

# 태양열 온수 시스템에 적용 가능한 100 W급 열전발전 모듈 성능에 관한 연구

서호영\*\* · 이경원\*\* · 윤정훈\*\* · 이순환\*\*\*

\*주식회사 브리콘, 한국에너지기술연구원, 수석연구원

\*\*주식회사 브리콘, 책임연구원

\*\*\*주식회사 브리콘, 대표

## A Study on the Performance of 100 W Thermoelectric Power Generation Module for Solar Hot Water System

Seo Ho-Young\*\* · Lee Kyung-Won\*\* · Yoon Jeong-Hun\*\* · Lee Soon-Hwan\*\*\*

\*Department of Energy Research Team, BRICON Co., Ltd. & Korea Institute of Energy Research, Chief Researcher

\*\*Department of Energy Research Team, BRICON Co., Ltd., Senior Researcher

\*\*\*Department of Energy Research Team, BRICON Co., Ltd., CEO

†Corresponding author: sshama@hanmail.net

### Abstract

Solar hot water system produces hot water using solar energy. If it is not used effectively, overheating occurs during the summer. Therefore, a lot of research is being done to solve this.

This study develops thermoelectric power module applicable to solar hot water system. A thermoelectric material can directly convert thermal energy into electrical energy without additional power generation devices. If there is a temperature difference between high and low temperature, it generate power by Seebeck effect. The thermoelectric module generates electricity using temperature differences through the heat exchange of hot and cold water. The water used for cooling is heated and stored as hot water as it passes through the module. It can prevent overheating of Solar hot water system while producing power. The thermoelectric module consists of one absorption and two radiation part. There path is designed in the form of a water jacket. As a result, a temperature of the absorption part was 134.2°C and the radiation part was 48.6°C. The temperature difference between the absorption and radiation was 85.6°C. Also, The Thermoelectric module produced about 122 W of irradiation at 708 W/m<sup>2</sup>. At this time, power generation efficiency was 2.62% and hot water conversion efficiency was 62.46%.

**Keywords:** 제어백 효과(Seebeck effect), 열전발전모듈(Thermoelectric module), 에너지 변환(Energy conversion), 태양열 온수 시스템(Solar hot water system), 열병합 발전(Cogeneration)

### 기호설명

$C_{p,c}$ : 냉각수 비열 [kJ/kg°C]

OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.39, No.1, pp.21-32, February 2019  
<https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.1.021>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 26 November 2018

Revised: 15 January 2019

Accepted: 26 January 2019

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- $Q_{out}$  : 열전발전모듈 온수 획득 열량 [W]
- $C_{p,h}$  : 열매체 비열 [kJ/kg°C]
- $T_{c,in}$  : 열전발전모듈 냉각수 입구 온도 [°C]
- $E_{out}$  : 열전발전모듈 출력 [W]
- $T_{c,out}$  : 열전발전모듈 냉각수 출구 온도 [°C]
- $\dot{m}_c$  : 냉각수 유량 [kg/s]
- $T_{h,in}$  : 열전발전모듈 열매체 입구 온도 [°C]
- $\dot{m}_h$  : 열매체 유량 [kg/s]
- $T_{h,out}$  : 열전발전모듈 열매체 출구 온도 [°C]
- $Q_{in}$  : 열전발전모듈 입력 열량 [W]

## 그리스 문자

- $\eta_{gen}$  : 열전발전모듈 발전 효율 [%]
- $\eta_{ht}$  : 열전발전모듈 온수 변환 효율 [%]

## 1. 서론

최근 인구 증가와 산업화가 지속적으로 발전됨에 따라 에너지 사용은 비약적으로 증가하였으나 기존 에너지 원으로 사용하던 석유, 석탄과 같은 화석에너지는 점점 고갈 되고 있다. 화석에너지를 대체하거나 보완하기 위해서 새로운 에너지원의 개발과 기존 에너지원을 효율적으로 사용하는 방법이 있다. 에너지원을 효율적으로 활용하는 방안으로 열에너지를 변환하여 활용하는 열전발전 기술 등이 있다. 열전발전 기술은 열에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 방식으로 거의 반영구적으로 사용이 가능하며 진동, 소음이 없으며 CO<sub>2</sub>배출이 없는 친환경적인 미래형 발전 시스템이라고 볼 수 있다. 열을 활용하는 열전발전 기술은 태양열, 폐열 등에 활용 가능성이 높다<sup>1-4)</sup>. 국내 태양열 온수 시스템은 사계절 모두 활용하기 위하여 겨울철을 기준으로 설계된다. 따라서 하절기에는 온수 사용량이 줄어들어 집열기에 과열이 발생하는 경우가 많아 차광막으로 집열기를 덮거나 방열기를 이용하여 열을 강제로 빼내는 경우가 많다. 따라서 동절기를 제외한 계절에 태양열 집열기로부터 남는 열을 활용하는 연구가 진행되고 있다<sup>5)</sup>.

