

수직벽면형 무동력 태양열 시스템 작동성능에 관한 실험적 연구

An experimental study on the operating performance of facade installed natural circulation type solar thermal system

백남춘* · 이왕제**† · 이진국*** · 이순명****

Baek Nam-Choon* · Lee Wang-Je**† · Lee Jin-Kook*** · Lee Soon-Myung****

(Received 28 April 2015; accepted 14 July 2015)

Abstract : The operation of the natural circulation type solar heating systems with facade integrated collector was analyzed by experiment. Two different types of flat plate solar collectors were used for these experiments. One was for the normal flat plate solar collector with the size of 1m*2m and the other was for the large size solar collector with 4m²(1m*4m). The experiments were carried out to investigate the effect of the series or parallel connection method on the performance of the collectors.

As a result, the solar thermal system which is installed on the wall or facade would be applicable for the natural circulation type if the system design reflects various parameters, including collector connecting method(series or parallel), to provide enough vertical height between collector and storage tank, and to reduce pressure loss due to collector and piping network, etc. The natural circulation type of solar thermal system as proposed in this study can increase the system reliability by removing or minimizing the use of the components such as pump, controller, sensors which may cause serious troubles of the system for a long-time operation

Key Words : 자연순환식 태양열시스템(Natural circulation type solar thermal system), 벽면설치형 집열기(Facade installed collector), 집열기 순환유량(Collector circulation flow rate), 태양열시스템 성능(Solar thermal system performance)

**† 이왕제(교신저자) : 한국에너지기술연구원 태양열연구실,
E-mail : lwj3116@kier.re.kr, Tel : 042-860-3535

* 백남춘 : 한국에너지기술연구원 태양열연구실

** 이진국 : 한국에너지기술연구원 태양열연구실

**** 이순명 : 한국에너지기술연구원 태양열연구실

**† Lee Wang-Je(Corresponding author) : Korea Institute of
Energy Research

E-mail : lwj3116@kier.re.kr, Tel : 042-860-3535

* Baek Nam-Choon : Korea Institute of Energy Research

*** Lee Jin-Kook : Korea Institute of Energy Research

**** Lee Soon-Myung : Korea Institute of Energy Research

기 호 설 명

A_c	: 집열기 면적(m^2)
T	: 온도 ($^{\circ}C$)
T_a	: 외기온도 ($^{\circ}C$)
\dot{m}	: 유량 (kg/sec)
P_c	: 집열기 손실수두(mm H_2O)
I_T	: 집열면 일사량(W/m^2)
\dot{q}_c	: 집열율(kcal/hr)
Q_c	: 집열량(kcal)
V_s	: 축열조 용적(m^3)
C_p	: 비열(kcal/kg $\cdot^{\circ}C$)

그리스 문자

ρ	: 밀도(kg/ m^3)
η	: 효율

하첨자

in	: 집열기 입구
s	: 축열조
c	: 집열기
day	: 하루
i	: 입구, i 번째

1. 서 론

태양열시스템은 효율이 높음에도 불구하고 신뢰성 저하로 보급이 크게 위축되고 있다. 태양열시스템의 신뢰성을 저하시키는 원인은 펌프, 제어장치, 센서의 고장으로 인한 문제, 적정 제어조건이 설정되지 못함으로 인한 문제, 일사량이 많은 하절기에 부하가 적어서 발생하는 과열 문제, 정전으로 인해 발생하는 과열 문제 등이 있다. 이로 인해 시스템 상에 여러 가지 문제가 발생하게 된다.

게다가 정부의 건물에너지 관련 정책은 해마다 신재생에너지의 확대·적용을 요구하고 있다.⁽¹⁾ 이에 태양열 집열기나 PV모듈의 경우 건물의 설치면적 및 의장적인 측면 등을 고려하여 건물일체형으로 적용되는 것이 바람직하다.

