 1차에너지소비는 보조가열기를 통한 가스소비량과 순환펌프에 의한 전기소비량으로 나뉘며, 각 에너지소비량에 대한 에너지비용 함수식은 각각 식(4)와 (5)와 같다.

$$C_{EE} = \frac{\sum_i E_{el,i} C_{EE}}{3600} \quad (4)$$

$$C_{NG} = \frac{Q_{AH} C_{NG}}{3600 \eta_{AH} LHV_{NG}} \quad (5)$$

표 2. 태양열급탕시스템 LCC 최적화 변수

변수	내용
이자율 ⁷⁾ *	6.41 %
물가상승률 ⁷⁾ *	3.16 %
실질할인율	3.15 %
분석기간	20 year
전기에너지 단가 ⁸⁾ **	68.9 won/kWh
가스에너지 단가 ⁹⁾ ***	778.28 won/m ³

* 2003년~2009년 평균값

** 2009년 6월 27일 기준 적용

*** 2010년 7월 1일 기준 적용

최적화 변수는 시스템의 성능에 영향을 미치는 주요 인자들인 집열기의 면적, 설치경사각, 순환유량 및 급탕탱크 용적으로 설정하였다. 표 2는 LCC 분석에 사용된 변수들을 나타낸다.

2.3 LCC 최적화 결과

사무소 건물에 적용되는 태양열급탕시스템을 대상으로 급탕공급온도가 60℃와 50℃인 경우에 대하여 LCC 비용식을 기준으로 Hooke-Jeeves법을 이용하여 최적화를 실시하였다.

표 3은 기준 시스템에 대한 LCC 최적화에 따른 시스템 설계변수의 변화결과로, 급탕 공급온도가 60℃와 50℃인 경우에 있어서 집열기 면적은 16.63% 및 27.75% 감소, 집열기 경사각은 7.50% 및 15.33% 증가, 축열조 용적은 48.93%

7) <http://ecos.bok.or.kr/>.

8) <http://cyber.kepco.co.kr/>.

9) <http://www.seoulgas.co.kr/>.

표 3. 태양열급탕시스템 LCC 최적화 설계변수 변화

최적화 변수	기준 시스템	LCC 최적화	
		Tset 60℃	Tset 50℃
집열기 면적 (m ²)	200	166.75 (-16.63%)	144.50 (-27.75%)
집열기 경사각 (°)	40	43.00 (7.50%)	46.13 (15.33%)
집열기 순환유량 (kg/hrm ²)	64.8	61.28 (-5.43%)	58.81 (-9.24%)
축열조 용량 (m ³)	15	7.66 (-48.93%)	6.92 (-53.87%)

표 4. LCC 최적화에 따른 태양열급탕시스템 경제성 변화

(단위: 1,000 원, 분석기간: 20 년)

시스템 종류	초기투자비	운전비	총생애비용
기준 시스템 (Tset 60℃)	64,122	66,626	130,748
최적 시스템 (Tset 60℃)	48,593	77,499	126,092
기준 시스템 (Tset 50℃)	64,122	40,624	104,746
최적 시스템 (Tset 50℃)	42,445	55,226	97,671

및 53.87% 감소되는 결과를 나타내어 초기투자비가 저감되는 시스템으로 변화되었다. 한편, 집열기 순환유량은 5.43% 및 9.24% 감소되는 결과를 보여 운전비는 증가되는 시스템으로 변화된 것을 알 수 있다.

표 4는 시스템 내구연한을 20년으로 설정

하였을 경우, 기준 시스템과 LCC 최적화 시스템의 경제성 분석결과를 나타낸다. 급탕공급온도가 60℃와 50℃인 경우에 있어서, 시스템의 초기투자비는 24.22% 및 33.81% 저감되었으나 운전비는 16.32% 및 35.94% 증가하는 것으로 나타났다. 시스템의 총 LCC는 3.56% 및 6.75% 저감되어 적용 활성화에 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

3. LCC 최적화에 따른 태양열급탕시스템 에너지성능 변화

태양열급탕시스템의 LCC 최적화에 따른 변화가 시스템의 에너지성능에 미치는 영향을 검토하기 위해 기준 태양열급탕시스템과 LCC 최적 시스템의 에너지성능에 대한 검토를 실시하였다. 검토는 태양열급탕시스템의 에너지성능 해석에 널리 사용되는 TRNSYS 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 통하여 실시하였으며, 시뮬레이션에 필요한 기상데이터는 한국태양에너지학회가 제공하는 서울지역 표준년기상데이터¹⁰⁾를 이용하였다.

