

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 25, No. 2, 2005

차온제어기의 On-Off 온도설정에 따른 태양열 시스템 열성능

신우철*, 백남춘**

*대전대학교 건축학과(shinuc@dju.ac.kr),
**한국에너지기술연구원 태양열연구센터(baek@kier.re.kr)

Thermal Performance of Solar Thermal System by On-Off Differential Temperature of Differential Temperature Controller

Shin, U-Cheul*, Baek Nam-Choon**

*Dept. of Architectural Engineering, Daejeon University(shinuc@dju.ac.kr),
**Korea Institute of Energy Research, Solar thermal Research Center(baek@kier.re.kr)

Abstract

On-off differential controller is one of the very important components which affect the system performance of the active solar thermal system. In this study, analyses were made regarding the influence of "on-off" setting temperature on the system efficiency and on the electrical consumption by circulation pump. This study was performed by experiment as well as the computer simulation using TRNSYS program. The simulation system was developed in this study was verified the its reliability by the experimental results. As a results, the turn off temperature(ΔT_{off}) is much more influence than the turn on temperature(ΔT_{on}) on the system efficiency. It is more clear and sensitivity in winter season. Finally the optimum on-off setting value and the system on-off pattern according to the several different kind of system was also represented.

Keywords : 태양열 시스템(Solar Thermal System), 차온제어(Differential Temperature Controller), TRNSYS

기 호 설 명

- A_o : 집열기 면적(m^2)
- C_p : 열매체의 비열($kJ/kg^\circ C$)
- E_p : 펌프 소비동력(kJ/h)
- E_s : 태양열 취득열량(kJ/h)
- $F_R U_L$: 집열기 열손실계수($kJ/m^2h^\circ C$)
- I_T : 집열면 총 일사량(kJ/h)
- \dot{m} : 펌프의 질량유량(kg/h)
- η : 태양열시스템효율

1. 서 론

일반적으로 사용되는 태양열 시스템의 제어기는 차온제어기와 비례제어기로 나눌 수 있다. 비례 제어기는 순환펌프의 속도를 제어하여 집열유량을 조정함으로써 집열기 출구온도를 일정하게 유지해주는 것으로, 차온 제어기에 비해 상대적으로 정밀 제어가 요구된다. 이에 반해 차온제어기는 집열기의 유효 집열량에 따라 순환펌프의 작동과 중지(On-Off)를 제어하는 것으로, 대부분의 태양열 시스템에 이 차온제어장치가 사용되고 있다. 현재 까지 제어기의 조작과 관련하여 일사량, 외기온 등 기상조건이나 시스템(구성, 용량, 용도, 열부하 등)에 따른 On-Off 온도설정 지침에 대한 상세한 연구결과는 없는 것으로 파악되며, 대략적인 설정 온도 범위만 제시된 상태에서 사용자가 임의대로 결정하고 있는 실정이다. 따라서 시스템에 적합한 제어가 되지 않아 이로 인한 효율저하가 예상되고 있다. 따라서 본 연구에서는 차온 제어장치의 On-Off 온도설정값이 시스템 열성능에 미치는 영향을 분석하여 온도설정에 필요한 제반 정보 및 기준치를 제시하고자 한다.

2. 태양열 시스템의 제어

태양열 시스템의 작동은 태양열 집열 및 축열

펌프의 On-Off 제어를 통해서 이루어진다. 이 On-Off 제어에는 펌프의 잦은 On-Off 작동을 피하기 위해 히스테리시스(hysteresis)가 있는 차온방식이 사용되고 있다. 이 제어방식은 제어함수 값, γ_o 을 1 또는 0으로 발생시키는데, 표 1과 같이 이 값은 두 개의 dead band 온도차, ΔT_{on} 와 ΔT_{off} 을 비교하여 고온측 온도, T_H 와 저온측 온도, T_L 의 차에 따른 함수 값으로 결정되며, 새로운 γ_o 은 이전 제어함수 값, γ_i 에 좌우된다. 일반적으로 고온측 온도와 저온측 온도는 각각 집열기 출구온도와 축열조 하단부의 온도를 기준으로 한다.

