

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
*Journal of the Korean Solar Energy Society*  
Vol. 21, No. 1, 2001

## 설비형 태양열 주택 실증시험 및 시뮬레이션 연구

백남춘, 유지용, 윤응상, 이동원, 주문창

한국에너지기술연구원

### A Study on the Field Test and Simulation of Active Solar System for Residential House

N. C. Baeck, J. Y. Yu, E. S. Yoon, D.W. Lee, M. C. Joo

*Korea Institute of Energy Research*

#### Abstract

The solar space and water heating system for residential house was analyzed by both experiment and computer simulation. Computer simulation program is developed using TRNSYS 14.2 verified by experimental result. The Parametric study of this solar system was carried out using this computer simulation program. On-OFF control strategy, collector area and storage tank volume as a parameters were considered in this study.

#### 기 호 설 명

$I_T$  : total Incident radiation on collector area  
 $I_d$  : diffuse radiation on horizontal surface  
 $I$  : total radiation on a horizontal surface  
 $Q_u$  : rate of energy gain  
 $T_a$  : ambient temperature  
 $T_i$  : inlet temperature of collector  
 $T_H$  : upper input temperature  
 $\Delta T_H$  : upper dead band temperature difference

$\Delta T_L$  : lower dead band temperature difference  
 $T_L$  : lpper input temperature  
 $T_R$  : room temperature  
 $UA$  : overall conductance for heat loss from house  
 $\alpha$  : solar altitude angle  
 $\beta$  : slope of surface  
 $\epsilon C_{min}$  : product of the effectiveness and minimum capacitance rate of load heat exchanger  
 $\eta$  : collector efficiency

## 1. 서 론

현재 세계적으로 불안정한 유가와 화석에너지의 사용으로부터 오는 환경문제 등으로 대체에너지에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 우리나라의 경우 대부분의 에너지를 해외에서 수입하고 있고 에너지 사용량이 많아 이러한 문제는 더욱 심각하다. 정부에서는 2003년까지 대체에너지 의존율을 2%까지 올리려는 계획을 세우고 있어 대체에너지에 대한 연구 및 보급 활성화는 더욱 절실히 요구된다.

대체에너지중 대표적인 에너지원이며 무한청정 에너지인 태양열에 관한 연구와 보급은 70년대 후반부터 시작되었으나 주로 주택용 온수기와 골프장, 수영장, 목욕탕 등 대규모 급탕시설 등 온수급탕분야에 머물러 있으며 건물에너지의 약 50%를 차지하는 난방분야에의 보급은 미비한 실정이다. 년중 사용하는 온수급탕 분야보다는 적용 효과측면에서 떨어지나 가까운 일본과 유럽에서 주택(단독 및 다가구주택, 집단 주거지), 병원, 학교 등에 일부 보급이 이루어지고 있다.

태양열 시스템은 시간에 따른 일사량 변화가 크고, 시간별 열부하 분포 및 태양의존율에 따라 축열되어야 할 축열량(축열조 용량), 집열 펌프 및 태양열 공급제어, 경제성과의 관계 등 여러 가지를 복합적으로 고려해야 적정한 시스템을 설계할 수 있다. 본 연구는 이러한 태양열 시스템에 영향을 주는 요소에 대한 분석을 위해 1) 기존에 설치된 태양열 급탕 및 난방 시스템을 통한 성능실험(실증시험) 결과와 2) 이론분석을 통한 parametric Study를 통하여 태양열시스템 설계에 영향을 주는 여러 요소들에 대해서 분석하였다.

## 2. 실증시험 장치

### 2.1 실증시험장치

그림 1.은 30평 주택에 설치된 태양열 난방 및 온수급탕 시스템의 개략도를 나타내었다. 시스템 구성은 평판형 집열기, 축열조, 제어장치, 온수용 열교환기, 보조열원(심야전기 보일러 및 유류 보일러), 펌프 등으로 구성되어 있다. 집열시스템은 자동배수식 시스템으로 동절기 집열기 내부가 동