집열매체의 온도차(밀도차)에 의해 작동되는 자연순환식 태양열 온수기에 대해서는 이미 많은 연구가 있었지만⁽²⁻³⁾ 수직벽면형 자연순환식 태양열시스템(이하 무동력 태양열시스템)에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다. 무동력 태양열시스템은 적절한 설치여건 확보와 적당한 시스템 설계가 이루어진다면 전술한 기존의 태양열시스템의 문제점을 해결할 수 있는 대안 중에 하나로 사료된다. 또한, 수직벽면형 집열시스템은 태양열 집열기를 건물 외장재 역할을 하는 벽면일체형으로도 적용할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 시스템 신뢰성을 크게 개선할 수 있는 수직벽면형 무동력 태양열시스템의 작동성능에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 특히, 국내 규격제품 중에 하나인 평판형 집열기와 대면적 집열기(이하 메가집열기)간의 비교시험과 더불어 집열기 연결방식(직렬, 병렬)에 따른 영향을 분석하여 그 가능성을 입증하고자 한다.

2. 무동력 태양열시스템 시험장치

2.1 무동력 태양열시스템에 영향을 미치는 주요 요소

자연순환에 의해 작동되는 무동력 태양열시스템의 집열매체 순환은 고온과 저온 열매체의 밀도 차에 따른 밀폐 회로에서의 부력과 집열기를 포함한 열매체 순환 배관망에서의 총 압력손실 간의 평형상태에 의해서 이루어진다. 이들을 시스템 상에서 보면 다음 같은

요소들에 의해 영향을 받게 된다.

- 집열기의 열성능 및 압력손실 계수
- 배관의 길이와 관경
- 각종 밸브 개수
- 집열기와 축열조간의 수직거리
- 열교환기에서의 압력손실
- 축열조 온도

태양열 집열기에서의 압력손실은 집열기 내의 지관(riser)과 주관(header)에 따라서 결정되며, 특히 집열기를 통과하는 열매체의 유량에 영향을 받게 된다. 이것은 결국 집열기의 종류와 집열부를 구성하고 있는 집열기 연결방식(직렬 및 병렬)에 의해서 결정되게 된다.

2.2 시험장치 개요

시험장치는 메가집열기와 일반 평판형집열기 2가지에 대해서 그림 1과 같이 시스템을 각각 구성하였으며, 설치된 사진은 그림 2와 같다. 표 1은 시험장치 사양을 정리한 것으로, 집열기와 축열조의 높이차는 축열조 하부를 기준으로 하였다. 시험장치의 배관은 간단한 밸브조작을 통해 직렬과 병렬연결이 가능하도록 구성하였으며, 태양열 집열기와 축열조는 수직벽면(남향)과 건물옥상에 설치하였다.

Table. 1 Specification of experimental set-up

Items	Mega	Flat plate
collector manufacturer	Jehin Co.	
Collector model	-	JH-FA
collector size(m)	1 * 4	1 * 2
collector total area(m ²)	8	8
storage tank volume(ℓ)	500	500
solar heat exchanger type & area	double tank jacket type, 2.22m ²	
Pipe diameter	15mm	
vertical height of storage tank from bottom of collector	14.5m	
vertical hight of storage tank from top of collector	5.3m	