표 1. 차온제어방식의 제어함수

제 어 조 건		제어함수
$\gamma_i = 1$	$\Delta T_{off} \leq T_H - T_L$	$\gamma_o = 1$
	$\Delta T_{off} > T_H - T_L$	$\gamma_o = 0$
$\gamma_i = 0$	$\Delta T_{on} \leq T_H - T_L$	$\gamma_o = 1$
	$\Delta T_{on} > T_H - T_L$	$\gamma_o = 0$

Duffie와 Beckman은 집열량을 극대화하기 위한 ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 의 관계식을 다음과 같이 제안하고 있다[1].

$$\Delta T_{off} \leq \frac{A_c F_R U_L}{\dot{m} C_p} \Delta T_{on} \quad (1)$$

식 (1)을 근거로 보면 ΔT_{on} 이 작을 때 ΔT_{off} 또한 작게 설정될 수 있다. 이 경우 제어기의 정밀 제어가 요구되며, 펌프의 연속가동으로 인한 소비전력 증가로 인해 시스템 효율저하가 발생할 수 있다. ΔT_{off} 를 식 (1)의 제안 값 보다 높게 설정할 경우 펌프의 On-Off 작동이 필요이상으로 빈번해질 우려가 높다. 한편 ΔT_{on} 이 큰 경우

ΔT_{off} 를 상대적으로 높게 설정할 수 있다. 이 때 집열량은 다소 감소하나 펌프동력을 고려하면 시스템 효율은 증가 될 수도 있다.

이 외에 식 (1)에서 알 수 있는바와 같이 ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 의 관계는 집열기의 열손실계수 ($F_R U_L$)와 집열면적당 유량(\dot{m})이 중요한 영향을 미침을 알 수 있다. 즉, $F_R U_L$ 이 작을수록 그리고 \dot{m} 이 클수록 ΔT_{off} 값은 작아져야 한다.

태양열 시스템 효율, η 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{\int E_s dt - \int E_p dt}{\int I_T dt} \quad (2)$$

3. 이론해석의 타당성 검토

본 연구에서 제어조건에 따른 시스템의 열성능을 해석하기 위하여 TRNSYS[2]를 이용하였다. 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여 대전 D 대학에 설치된 실험용 태양열 시스템을 사용하였으며, 그림 1과 표 2는 이 태양열 시스템의 계통도와 시스템 사양을 나타낸 것이다. 이 시스템은 온수급탕용의 밀폐형 부동액 방식으로 보조열원 장치는 설치되어 있지 않다.

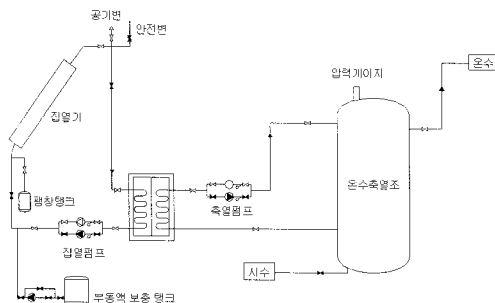


그림 1. 실험용 태양열 급탕 시스템

제어장치의 설정조건에 따른 실험은 표 3과 같이 펌프유량과 ΔT_{on} 을 일정하게 유지한 상태에서 2가지 ΔT_{off} 에 대하여 실시하였다. 그림 2는 실험이 실시된 2002년 4월 20일과 5월 11일의 외기온 및 일사분포를 나타낸 것이다. 외기온은 다소 차이가 있으나 일사분포는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

표 2. 시스템 사양

구분	항목	사양
집열기	FR(τ_a) _n	0.71
	FRUL	23kJ/m ² h ^o C
	경사각	45 ^o
	향	정남향
축열조	집열면적	11.05 m ²
	형식	중형
	용량	1.5m ³
열교환기	형식	관형

표 3. 실험조건

구분	측정일시	집열 및 축열 펌프유량	제어설정	
			ΔT_{on}	ΔT_{off}
1차	4월 21일	17 l/min	16 ^o C	2 ^o C
2차	5월 11일	17 l/min	16 ^o C	6 ^o C