본 연구는 태양열 온수 시스템의 열을 효율적으로 활용하기 위하여 태양열 온수 시스템에 적용 가능한 열전발전모듈을 개발하는 데 있다. 이를 위하여 집열 면적 30 m<sup>2</sup>, 온수 저장량 2 m<sup>3</sup>의 태양열 온수 시스템에 발전용량 100 W급 열전발전모듈을 설계·제작하고 태양열 온수 시스템에 장착하여 그 성능을 알아보았다.

## 2. 태양열 온수 시스템

태양열 온수 시스템은 태양으로부터 발생하는 에너지를 집열하고 이를 온수로 열교환하여 사용하는 시스템이다. 태양열 집열기, 열교환기, 온수저장탱크 및 제어반으로 구성되어 있다. 태양열 집열기는 여러 종류가 있으나 본 시스템에 사용된 집열기는 이중진공관형 집열기로 이중으로 된 유리관 내부는 진공처리 되어 열손실을 최소화하고 유리관 내부에 작동유체가 지나가는 동관에 선택 흡수막이 감싸져 열을 전달하는 구조로 되어 있다. 집열부의 작동유체는 일반적으로 물을 많이 사용하며 겨울철 동파를 방지하기 위하여 부동액을 섞어 사용한다. 집열부 작동유체인 열매체와 온수를 생산하기 위한 열교환은 열교환기를 통하여 이루어진다. 냉수는 열교환기를 통해 온수로 바뀌며 온수저장탱크에 저장되었다가 필요에 따라 사용하게 된다.

본 연구에 활용될 태양열 온수 시스템은 건물면적 약 100 m<sup>2</sup>(30 평형)의 마을회관 또는 가정집에 사용이 가능한 시스템으로 집열 면적은 약 30 m<sup>2</sup>, 판형 열교환기를 통해 열교환이 이루어지며 온수 저장 능력은 2 m<sup>3</sup>이다. Table 1은 태양열 온수 시스템 기본 설계 사양을 보여준다.

**Table 1** Specification of solar hot water system

Component (Unit)	Value	Description
Building area (m <sup>2</sup> )	100	Village hall, House
Concentrating area (m <sup>2</sup> )	30	Concentrating efficiency 40% (at irradiation 1 kW/m <sup>2</sup> )
Solar collector module (mm)	1,990×1,516 W×134 H	Double-vacuum tube, CPC type, 10 set (tube, 160 EA)
Flow rate of collector working-fluid (LPM)	20~25	Working-fluid : water(Ethylene glycol, 30 %)
Flow rate of cold/hot water (LPM)	20~25	City water
Hot water storage tank capacity (m <sup>3</sup> )	2 m <sup>3</sup>	Insulation : Cerakwool, 100 mm

### 2.1 열전발전모듈 적용 태양열 온수 시스템

태양열 온수 시스템에 열전발전모듈을 적용하기 위하여 시스템의 일부를 변경하였다. 열전발전모듈에 고온의 열을 안정적으로 공급하기 위하여 열매체 보조 저장탱크(Auxiliary storage tank)를 장착하였으며 열전발전모듈과 열교환기의 흐름을 변경하기 위한 자동밸브 및 배관이 추가 되었다. 보조 저장탱크의 역할은 태양열 집열기에서 만들어진 고온의 열매체를 저장하여 열매체 온도를 상승시킨다. 또한 시스템 가동 중에 구름이 끼어 일시적으로 일사량이 떨어져도 시스템 내에 고온부 온도를 급격히 떨어지지 않게 하여 열전발전모듈의 출력이 일사량에 따라 급격히 변하는 것을 방지 한다. 태양열 집열기에서 만들어진 고온의 열매체는 보조 저장탱크에 저장 된 후 열교환기나 열전발전모듈로 보내어 진다. 이렇게 보내진 고온의 열은 열교환기를 통해 직접적으로 온수를 만들어 주거나 열전발전모듈에 열을 주는 역할을 한다. 온수 저장 탱크에 저장된 저온의 물은 열교환기를 통해 온수로 바뀌거나 열전발전모듈의 냉각수 역할을 하며 열전발전모듈을 통과한 물은 열을 획득하여 온수 저장탱크로 저장 된다. Fig. 1은 열전발전모듈이 적용된 태양열 온수 시스템의 계통도를 보여준다.