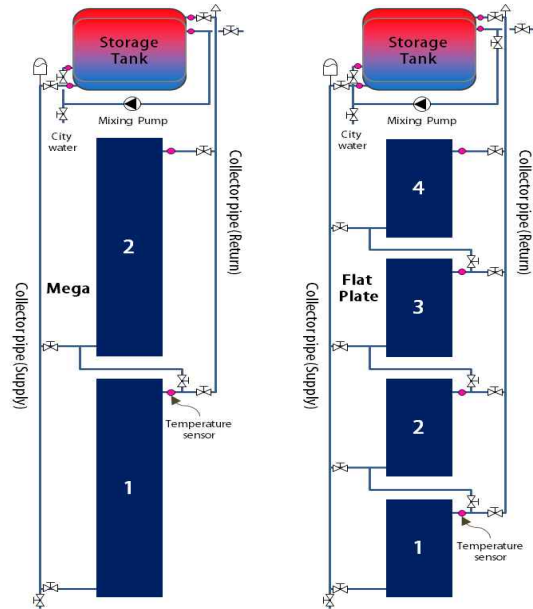


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

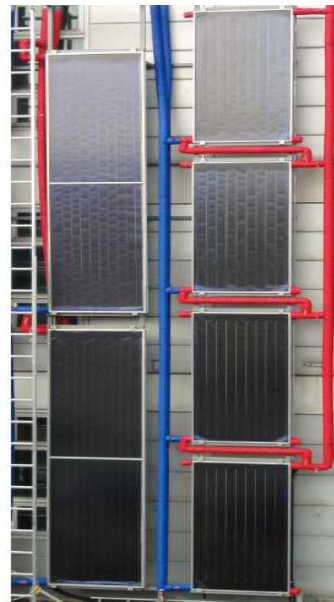


Fig. 2 Photo of experimental set-up

사용된 집열기의 열성능(투과면적 기준) 및 압력저하는 KS B ISO 9806-1“태양열 집열기 시험방법”에 의한 시험결과로 식 (1)-(4)와 같다.

시험결과를 보면 메가집열기에 비해 일반 평판형집열기의 압력손실이 더 큰 것을 알 수 있다.

▶ 메가 집열기

$$\eta_c = 0.778 - 4.795(T_i - T_a)/I_t \quad (1)$$

$$P_c = 2587.5\dot{m}^2 + 208.6\dot{m} + 0.326 \quad (2)$$

▶ 평판형 집열기(모델명 : JH-FA)

$$\eta_c = 0.771 - 5.466(T_i - T_a)/I_t \quad (3)$$

$$P_c = 4830.4\dot{m}^2 + 221.8\dot{m} + 0.614 \quad (4)$$

2.3 집열기 열매체 배관

시험장치에서 중요한 요소 중에 하나인 집열배관의 사이즈를 결정하기 위해서 다음과 같이 설계조건을 설정하였다.

- 집열면 설계 일사강도 (It) : 800W
- 집열기의 집열효율(η) : 40%
- 설계조건하에서의 집열부 입출구 온도차 (ΔT_c) : 20℃ 전후

ΔT_c가 너무 커지면 축열조 하단부 온도가 높을 경우 집열부 출구의 온도는 비등온도 이상이 될 수가 있다. 그러나 너무 작으면 순환 유량이 많아져야 하기 때문에 열매체 순환 계통의 저항을 줄이기 위해서 집열기는 주로 병렬연결로 이루어져야 하며, 집열배관 관경도 커져야 한다. 강제순환식 태양열시스템의 경우 사용온도 및 용도, 시스템 설계 조건 등에 따라서 다르지만 대체적으로 5~20℃ 정도이다. 이러한 설계조건하에서 순환되어야 할 집열면적당 유량(\dot{m}_c)은 식 (5)와 같다.

$$\dot{m}_c = q_{c,max} / (C_p \cdot \Delta T_{c,max} \cdot A_c) = 13.75 (kg/m^2 \cdot hr) \quad (5)$$

여기서

$$q_{c,max} = I_{t,max} \cdot A_c \cdot \eta_{max} = 2,201 (kcal/hr) \quad (6)$$

열매체 배관을 통과하는 집열매체의 설계 유속(v)을 0.2(m/sec)라고 한다면 시간당 110kg/hr 을 통과시키기 위한 배관경(D)은 14mm 정도가 되어야 한다. 본 연구에서는 시중에 판매되는 동관 규격품 중 가장 근접한 15mm를 사용하였다.

2.4 센서설치 및 시험방법

(1) 온도센서 및 일사계

무동력 태양열시스템 작동성을 파악하기 위해 그림 1과 같이 집열부 메인입구와 모든 집열기의 출구배관에 RTD온도센서를 각각 설치하였다. 축열조 내부 온수의 평균온도를 측정하기 위해 축열조 온수 혼합펌프의 입·출구에도 RTD온도센서를 설치하였고, 일사계(ISO 9060에 규정된 등급 I)는 집열면(수직벽면 90°)에 설치하였다.