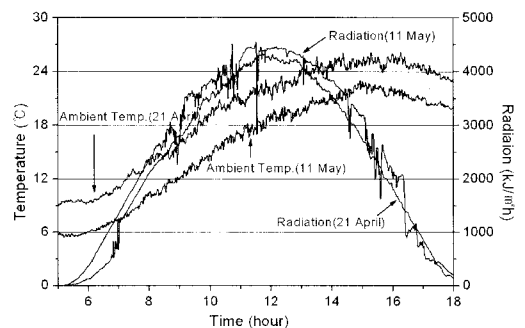


그림 2. 외기온 및 일사분포

그림 3은 $\Delta T_{off} = 2^{\circ}\text{C}$ 로 설정된 1차 실험결과를 나타낸 것이다. 8시부터 오후 5시까지 집열

펌프가 연속 작동하고 있으며 이 시간 동안 집열기 출구와 축열조 하단의 온도차가 2°C 이상을 유지하는 것을 알 수 있다.

그림 4는 실험과 동일한 조건에서 실시된 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 실험과 시뮬레이션에 따른 평균 시스템 효율은 각각 59.3%와 59.0%로서 거의 일치하고 있으며, 펌프작동 및 온수온도의 열적 거동 또한 매우 유사한 경향을 보이고 있다.

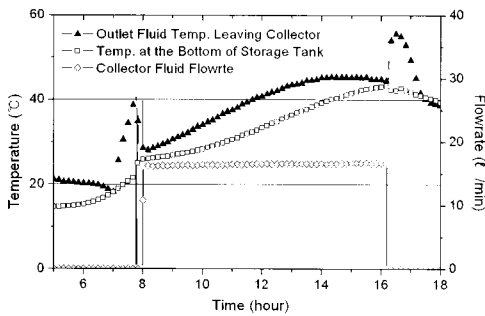


그림 3. 실험에 따른 펌프유량 및 온도분포

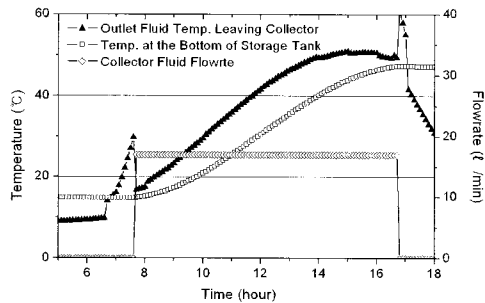


그림 4. 이론해석에 따른 펌프유량 및 온도분포

그림 5와 그림 6은 집열펌프 유량이 17ℓ/min 이고 $\Delta T_{off} = 6^\circ\text{C}$ 일 때 실험 및 시뮬레이션에 따른 결과를 나타낸 것으로, 1차 실험에 비해 ΔT_{off} 가 4°C 높게 설정되었다. 일사량이 다소 적은 오전과 오후의 펌프 작동이 매우 불연속적으로 일어나는 것을 알 수 있다. 실험과 시뮬레이션에 따른 평균 시스템 효율은 각각 48.1%와 51.4%

로서 약 3%의 상대오차를 나타내고 있으며, 열적 거동 또한 유사한 분포를 보이고 있다.

이상의 두 결과에서 알 수 있는 바와 같이 시뮬레이션 모델이 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