3.1 태양열에너지 획득 및 공급량

그림 3과 그림 4는 각각 급탕공급온도가 60℃와 50℃인 경우에 있어서, 기준 태양열급탕시스템과

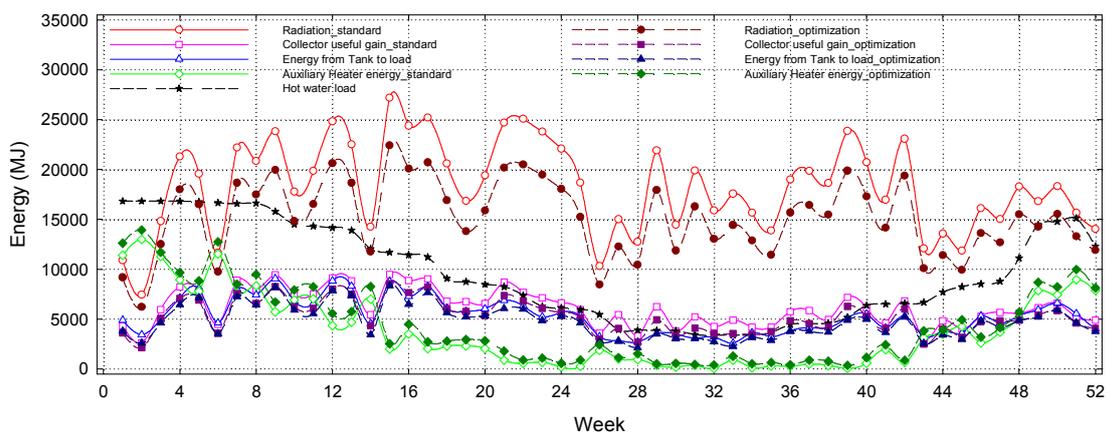


그림 3. LCC 최적화에 따른 태양열급탕시스템 주간별 에너지성능 변화(급탕공급온도 60℃)

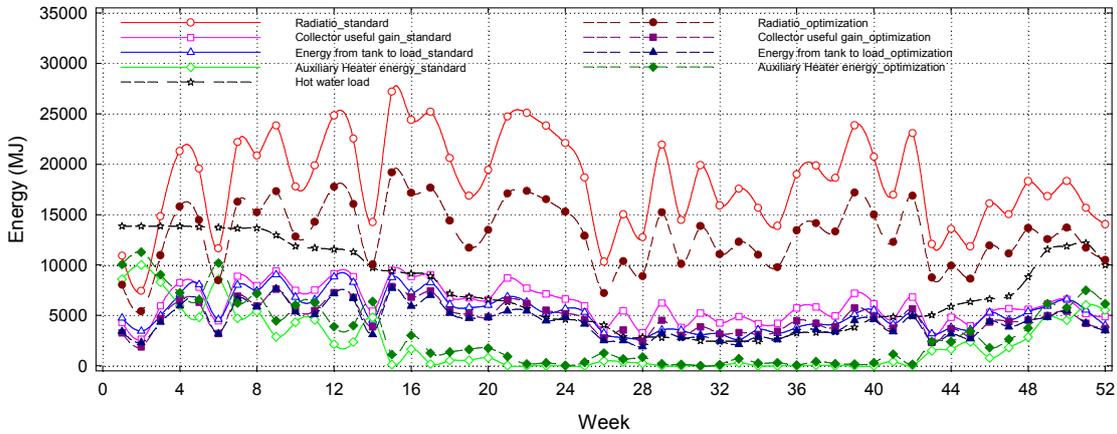


그림 4. LCC 최적화에 따른 태양열급탕시스템 주간별 에너지성능 변화(급탕공급온도 50℃)

표 5. LCC 최적화에 따른 태양열급탕시스템의 계절별 태양열에너지 취득 및 공급량

기 간		집열기 일사획득량		집열기 유효 집열량		축열조 공급열량		보조가열기 공급열량	
		60℃	50℃	60℃	50℃	60℃	50℃	60℃	50℃
동절기*	GJ/h	-43.23	-72.32	-14.95	-22.29	-12.57	-19.17	13.95	21.55
	%	-15.64	-26.16	-14.61	-21.78	-12.78	-19.53	10.42	24.40
중간기**	GJ/h	-92.24	-155.05	-24.93	-38.78	-14.71	-25.96	16.60	20.70
	%	-17.41	-29.27	-14.17	-22.04	-9.82	-17.32	28.19	3.43
하절기***	GJ/h	-26.05	-43.83	-8.17	-11.10	-2.71	-4.71	2.70	2.22
	%	-17.98	-30.26	-19.86	-26.98	-9.72	-16.89	61.16	183.09
연 간	GJ/h	-161.51	-271.21	-48.05	-72.16	-29.99	-49.83	33.25	44.47
	%	-16.98	-28.52	-15.04	-22.59	-10.86	-18.06	16.86	38.50

* 동절기: 1월, 2월, 11월, 12월

** 중간기: 3월, 4월, 5월, 6월, 9월, 10월

***하절기: 7월, 8월

LCC 최적화 태양열급탕시스템의 태양열에너지 취득량 및 공급량의 연간 변화를 나타낸 것이다. 그림에서는 태양에너지 일사량, 집열량, 공급량, 급탕부하 등의 연간 변화를 나타내고 있다. 전체적으로 태양에너지 집열량과 축열조를 통한 공급량은 일사량의 변화와 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. LCC 최적화 시스템의 경우 태양열집열기 면적의 감소로 취득 일사량이 감소함에 따라 태양열 집열 에너지와 공급에너지가 감소하는 반면 공급 에너지 부족분을 담당하는 보조가열기 공급 에너지가 증가되는 것을 알 수 있다.

이러한 태양열급탕시스템의 성능은 계절변화에 따른 일사량, 외기온, 급탕부하 등에 의한 영향을 받으므로 계절에 따른 특성 변화에 대하여 분석을 실시하였다. 표 5는 태양열급탕시스템의 LCC 최적화에 따른 태양에너지 취득 및 공급량 등의 계절별 변화 특성을 나타낸 것이다. LCC 최적화에 따른 집열기 일사획득량의 감소 비율은 연평균치인 -16.98%(60℃)와 -28.52%(50℃)를 기준으로 중간기 및 하절기에 크게 감소 동절기에는 작게 감소하는 경향을 나타냈다. 반면, 집열기 유효집열량의 감소비율은 연평균치인 -15.04%(60℃)와 -22.59%(50℃)를 기준으로 중간기와 동절기에는 작게 감소, 하절기에는 크게 감소하는 것으로 분석되었

10) KESE Registration Number 2009-incheon-R-004, 2009.

다. 이러한 변화는 LCC 최적화에 따라 기준 시스템의 집열기 경사각인 40°보다 7.50%(60°C)와 15.33%(50°C) 더 높게 설정되었기 때문으로 판단되며, 경사각 상승을 통해 하절기에 집열에너지 과잉 생산을 방지하고 동절기에 보다 많은 집열량을 확보하여 시스템의 성능을 높이는 방향으로 변화하였기 때문으로 판단된다. 한편, LCC 최적화에 따라 축열조의 용량은 급탕 공급온도별로 각각 48.93%(60°C)와 53.87%(50°C) 감소되었으나, 부하측으로의 공급에너지는 10.86%(60°C)와 18.06%(50°C) 감소된 것으로 나타났다. 축열조의 용량 감소에 비해 축열조를 통한 공급에너지의 감소 비율이 크지 않았던 것은 기준 시스템의 축열조 용량이 과다 설계되었던 까닭으로 판단된다.

3.2 태양열급탕시스템 에너지 효율

(1) 에너지효율 평가 지표

평관형 태양열 집열기의 집열량은 일사에 의해 흡수한 에너지와 주위로 손실된 에너지에 의해 식(6)과 같이 표현할 수 있으며, 식(6)의 집열량은 집열효율 수정계수를 사용하여 식(7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_u = A_c [I_t(\tau\alpha) - U_L(T_p - T_a)] \quad (6)$$

$$Q_u = F_R A_c [I_t(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (7)$$

태양열 집열기의 에너지 효율은 일반적으로 집열기가 획득한 에너지를 집열면적에 입사된 총 일사량으로 나눈 값으로 식(8)으로 표현되며, Hottel-Whillier¹¹⁾의 제안식에 따라 식(9) 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_c = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int I_t dt} \quad (8)$$

$$\eta_c = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_t} \quad (9)$$

태양열급탕시스템의 에너지 효율은 집열기에 입사된 총 일사량에 대해 시스템 가동을 위해 소비된 동력을 제외한 태양열급탕시스템을 통해 취득된 열량의 비로써 식(10)과 같이 표현된다.

$$\eta_{sys} = \frac{\int Q_{sol} dt - \int Q_p dt}{\int I_t dt \times A_c} \quad (10)$$

태양열급탕시스템 의존율은 시스템의 총 부하 중 태양열 급탕시스템에 의해 공급된 에너지의 비율로써 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{sol} = \frac{\int Q_d dt - \int Q_{aux} dt}{\int Q_d dt} \quad (11)$$

(2) 태양열 집열기 및 태양열급탕시스템 에너지 효율

그림 5는 LCC 최적화에 따른 태양열 집열기 및 태양열급탕시스템 에너지 효율의 연간 변화를 나타낸 것이다. 태양열 집열기의 연평균 에너지효율은 급탕공급온도 60°C인 경우 33.59%에서 34.47%로 0.88% 증가, 50°C인 경우에 33.59%에서 36.37%로 2.78% 증가하는 것으로 나타났고, 펌프 작동은 급탕공급온도 60°C인 경우 6.64% 증가, 50°C인 경우 10.24% 증가한 것으로 나타났다. 태양열집열기의 에너지효율 증가는 LCC 최적화 과정을 통해 감소된 집열기 순환유량이 순환펌프의 출구 온도 및 작동을 증가시켜 보다 많은 에너지 집열이 가능하게 되었기 때문으로 판단된다. 표 6은 태양열 집열기 및 태양열급탕시스템의 에너지 효율의 계절별 특성을 나타낸다. 태양열 집열기의 에너지 효율은 급탕부하가 많은 동절기나 중간기에 증가, 하절기에는 감소

11) J. A. Duffie, and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, third ed., Wiley, New York, 2006.

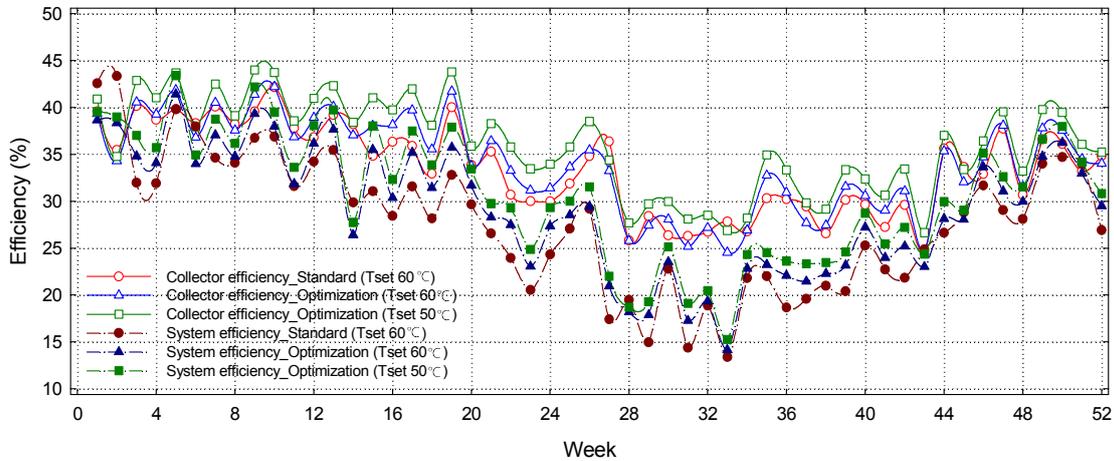


그림 5. LCC 최적화에 따른 태양열 집열기 및 급탕시스템 에너지 효율 변화

표 6. LCC 최적화에 따른 태양열 집열기 및 태양열급탕시스템의 계절별 에너지 효율

시스템 종류	태양열 집열기 효율				태양열급탕시스템 효율			
	동절기	중간기	하절기	연 간	동절기	중간기	하절기	연 간
기준 시스템 (Tset 60°C)	37.02%	33.22%	28.39%	33.59%	34.01%	26.92%	17.88%	27.60%
최적 시스템 (Tset 60°C)	37.47%	34.52%	27.75%	34.47%	34.88%	29.07%	19.46%	29.34%
기준 시스템 (Tset 50°C)	37.02%	33.22%	28.39%	33.59%	33.96%	26.92%	17.88%	27.59%
최적 시스템 (Tset 50°C)	39.21%	36.61%	29.73%	36.37%	36.50%	30.87%	20.79%	31.06%

또는 소폭 증가를 나타냈으며 이는 전술한 태양열집열기 경사각의 상승에 기인한 결과로 판단된다. 식(9)에 나타낸 것처럼 일사량과 외기온에 의한 관계식으로 표현되는 태양열 집열기의 에너지효율은 외기온 보다는 일사량에 의한 영향을 더 크게 받음을 알 수 있다.

한편, 태양열급탕시스템의 연간 에너지 효율은 급탕공급온도 60°C와 50°C인 경우에 있어 각각 1.74%와 3.47% 향상되었다. 태양열 급탕시스템의 효율변화 양상은 태양열 집열기의 효율변화 양상과 유사하지만 시스템 가동을 위한 소비동력으로 인해 효율 값은 상대적으로 낮게 나타난다. 아울러, 표 6에 나타나듯이 태양열급탕시스템의 계절간 효율 차이는 태양열 집열기 효율 차이의 약 2배에 해당

할 정도로 크게 나타났으며, 동절기에서 하절기로 갈수록 시스템 효율의 저하가 심화되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 태양열 집열기 효율이 일사량에 대한 집열에너지의 생산성을 의미하지만, 시스템 효율은 펌프의 소비에너지와 함께 잉여 집열량이 제외된 부하측으로의 실제적인 공급에너지가 반영된 효율이기 때문으로 판단된다.

(3) 태양열급탕시스템 의존율

그림 6은 LCC 최적화에 따른 태양열급탕시스템 의존율의 연간 변화, 표 7은 계절별 평균값을 나타낸 것이다.

태양열급탕시스템 의존율의 연간 변화 패턴은 일사량 변화패턴과 유사한 경향을 나타냈다. 그러나 계절별 평균값은 연간 급탕부하 변동특

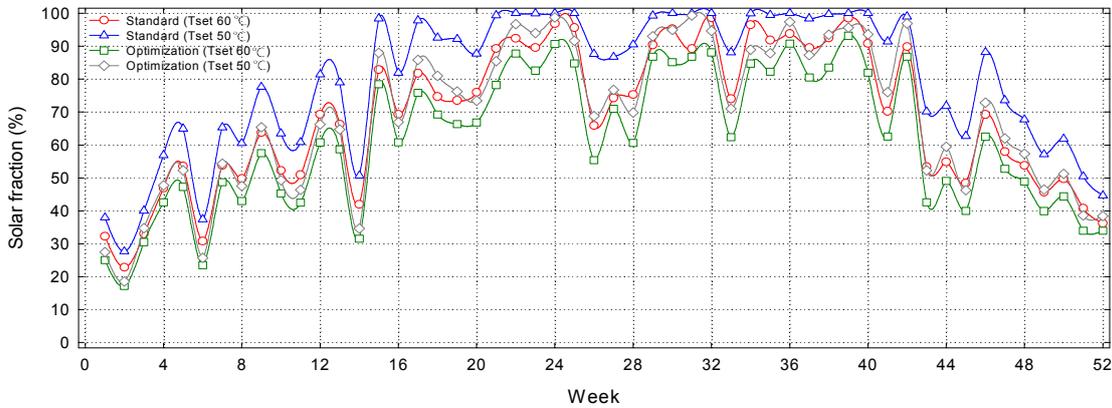


그림 6. LCC 최적화에 따른 태양열급탕시스템 의존율 연간 변화

성의 영향으로 태양열 집열기 및 태양열급탕시스템 효율과 반대로 동절기의 값이 중간기 및 하절기에 비해 상대적으로 낮은 값을 나타냈다.

LCC 최적 시스템의 태양열급탕시스템 의존율은 급탕 공급온도가 60°C와 50°C인 경우에 각각 6.68% 및 11.26% 감소하는 것으로 나타났다.

이는 LCC 최적화를 통해 집열기의 면적과 축열조의 용량이 감소되어 부하측으로 공급된 태양열에너지가 감소하였기 때문으로 판단된다. 또한, 급탕공급온도가 60°C와 50°C인 경우 모두 기준 시스템의 태양열급탕시스템 의존율이 LCC 최적화 시스템 보다 높았지만, 태양열 집열기 및 태양열급탕시스템의 에너지 효율은 낮게 나타나 높은 태양열급탕시스템 의존율이 태양열급탕시스템의 에너지 효율성 향상을 의미하는 것은 아님을 알 수 있었다.

표 7. LCC 최적화에 따른 태양열급탕시스템 계절별 평균 의존율

시스템 종류	기 간			
	동절기	중간기	하절기	연 간
기준 시스템 (Tset 60°C)	44.91%	73.45%	86.40%	60.34%
최적 시스템 (Tset 60°C)	39.17%	65.97%	78.08%	53.66%
기준 시스템 (Tset 50°C)	55.24%	85.05%	94.87%	70.74%
최적 시스템 (Tset 50°C)	44.32%	73.15%	85.48%	59.48%

아울러 각 시스템에 대한 20년간의 LCC 분석 결과 태양열급탕시스템 의존율이 낮은 LCC 최적화 시스템의 생애비용이 더 낮은 것으로 나타나, 높은 태양열 의존율이 태양열급탕시스템의 경제성을 보장하지는 않음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 사무소 건물에 적용되는 태양열급탕시스템을 대상으로 LCC 최적화를 수행한 후, LCC 최적화에 따른 시스템 설계 변수의 변화가 시스템의 에너지성능 및 태양열시스템 의존율에 미치는 영향에 대하여 검토를 실시하였다. 태양열급탕시스템의 급탕 공급온도가 60°C와 50°C인 경우에 있어서 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) LCC 최적화에 따른 시스템 설계변수 변화는, 집열기 면적 16.63%(60°C)~27.75%(50°C) 감소, 집열기 경사각 7.50%(60°C)~15.33%(50°C) 증가, 축열조 용적 48.93%(60°C)~53.87%(50°C) 감소, 집열기 순환유량 5.43%(60°C)~9.24%(50°C) 감소되는 것으로 나타났다. 시스템의 경제성 변화는, 대상기간을 20년으로 설정하였을 경우, 총생애비용 3.56%(60°C)~6.75%(50°C) 감소, 초기투자비 24.22%(60°C)~33.81%(50°C) 감소, 운전비 16.32%

(60℃)~35.94%(50℃) 증가되는 것으로 나타났다.

- (2) LCC 최적화에 따른 시스템 설계변수 변화가 시스템의 태양에너지 취득 및 공급량에 미친 영향을 보면, 태양열 집열기의 연간 일사획득량은 16.98%(60℃)~28.52%(50℃) 감소, 유효집열량은 15.04%(60℃)~22.59%(50℃) 감소, 축열조공급열량은 10.86%(60℃)~18.06%(50℃) 감소하였으며, 보조가열기의 공급량은 16.86%(60℃)~38.50%(50℃) 증가되는 것으로 나타났다.
 - (3) 태양열 집열기의 에너지 효율은 집열기의 경사각 증가 및 순환유량 감소에 의해 연평균 0.88%(60℃)~2.78%(50℃) 증가하였으며, 계절별로는 동절기와 중간기에 상대적으로 크게 증가, 하절기에는 소폭 증가 또는 감소하는 결과를 보였다. 태양열 급탕시스템의 에너지효율은 계절에 관계없이 모두 증가하는 경향을 보였으며, 연평균 1.74%(60℃)~3.47%(50℃) 증가를 나타냈다.
 - (4) 태양열시스템 의존율은 집열기면적과 축열조용적의 감소에 따라 연간 6.68%(60℃)~11.26%(50℃) 감소하는 것으로 나타났다.
- 종합적으로 보면, 태양열급탕시스템의 LCC 최적화에 따라 시스템에 대한 초기투자비 및 총생애비용 감소, 태양열집열기 및 시스템의 에너지효율 향상의 결과를 얻을 수 있었으며, 시스템에 대한 의존율은 작아지는 결과를 나타냈다.

후 기

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2010년도 첨단도시개발사업(과제번호:07도시재생B04) 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 고명진 외, 사무소건물 태양열급탕시스템의 LCC 최적화 시뮬레이션, 설비공학논문집, 제22권, 제12호, 2010.12.
2. 한국에너지기술연구원, 태양열설비 시스템 표준화, 지식경제부, 2008.
3. Solar Energy Lab., TRNSYS 16.1 reference manual, University of Wisconsin-Madison, 2005.
4. Wetter, M., GenOpt, Generic Optimization Program. User Manual, Lawrence Berkeley National Laboratory, Technical Report LBNL-2077E, 2009
5. <http://www.jehin.co.kr/>
6. <http://www.kpi.or.kr/>
7. <http://ecos.bok.or.kr/>
8. <http://cyber.kepco.co.kr/>
9. <http://www.seoulgas.co.kr/>
10. KESE Registration Number 2009-incheon-R-004 (2009.9.25)
11. J. A. Duffie, and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, third ed., Wiley, New York, 2006.