(2) 측정방법

벽면설치형 무동력 태양열시스템에서 집열기 연결방식(직렬 및 병렬)에 따른 시험을 실시하였다. 시험은 아침부터 저녁까지 수행하였으며, 데이터로거를 통해 모든 온도와 일사강도(누적치 포함)를 1분 간격으로 측정 및 저장하였다. 집열 시작 전(아침)과 집열 완료 직후에 축열조 순환펌프를 통해 탱크 안의 물을 잘 혼합하여 온도가 일정한 상태가 되면 그 시간의 평균온도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 시스템 효율

측정된 자료를 바탕으로 일 집열효율($\eta_{c,day}$)은 식 (7)과 같이 계산 할 수 있다.

$$\eta_{c,day} = Q_{c,day} / (I_{c,day} \cdot A_c) \quad (7)$$

여기서 배관 및 축열조의 열손실, 축열조 온수 혼합과정에서의 열손실을 없다고 가정하면 집열량 $Q_{c,day}$ 는 낮 동안 축열조 평균온도 상승분으로부터 식 (8)과 같이 계산 할 수 있다.

$$Q_{c,day} = \rho \cdot C_p \cdot \Delta T_s \cdot V_s \quad (8)$$

표 2는 특정일인 12월 18일과 12월 30일 하루 동안의 측정결과 및 시스템 효율을 정리한 것이다. 효율은 메가집열시스템은 약 32%, 평판형집열시스템은 약 25%로 나타났다.

Table. 2 Summary of experimental results

date	Connec-tion	Collector	Storage tank temperature (°C)		Heat capacity (kcal)	Insolation (kcal/m ²)	System Efficiency (%)
			initial	final			
12/18	Series	Mega	45.7	69.1	11,021	4,347	31.7
		Flat	50.1	68.4	8,619	4,347	24.8
12/30	Parallel	Mega	43.2	58.5	7,206	3,039	29.6
		Flat	45.2	58.3	6,170	3,039	25.4

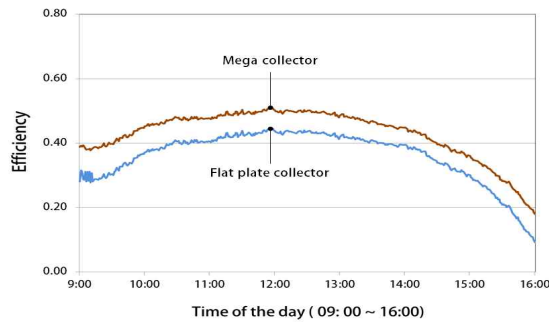


Fig. 3 Theoretical instantaneous efficiency of collector fields

식 (1)과 식 (3)을 통해 하루 동안의 이론적인 순간 집열효율(배관 및 축열조 열손실을 감안하지 않은 효율)을 계산하였으며, 그 결과는 그림 3에 있는 바와 같다. 순간 집열효율 결과를 바탕으로 일 평균 집열효율은 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

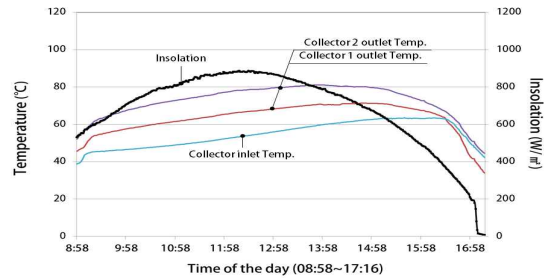
$$\eta_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^n (\eta_i \cdot I_{i,t})}{\sum_{i=1}^n (I_{i,t})} \quad (9)$$

계산결과 이론적 일 평균 집열효율인 η_{mean} 는 메가집열기 46%, 평판형 집열기 40%로 나타났다. 직렬연결 기준으로 이론적 집열효율 대비 메가집열기 시스템은 68.9%, 평판형 집열시스템은 61.3%로 분석되었다. 이렇게 효율이 차이나는 원인은 배관과 축열조(열매체 혼합 시에 발생)의 열손실과 더불어 집열부 입·출구 온도차가 커짐에 따른 효율저하, 즉 집열순환유량이 적어짐으로서 생기는 효율저하에 의한 것으로 볼 수 있다.