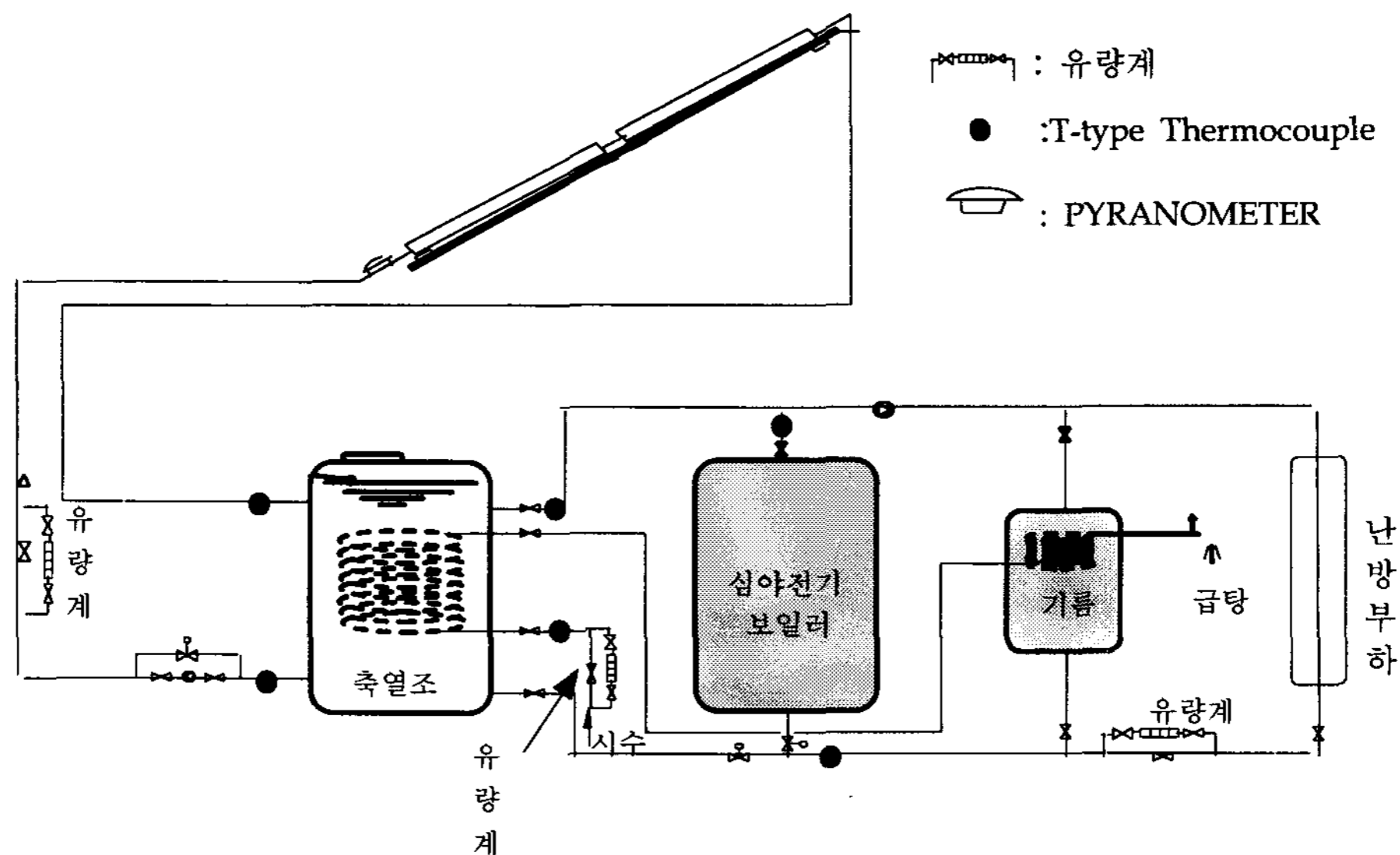


Fig 1. Schematic diagram of solar space and hot water heating system for residential house

Table 1. Specification of solar system

| 구 분       | 제 원                               |
|-----------|-----------------------------------|
| 태양열 집열기   | 1188×2103, 10매(25m <sup>2</sup> ) |
| 심야전기 보일러  | 1600 liter                        |
| 태양열 축열조   | 1500 liter                        |
| 집열매체 순환유량 | 20 l/m                            |

결조건(5℃) 가까이 온도가 내려가면 집열기 및 배관 내에 있는 열매체(물)가 자동적으로 배수되어 축열조 하단부로 유입된다. 집열기는 정남향 45도의 경사로 설치되었다. 이용부는 태양열 축열조와 심야전기 보일러가 그림과 같이 병렬로 연결되어 있으며 축열조는 개방식으로 심야전기 보일러와 태양열축열조의 팽창을 태양열 축열조가 받을 수 있도록 보일러 높이보다 태양열 축열조가 약간(10cm 정도) 높도록 (수위는 같음)설치되어 있으며, 태양열 축열조 상단에 축열조에 물을 자동적으로 보충되도록 볼탭이 설치되어있다. 이와 같이 이 시스템은 심야전기 보일러의 팽창 탱크가 없는 대신 태양열 축열조를 팽창탱크로 이용한 것이 특징이다. 참고로 이 시스템은 충남 청원군에 설치된 시스템으로 2000년도에 설치되었다.

### 2.2 성능측정용 센서 및 계측 장치

실증시험장치에 부착된 각종 센서의 위치는 그림 1.에 있는바와 같다. 집열기 입출구의 열매체 온도, 축열조 온도, 난방 공급 및 회수온도, 시수 공급온도, 외기온도 등의 측정을 위해서 T-Type Thermocouple을 부착하였고, 유량은 집열유량, 난방공급 및 회수유량, 시수유량을 위해서 질량유량계를, 그 외에 집열면 일사량을 측정하였다.

측정장비는 DAS는 HP 34970A를 사용하였고, 데이터 scanning은 1분 간격으로 하였다.

## 3. 컴퓨터 시뮬레이션

### 3.1 시뮬레이션 개요

전술한 실증시험장치에 대한 시뮬레이션을 위해서 미국 Wisconsin-Madison 대학의 태양에너지연구실에서 개발하여 태양열 및 건물관련 에너지 분석분야에 타당성이 입증되고 또 범용적으로 사용되고 있는 Trnsys 14.2를 사용하였다. 이 Trnsys는 약 80여개의 에너지기기 및 시스템 관련 요소로 구성되어 있다. 본 분석에서 시뮬레이션 모델은 실증시험 시스템과 비교를 위해서 실증시험장치와 동일한 모델을 사용하였다. 각 요소별 주요 모델은 다음과 같다.

### 3.2 시스템 요소(component) 모델

#### (1) 기상자료

기상자료는 2가지를 사용하였다. 실증시험결과와의 비교를 위한 시뮬레이션에서는 실제 실증시험당시 측정된 실측 데이터를 사용하였으며, Parametric study에서는 대전지방의 30년간 평균치를 사용하였다.

#### (2) 태양열 집열기

태양열 집열기는 실증 시험 시스템과 동일한 평판형 집열기를 사용했으며 집열 성능 곡선식은 다음과 같다.

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

여기서 투과 흡수율,  $F_R(\tau\alpha)$ 와 열손실계수,  $F_R U_L$ 은 집열기의 성능시험으로부터 주어지는 값으로 각각 0.74와 6.0(W/m<sup>2</sup>℃)로 하였다.

#### (3) 제어장치

태양열 시스템에서 제어장치는 태양열 집열순환펌프와 난방 순환펌프의 ON-OFF를 제어한다. 태양열 집열순환펌프는 일반적으로 펌프의 잦은 ON-OFF 작동을 피하기 위해 그림 2와 같이 히

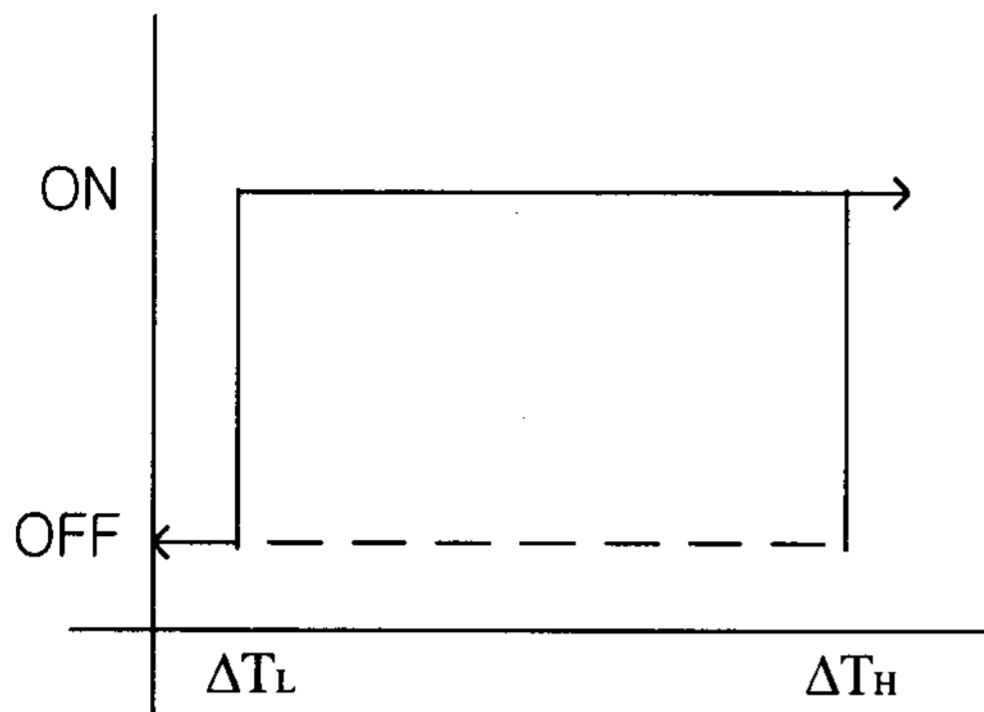


Fig. 2. ON/OFF control conception

스테리시스가 있는 차온제어에 의해 제어되며, 제어장치에 입력되는 온도는 집열기 입·출구 온도가 이용된다. 집열기 입구온도는 자동배수 시스템에서는 축열조 하단부 온도가 일반적으로 사용된다.

