[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 31, No. 5, 2011
ISSN 1598-6411

유량제어방식에 따른 태양열 급탕시스템의 열성능 평가

백남춘*, 신우철**

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

Thermal Performance Evaluation of Solar Hot Water System according to Flow Rate Control

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

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

Abstract

In this study, the performance and behavior of solar heating system according to the system control scheme, variable flow control (proportional control) and constant flow control (on-off control) was carried out by experiment. The on-off control is used generally for solar thermal system by now. But the proportional control is used for the solar district heating system which is supplied the higher temperature of water than that of desired. The proportional control logic that pump speed is varied in an attempt to maintain a specified outlet temperature of solar heating system was developed and tested for the use widely for the small and medium solar thermal system. The results are as following. First, the proportional controller which is made here could be adopted the characteristics for setting temperature control. Second, the proportional control is better than the on-off control in the side of the performance of thermal stratification in storage tank. Third, the operating energy(electricity consumption by pump) of solar thermal system can be saved more than 60% using the proportional control comparing to the on-off control.

Keywords : 변유량 제어(Variable flow control), 정유량 제어(Fixed flow control), 차온제어(Temperature difference control), 태양열 급탕 시스템(Solar water heating system)

기 호 설 명

A_o	: 집열기 면적 (㎡)	$F_R U_L$	: 열손실계수 (W/㎡・K)
C_p	: 열매체 비열 (kJ/kg・K)	$\dot{m}$	: 열매체 유량 (kg/h)
		k	: 비례증분계수

투고일자 : 2011년 9월 14일, 심사일자 : 2011년 9월 15일, 게재확정일자 : 2011년 10월 24일
교신저자 : 신우철(shinuc@dju.ac.kr)

$P_{rpm,n}$: 현재 출력신호
$P_{rpm,o}$: 이전 출력신호
T_n : 취득부(축열조입구)온도 (℃)
T_{set} : 설정온도 (℃)
γ : 펌프제어신호

1. 서 론

태양열시스템 제어는 단순히 펌프의 ON-OFF만 제어하는 방법(이하 정유량 제어)와 집열매체 순환유량까지도 제어하는 변유량 제어가 있다. 대부분의 태양열시스템은 제어장치의 구성이 단순하고 신뢰성이 입증된 정유량 제어가 사용되고 있다. 이 방식은 순환유량, 집열기 성능 등 여러 가지 요소에 따른 On-Off 온도 설정값이 최적화되지 않을 경우 시스템 효율 저하는 물론 펌프동력이 많이 들어갈 수 있다.[1] 또한 산업공정열이나 지역난방시스템에 적용될 때 원하는 온도를 공급하는 정온공급 제어가 불가능하며, 열매체 배관의 마찰손실 수두에 따라 순환펌프의 소비동력이 증가할 우려가 있다.

이에 반해 변유량 제어는 열매체 순환펌프의 회전수를 제어하여 유량을 조정함으로서 취득부 즉 태양열 열교환기의 1차측 입구온도(집열기 출구)나 2차측 출구온도(축열조 입구)를 일정하게 유지해주는 방식이다. 그러나 이 방식은 정유량 제어에 비해 상대적으로 복잡하고 고가의 정밀 제어가 필요하다는 인식하에 국내에서 정확한 제어 알고리즘과 실증자료가 없는 상태로서 지역난방시스템의 난방수 승온용 태양열 시스템[2]을 제외하고 일반 태양열 시스템에 적용된 사례는 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 태양열 급탕시스템의 변유량 제어에 대한 알고리즘을 정립하고 실증실험을 통하여 변유량 제어방식과 정유량 제어방식에 따른 시스템의 열성능을 비교·분석하였다.

2. 이론해석

2.1 차온제어

정유량 제어의 기반이 되는 차온제어(temperature differential control)는 태양열 집열펌프와 축열펌프의 잦은 동작과 정지를 피하기 위해 히스테리시스(hysteresis)를 적용하는 것이 일반적인 제어방식이다. 이 제어방식은 제어함수 값, γ_o를 1 또는 0으로 발생시키는데, 표 1과 같이 두 개의 dead band 온도차, ΔT_{on}과 ΔT_{off}[1]를 비교하여 고온측 온도, T_H와 저온측 온도, T_L의 차에 따른 함수 값으로 결정되며, 새로운 γ_o는 이전 제어값, γ_i에 좌우된다. 고온측 온도는 집열기의 상부온도를 사용하고 저온측의 온도는 축열조의 하단부 온도를 사용한다.

표 1. 차온제어방식의 제어함수

제어조건		제어함수
$\gamma_i = 1$	$\Delta T_{off} \le T_H - T_L$	$\gamma_o = 1$
	$\Delta T_{off} > T_H - T_L$	$\gamma_o = 0$
$\gamma_i = 0$	$\Delta T_{on} \le T_H - T_L$	$\gamma_o = 1$
	$\Delta T_{on} > T_H - T_L$	$\gamma_o = 0$

또한 Duffie와 Beckman은 집열량을 극대화하기 위한 ΔT_{on}과 ΔT_{off}의 관계식을 다음과 같이 제안하고 있다.[3]

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

2.2 비례제어

불균일한 밀도를 갖는 태양복사에너지의 특성상 태양열 집열기의 출구온도를 일정하게 유지하기 위해서는 열매체 순환펌프의 회전수(RPM)를 제어하여 유량을 조정하게 된다. 본 연구에서는 비례제어(proportional control)를 이용하여 회전수를 제어하였다.

식 2는 펌프의 회전수제어를 위한 제어기 출력신호(회전수)를 나타낸 것이다. 여기서 비례증분계수, k는 시스템의 설치여건에 따라 현장에서 학습된 값으로 결정된다.

$$P_{rpm,n} = P_{rpm,o} + (T_n - T_{set}) \times k \qquad (2)$$

3. 실증시험장치

3.1 시스템 개요

실증시험은 기존에 D대학에 설치되어 있는 시험 및 교육용 태양열시스템을 보완하여 사용하였다. 그림 1과 그림 2는 실증시험용 태양열 시스템의 전경과 시스템 계통도를 나타낸 것이다. 본 태양열 시스템은 난방 및 급탕이 동시에 또는 별도로 실험이 가능하도록 시스템이 구성되었다.

그림 1. 태양열 시스템 전경

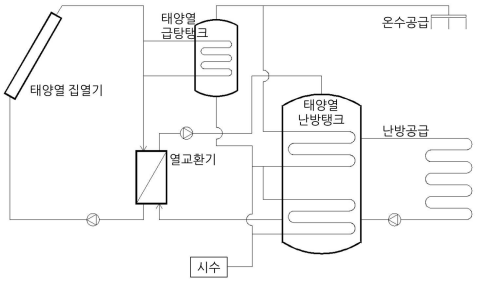

그림 2. 태양열 시스템 계통도

표 2는 본 태양열 시스템의 개요를 나타낸 것이다. 2단 6열의 배열로 총 24㎡의 집열기 면적을 갖고 있으며, 열매체의 배관은 밀폐식을 사용하고 있다.

표 2. 태양열시스템 개요

구분	내용
집열기 면적	24㎡
집열기 경사각/방위각	50° / 0°
축열조 용량	5㎥
열매체	40% Propylene glycol

3.2 모니터링 및 제어

그림 3은 시스템의 제어설정과 운전감시를 위한 원격 모니터링 화면을 나타낸 것이다. 설정된 제어조건에 따라 시스템의 작동상태를 실시간으로 표시하게 되며, 안전을 위해 모니터링 및 제어 시스템에 이상이 발생 시 제어권한이 PLC 판넬로 넘어갈 수 있도록 설계하였다.

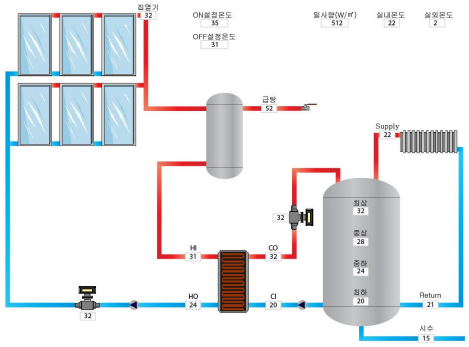

그림 3. 태양열 모니터링 시스템

표 3은 원격 제어 및 모니터링을 위해 설치된 계측장비와 측정 센서 개요를 나타낸 것이다.

펌프의 회전수 제어는 전압에 의한 방법과 전기의 주파수(Hz)을 제어하는 두 가지 방법으로 나뉘는데 본 실험에서는 후자의 방법을 사용하였다.

식 2에 의해 제어기의 출력신호가 결정되면 이 신호는 인버터에 출력되고, 인버터의

회전수 변위 신호에 따라 순환펌프의 유량이 조정된다. 그림 4는 현장에 설치된 펌프와 인버터를 나타낸 것이다.

표 3. 측정장비 및 센서 개요

구분	장비	수량
데이터수집	HP34970A, Agilent	1
온도	RTD Thermometer	12
유량	DN25 JIS 20K, ENDRESS+HAUSER	2
일사	EPPLEY RADIOMETER ESP, EPPLEY LAB. INC	1
전력측정	2169-21, HIOKI	

그림 4. 인버터 및 볼류트 펌프

그림 5는 본 태양열 시스템에서 제어기 출력신호(회전수)에 따른 펌프의 유량변화와 소비전력을 나타낸 것이다. 유량의 변화가 회전수에 거의 비례하는 것을 알 수 있다. 여기서 동일한 펌프용량에도 집열유량이 축열유량 보다 적은 이유는 집열부의 양정이 축열부에 비해 더 크기 때문이다.

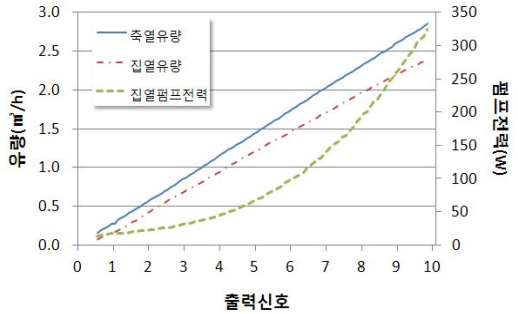

그림 5. 제어기 출력신호에 따른 펌프의 유량 및 소비전력

4. 시스템의 열성능 분석

정유량 제어와 변유량 제어에 따른 태양열 급탕시스템의 열성능을 비교·분석하기 위해 외기조건이 유사한 날들의 실험 데이타를 선정하여 분석하였다.

표 4는 제어방식에 따른 시험조건을 정리한 것이다. 변유량 제어의 경우 순환펌프는 정지상태에서 작동될 때 차온제어로 구동되며 안정적인 시스템 운전을 보장하기 위하여 최저 설정유량에 따른 지속운전시간을 갖게 되고, 이후 취득부(열교환기 2차측 출구온도) 즉 축열조 입구온도를 일정하게 유지하기 위해 비례제어에 의한 변유량 운전이 이루어지게 된다. 한편 정유량 제어에서 순환유량은 일정하며, 집열기 단위면적당 54kg/h를 기준으로 설정하였다.

표 4 제어방식에 따른 시험조건

구분		내용	외기조건
변유량 제어	취득부 설정온도	35℃	총 일사량 : 5,048kWh 평균 외기온 : -3.8℃
	최저유량	0.3㎥/h	
	최대유량	2.0㎥/h	
정유량 제어	ΔT_{on}	10℃	총 일사량 : 4,982Wh 평균 외기온 : -5.5℃
	ΔT_{off}	2℃	
	순환유량	1.2㎥/h	

그림 6은 정유량 제어에 따른 취득부의 온도와 집열면 총 일사량을 나타낸 것이다. 일사량 증가에 따라 취득부의 온도가 지속적으로 상승하고 있으나, 일사량이 급격히 감소하는 시점부터 취득부의 온도 또한 점차 낮아지는 것을 알 수 있다. 이와 같이 상대적으로 낮은 온수가 유입될 경우 축열조의 성층화된 온도분포가 유지되기 어렵게 된다.

그림 7은 변유량 제어에 따른 취득부의 온도와 집열면 총 일사량을 나타낸 것이다. 일사량이 적은 오전 초반 취득부의 온도는 설정

조건에 도달하지 못한 상태에서 최저유량으로 작동하고 있으나 일사량이 점차 증가하여 일정값 이상으로 됨에 따라 취득부 온도는 설정온도(여기서는 33℃ 임)에 맞게 제어되고 있다. 또한 일사량이 감소하는 오후 후반에도 취득부의 온도가 설정온도로 적절하게 유지되다가 펌프가 정지됨을 알 수 있다. 즉 태양열 급탕시스템의 변유량 제어방식이 효과적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

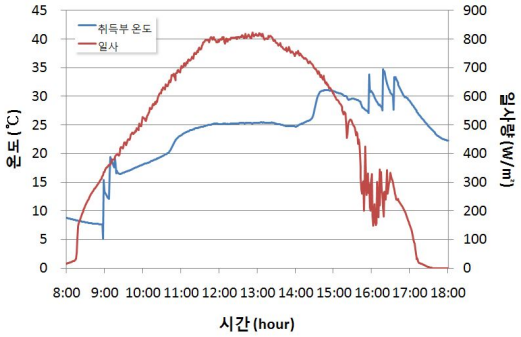

그림 6. 정유량 제어에 따른 취득부의 온도변화

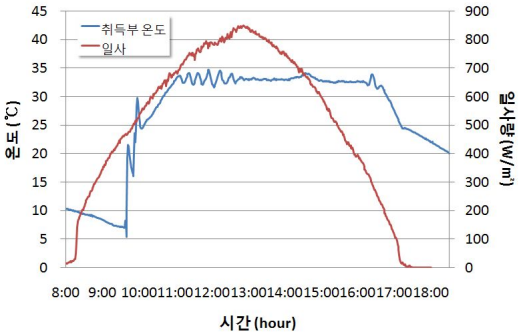

그림 7. 비례제어에 따른 취득부 온도변화

그림 8과와 그림 9는 정유량 제어 및 변유량 제어에 따른 축열조 온도분포를 각각 나타낸 것이다. 정유량 제어의 경우 축열조의 온수는 온도 성층화 기능이 약해진 상태(온수가 혼합된 상태)에서 전반적으로 온도가 올라가고 있는 반면, 변유량 제어에서는 온도 성층화가 뚜렷한 상태로 축열조의 온도가 상승하는 것을 알 수 있다.

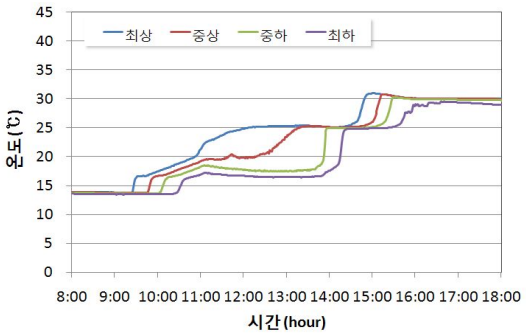

그림 8. 정유량 제어의 축열조 온도분포

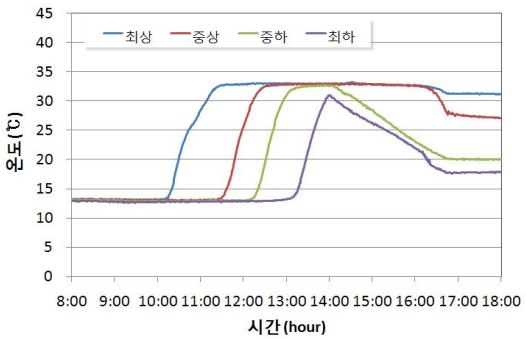

그림 9. 비례제어의 축열조 온도분포

그림 10은 제어방식에 따른 순간효율을 비교한 것이다. 여기서 순간효율은 집열면의 총 일사에 대한 열교환기 2차측 취득열량의 비를 표시한다. 변유량 제어의 순간효율의 변화가 정유량 제어와 큰 차이가 없으며, 평균 순간효율 또한 각각 29.4%와 30.4%로서 거의 동일한 것으로 나타났다.

그림 11은 제어방식에 따른 집열펌프의 소비전력을 측정한 것이다. 정유량 제어방식은 펌프의 소비전력이 일정한 반면 변유량 제어의 경우에는 변유량에 따라 펌프의 소비전력 또한 변화하는 것을 알 수 있다. 일일동안 변유량 제어의 총 소비전력은 177Wh로서 정유량 제어 454Wh에 비해 약 60% 이상 감소하고 있다. 이와 같이 변유량 제어 방식은 정유량 제어 방식에 비해 시스템 구동에너지를 상당히 많이 절감할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.

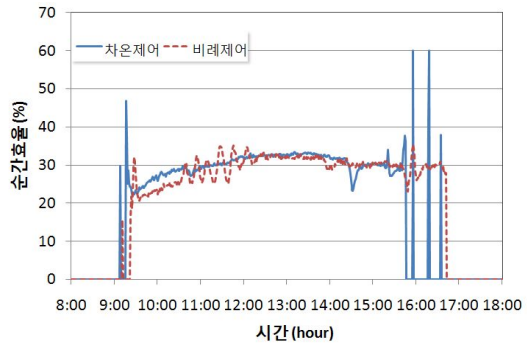

그림 10. 제어방식에 따른 순간효율

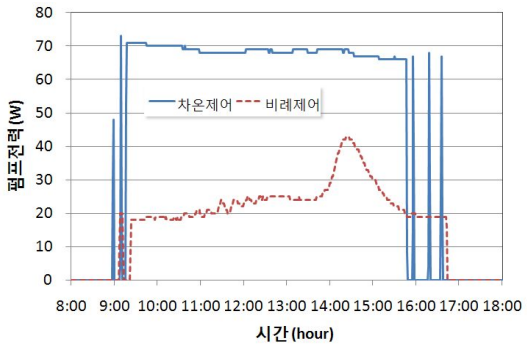

그림 11. 제어방식에 따른 집열펌프전력

5. 결 론

본 연구에서는 태양열 급탕시스템의 변유량 제어에 대한 알고리즘을 정립하고 실증실험을 통하여 정유량 제어방식에 따른 시스템의 열성능을 비교·분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 태양열 급탕시스템의 변유량 제어를 위하여 비례제어방식을 도입하였으며, 불규칙한 외기조건에도 불구하고 설정된 온도에 대한 추종(응답성)하는데 문제점이 없는 것으로 분석되었다.

둘째, 정유량 제어에 비해서 변유량 제어가 축열조의 온도성층화 성능이 크게 향상되는 것으로 나타났다.

셋째, 펌프의 소비전력(시스템 구동에너지)은 정유량 제어에 비해 변유량 제어가 약 60%이상 감소하는 것으로 나타났으며, 이를 감안할 경우 시스템 효율은 변유량 제어 방식이 열성능 측면에서 우수함을 알 수 있다.

넷째, 그러나 시스템 구동에너지를 제외한 태양열 집열성능에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타냈다.

후 기

본 연구는 산업기술연구회 연구비 지원으로 수행되었음 (과제번호 : GP2010-0003)

참 고 문 헌

1. 신우철 외 1인, “차온제어기의 On-Off온도 설정에 따른 태양열 시스템 열성능”, 태양에너지학회 논문집, pp. 1-8, Vol. 25, No. 2, 2005.
2. 백남춘 외 4인, “태양열 축열조가 없는 변유량 제어방식의 지역난방용 태양열 시스템 실증실험연구” 태양에너지학회 논문집, pp. 21-27, Vol. 8, No. 5, 2008.
3. J. A. Duffie, W. A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, JONE WILEY & SONS, INC.