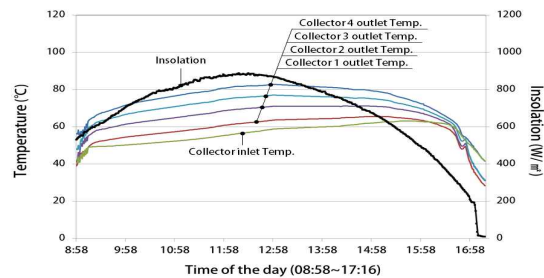
3.2 집열매체 입출구 온도차

(1) 집열기 직렬연결 시

집열기를 직렬로 연결하였을 경우 일사량에 따른 입·출구 온도변화를 그림 4와 같다. 일사량이



(a) System with mega collector



(b) System with flat plate collector

Fig. 4 Inlet and outlet temperature variation of collector according to insolation (collector connection in series)

일사량이 좋은 날의 측정결과로 메가집열기는 집열기 입구온도(초기 43°C에서 60°C까지 상승)가 집열기를 통과하면서 30~35°C 상승되는 것으로 나타났고, 일반 평판형 집열기는 메가 집열기보다 높은 50~55°C가 상승되는 것으로 나타났다. 이는 설계조건인 30°C에 비해 월등히 높은 값으로 집열기 단위면적당 열매체 순환량이 적기 때문이다.

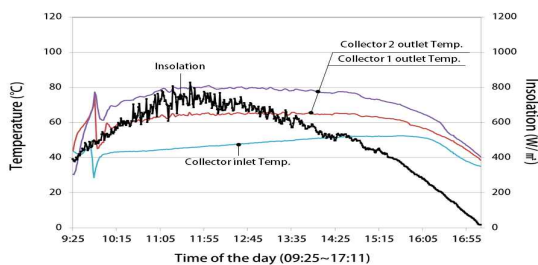
(2) 집열기 병렬연결 시

집열기를 병렬로 연결하였을 경우 일사강도에 따른 입출구 온도변화를 그림 5와 같다. 메가집열기 시스템의 경우 하단부 집열기는 최대 20°C, 상단부 집열기는 최대 37°C 온도차가 나는 것으로 나타났다. 직렬연결에 비해서 축열조와 집열기 수직 높이 차(이하, 수두차)가 적게 나는 상단부 집열기의 열매체 순환량이 다소 저하되는 것으로 나타났다. 한편 평판형 집열기는 그림 5에 있는 바와 같이 상단부의

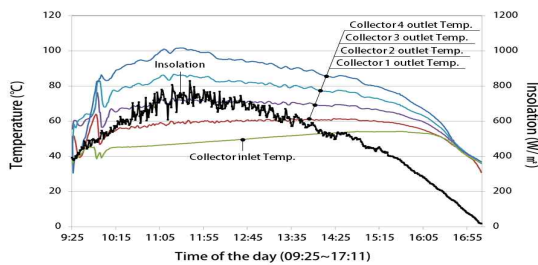
집열기일수록 입·출구 온도차가 더욱 크게 나는 것으로 나타났다. 이는 집열매체 순환량이 상단부로 갈수록 감소하기 때문이다. 만약에 집열기 입구온도(이것은 축열조 온도에 의존적임)가 더욱더 높아지게 되면 상단부 집열기에서 가장 먼저 비등이 발생하게 되므로 고온에서 작동되는 시스템에서는 집열기 어레이(array)별 출구온도가 크게 차이가 나는 것은 설계시 피해야 할 것이다.