- 즉, 펌프가 ON 상태일 경우,
- $T_H - T_L \geq \Delta T_L$  : 계속 ON
- $T_H - T_L < \Delta T_L$  : OFF

- 펌프가 OFF 상태일 경우,
- $T_H - T_L \geq \Delta T_H$  : ON
- $T_H - T_L < \Delta T_H$  : 계속 OFF

난방순환펌프는 실내온도와 축열조 상단부온도를 감지하여 태양열 집열순환펌프와 같이 차온제어 방법으로 제어되도록 하였다.

(4) 일사량

일반적으로 일사량 자료는 수평면일사량으로 제공된다. 따라서 경사면 일사량으로 환산하기 위해서 여러 가지 모델이 제시되었으나 여기서는 Lui & Jordan이 제안한 다음과 같은 모델을 사용하였다. 수평면 일사량으로부터 직달 및 산란 일사량 계산은

$$\begin{aligned} \frac{I_d}{I} &= 1.020 - 0.254k_T + 0.0123 \sin(\alpha) \\ \text{for } 0 \leq k_T \leq 0.22, \quad \frac{I_d}{I} &\leq 1.0 \\ \frac{I_d}{I} &= 1.400 - 1.749k_T + 0.177 \sin(\alpha) \\ \text{for } 0.3 \leq k_T \leq 0.78, \quad 0.1 \leq \frac{I_d}{I} &\leq 0.97 \\ \frac{I_d}{I} &= 0.486k_T + 0.182 \sin(\alpha) \\ \text{for } 0.78 < k_T, \quad \frac{I_d}{I} &\geq 0.1 \end{aligned} \tag{2}$$

따라서 경사면 전 일사량은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} I_{d,T} &= I_d \left[ (1 - A_i) \left( 1 + \frac{\cos \beta}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. [1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right)] + A_i R_b \right] \end{aligned} \tag{3}$$

(5) 열부하

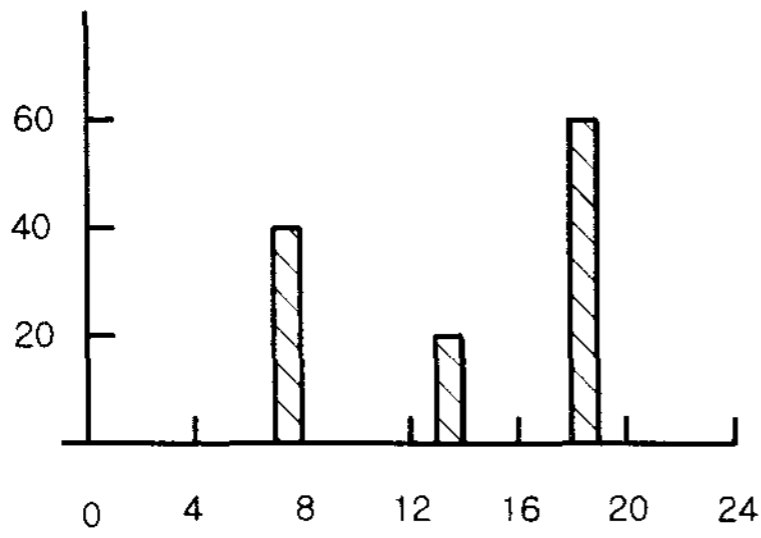
건물의 열부하 모델은 식 2에 있는바와 같이 Energy/(Degree-Hour) 기법을 사용하여 열부하,  $Q_L$ 를 계산하였다.

$$Q_L = [UA(T_R - T_a) - Q_{gain}] \tag{4}$$

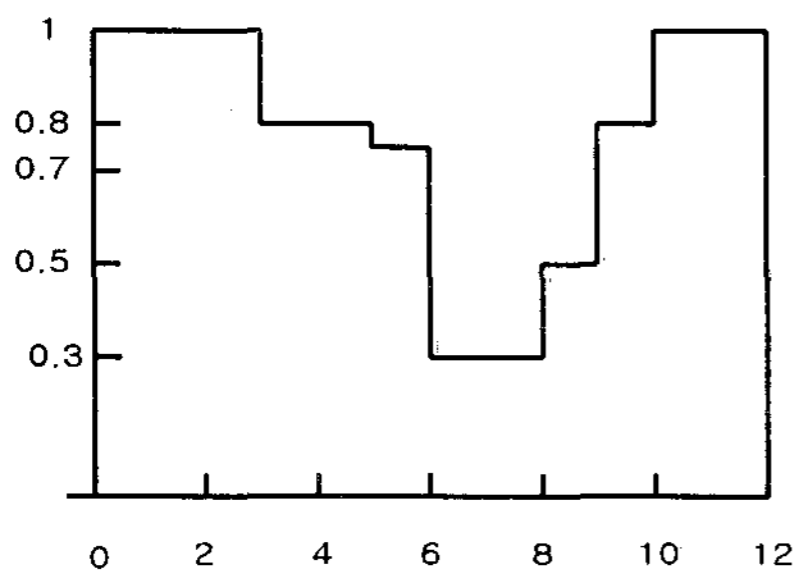
그러나 실험결과와의 비교분석을 위한 시뮬레이션에서는 매시간 실제 공급된 난방열량값( $Q_L$ )을 직접 주었다.

(6) 온수부하

온수부하도 마찬가지로 부하분포 및 사용량은 시스템 성능에 적지 않은 영향을 미치게 된다. 이것은 각자의 생활형태 및 습관에 따라서 달라지게 된다. 여기서는 온수사용량을 동계 120(리터/일)로 하였으며, 월별 및 시간별 온수사용 패턴을 실제 거주자의 의견을 반영하여 그림 3.과 같이 가정하였다.