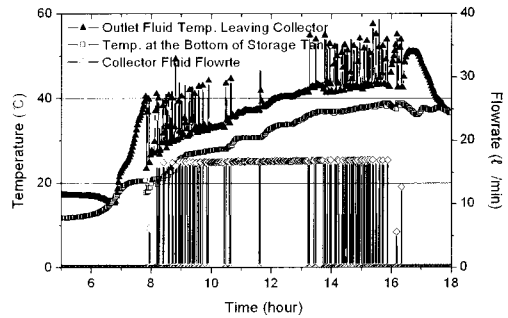


그림 5. 실험에 따른 펌프유량 및 온도분포

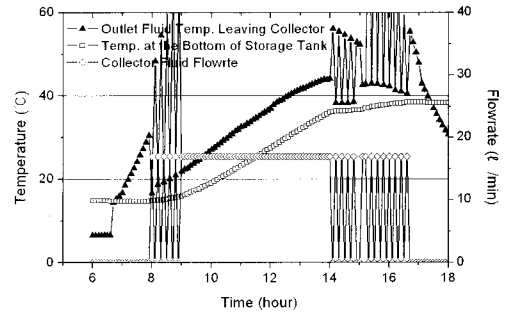


그림 6. 이론해석에 따른 펌프유량 및 온도분포

4. 제어설정 및 시스템 열성능

차온 제어기의 ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 설정에 따른 태양열 급탕시스템의 열성능을 검토하기 위하여 시뮬레이션에 의한 분석을 실시하였다. 시스템 모델은 실험장치와 동일한 온수급탕용 밀폐형 부동액시스템으로 집열부와 축열조 보조열원 승온방식의 이용부를 갖는 태양열 급탕시스템을 기준으로 구성하였으며, 자세한 사양은 표 4와 같다. 온수 부하는 모든 시뮬레이션 조건에 대하여 동일하게 적용하였다.

표 4. 시스템 모델의 사양

구분	항목	사양
집열기	FR(τ_a) _n	0.71
	FRUL	23kJ/m ² h ² °C
	경사각	45°
	향	정남
축열조	집열면적	20m ²
	형식	중형
열교환기	용량	1m ³
	형식	관형
집열펌프	용량	일정효율 70%
	유량	54ℓ/m ³ .hr
축열펌프	동력	0.5kW
	유량	54ℓ/m ³ .hr
온수부하	동력	0.25kW
	급탕사용량	1000ℓ/day
	급탕온도	50°C

태양열시스템에서 일반적으로 많이 사용하고 값은 ΔT_{on} 이 12°C 전후, 그리고 ΔT_{off} 가 2~4°C 내외가 된다. 따라서 본 분석에서는 ΔT_{on} 을 10°C와 20°C, 그리고 ΔT_{off} 를 0~6°C 범위의 값에 따른 태양열시스템의 열성능을 검토하였다. ΔT_{on} 가 10°C와 20°C일 때 식 (1)에 따른 ΔT_{off} 의 기준치를 계산하면 각각 1°C와 2°C 이하가 된다.

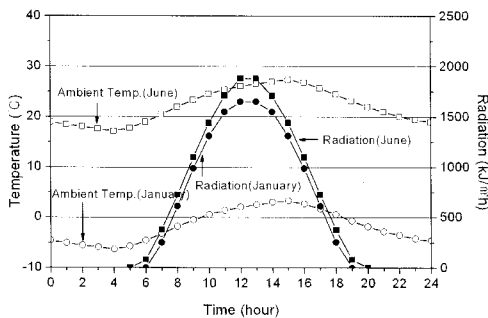


그림 7. 시뮬레이션의 기상조건

그림 7은 시뮬레이션에서 사용된 대전지방의 1월과 6월의 일평균 수평면 일사량 값(일 평균치)

각각 8,258 kJ/m²day과 16,605 kJ/m²day)을 기준으로 정남형 45° 집열기 경사면에 대한 일사량 분포와 외기온도 분포 값을 나타내고 있다(3).

그림 8는 ΔT_{on} 이 10°C와 20°C일 때 ΔT_{off} 의 변화에 따른 1월과 6월의 집열량을 나타낸 것이다.

6월의 경우 ΔT_{on} 의 변화에 따른 집열량의 차이는 거의 없으나 1월의 경우 ΔT_{on} 이 10°C일 때 $\Delta T_{on} = 20°C$ 에 비해 집열량이 약간 많은 것으로 나타났으며, ΔT_{off} 가 클수록 그 차가 점차 증가하여 $\Delta T_{off} 6°C$ 에서는 약 5% 정도의 차이를 보이고 있다. 한편 ΔT_{off} 의 변화가 집열량에 미치는 영향은 ΔT_{on} 보다 비교적 큰 것으로 나타났으며, ΔT_{on} 의 경우와 동일하게 하절기보다는 동절기에 그 영향이 큰 것을 알 수 있다. ΔT_{off} 가 증가할수록 집열량이 줄어들며 ΔT_{off} 이 6°C일 때 집열량은 $\Delta T_{off}=0°C$ 에 비해 약 30% 정도 감소하고 있다. 이와 같이 ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 의 변화가 하절기 보다는 동절기에 더 큰 이유는 ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 가 클수록 집열기 내부의 온도가 상승하여 집열기로부터의 열손실량이 증가되기 때문이다.

그림 9는 ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 의 변화에 따른 펌프 작동시간을 나타낸 것이다. 집열량에 비해 ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 의 설정에 따른 펌프의 일 작동시간의 변화가 큰 것을 알 수 있다. $\Delta T_{on} = 10°C$ 이고 $\Delta T_{off} = 6°C$ 일 때 동·하절기 일 작동시간은 각각 3.9시간(1월)과 7.3시간(6월)으로서 $\Delta T_{off} = 0°C$ 에 비해 51%와 34% 감소하고 있다. ΔT_{on} 이 20°C일 때 펌프의 작동시간은 $\Delta T_{on} = 10°C$ 에 비해 약 0.3~0.7시간 줄어들고 있으나 동·하절기나 ΔT_{off} 설정에 큰 영향을 받지 않고 있다.

그림 10은 ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 변화에 따른 시스템 효율을 나타낸 것이다. ΔT_{on} 의 변화는 시스템 효율

울에 큰 영향을 미치지 않고 있으나 ΔT_{on} 이 20°C 일 때 시스템 효율이 $\Delta T_{on} = 10^\circ\text{C}$ 에 비해 오히려 높은 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 ΔT_{on} 이 작을수록 집열량에 비해 펌프의 소비동력이 더욱 증가하기 때문에 발생한다. ΔT_{off} 에 따른 시스템 효율은 앞서 그림 8의 집열량과의 관계에서 관찰된 바와 같이 외기온이 낮은 동절기에 ΔT_{off} 가 커짐에 따라 점차 저하되고 있다. 1월의 경우 ΔT_{off} 가 6°C일 때 시스템 효율은 약 19.4%로서 ΔT_{off} 가 1°C일 때의 효율(25.4%)에 비해 약 6% 정도 낮아지고 있으나, 6월의 경우에는 2% 미만의 감소에 그치고 있다. 시스템 최고 효율은 하절기의 경우 ΔT_{off} 가 대략 2~3°C 사이일 때, 동절기에는 1~2°C에서 나타났다.

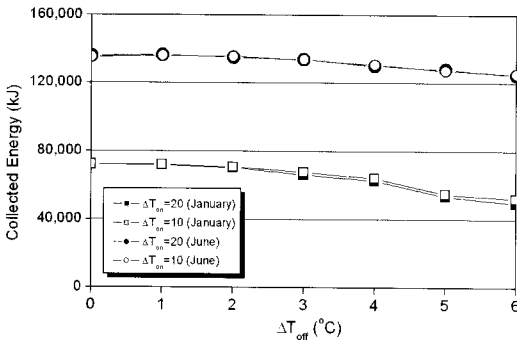


그림 8. ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 에 따른 일일 집열량 비교

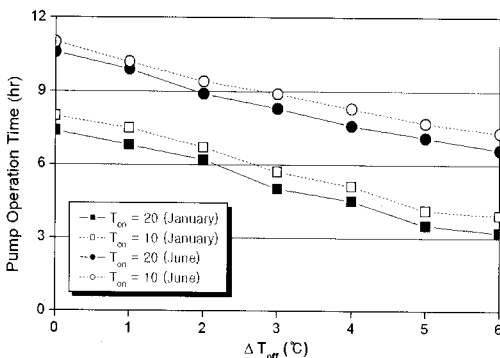


그림 9. ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 에 따른 일 펌프작동시간

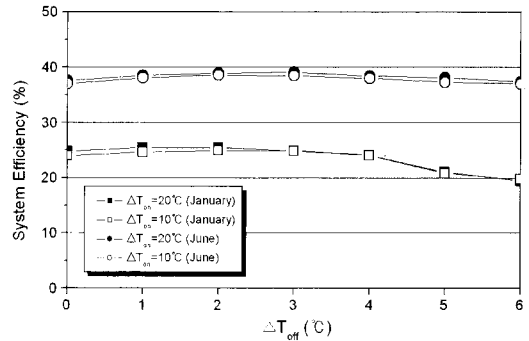


그림 10. ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 에 따른 일 시스템효율

그림 11은 6월의 경우 $\Delta T_{on} = 20^\circ\text{C}$ 일 때 ΔT_{off} 변화에 따른 순환펌프의 On-Off 패턴을 나타낸 것이다. 여기서 출력값(γ) 1과 0은 각각 펌프 작동(On)과 중지(Off)를 의미한다. ΔT_{off} 이 1°C일 때 시스템의 제어는 $\Delta T_{off} = 0^\circ\text{C}$ 와 거의 동일한 형태를 나타내고 있으나, 축열조의 온도가 높아진 오후에는 순환펌프 작동이 보다 조기에 중지되어 펌프의 가동시간이 줄어들고 있다. 그러나 식 (1)에 의한 기준 설정치($\Delta T_{off} \approx 2^\circ\text{C}$) 보다 ΔT_{off} 가 커질수록, 일사량이 적은 아침과 저녁 시간대에 순환펌프의 On-Off 작동이 빈번(불연속 작동)하게 일어나고 있으며, 이러한 현상은 ΔT_{off} 설정값이 클수록 더욱 확대되고 있다.

그림 12는 1월 달의 태양열 시스템 On-Off 제어패턴을 나타낸 것이다. 6월에 비해 일조시간이 짧기 때문에 펌프의 작동시간이 줄어들고 있으며, ΔT_{off} 값이 증가할수록 펌프의 On-Off 작동이 더욱 빈번해 지고 있다. ΔT_{off} 가 5°C 이상인 상태에서는 일사량이 많은 정오 시간대에도 펌프의 불연속 작동이 지속되고 있다. 이것은 외기온이 낮은 상태에서 집열기로부터 손실되는 열량이 증가하기 때문에 발생하는 현상으로서, 이를 방지하기 위해서는 열손실율이 큰 집열기일수록 동절기 ΔT_{off} 설정 값이 하절기에 비해 작아져야 한다.

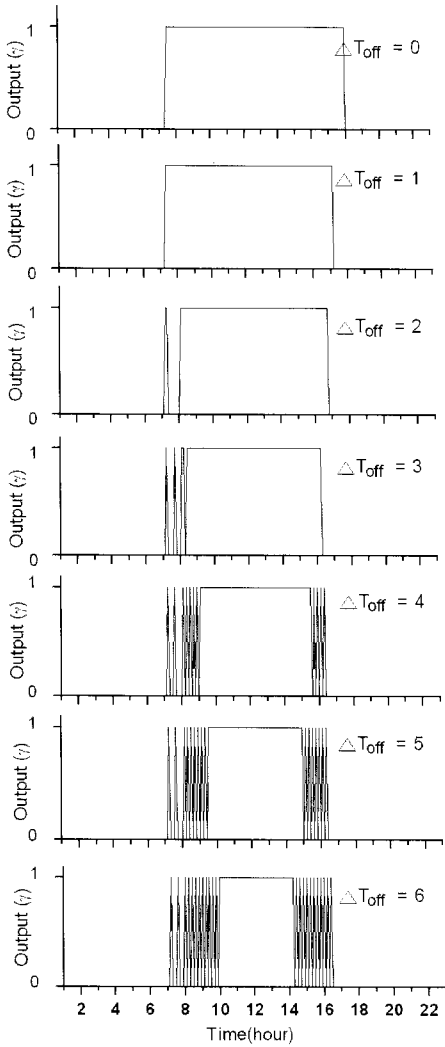


그림 11. ΔT_{off} 변화에 따른 펌프의 On-Off 제어(6월)

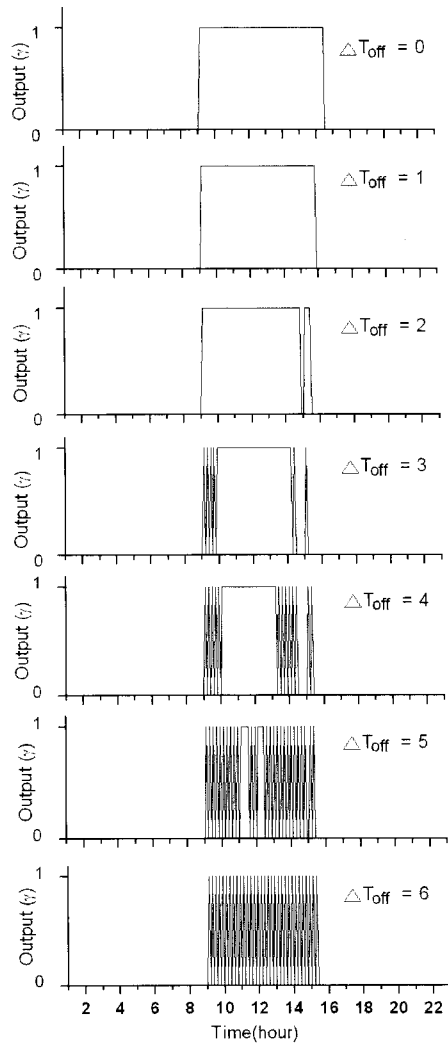


그림 12. ΔT_{off} 변화에 따른 펌프의 On-Off 제어(1월)

5. 결 론

본 연구에서는 태양열 온수급탕 시스템을 대상으로 차온 제어장치의 On-Off 온도 설정값이 시스템 열성능과 펌프 작동시간에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 제어조건에 따른 시스템 열성능을 이론해석하기 위하여 TRNSYS를 이용하였으며, 실험을 통하여 시뮬레이션의 타당성을 검증하

였다. 본 분석에 사용된 모델은 국내·외적으로 가장 많이 사용되고 있는 밀폐형의 부동액시스템으로 외장형 집열 열교환기를 갖는 온수급탕 시스템을 선정하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) ΔT_{on} 의 변화가 시스템 효율에 미치는 영향은 ΔT_{off} 에 비해 상대적으로 크지는 않다. ΔT_{on} 이 작을수록 집열량이 많아지나 펌프

의 소비동력 증가로 인하여 시스템 효율은 오히려 떨어질 우려가 있다.

- (2) ΔT_{off} 가 시스템 효율에 미치는 영향은 하절기에 비해 동절기가 큰 것으로 나타났다. 하절기의 경우 ΔT_{off} 가 대략 2~3℃ 사이일 때 동절기에는 1~2℃에서 시스템 효율이 가장 높게 나타내고 있으며, 그 이상에서는 ΔT_{off} 값이 증가할수록 시스템 효율이 점차 감소한다.
- (3) ΔT_{on} 과 ΔT_{off} 의 설정 값에 따른 순환펌프의 제어패턴 분석결과 ΔT_{off} 가 커질수록, 일사량이 적은 아침과 저녁 시간대에 순환펌프의 On-Off 작동이 불연속적으로 발생하며, 이러한 현상은 외기온이 낮고

ΔT_{off} 설정값이 클수록 더욱 확대되고 있다. 이를 방지하기 위해서는 열손실율이 큰 집열기일수록 동절기 ΔT_{off} 설정 값이 하절기에 비해 작아져야 한다.

참 고 문 헌

1. J.A. Duffie & W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes-2nd ed., Wiley, New York, 1991.
2. TRNSYS 14.2 Reference manual, University of Wisconsin-Madison, 1996.
3. 한국에너지 기술연구소, 國內 日射量 分析·評價 및 데이터 標準化 研究, 1998.