

# 6 kW급 태양열 온수급탕 시스템의 실증실험 및 분석 (제2보 모델링 및 시뮬레이션)

최 봉 수, 김 진 홍, 강 용 태\*, 홍 희 기\*  
경희대학교 대학원, \*경희대학교 기계산업시스템공학부

## Verification Experiment and Analysis for 6 kW Solar Water Heating System (Part 2 : Modelling and Simulation)

Bong Su Choi, Jin Hong Kim, Yong Tae Kang\*, Hiki Hong\*†

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

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

(Received March 11, 2004; revision received April 20, 2004)

**ABSTRACT:** We have experimented an actual solar water heating system acquiring real data for one year period. On the basis of the operation data, it is necessary to predict the system performance such as collector efficiency and solar fraction, and to analyze the economical efficiency for system optimal design. To estimate the performance of actual systems through simulation, valid modelling for components consisting of the system should be accompanied. The present study is focused on the modelling for load patterns and operating control conditions. We proposed two load models: concentration model which gathers real loads as a meaningful group and distribution model which disperses real loads with time. If grouping of the load distribution is suitable, the predicted values by the concentration model approaches to those by the distribution model close to actual load pattern apparently. As a result, both of them are in good agreement with those by experiment.

**Key words:** Solar thermal energy(태양열 에너지), Water heating system(온수급탕 시스템), Modelling(모델링), Simulation(시뮬레이션), Load pattern(부하패턴)

기 호 설 명

$A_c$  : 집열면적 [ $m^2$ ]

$F_R$  : 집열효율 수정계수

$I_t$  : 경사면 투사 일사량 [ $kJ$ ]

$Q_u$  : 집열기 획득열량 [ $kJ$ ]

$T$  : 온도 [ $^{\circ}C$ ]

$U_L$  : 집열기 열손실계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]

그리스 문자

$\alpha$  : 흡수판 흡수율

$\eta$  : 집열 효율

$\tau$  : 투명 덮개 투과율

† Corresponding author

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

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

## 하첨자

- $a$  : 대기  
 $c$  : 집열기  
 $i$  : 입구측  
 $o$  : 출구측  
 $s$  : 축열조

## 1. 서 론

안정적으로 작동 가능한 태양열 온수급탕 시스템의 성능예측 및 최적설계를 위해서는 장기간에 걸친 실제상황의 운전데이터 특히 부하패턴 등을 확보할 필요가 있다. 이에 저자들은 2003년에 경희대 공학관 실험동에 상용화된 제품을 기본으로 실험용 시스템을 설치하고 1년간 운전하면서 데이터를 확보한 바가 있다.<sup>(1)</sup>

후속연구로 실증실험에 사용된 시스템을 대상으로 구성요소에 대한 모델링과 시스템 시뮬레이션을 수행하였다. 특히 부하패턴에 대한 모델링은 실제 시스템의 정확한 성능 및 거동 파악을 위해 대단히 중요하다. 일반적으로 알려진 샤워용 급탕온도, 온수사용량 등의 핸드북 데이터는 설계용으로, 계절적인 요인이 배제된 매우 개략적인 값이다.<sup>(2,3)</sup> 실증실험을 통하여 온수급탕 부하의 계절적인 변동이 3배 이상 차이 나는 것을 확인할 수 있었다.

동일한 시스템이라도 연간 급탕부하가 일정하게 사용되는 경우와 계절에 따라 변동하는 경우에는 성능이 현저히 달라질 수 있다. 즉, 하절기에도 동절기와 동일한 급탕부하로 설정하게 되면, 축열조의 평균온도가 낮아지게 되어 집열효율, 획득열량 및 보조열량이 증가하게 된다. 한편 1일 급탕부하의 경우에도 사용시간대가 상이함에 따라 시스템의 운전성능에 상당한 영향을 주게 된다. 일단 집열운전이 시작되면 축열조 내부가 완전혼합의 양상을 보이며 혼합손실로 인하여 온도가 충분히 상승할 때까지는 요구되는 급탕부하에 대응할 수 없어 보조열원의 사용이 불가피하다. 반면에 오후에 걸리는 부하는 축열조의 온도를 낮추어 집열효율을 증가시키는 방향으로 작용하기도 한다. 따라서 적절한 성능예측을 위해서는 용도에 맞는 부하패턴을 사전에 입수할 필요가 있으나 이에 대한 자료는 대단히 미흡하다.

Baeck et al.은 건물의 시간별·계절별 온수사용 패턴을 적절히 가정하거나,<sup>(4,5)</sup> 실제 거주자의 의견을 반영하여 가정한 패턴<sup>(6)</sup>을 사용하여 시물레이션에 입력한 바 있다. 본 연구에서는 실증실험을 통해 획득한 월별, 시간별 부하패턴을 시물레이션에 적용하는 것으로 하였다. 결론적으로 적절한 시스템의 모델링을 전제로 한 시물레이션은 실험결과에 매우 잘 추종하는 것을 확인할 수 있었다.

## 2. 시스템의 개요 및 모델링

시물레이션의 대상 시스템에 대해서는 선행연구에서 상세히 언급한 바 있으며, 개략도를 Fig. 1에, 재원을 Table 1에 각각 나타내었다.

설계단계에서도 시물레이션을 유용하게 활용할 수 있으나, 시스템을 구성하는 요소들에 대한 정확한 모델링이 이루어지지 않으면 의도하는 시스템의 성능예측은 실제와 상당히 차이날 수밖에 없다. 따라서 이미 설치된 시스템을 대상으로 실측치와 일치할 수 있도록 각각의 구성요소에 대한 모델링이 필요하다. 시물레이션에 사용된 구성요소에 대한 입력치는 TRNSYS에 포함되어 있는 IIsibat을 통해 이루어지며, 사용된 모듈들이 연결된 모습을 Fig. 2에 보인다. IIsibat 화면상에는 구성요소의 개략적인 입출력 변수의 흐름만 보이며, 각각의 구성요소에서 상세한 입출력 정

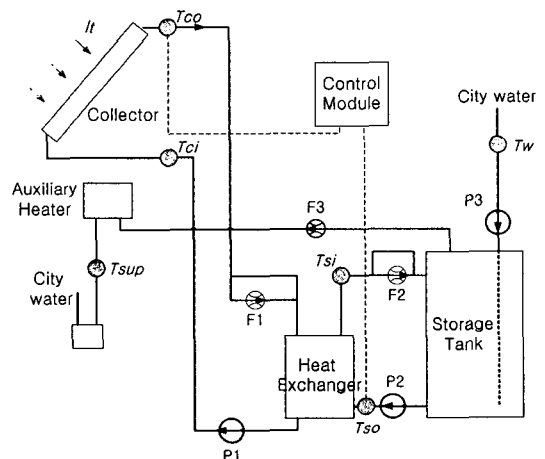


Fig. 1 Schematic diagram of system (P: Pump, F: Flowmeter).

Table 1 System specification for solar water system

Collector	Size	1179×2228 mm	
	Area	2.5 m <sup>2</sup>	
	Unit	4	
	Slope	40°	
Storage tank	Capacity	430 L	
	UA	2.0 W/K	
Heat exchanger	Type	Shell and coil	
	UA	370 W/K	
Materials		Shell : STS Coil : Copper	
Pump	1st	Capacity Output	60 lpm (H : 4 m) 80 W
	2nd	Capacity Output	35 lpm (H : 3 m) 40 W
Control module	Type	Digital difference temperature control	
Pipe	Material	Copper	
	Diameter	20 mm	
Auxiliary heater	Type Capacity	Electric geyser 13.2 kW	

보를 입력하게 된다.

시뮬레이션 프로그램으로는 1970년대 말부터 태양열 시스템 해석용으로 널리 사용되고 있고, 이미 그 타당성이 입증된 바 있는 TRNSYS (Transient System Simulation) 15.3을 사용하였다.<sup>(7)</sup>

2.1 집열기(Type 1b collector)

평판형 집열기를 나타내는 모듈로서, 실증실험에 사용된 집열기의 전면적(gross area)은 10 m<sup>2</sup>이며, 집열기 4장이 직렬로 연결되어 있다. 실험에 사용한 것과 동일한 집열기에 대해 성능검증기관으로부터 획득한 성능곡선을 Fig. 3에 보인다. 집열효율의 식은

$$\eta = \frac{Q_u}{I_t A_c} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_i - T_a}{I_t} \quad (1)$$

이며,<sup>(8)</sup> 여기서 실증실험에 사용된 집열기의  $F_R(\tau\alpha)$  은 0.7425,  $F_R U_L$ 은 6.1891 W/m<sup>2</sup> K로 각각 Fig. 3의 직선의 절편과 기울기에 해당된다. 집열기의

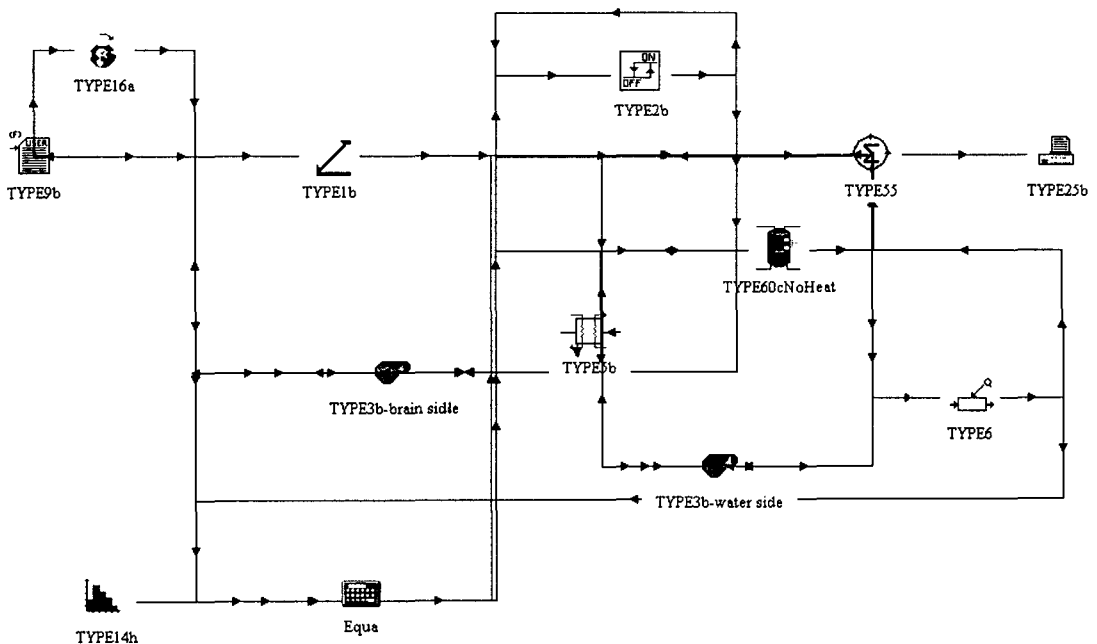


Fig. 2 Connected modules in IIsibat.

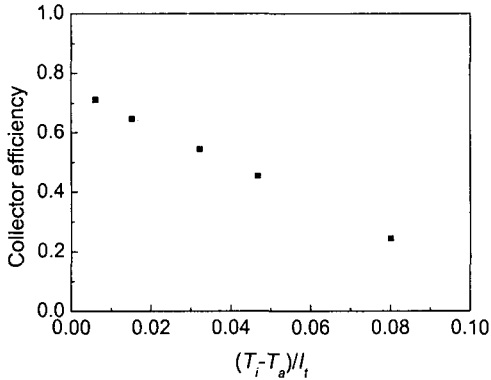


Fig. 3 Collector efficiency curve.

경사각은 40°이며, 정남향으로 설치되어 있다.

2.2 열교환기(Type 5b heat exchanger)

Fig. 1에서 1차측(집열기측)과 2차측(축열조측) 순환펌프를 연결하는 열교환기는, 실증실험에서는 2차측 루프에 지하수가 일부 이용됨에 따라 스케일 문제로 스테인리스제 원통 안에 코일(구리)이 들어간 원통-코일형(shell and coil type) 열교환기를 이용하였다. 그러나 TRNSYS에서는 이에 해당하는 적절한 모듈이 없어 대항류형 이중관식 열교환기를 나타내는 모듈인 Type 5b를 이용하여 모델링하였으며, 작동범위 내에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 실험을 통해 열교환기의 UA 값은 370 W/K로서 이를 입력치로 사용하였다.

2.3 축열조(Type 6c noheat storage tank)

시스템 개략도(Fig. 1)에서 보인 축열조는 용량이 430 L, 내경 0.59 m, 높이 1.56 m의 원통형이며, 디퓨저 등의 성층화 촉진기구는 설치하지 않았다. 이로 인해 집열운전 중에는 완전혼합의 양상을 보였으며, 따라서 집열운전 기간 중에는 성층화가 전혀 이루어지지 않는 것으로 가정하고, 이 경우 축열조 내의 온도층수를 나타내는 노드(node)는 1로 설정하였다.

반면 부하운전시에는 비교적 천천히 하부에서 반경방향으로 수돗물이 유입되고 상부로부터 온수가 빠져나가는 구조를 취함으로써 성층화가 잘 유지되는 편이었다. 노드 수를 6으로 설정하였을 때 실험결과와 잘 일치하는 경향을 보여, 이를

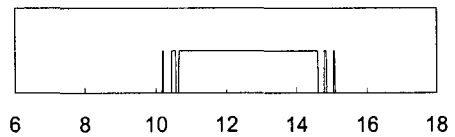
설정값으로 입력하였다. 계산을 통해 2.0 W/K로 산출되었으며 이를 이용해 시뮬레이션한 결과를 실측치와 비교하여 적절함을 확인하였다.

2.4 순환펌프(Type 3b pump)

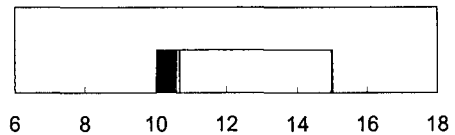
1차측 순환펌프의 질량유량은 1,548 kg/hr, 출력은 80 W로 설정하였다. 1차측 루프의 작동매체는 동파를 방지하기 위해 40 wt% 프로필렌글리콜을 사용하였으며, 비열로 3.815 kJ/kg·K을 입력하였다. 또한 2차측 순환펌프의 유량은 1,764 kg/hr, 출력은 40 W, 작동매체로 사용된 물의 비열은 4.19 kJ/kg·K을 입력치로 설정하였다.

2.5 제어기(Type 2b differential controller)

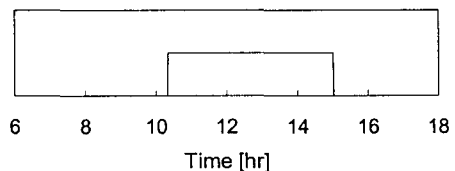
TRNSYS Type 2b는 차온제어기(differential controller)로서 집열기 출구측 유체온도  $T_{c,o}$ 와 축열조 출구측 유체온도  $T_{s,o}$ 의 온도차를 이용하여 순환펌프 1, 2의 작동을 제어하게 된다. 실제 시스템에서는 정지시 차온이 8°C 이상이면 집열운전을 시작하고, 운전중 4°C 이하로 떨어지면 정지하도록 설정되어 있으며, 실증실험에서의 on/off 상황의 예를 Fig. 4(a)에 보인다.



(a) Experiment (8°C/4°C)



(b) Simulation (8°C/4°C)



(c) Simulation (23°C/4°C)

Fig. 4 On/off status of pump.

그러나 실증실험에서 설치된 온도센서는 집열기 출구부분의 작동유체 온도가 아니고 설치의 편의상 집열기 출구에서 5cm 떨어진 배관의 표면온도를 감지하게 된다. 축열조 출구의 경우에도 마찬가지로 출구에서 5cm 떨어진 배관의 표면온도로서 출구 직전의 유체온도와는 다소 차이가 나게 된다. 작동유체가 순환되고 있는 경우가 차이는 무시할 만하나, 순환펌프의 작동이 멈춘 상태에서, 즉 유체가 정지된 상태에서는 배관에 단열이 잘 되어 있어도 온도차가 날 수밖에 없다.

이로 인하여 실험에 사용한 제어조건인 8℃/4℃를 그대로 시뮬레이션의 on/off 조건으로 하는 경우 Fig. 4(b)와 같이 매우 빈번한 on/off를 보이게 된다. 특히 정지된 상태에서 일사조건이 좋아지면 집열기 출구의 작동유체 온도가 상승하게 되나 실제 계측부분의 배관온도는 이보다 훨씬 낮을 수밖에 없다. 따라서 실증실험에서도 8℃보다 높은 유체의 차온에서 작동된 것으로 생각할 수 있다. 무작위로 선정된 날들을 대상으로 시뮬레이션을 수행한 결과 실증실험과 유사하게 집열 운전 시작 및 종료 경향을 보이는 제어조건은 23℃/4℃로서 이를 시뮬레이션의 제어조건으로 설정하였다. Fig. 4(c)에 보인 바와 같이 빈번한 on/off는 보이지 않으며 비교적 실증실험의 결과와

잘 일치한다. 이 온도차는 시행착오를 통해 구하거나 이론계산을 통해 예상할 수 있다.

## 2.6 부하(Type 516 7-day sliders)

앞서 언급한 바와 같이 부하패턴은 시뮬레이션이 실증실험을 정확히 추종하기 위해서 가장 중요시되는 모델링이다. 부하를 입력하는 모듈로서는 TRNSYS에서 제공하는 일종의 함수발생기인 Type 14와 516이 있으나, 평일과 주말 부하를 구분할 수 있는 Type 516을 주로 사용하여 실증실험을 통해 획득한 월별 1인당 사용열량을 입력하였다. 실증실험을 통한 월별 1인당 사용열량을 Table 2에 정리하였다. Table 2에 함께 기록한 실내온도, 시수온도가 월별에 따라 달라지게 되며 이로 인해 1인당 사용열량은 월별 최대 3배 이상 차이 나는 것을 알 수 있다.

실제의 사용시간, 사용량 등은 개인차가 있어 이를 그대로 입력할 수는 없으며, 3장에서 이에 대해 상세히 다루기로 한다.

## 2.7 보조히터(Type 6 auxiliary heater)

보조열원은 실증실험과 마찬가지로 편의상 출력 13.2kW의 순간온수기로 설정하였다. 그러나

Table 2 Monthly experimental results from actual operation (Energy unit: MJ)

Total	Month											Average
	March	April	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.		
Irradiation	4,281	4,040	5,040	3248	3,481	3,000	3,830	4,801	2,741	3,226	3,769	
Heat collected	2,022	1,997	2,176	868	1,216	1,032	1,431	2,035	943	1,075	1,480	
Heat load	904	1,146	913	957	1,028	732	1,305	2,633	1,864	1,959	1,344	
Auxiliary energy	186	354	241	342	353	220	390	1,240	962	1,025	531	
Load per man	6.2	5.0	3.3	3.2	3.7	2.6	4.5	6.5	7.4	9.0	5.3	
Pump load	103	118	145	70	117	103	118	143	86	109	111	
Efficiency (%)	47.2	49.4	43.2	26.7	34.9	34.4	37.4	42.4	34.4	33.3	38.9	
Solar fraction	0.79	0.69	0.74	0.64	0.66	0.70	0.74	0.53	0.48	0.48	0.65	
Outdoor temp. (℃)	7.8	12.9	19.6	21.9	24.2	24.5	20.9	13.5	9.4	0.9	15.6	
Room temp.	16.2	18.9	23.7	25.6	26.9	27.4	25.3	21.1	19.1	15.8	22.0	
City water temp.	14.4	16.5	18.5	20.4	22.7	23.4	20.7	17.4	15.8	13.5	18.3	
Shower temp.	38.0	37.1	36.1	35.2	33.9	32.2	34.6	36.1	36.8	36.7	35.7	
Supplied water at 60℃ (L)	32.7	27.4	18.9	19.2	23.9	16.8	30.9	36.6	39.8	46.2	29.2	
Average time in shower (min)	11.1	10.6	11.0	11.7	11.4	10.7	10.3	11.3	10.8	11.6	11.0	
Average no. of people	4.7	7.4	9.0	9.7	8.9	8.2	9.4	13.0	8.4	7.4	8.6	

실증실험에 사용된 전기온수기는 히터전력량 조절기 등을 부착하여 일반적으로 사용되는 가스온수기의 거동과 유사하도록 설정한 바 있다. 따라서 시뮬레이션의 보조히터는 전기온수기보다는 오히려 일반적으로 사용하는 가스온수기를 모델링한 것으로서 축열조 출구온도가 40℃ 이하가 되면 보조히터가 작동되도록 하고, 보조히터의 출구온도가 40℃가 되게 출력을 조절하도록 설정하였다.

## 2.8 데이터입력(Type 9b data reader)

시뮬레이션에 필요한 기상데이터를 읽어들이는 모듈로서 1시간 간격으로 계속된 2003년 수원 지역의 기상데이터로, 건구온도, 일사량, 상대습도, 풍향, 풍속, 전운량이 포함된다. 이를 Type 9b에서 필요로 하는 건구온도, 상대습도, 일사량, 풍향, 풍속, 전운량의 순으로 변환한 후 사용하였다.

## 2.9 일사량처리(Type 16a radiation processor)

기상청에서 제공하는 수평면 전천일사량으로부터 경사면 일사량을 계산하는 모듈이다. 집열기는 실증실험과 마찬가지로 정남향의 경사각 40°로 설치된 것으로 입력하였다. 위도와 경도는 수원 지역 기상청의 좌표인 37.16°, 126.6°로, 표준시와 실제 경도와와의 차를 나타내는 shift in solar time은 서경 기준으로 -8.4°로 설정하였다.

## 2.10 데이터 출력 모듈

1일 대상 시뮬레이션의 경우 Type 25b를 통해 36초(0.01시) 간격으로 결과치를 출력하였다. 결과치는 크게 일사량, 획득열량, 부하량, 보조열량의 에너지 그룹과 축열조 내부의 온도를 나타내는 축열조 온도 그룹, 집열기 입출구 온도, 축열조 입출구 온도를 나타내는 시스템 내부온도 그룹으로 분류하여 출력하였다. 각 그룹과는 별도로 집열운전 상황을 나타내는 순환펌프 on/off를 출력하도록 설정하였다.

월별 시뮬레이션의 경우 시뮬레이션 기간 전체 중 일정기간씩 합산하는 Type 55를 이용하여 일사량, 획득열량, 부하량, 보조열량을 1일 단위로 묶어 Type 25b로 출력하였다.

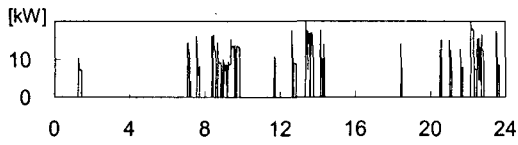
## 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 3.1 부하패턴 모델링

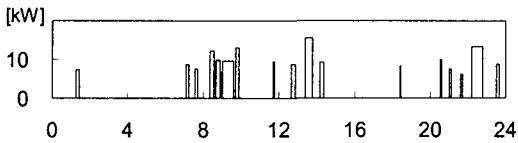
전형적인 부하패턴을 보이면서 1일 사용인원이 많은 2003년 10월 15일(18인 사용)의 실제 급탕 부하를 Fig. 5(a)에 보인다. 이를 약간 단순화시켜 Type 14h를 통해 시뮬레이션의 입력치로 부여하였다(Fig. 5(b)). 그러나 이러한 방법은 특정 1일에 대해 비교하는 것은 가능하나 장기간의 성능 예측에 적용하기에는 부적합하다. 따라서 부하패턴을 더욱 단순화시킬 필요가 있다. 선행연구에서 수행된 실증실험에서의 급탕부하는 대체로 집열운전이 본격적으로 시작되기 전후의 오전시간대와 집열운전이 진행중인 점심시간대 및 집열운전이 종료된 이후의 저녁시간대에 몰려 있는 경향을 보였다.

태양열 시스템의 성능과 관련된 지표로는 집열효율과 태양열 의존도가 많이 사용되는데, 투사된 일사량을 얼마나 획득하는지를 나타내는 집열효율이 높을수록, 전체부하 중 태양열로 공급한 비율인 태양열 의존도가 높을수록 우수한 운전성능을 보인다고 할 수 있다. 집열운전 중에 걸리는 부하는 시스템의 운전성능에 상당한 영향을 줄 수 있으며, 집열운전 직후의 부하는 태양열의존도를 떨어뜨리는 방향으로, 반면에 충분히 축열조의 온도가 상승한 오후의 부하는 집열효율을 높이는 방향으로 성능에 영향을 미치게 된다. 축열조의 온도가 상승하게 되면 집열기 입구온도도 높아져 식(1)로부터 집열효율 및 획득열량이 감소하게 된다. 이때 부하가 걸리게 되면 축열조의 온도가 떨어져 집열효율 및 획득열량이 증가하게 되어 시스템의 운전성능이 좋아지는 방향으로 작용하게 된다.

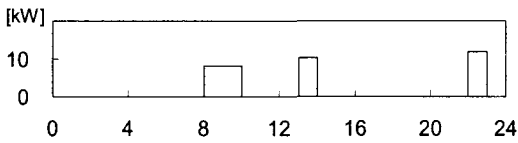
집열운전이 시작되기 전에 축열조 상부의 온도가 설정온도(본 연구의 경우 40℃) 이상이면 보조열원의 작동 없이 저장된 열로만 부하를 처리할 수 있다. 그러나 일단 집열운전이 시작되면 축열조 전체가 급속도로 혼합되어 축열조는 완전 혼합에 가깝게 되며 상부의 온도가 설정온도 이하로 떨어져 부하가 걸리면 보조열원을 필요로 하게 된다. 즉 유용하게 쓸 수 있는 에너지가 있었음에도 불구하고 혼합에 의한 가용 에너지의 손실로 시스템의 효율, 즉 태양열 의존도의 저하



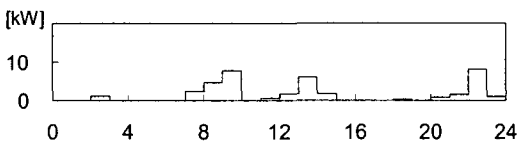
(a) Measured data from experiment



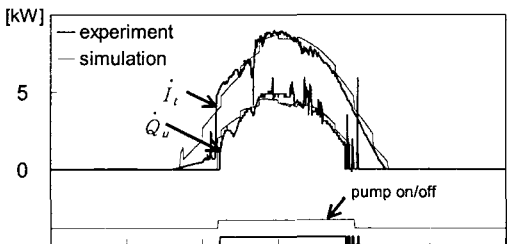
(b) Input data for simulation



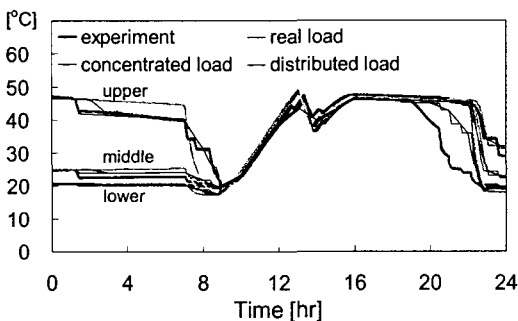
(c) Concentrated input data



(d) Distributed input data



(e) Acquired heat and pump on/off



(f) Timewise variation of temperatures

Fig. 5 Typical load pattern.

를 초래하게 된다. 또한 집열운전 전에 축열조 상부가 설정온도 이하로 떨어진 상태라도 급탕에 공급하는 적정온도까지 최소한으로만 승온시켜도 되는 데 비해, 집열운전에 의한 완전혼합이 이루어진 이후에는 거의 시수온도에서부터 승온시켜야 하는 상황도 발생한다. 일과시간이 상이한 구성원으로 이루어진 대학 기숙사에서 자주 나타나는 현상이다. 이와 같은 경우에 오전부하를 집열운전 전후로 구분하지 않으면 정확한 성능예측이 곤란하다. 규칙적인 생활을 하는 회사 기숙사라면 오전부하를 8시 이전으로 보다 단순화시킬 수 있다.

Fig. 5(c)에는 집열운전 시작 전후의 오전시간대와 점심시간대 및 야간시간대로 부하를 집중시켜 단순화시킨 모델링의 결과를 보인다(이하 집중부하모델이라 부름). 이때 급탕부하 배치방법으로는 분산되어 있는 부하를 단순히 모아둔 것으로서 부하의 합이 같도록 하였다. 이와 같은 부하패턴은 Baek et al.의 연구<sup>(6)</sup>에서도 사용한 적이 있으며 시간대별 급탕부하가 파악되지 않은 경우 개략적인 경향을 조사하여 적용할 수 있는 방법이다. 집중시킨 부하패턴은 반드시 실제 사용시간과 같게 합산할 필요는 없으며 다소 차이가 나더라도 부하의 합만 일치시키면 결과에는 거의 영향을 주지 않는다. 단지 지나치게 사용시간을 적게 하면 유량이 커져 성층화를 파괴하는 방향으로 작용하여 혼합을 촉진시키는 경향을 보인다. 부하입력의 편의상 실제사용시간으로 집중시키는 대신 1시간에 걸쳐 집중시켜도 예측된 시스템의 성능(즉, 획득열량, 집열효율 등)에는 1% 이내의 아주 미세한 차이밖에 나지 않았다.

평일과 주말과 같이 부하패턴을 달리하여 시뮬레이션해야 할 때에는 TYPE 14 대신에 TYPE 516을 사용하게 되는데, 이 모듈은 TYPE 14와 달리 1시간 단위로 값을 입력해야 하는 제약이 있다. 물론 동일한 조건을 입력하게 되면 이들의 결과는 완전히 일치한다. 여기서는 편의상 TYPE 516에 의한 결과만을 제시하였다.

시간대별로 사용인원 빈도수를 구해 Fig. 5(d)와 같이 입력하는 것이 가장 보편화된 방법으로서 실제사용에 대한 실태조사 등을 통해 산출하게 된다(이하 분산부하모델이라 부름). 몇 개의 그룹으로 모은 집중부하모델과 달리 집열운전시간대의 부하량을 정확히 부여해야 하는 번거로움을 피할 수 있다. 부하패턴을 평일과 주말로 구

분할 경우 TYPE 516을 사용한다.

### 3.2 일간 시뮬레이션

급탕부하의 입력을 달리 모델링하여 계산된 시뮬레이션의 결과로서, 획득열량 및 순환펌프 on/off 상황을 Fig. 5(e)에 나타내었다. 집중부하모델과 분산부하모델을 각각 사용하여 시뮬레이션한 결과는 거의 완전하게 일치하여 Fig. 5(e)에서는 그 차이를 식별할 수 없으며, 양쪽 모두 실험결과에 양호하게 접근한다.

반면 Fig. 5(f)와 같이 축열조 내부의 시간에 따른 온도분포는 부하의 시간별 배치에 따라 다소 차이를 나타낸다. 실증실험에서 축열조 내부의 온도는 축열조를 높이 방향으로 가상으로 3등분하고 각각의 중심에서 측정한 결과이다. 시뮬레이션에서는 온도층수의 노드를 6으로 입력하였기 때문에(가상으로 6등분하고 각각의 내부온도는 균일한 것으로 가정함), 상부로부터 1, 3, 5의 온도를 표시한 것이므로 실험결과와 직접적인 비교는 곤란하다. 시뮬레이션보다 실험의 하부측 온도측정점이 아래쪽에 위치해 먼저 떨어지지만, 실제 및 분산부하모델로 입력한 경우 실험과 거의 같은 경향을 보인다. 시수가 축열조 하부로 유입되기 때문에 부하가 걸릴 때마다 축열조 하부부터 계단상으로 온도가 하강하는 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 분산부하모델에서는 입력 특성상 비교적 완만한 형태로 떨어지게 된다. 집중부하모델(Fig. 5(c))에서는 축열조의 온도하강이 부하를 배치시킨 시간대에 위치하게 되는데, 최종 온도분포는 실측치와 거의 동일하며 시스템의 성능 예측을 위한 목적으로는 그다지 문제되지 않는다.

Table 3에 획득한 열량과 보조열원에 소요된 열량 및 집열효율, 태양열 의존도를 정리하였다. 투사된 총일사량은 198.3 MJ, 급탕부하는 137.2

MJ로 실험과 동일하게 설정하였다. 분산부하모델의 계산결과는 실제부하를 부여한 것과 거의 동일한 값을 보였으나, 예상외로 집중부하모델 역시 잘 일치하였다. 집중화시키는 방법에 따라 다소 차이를 보이기도 하나, 이 경우에는 집열운전 전후의 급탕부하 구분이 정확했기 때문이다. 전반적으로 실험결과와 시뮬레이션의 결과는 상당히 만족스러운 수준으로 일치하며, 부하패턴 모델링의 적합성을 확인할 수 있다. 이와 같은 모델링의 적합성에 대해서는 특정 1일이 아닌, 일사량의 상태가 상이한 여러 날을 대상으로 분석해 보았으며 거의 비슷한 수준으로 일치함을 확인하였다.

집중부하패턴을 사용용도와 맞지 않게 가정하는 경우의 예를 대상으로 시뮬레이션하였다. 비교적 부하패턴을 예측하기 쉬운 회사 기숙사를 상정하여 평일 사용시간대를 오전 6~7시, 오후 21~22시로 오전과 오후의 사용빈도수를 같게 가정하고 계산해 본 결과 획득열량 81.8 MJ, 보조열량 45.3 MJ, 집열효율 39.5%, 태양열 의존도 0.67로서 Table 3의 결과와는 상당한 차이를 보인다. 특히 축열조의 온도가 상승한 오후시간대에 부하가 걸리지 않아 획득열량이 감소한 것이 주된 이유로 판단된다. 이로부터 부하패턴을 적절하게 설정하지 못하는 경우 실제운전에서 벗어난 운전 성능을 예측함을 알 수 있다.

### 3.3 월간 시뮬레이션

비교적 1일 평균 샤워실 사용인원이 균일하고 실증실험의 데이터가 안정적이며 결손일이 없는 2003년 12월을 대상으로 월간 시뮬레이션을 수행하였다.

실제부하를 그대로 시뮬레이션의 입력치로 사용하는 것은 사실상 불가능하며, 2003년 12월에

Table 3 Daily simulation results according to load models (Unit: MJ)

	Experiment	Simulation		
		Real load (Type 14h)	Concentrated load (Type 516)	Distributed load (Type 516)
Heat collected	90.3	92.7	92.7	92.7
Auxiliary energy	38.0	37.2	37.4	37.0
Efficiency (%)	45.5	44.8	44.8	44.8
Solar fraction	0.72	0.73	0.73	0.73



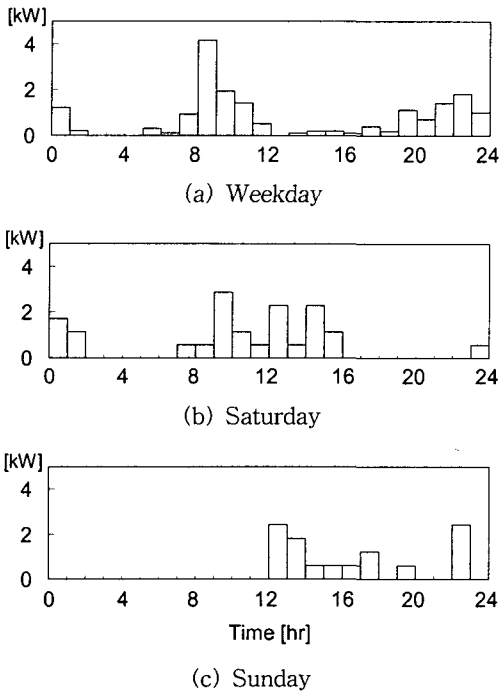


Fig. 6 Load patterns on December.

대한 시간대별 샤워인원수로부터 Fig. 6과 같이 급탕 사용패턴을 구하였고, 집중부하모델의 경우에는 이를 토대로 Fig. 5(c)와 같은 형태로 단순화시켰다. 시뮬레이션은 평일과 주말로 구분하여 TYPE 516을 통해 입력하였다. Table 2로부터 12월의 1인당 평균 급탕부하는 9.0 MJ이며, 평균 사용인원은 7.4명이다. 이를 세분하면 평일 8.09명(표준편차 2.67), 토요일 6.75명(표준편차 2.63), 일요일 4.25명(표준편차 2.37)로서 비교적 편차가 다른 달에 비해 작은 편이었다.

Table 4로부터 알 수 있듯이 부하모델과 상관없이 시뮬레이션 결과는 실험값과 잘 일치하였다.

단, 집열기에 투사된 일사량이 다소 차이를 보이는 이유는 실증실험에서는 36초 간격으로 실측한 값을, 시뮬레이션에서는 기상청에서 1시간 간격으로 측정된 수평면 전천일사량으로부터 경사면 일사량으로 환산하는 과정에서 발생한 불일치이다.

사용인원의 편차가 커지면 실험과 계산의 차이가 커지는 경향을 확인할 수 있었다. 실제 시스템에서 사용인원이 매우 적은 날에는 획득한 열을 충분히 이용하지 못하고 높은 온도의 상태로 다음 집열운전으로 넘어가면서 집열효율 및 획득열량의 감소를, 지나치게 많은 경우에는 바로 보조열원의 사용으로 직결되기 때문이다. 즉, 사용인원의 일간 편차가 클수록 효율적인 운전이 어려워지며 보조열원의 사용량이 많아지고 결국 태양열 의존도가 떨어지게 된다.

일간 및 월간 시뮬레이션 결과로부터 집중부하모델의 유용성이 확인된 것은 중요한 의미를 갖는다. 시간대별 분포를 정확히 모르는 경우에도 부하의 총량만 파악하고 있으면 신뢰성 있는 성능예측이 가능하다는 점이다. 물론 집열운전 시간대의 부하패턴에 대해서는 충분한 사전정보를 전제로 한다.

Table 2의 실증실험으로부터 급탕부하는 실내 온도 및 시수온도와 밀접한 관련이 있는 것을 알 수 있다. 기온이 올라갈수록 샤워온도는 낮아지며 동절기에 38℃ 정도이던 것이 하절기인 8월에는 32℃ 정도까지 떨어지게 된다. 반면에 시수온도는 동절기에 비해 10℃ 이상 높은 값을 보인다. 따라서 1인 평균 급탕부하는 계절에 따라 3배 이상 차이가 나게 되며, 정확한 시스템의 성능예측을 위해서는 이를 월별로 반영해 주어야 한다. 단순히 1인 기준 60℃, 45L의 온수사용에 하계는 이것의 30% 등의 설계데이터로는 올바른 성능예측이 불가능하다.

Table 4 Monthly simulation results according to load models (Unit: MJ)

	Experiment	Simulation			
		Concentrated load model	Difference [%]	Distributed load model	Difference [%]
Irradiation	3,226	3,289	2.0	3,289	2.0
Heat collected	1,075	1,106	2.9	1,119	4.1
Heat load	2,007	2,005	-0.1	2,002	-0.3
Auxiliary energy	1,025	997	-2.7	975	-4.9
Efficiency (%)	33.3	33.6	0.9	34.0	2.1
Solar fraction	0.48	0.50	5.4	0.51	7.6

그러므로 일반주택, 사회시설, 대학기숙사, 회사 기숙사 및 군대막사, 호텔 등의 숙박업체 등 용도에 맞는 대표적인 부하패턴 및 온수사용량에 대한 자료는 향후 정확한 태양열 온수급탕 시스템의 성능예측을 위해 필수적으로 제시되어야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 시스템 구성요소 및 운전에 대해 적절한 모델링이 이루어지면 시뮬레이션 결과는 대단히 정확하게 실제시스템의 성능을 예측할 수 있음을 보였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 시뮬레이션의 집열운전 on/off 제어조건을 실제의 조건(본 연구에서는 8°C/4°C)과 동일하게 설정하면 예측결과는 매우 빈번한 on/off를 수반하게 된다. 이는 순환펌프의 정지시 집열기 출구측 센서가 출구 직전의 유체온도가 아닌 출구배관의 표면온도를 감지함으로써 발생하는 차이로서, 시뮬레이션 수행시 이를 보정해야 하며 훨씬 높은 온도차를 설정해 주어야 한다(본 연구에서는 23°C/4°C).

(2) 실증실험을 통해 획득한 실제부하를 단순화시키기 위해 집중부하모델과 분산부하모델을 제시하였다. 집열운전 중의 부하는 시스템의 성능예측에 큰 영향을 미치므로, 특히 집중부하모델에서 부하그룹의 적절한 배치는 매우 중요하다. 대학기숙사와 비슷한 생활양상을 보인 본 연구의 경우 집열운전 전후의 오전부하, 축열조 온도가 충분히 상승한 시간대의 오후부하, 그리고 집열운전이 종료된 이후의 야간부하로 분류하였을 때 실제부하 및 분산부하모델에 근접하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 시스템의 정확한 성능예측을 위해서는 용도에 맞는 대표적인 월간·일간 부하패턴 및 온수사용량이 전제되어야 한다.

(3) 일사조건이 양호한 1일을 대상으로 시뮬레이션한 결과 부하모델과 상관없이 실험결과와 대단히 좋은 일치를 보였다. 집열량은 다소 크게 추정되었으나 집열효율 및 태양열 의존도는 1.5% 이내의 범위에서 거의 완전하게 접근하였다. 이로부터 부하모델 및 운전제어조건 설정이 적합하였음을 확인할 수 있었다.

(4) 2003년 12월을 대상으로 평일과 주말의 부하패턴을 달리하여 월간 시뮬레이션을 수행하였으며, 사용인원의 일간 편차가 존재하였음에도 불

구하고 실험결과와 비교적 양호한 일치를 보였다.

시뮬레이션이 태양열 시스템에 대한 신뢰성 있는 설계도구로서 활용될 수 있음을 보였으며, 향후 설계변수의 변화에 따른 시스템의 성능 및 경제성 분석을 수행하고 최적설계용 데이터를 제시할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2001-000-00398-0) 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Kim, J. H., Kim, S. S., Choi, B. S. and Hong, H., 2004, Verification experiment and analysis for 6kW solar water heating system, Part 1: verification experiment, Proceedings of the SAREK, Vol. 16, No. 2, pp. 128-134.
2. Korean Solar Energy Society, 2001, Solar Energy Handbook, Taerim, pp. 369-416.
3. SAREK, 2001, Equipments Engineering Handbook, pp. 1.4 1-41.
4. Baeck, N. C., Park, J. U., Song, B. H., Lee, J. K. and Kim, H. J., 2000, Simulation of solar and ambient-air-assisted heat pump, Solar Energy, Vol. 20, No. 4, pp. 17-24.
5. Baeck, N. C., Yu, J. Y., Yoon, E. S., Lee, D. W. and Joo, M. C., 2001, A study on the field test and simulation of active solar system for residential house, Solar Energy, Vol. 21, No. 1, pp. 93-101.
6. Baeck, N. C., Yoo, C. K., Yoon, E. S., Yoo, J. Y. and Yoon, J. H., 2002, Active solar heating system design and analysis for the zero energy solar house, Solar Energy, Vol. 22, No. 4, pp. 1-9.
7. Solar Energy Laboratory, 1994, TRNSYS Reference Manual, University of Wisconsin at Madison.
8. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, pp. 487-512.