(a) hourly consumption rate



(b) monthly consumption rate

Fig. 3. Hot water consumption rate

(7) 축열조

태양열 축열조는 원통형으로 다음과 같은 온도 층화 모델을 사용하였다. 이 축열조의  $i$  번째 층에서의 열평형 방정식은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M_i C_{pf} \frac{dT_f}{dt} &= \alpha_i m'_h C_{pf} (T_h - T_i) \\
 &+ \beta_i m'_L C_{pf} (T_L - T_i) + UA_i (T_{env} - T_i) \\
 &+ \gamma_i (T_{i-1} - T_i) C_{pf} \quad \text{if } \gamma_i > 0 \\
 &+ \gamma_i (T_{i-1} - T_i) C_{pf} \quad \text{if } \gamma_i < 0 \\
 &+ Q_i \quad \text{for } i=1, N
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 제어함수  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & \text{if } i = S_h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

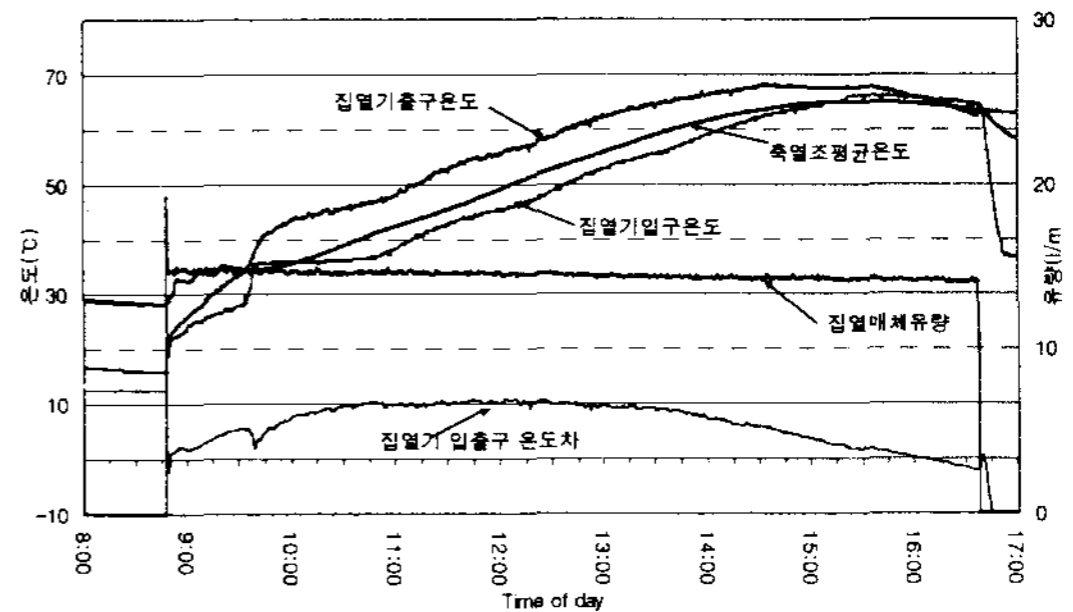
$$\beta_i = \begin{cases} 1 & \text{if } i = S_l \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\gamma_i = \dot{m}_h \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j - \dot{m}_L \sum_{j=i+1}^N \beta_j$$

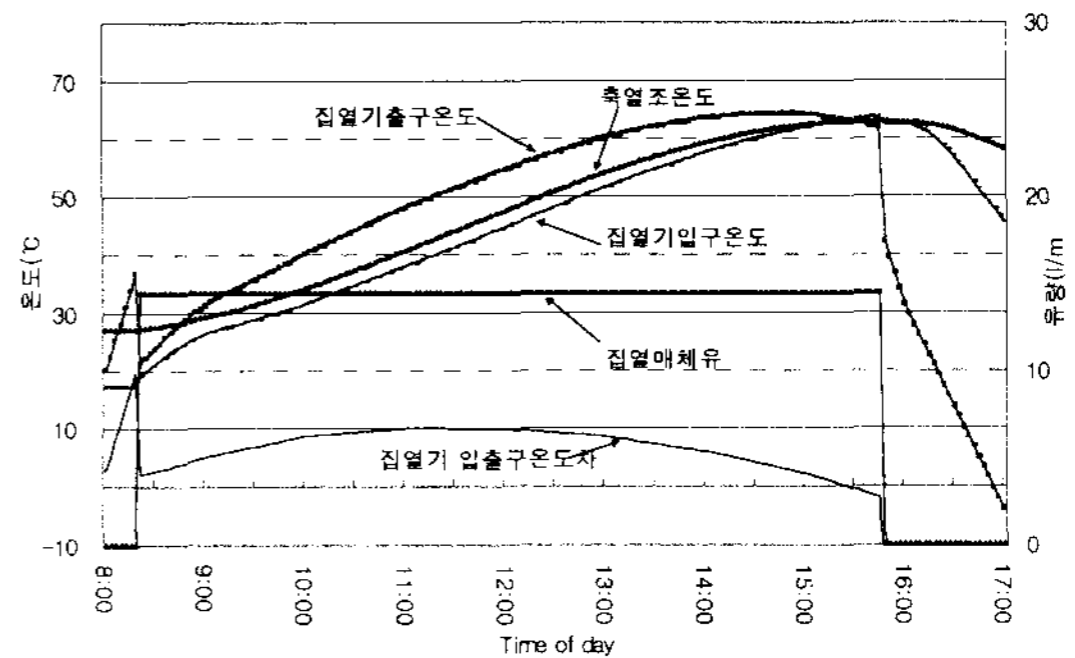
4. 실증시험 및 시뮬레이션 결과 분석

4.1 실증시험과 시뮬레이션 결과 비교

그림 4는 실증시험 및 시뮬레이션 결과를 상호 비교하기 위해 실험조건과 동일한 조건으로 시뮬레이션을 수행하여 나타낸 그림이다. 시스템 작동상태를 비교해보기 위해 집열기 입·출구 온도 및 온도차, 축열조 온도, 집열매체 순환유량 등에 대해서 실험시와 시뮬레이션에서의 나타내었다.



(a) experimental results



(b) simulation results

Fig. 4. Experimental and simulation results

두 경우가 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 여기서 집열순환펌프의 On, Off 조건은 각각 20℃, 4℃로 하였다. 그런데 펌프가 Off 되는 시점의 온도차가 실험결과에서는 -2℃로 나타났는데, 그 이유는 실증 시험시스템에서 On/Off 제어용 집열기 입구 측정온도센는 축열조 하단부 부근에 위치되어 있고, 여기에 나타난 집열기 입구 온도센서는 집열기로 연결되는 배관 내부에 설치되어 있기 때문에 나타난 것이다. 즉, 제어용 센서(축열조 하단부 온도)부근의 온도가 집열기 입구로 가는 열매체 배관의 온도보다 높기 때문에 나타나는 현상이다.

이 결과로부터 1일동안 집열된 태양열은 실증 시험사가 50,933Wh, 시뮬레이션의 경우가 49,663Wh로 나타났으며, 집열효율은 각각 36%, 35%로 나타났다. 이상의 결과에서 알 수 있는바와 같이 시뮬레이션 결과가 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

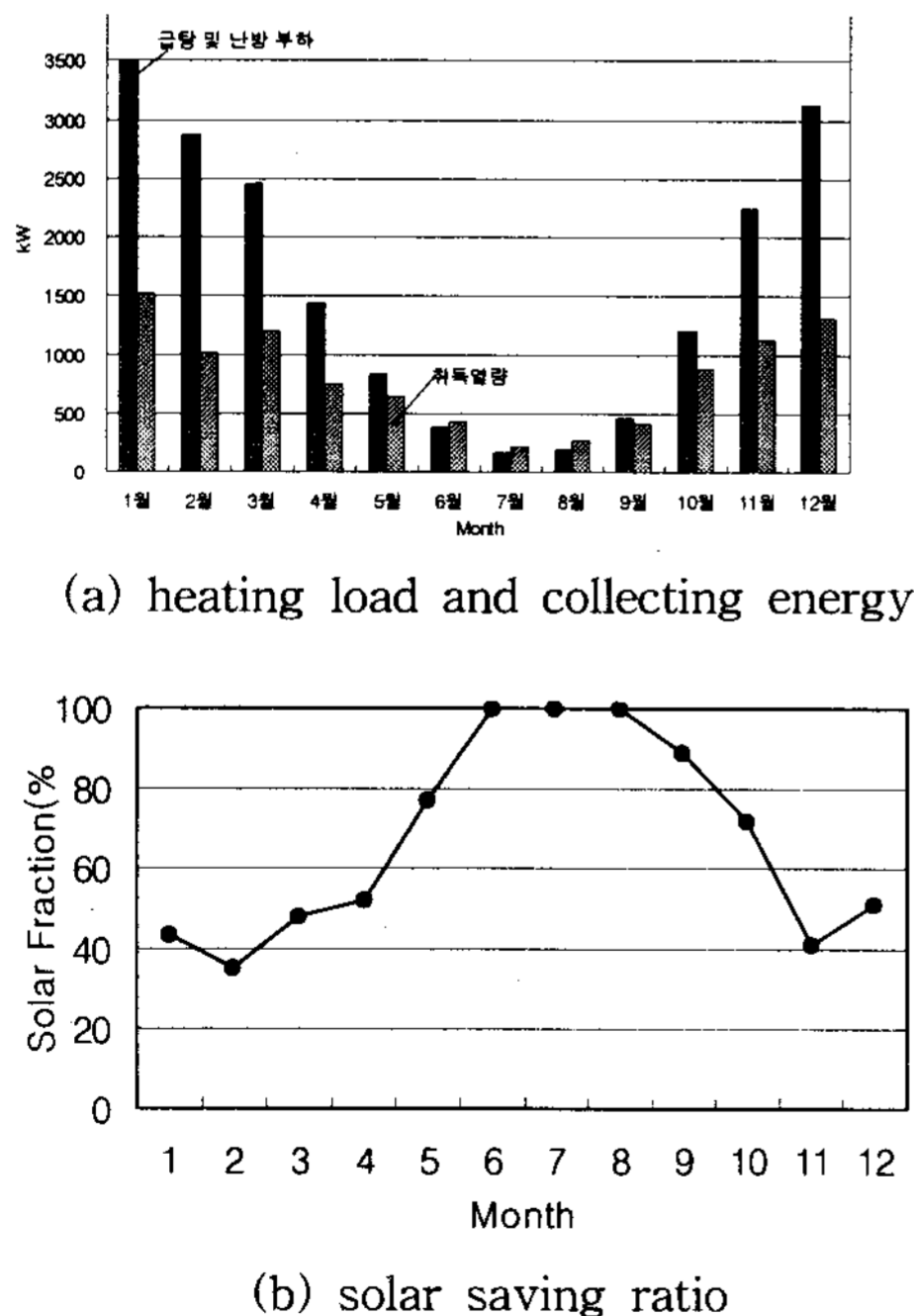


Fig. 5. Heating load, collecting energy and solar saving ratio

#### 4.2 난방 부하 및 취득 열량

시뮬레이션 결과로부터 1년동안의 월별 태양열 이용량, 열부하 및 의존율을 그림 5에 나타내었다. 여기서 태양의존율, f는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{\text{태양열이용량}}{\text{난방부하} + \text{급탕부하}} \quad (6)$$

동절기에 태양의존율은 약 40-50% 정도로 나타났으며, 년 평균치는 약 51%가 된다.

열부하는 난방과 온수급탕으로 구분되는데 이 두가지 부하의 크기는 그림 6에 있는 바와 같다.

#### 4.3 Parametric Study

본 연구를 통해서 개발된 시뮬레이션 프로그램으로 태양열시스템에 영향을 미치는 중요한 인자들에 대해 분석하기 위해서 1월 한달간을 시뮬레이션을 수행 하였다.