3.3 집열매체 순환 유량

전술한 이론적 순간 집열효율(그림 3) 및 일 평균 집열효율과 측정치인 일일 평균시스템 효율을 활용하여 순간 유량(flow rate)과 배관 내의 유속을 계산하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 최대 유속을 보인 13시 전·후의 유속은 평판형이 0.168m/sec, 메가집열기는 0.184m/sec 정도로 시스템 설계조건 보다 비교적 낮게 나타났다. 이 값은 자연순환식 시스템을 설계할 때 집열부 배관경 선정에 중요한 참고자료가 될 것으로 판단된다. 이 결과로부터 단위 집열면적(m²)당 최대 유량(specific flow rate)은 메가집열기의 경우 약 14.6 kg/m²·hr, 평판형집열기는 약 13.3 kg/m²·hr로 나타났다. 참고로 태양열시스템에서 집열면적당 유량은 적용분야, 태양의존율, 사용온도 등 설계 인자들과 설계자에 따라서 다소 차이는 있을 수 있다. 유럽에서는 10~50 kg/m²·hr의 폭넓은 값을 설계 가이드라인으로 사용하고 있다.4) 이 값을 근거로 본다면 본 무동력 시스템의 유량은 설계유량 범위 내에 있음을 알 수 있다. 그러므로 집열기를 포함한 배관, 열교환기 등 열매체 순환저항이 줄어들도록 시스템이 설계되면 벽면 설치형 무동력 시스템은 기존 시스템의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있는 대안이 될 수 있을 것으로 사료된다.



(a) System with mega collector



(b) System with flat plate collector

Fig. 5 Inlet and outlet temperature variation of collector according to insolation (collector connection in parallel)

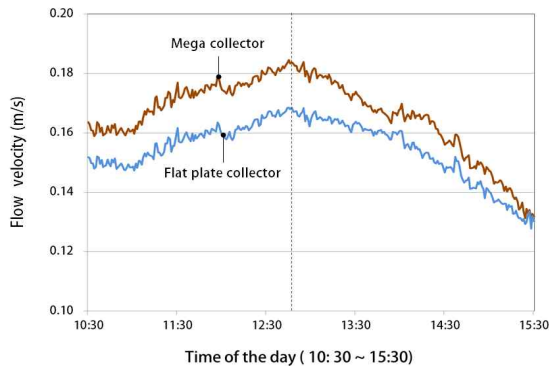


Fig. 6 Flow velocity in pipe (collector connection in series)

4. 결 론

본 연구는 펌프와 제어장치 등이 없는 수직 벽면형 무동력 태양열시스템에 대한 가능성을 알아보기 위해 수행되었다. 시험장치는 일반평판형 집열기(1m*2m, 4장)와 본 연구를 위해 특별히 제작된 대면적 평판형 집열기인 메가집열기(1m*4m, 2장)로, 집열기 특성 및 연결방식(직렬과 병렬)에 따른 시스템 작동상태를 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 압력손실이 큰 평판형 집열기 보다는 압력손실이 작은 메가 집열기가 열매체 순환이 원활하여 무동력 태양열시스템에 비교적 적합한 것으로 나타났다.
- (2) 본 시스템 하에서 집열기를 병렬보다는 직렬연결이 집열매체 순환이 원활하다. 병렬연결의 경우 상단부(축열조에 가까운 집열기) 집열기일수록 순환유량이 적어져 출구온도가 높아지게 되는데 이 때, 축열조 온도가 높을 경우 과열문제가 발생할 수 있어 유량분배에 대한 각별한 검토가 있어야 할 것이다.

결론적으로 본 연구를 통해 시스템을 복잡하게 하고 신뢰성 저하에 영향을 주는 열매체

순환펌프와 제어장치, 센서 등이 배제된 수직 벽면 무동력 태양열시스템의 가능성을 확인할 수 있었다. 이들 시험데이터는 향후 시스템 최적화 프로그램 개발을 위한 타당성 검토에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 에너지기술평가원의 연구비 지원으로 수행되었음(과제번호 : 20143030080950)

Reference

1. Act on the Promotion of the Development, Use, and Diffusion of New and Renewable Energy, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2015, Paragraph 2 of Article 12
2. Ka-Kui Tse, Tin-tai Chow, "Dynamic model and experimental validation of a indirect thermosyphon solar water heater coupled with a parallel circular tube rings type HX coil, Solar Energy 114 (2015) 114-133.
3. P.M.E. Koffi, et al., theoretical and experimental study of solar water heater with internal exchanger using thermosyphon system, Energy Conversion & Management, 49 (2008), 2279-2290
4. Lars Staudacher, Large Collector Systems, Bavarian Center for Applied Energy Research Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung.