

태양열 온수급탕 시스템의 최적설계 및 경제성 평가

최 봉 수, 이 봉 진, 김 진 홍, 홍 희 기*

경희대학교 대학원, *경희대학교 기계산업시스템공학부

Optimum Design and Economic Evaluation for Solar Water Heating System

Bong Su Choi, Bong Jin Lee, Jin Hong Kim, Hiki Hong**

Graduate School, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

*School of Mechanical and Industrial System Engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

ABSTRACT: We have found the optimum conditions varying design parameters by simulating an actual solar water heating system. The intervals showing 95% or more value of the maximum collected heat are obtained; the slope angle of collector is between 20 and 50° and the azimuth is at south±40° in Seoul, which is ranged more widely than expected. So the solar system can be installed more freely without reduction of the efficiency. To evaluate the economical efficiency of the solar system, we analyzed its life cycle cost comparing the gas heater as a base case. The solar water heat system is allowed to 30% fossil energy reduction, but cannot be paid back within the life cycle period. To activate and propagate it, some financial supports from government should be followed with 50% initial costs.

Key words: Solar thermal energy(태양열 에너지), Water heating system(온수급탕시스템), Simulation(시뮬레이션), Life cycle cost(생애 주기 비용), TRNSYS

1. 서 론

일반적으로 태양열 온수급탕 시스템을 설치할 때 집열기 경사각은 설치 지역의 위도로, 방위는 남향으로 하게 된다. 이는 시스템의 효율 및 획득 열량이 최대가 되도록 하기 위한 것이나, 대도시와 같이 인구가 밀집되고 설치공간이 협소한 경우에는 이 조건을 만족시키기 어렵다.

한편 설비 용량을 부적절하게 산정할 경우 시스템의 기능을 충분히 발휘하지 못하게 된다. 축열조의 경우 용량이 클수록 집열효율은 향상되지만 지나치게 커지면 축열 온도가 낮아져 보조열원의 사용량이 오히려 증가함으로써 시스템의 이용효과가

감소하게 된다.^(1,2) 집열기 면적의 경우 클수록 획득열량은 증가하고 보조열량은 감소하게 되지만 초기 투자비가 올라가고 시스템 효율이 오히려 저하할 수도 있다. 반면에 지나치게 작으면 요구되는 급탕부하에 대응하지 못하게 된다.

이에 저자들은 2003년에 경희대 공학관 실험동에 상용화된 제품을 기본으로 실험용 시스템을 설치하고 1년간 운전하며 데이터를 확보하였다.⁽³⁾ 또한 실증실험에 사용된 시스템을 대상으로 구성요소에 대한 모델링을 수행하여 특정일 및 일정 기간에 대한 시뮬레이션을 통해 실험결과와 좋은 일치율을 확인함으로써 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 검증하였다. 본 연구에서는 검증된 모델링 결과를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하여 집열기 경사각 및 방위각 변화에 따른 최고값 대비 95% 획득열량 범위를 제시한다. 아울러 설비 용량 변화에 따른 시스템의 성능 및 사용인원에 따른 시스템의

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2925; fax: +82-31-202-2625

E-mail address: hhong@khu.ac.kr

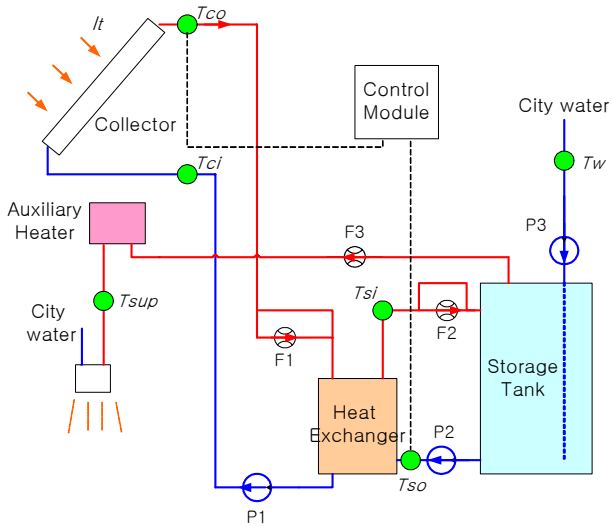


Fig. 1 Schematic diagram of system.
(P : Pump, F : Flowmeter)

경제성을 분석하고자 한다.

2. 시스템의 개요 및 모델링

시뮬레이션의 대상 시스템 및 모델링에 대해서는 선행연구에서 상세히 언급한 바 있으며, 개략도를 Fig. 1에, 주요 제원은 Table 1에 각각 나타내었다.

계산의 편의상 1인당 사용열량, 외기온도 등이 비슷한 3개월씩을 묶어 계절별로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 프로그램으로는 1970년대 말부터 태양열 시스템 해석용으로 널리 사용되고 있

Table 1 System specification for solar water heat system

Collector	Size	1,179×2,228 mm	
	Area	2.5 m ²	
	Unit	4	
	Slope	40°	
Storage tank	Capacity	430 L	
	UA	2.0 W/K	
Pump	1st	Capacity	60 lpm(H: 4 m)
		Output	80 W
	2nd	Capacity	35 lpm(H: 3 m)
		Output	40 W
Auxiliary heater	Type	Electric geyser	
	Capacity	13.2 kW	

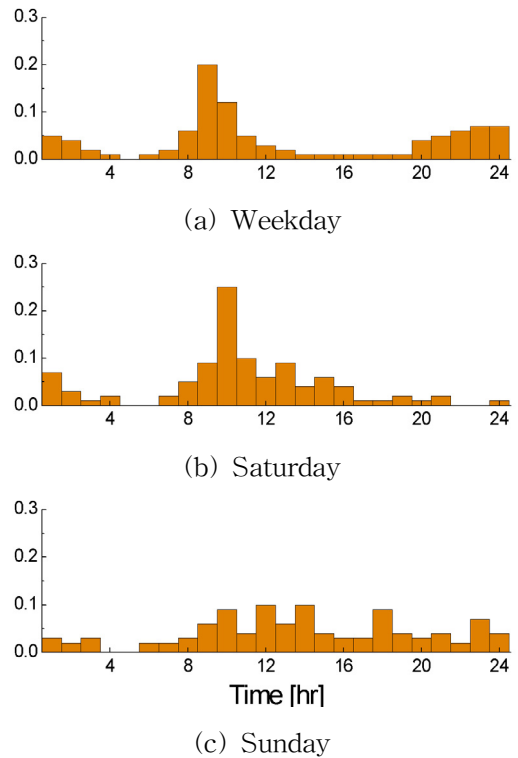


Fig. 2 Load distribution.

고 이미 그 타당성이 입증된 바 있는 TRNSYS(Transient System Simulation) 15.3을 사용하였다.⁽⁴⁾ 기상 데이터는 설비공학회의 서울에 대한 표준기상 데이터를 이용하였다. 이에 따라 시스템은 서울 지역의 좌표인 북위 37.5°, 동경 127°에 설치된 것으로 설정하였다.

부하패턴은 2003년 1년간 실증실험을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 모델링하였으며 그 결과를 Fig. 2에 정리하였다. 실증실험으로부터 평일평균 8명이 샤워실을 이용하는 것으로 기준 사용인원을 설정하였다(토요일과 일요일은 각각 7명과 4명). 샤워에 소요된 1인당 사용열량은 실증실험을 통해 얻은 월별 1인당 사용열량을 이용하여 봄(3, 4, 5월) 4.93 MJ, 여름 3.17 MJ, 가을 6.13 MJ, 겨울 9.60 MJ로 산정하였다.

실험에 사용된 설계조건 및 모델링한 급탕부하를 입력치로 하여 시뮬레이션한 결과를 Table 2에 정리하였다.

3. 설계 변수의 영향

현재 설치된 태양열 온수급탕 시스템을 기준 조

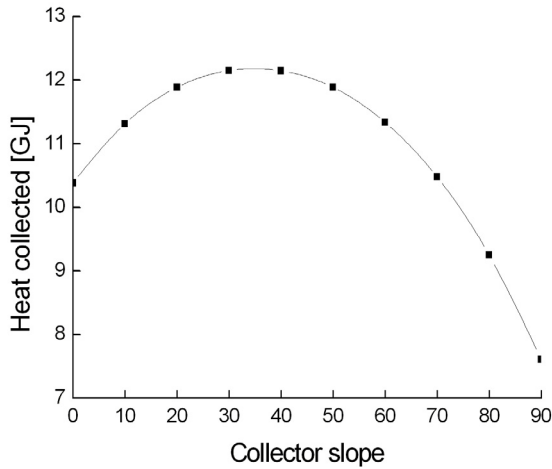


Fig. 3 Heat collected with collector slope.

건으로 선정하고 이에 대한 시뮬레이션 결과를 Table 2에 나타내었다. 또한 설계 변수는 집열기 경사각, 방위각과 같이 설비 용량의 변경없이 조절 가능한 시스템 설치조건과 축열와 같이 설비 용량 변동이 필요한 용량 요소로 구분하여 진행하였다.

3.1 시스템 설치조건 변경

집열기 방위는 남향으로 고정된 상태에서 집열기 경사각을 0°에서 90°까지 10°씩 변경하며 시뮬레이션을 수행하였고 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 집열기 경사각이 40°일 때, 획득열량이 최대이며 20°~50° 범위에서는 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 집열기 경사각에 따른 계절별 및 연간 보조열원 사용량을 나타낸 것으로 동절기 보조열원 사용량을 절약하기 위해 집열기 경사각을 설치지역의 위도보다 크게 하는 것이 1년 전체 보조열원 사용량 절감에는 효과가 없는 것으로 나타났다. 이로부터 연간 사용이 이루어지는 온수급탕시스템의 경우 경사각이 위도 정도에서 최대를

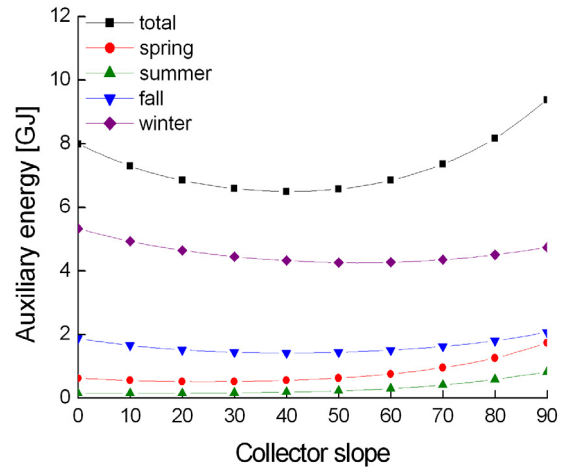


Fig. 4 Auxiliary heater energy with collector slope.

보이는 것은 기존의 연구결과와 일치하며, 일반적으로 추천되는 범위인 위도±15°보다는 2~3° 정도 작은 편이 유리하다. 획득열량과 마찬가지로 경사각이 위도와 비슷한 각도일 때 보조열원의 연간 소요량이 최소가 된다.

Fig. 5는 경사각을 40°로 유지한 상태에서 방위를 동쪽에서 서쪽으로 15°씩 바뀌가며 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 획득열량은 남향에서 최대가 되며, (남향)±40°범위에서는 획득열량 차이가 5% 이내로 나타남을 확인할 수 있었으며, 일반적으로 권장되는 범위보다는 넓게 나타났다.

실제 운전과 상관없이 집열기의 경사각과 방위각만을 변화시키면서 연간 최대로 일사가 투입되는 조건을 구해 이를 설치조건으로 제시하는 것이 일반적이며, 경사각의 경우 위도와 같은 각도, 방위각은 정남이다. 그러나 동일한 일사량이 집열기에 투사되어도 축열조의 온도가 낮은 오전과 높은 오후의 획득열량이 달라지게 된다. 따라서 운전조건과 무관하게 구한 최적의 설치조건에서 실제의 최

Table 2 Simulation results with actual experiment conditions

[unit: GJ]

	Irradiation	Heat collected	Heat loads	Auxiliary energy	Efficiency [%]	Solar fraction
Spring	14.1	3.7	3.3	0.6	26.4	0.83
Summer	11.9	2.8	2.1	0.2	23.8	0.91
Fall	10.5	3.3	4.1	1.4	31.2	0.65
Winter	8.8	2.3	6.3	4.3	26.6	0.31
Total	45.2	12.1	15.8	6.5	26.8	0.59

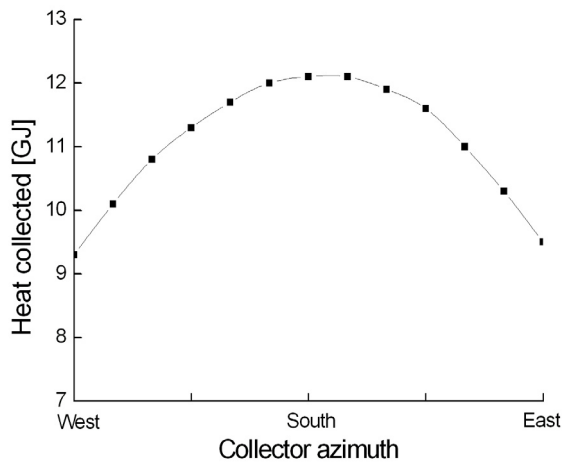


Fig. 5 Heat collected with collector azimuth.

적조건은 다소 벗어날 수 있다.

3.2 시스템 용량 변경

축열조 용량은 집열면적 1m^2 당 100 L의 지침으로부터 구한 430 L를 기준으로, 축열조의 높이와 지름의 비율은 일정하게 유지한 상태에서 축열조 용량을 기준 조건의 50%씩 변경하며 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6은 축열조 용량에 따른 시스템의 획득열량, 보조열원 사용량 및 펌프 소요동력을 나타낸 것으로 축열조 용량이 2.5배(1,075 L)를 넘어서면서 보조열량은 미세하게 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 축열조 용량이 지나치게 커짐으로써 축열조 내부의 온도를 요구하는 급탕온도까지 올리지 못하기 때문인 것으로 분석된다.

Table 3은 평일 평균사용인원을 변경하며 시뮬레이션을 수행한 결과로 사용인원이 증가함에 따라 집열효율 및 획득열량은 증가하는 것으로 나타

Table 3 Effects of load variation
[unit: GJ]

People Item	4	8	12	15
Heat collected	9.5	12.1	13.8	14.8
Heat loads	7.9	15.8	23.7	29.6
Auxiliary energy	2.0	6.5	12.3	18.9
Efficiency [%]	20.1	26.8	30.5	32.8
Solar fraction	0.74	0.59	0.48	0.40

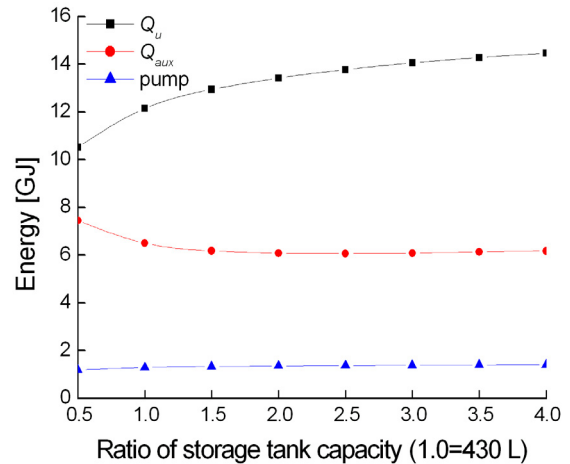


Fig. 6 Energy according to storage tank capacity.

났는데 이는 집열운전 시간 중 샤워하는 인원의 증가로 축열조 및 집열기 입구의 온도가 낮아지면서 집열효율이 상승함에 따른 것으로 해석할 수 있다. 반면에 급탕에 소요되는 부하 중 태양열로 공급하는 비율인 태양열의존도는 사용인원이 증가함에 따라 현격히 감소하는 것을 알 수 있다.

이로부터 일반적인 설계조건, 즉 집열면적 1m^2 당 축열조 용량 100 L는 무난한 설계로 보인다.

4. 경제성 분석

Table 3에 보여진 사용인원 변동에 따른 시뮬레이션 결과를 기초로 동일용량의 가스온수기를 이용한 온수급탕 시스템과 경제성을 평가하였다. 평가 방법으로는 LCC(Life Cycle Cost)분석개념을 도입하였으며 이를 계산하기 위해 미국 국립표준연구소(NIST)에서 개발한 BLCC 5.1 프로그램을 사용하였다.

기준안(basecase)으로 설정한 가스온수기의 용량은 태양열 시스템(alternative)에서의 보조열원과 같은 용량으로 설정하였으며 실제 보급될 태양열 시스템의 경우 가스온수기를 보조열원으로 사용할 가능성이 높으므로 보조열원은 가스온수기로 가정하여 분석하였다.

4.1 LCC 분석을 위한 가정

분석시점은 편의상 2004년 1월 1일로, 분석기간은 각 대안의 내용년수를 고려하여 20년으로 산정하였다. 미래에 발생할 비용의 시점이 다르기 때문

Table 4 LCC except energy costs
[unit: thousand won]

Classification	Base case	Alternative	Savings
Capital requirements as of base date	780	6,400	-5,620
Recurring and non-recurring OM&R cost	542	144	398
Capital replacements	706	1,352	-646
Residual value at end of study period	0	-410	410
Sum	2,028	7,486	5,458

에 기준시점으로 등가환산을 위한 적정 할인율을 결정해야 하는데, 본 연구에서는 한국은행 장기예금 이자율과 각종 경제지표를 고려하여 4.4%를 적용하였다.

4.2 각 대안의 비용항목

초기투자비는 각 대안에 필요한 장치설치비, 배관설비 및 인건비를 포함한 시공비의 총합으로 기준안은 장비비 64만원, 배관 및 설치비 14만원을 적용하여 총 78만원으로 설정하였고, 태양열 시스템은 집열기 1장 당 제반비용을 포함하여 140만원, 보조열원을 추가하여 총 640만원을 초기투자비로 산정하였다.

시스템의 잔존가치는 시설물의 법정 내용년수를 기준으로 시설의 가치가 매년 일정비율로 감소(정액법)한다고 보고 분석시점으로부터 15년(residual value factor: 66.7%)에 태양열 시스템에 펌프 2대, 축열조 1대를 교체하여 계산하였다.

운영 및 관리비용은 각 대안에 해당하는 시설물의 유지관리에 소요되는 비용을 말하며, 기준안은 매년 온수기 세관 및 수리비로 3만원, 태양열 시스템은 브라인 교체비로 8천원이 각각 소요되는 것으로 산정하였다.

4.3 분석결과

태양열 온수급탕 시스템과 가스 온수기에 대한 에너지 비용을 제외한 20년간의 생애비용을

Table 5 Subtotal for energy cost
[unit: thousand won]

Persons	Base case	Alternative	Savings
4	2,075	1,295	780
8	4,143	2,604	1,539
12	6,218	4,211	2,007
15	8,294	5,977	2,317

Table 6 LCC analysis and rate of subsidy
[unit: thousand won]

Persons	Net savings	Rate of subsidy
4	-4,679	73.1%
8	-3,920	61.3%
12	-3,451	53.9%
15	-3,141	49.1%

Table 4에 정리하였으며, 태양열 시스템의 에너지 절감 효과는 Table 5에 나타내었다. 샤워인원에 관계없이 태양열 온수급탕 시스템이 가스 온수기에 비해 30~35% 정도 에너지 절감 효과가 있는 것을 알 수 있었다. Table 6는 LCC 분석결과로 사용인원이 증가할수록 대체에너지에 의한 효과가 증가하지만 단순투자회수는 불가능한 것으로 나타났는데 이는 태양열 시스템의 비용항목 중 초기 투자비의 비율이 매우 높기 때문으로 분석된다. 즉 Table 6의 순이익이 양의 수로 나타나지 않는 한 투자회수는 불가능하며, 보조금 등을 통해 균형을 맞출 수 있는 정도이다.

태양열의존도가 50%가 넘는 본격적인 태양열 시스템을 전제로 할 때, 본 시스템의 경우 Table 3과 같이 1일 사용인원 12인을 한계로 볼 수 있다. 이때 Table 6의 12인 사용시 초기투자비용 6,400천원 중 순이익 -3,451천원, 즉 설치비용의 약 50~60%를 보조해주면 경제성을 어느 정도 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구를 통해 집열기, 축열조 등의 설비에 대한 최적 설계 범위 및 태양열 온수급탕 시스템의 경제성을 예측할 수 있었다. 서울에 설치된 것을 전제로 할 때 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 집열기의 경사각 및 방위각을 변화시켜가면서 획득열량이 최대가 되는 조건 및 최대치의 95% 이상이 되는 범위를 구하였다. 경사각은 20~50°, 방위각은 정남 \pm 40°이었으며, 일반적으로 알려진 값보다 범위가 넓어 설치의 제약에서 벗어날 수 있다.

(2) LCC 분석결과, 사위인원에 관계없이 태양열 온수급탕 시스템이 가스 온수기에 비해 30~35% 정도 에너지 절감 효과가 있다. 사용인원이 증가할수록 대체에너지에 의한 효과가 증가하지만 단순 투자회수는 불가능한 것으로 나타났는데 이는 태양열 시스템의 비용항목 중 초기 투자비의 비율이 매우 높기 때문으로 분석된다. 태양열의존도가 50%가 넘는 본격적인 태양열시스템을 전제로 할 때, 본 시스템의 경우 1일 사용인원 12인을 한계로 볼 수 있으며, 설치비용의 약 50~60%를 보조해주면 경제성을 어느 정도 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다

후 기

본 연구는 에너지관리공단 지원 에너지기술학술진흥사업(2002-N-SO03-P-02-0-000-2003)에 의해서 수행되었으며 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Korean Solar Energy Society, 2001, Solar Energy Handbook, Taerim, pp. 369-416.
2. SAREK, 2001, Equipments Engineering Handbook, pp. 1.4 1-41.
3. Kim, J. H., Kim, S. S., Choi, B. S. and Hong, H., 2004, Verification experiment and analysis for 6 kW solar water heating system part 1 : verification experiment, Proceedings of the SAREK, Vol. 16, No. 2, pp. 128-134.
4. Solar Energy Laboratory, 1994, TRNSYS Reference Manual, University of Wisconsin at Madison.
5. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, pp. 487-512.
6. Kim, J. H., Park, Y. W., Lee., B. J. and Hong, H., 2003, Economic Analysis for Solar water heating system, Proceedings of the SAREK, pp. 1080-1085.
7. Choi S. H., Cha B. J., Kim S. M., and Leigh S. B., 2002, A study on optimized design decision of building service systems based on a Life-Cycle-Cost Analysis, Society of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers of Korea, Vol 14, No. 2, pp 134-142.