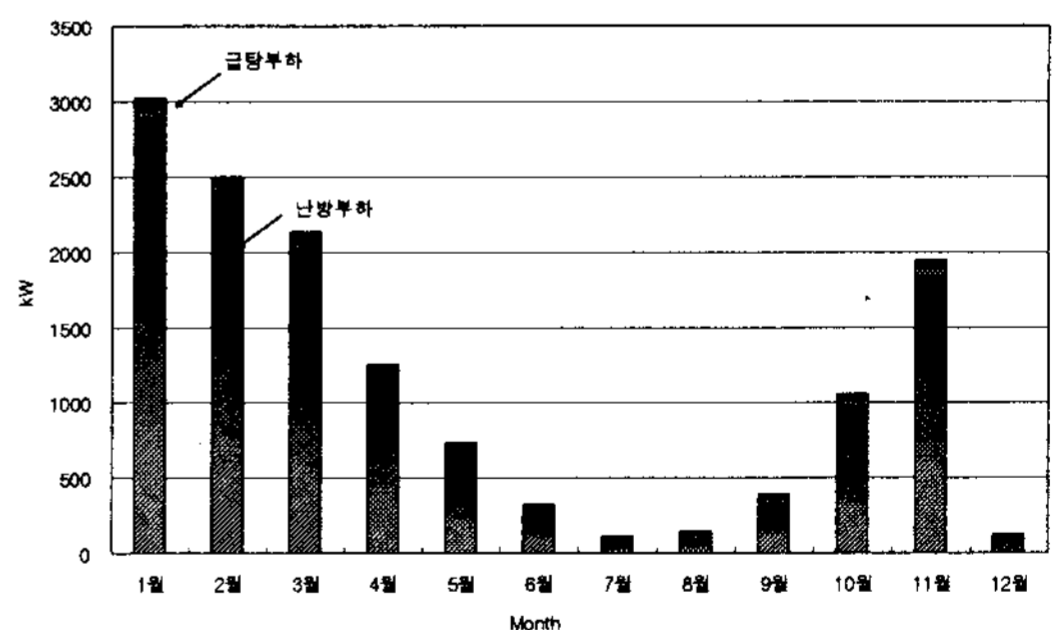


Fig. 6. Space and water heating load

#### (1) 집열순환펌프 ON-OFF 제어의 영향

그림 7~그림 9는 집열순환펌프의 ON/OFF 제어조건을 각각 20/4℃, 20/10℃, 20/16℃로 하였을 경우의 시뮬레이션 결과이다.

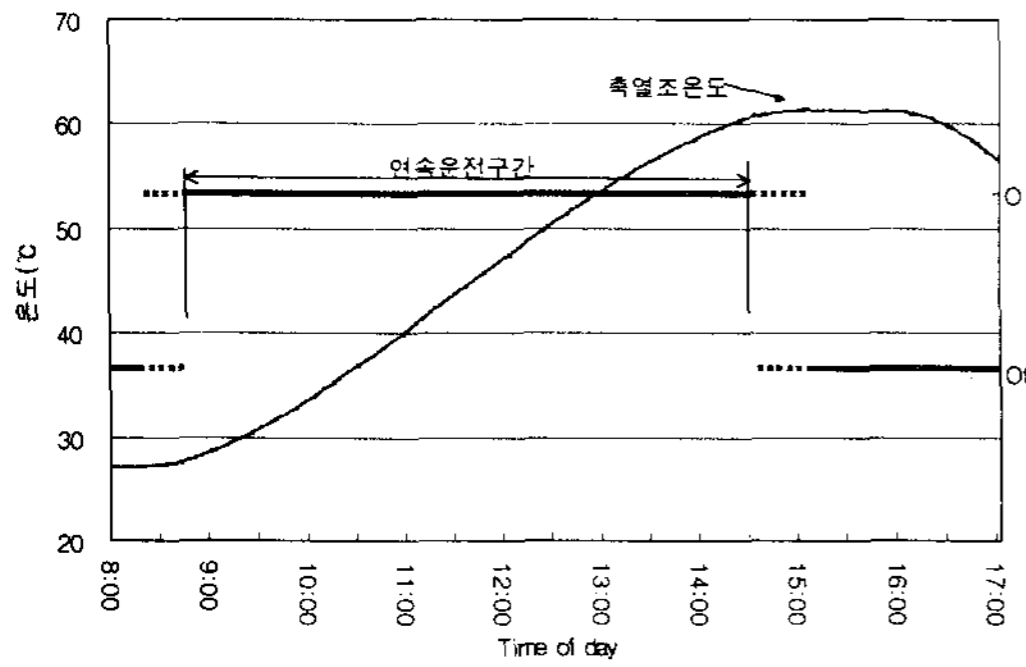


Fig. 7. On/Off condition : 20/4°C

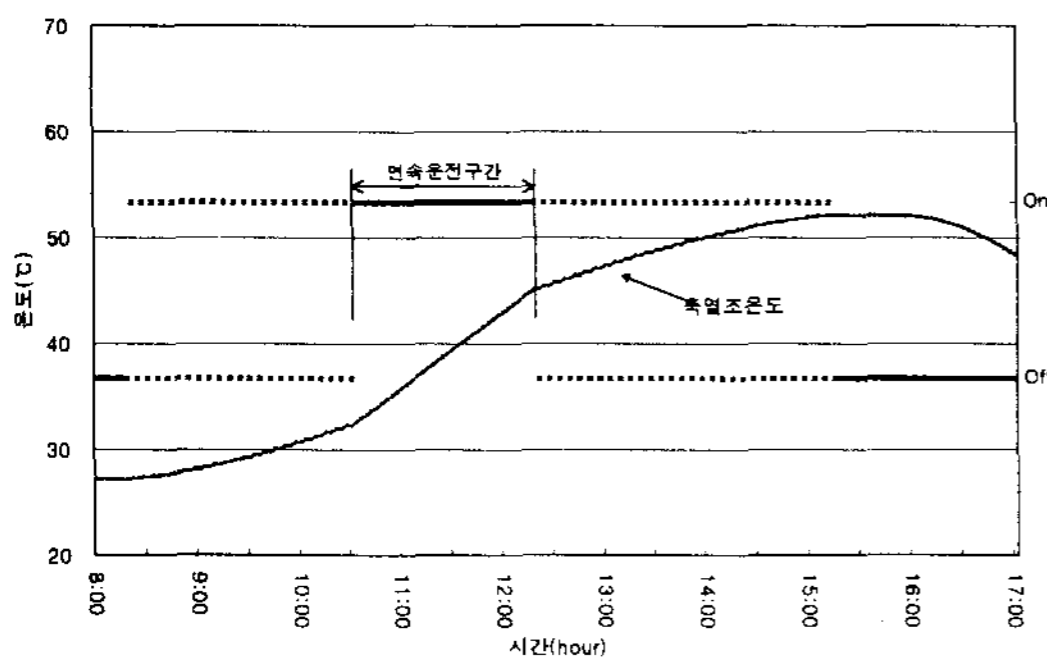


Fig. 8. On/Off condition : 20/10°C

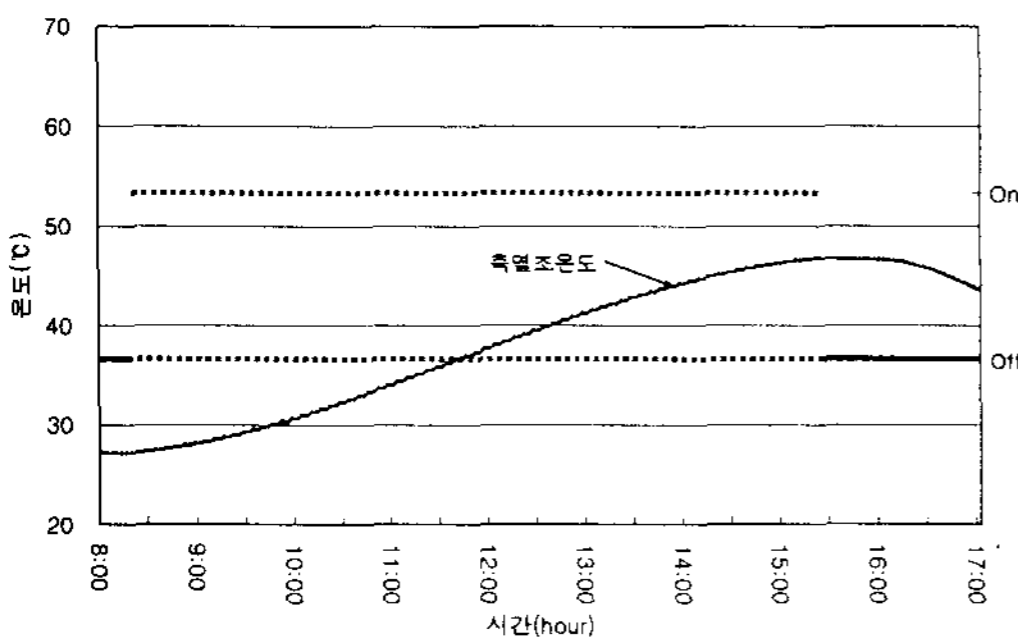


Fig. 9. On/Off condition : 20/16°C

Table 2. 집열순환펌프 ON/OFF 제어에 따른 집열량 및 효율

| 구 분      | 20/4°C | 20/10°C | 20/16°C |
|----------|--------|---------|---------|
| 집열량(kWh) | 49     | 36      | 29      |
| 집열효율(%)  | 34     | 25      | 20      |

결과는 표 2에 있는 바와 같다. 즉, Off 되는 온도가 높으면 높을수록 집열량이 현저하게 감소하고 있음을 알 수 있다.

이러한 현상은 ON/OFF 제어조건을 20/4°C로 했을 경우에는 일사량이 좋은 8:30분부터 14:30분까지 순환펌프가 연속으로 작동하였으나, 20/16°C로 제어를 할 경우 지나치게 빈번하게 집열순환펌프가 On, Off가 반복되고 있음을 알 수 있다. 펌프가 OFF 되는 온도가 높으면 높을수록 집열기 내부의 온도가 높다고 볼수 있기 때문에 이로 인한 열손실이 커지기 때문이다. 즉, 집열기의 성능곡선식 (1)에서  $(T_i - T_a)$ 의 값이 커지기 때문에 집열기로부터 손실되는 열량이 많아지기 때문이다. 이론적으로 보면 OFF 되는 온도는 펌프에 소요되는 전기에너지 비용보다 집열되는 에너지 비용과 같을 때의 온도차가 되어야 한다.

### (2) 집열면적에 따른 영향

태양열시스템의 규모를 결정하는 것은 태양열 시스템을 설계하는데 대단히 중요한 요소중에 하나이다. 시스템 규모는 결국 태양열 집열면적을 의미하는데, 그림 10.에 시뮬레이션에 의한 태양열 집열면적과 집열량 및 태양열의존율과의 관계를 나타내었다. 집열면적이 10m<sup>2</sup>에서 35m<sup>2</sup>까지 변화할 경우 집열량의 변화는 그림 10.에서 보는바와 같다. 적은 집열면적에서는 집열면적이 증가함에 따라 집열량의 증가도 크지만 집열면적이 클수록 그 증가율은 크게 둔화되고 있음을 알 수 있다. 즉, 태양열 의존율이 증가할수록 태양열 시스템의 집열효율은 떨어지기 때문이다. 태양열 시스템은 이와 같이 태양열의존율과 집열면적간의 관계를 고려해서 적정하게 집열면적이 결정되어야 한다. 물론 시스템 규모를 결정하는데 중요한 지표가 되는 것은 경제성분석이 결과이지만 태양열 의존율도 반드시 고려되어야 한다. 이 결과로부터 적정 태양열 집열면적은 의존율이 급격하게 감소되는 20m<sup>2</sup> 내외가 되는 것으로 사료된다.



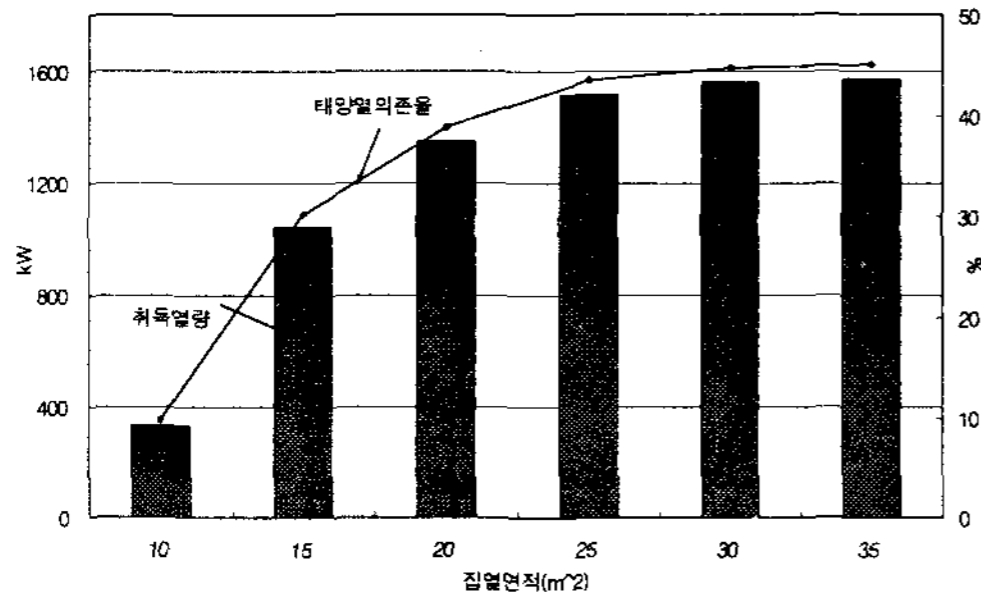


Fig. 10. Influence of collector area

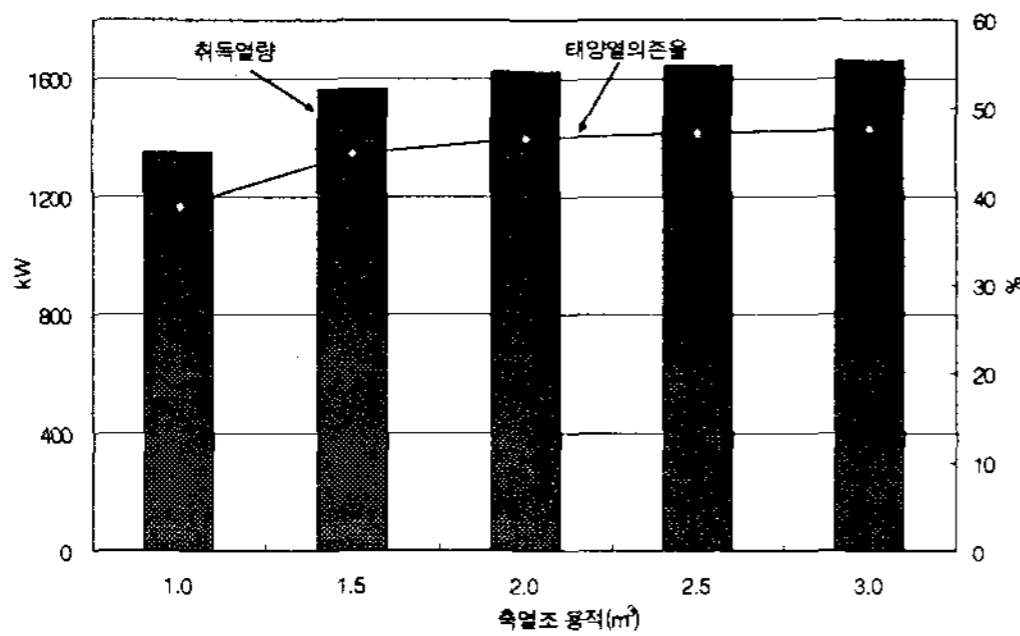


Fig. 11. Influence of solar storage tank volume

(2) 축열조 용적

태양열 축열조는 결국 부하와 태양열 집열량 간의 조화를 위해서 필요한 중요한 요소이다. 그림 11.은 축열조 용적 변화에 따른 태양열의존율과 집열량을 보여주는 그래프이다. 축열조 용적이 증가함에 따라 태양열의존율과 집열량이 증가하지만 증가율이 점차 감소하고 있음을 알 수 있다.

즉, 축열조 용적이 1.5m<sup>3</sup> 이후로는 거의 변화 없음을 알 수 있다. 이러한 경향은 집열면적의 영향에서와 유사하며, 대략적으로 볼 때 축열조 용적은 1.5m<sup>3</sup>를 초과할 경우 시스템 성능증가에 큰 도움이 없음을 알 수 있다.

그림 12.는 참고로 태양열 집열량과 열부하와의 관계를 나타낸 것으로 축열조의 용량은 바로 열부하보다 큰 집열량을 축열하는데 사용되는 것으로 축열조의 적정 용량은 열부하 분포에 절대

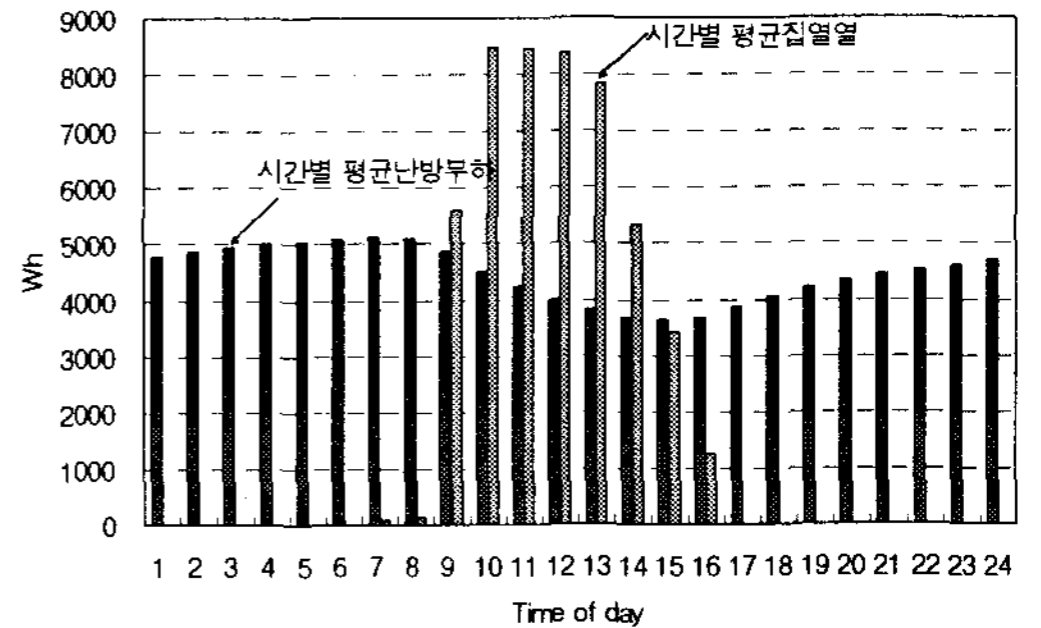


Fig. 12. Hourly heating load and collecting energy

적으로 지배적이라 할 수 있다. 따라서 부하가 야간에 집중되어 있는 분야에보다 주간에 많은 곳에 적용될 경우 축열조 용적이 적게 설계될 수가 있다.

5. 결 론

주택에 설치된 태양열 난방 및 온수급탕시스템에 대한 실증시험과 시뮬레이션을 통하여 태양열 시스템에 대한 분석을 실시하였다. 시뮬레이션용 태양열 시스템 모델은 TRNSYS를 이용하였으며, 신뢰성 검토를 위해서 실험결과와 비교 검토하였다. 이 결과 본 연구에서 개발된 태양열 난방 및 온수급탕 용 태양열 시스템용 시뮬레이션 프로그램의 분석 결과가 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타나 신뢰성이 입증되었다. 본 연구에서 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 시스템 성능에 중용한 영향을 미치는 요소 즉, 집열면적, 제어방법, 축열조 용적에 대해서 분석하였다. 분석은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 집열매체 순환 펌프의 ON/OFF 차온제어는 시스템 성능에 중요한 영향을 미치며, 특히 OFF 온도가 클수록 집열성능이 크게 저하된다.



- 집열면적은 태양의존율이 낮은 영역에서는 집열면적 증가에 따라 태양열 집열량증가율이 크나 의존율이 증가할수록 증가율이 크게 감소된다.
- 축열조 용적이 태양열 시스템 성능에 미치는 영향도 축열조 용적이 적은 부근에서는 축열조 용적 증가에 따른 태양열 집열량 증가율이 크나 일정용적 이후에는 급격히 감소함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Solar energy laortory, "TRNSYS MANUAL" Univ, of Wisconsin Madison, 1944
2. J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar Energy Thermal Processs", Wiley, New York, 1974.
3. 백남춘외 4인, "태양열 및 외 열원식 히트펌프 시스템 시뮬레이션", 태양에너지 Vol.20. No.3, 2000, pp17~24