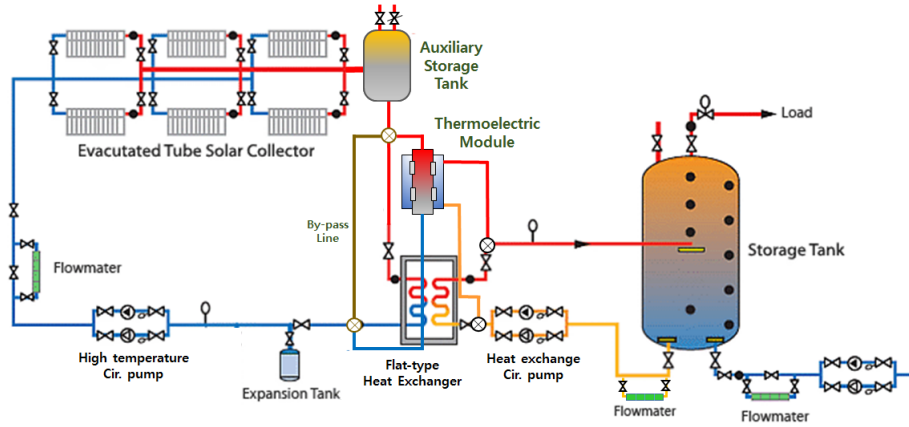


Fig. 1 Schematic diagram of solar hot water system

## 2.2 차온 제어 시스템 설계

본 시스템은 태양열을 이용하여 온수와 전력 생산이 가능해야 한다. 또한 자동으로 운영되어야 하며 사용자의 필요에 따라 가동되어야 한다. 따라서 온수 모드(Hot water supply mode)와 발전 모드(Power generation mode)로 나누어 가동되도록 하였다. 온수 모드는 일반적인 태양열 온수 시스템과 같은 운영체제로 태양열 집열기에서 집열된 열매체가 온수 저장 탱크 저온의 물과 열교환기를 통해 열을 교환함으로써 온수를 생산한다. 태양열 집열기 출구 온도와 온수 저장탱크의 물 온도를 비교하여 태양열 집열기 출구 온도가 온수저장탱크 물온도보다 높으면 고온 순환 펌프(High temperature cir. pump)와 열교환 펌프(Heat exchange cir. pump)가 작동하여 열교환기에서 열교환이 이루어져 온수가 생산하게 되며 온도가 같아지면 펌프의 작동은 멈춘다.

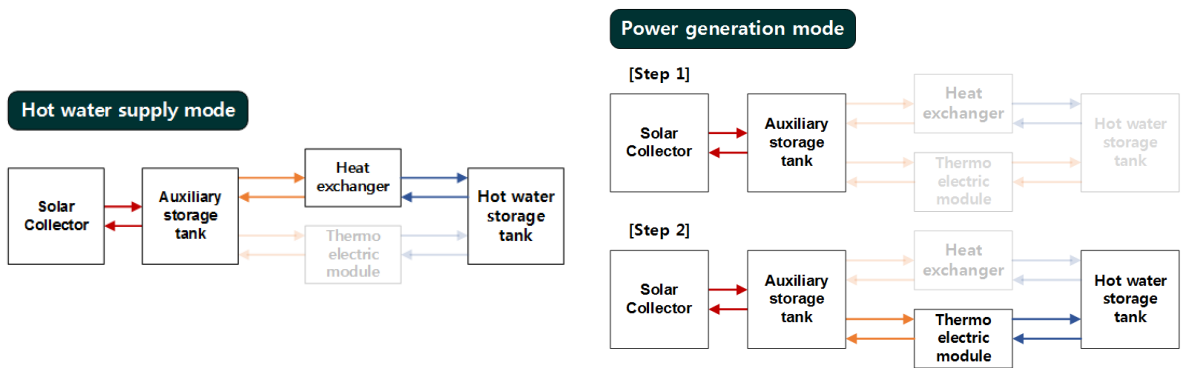


Fig. 2 Schematic diagram of system operating according to setting mode

발전 모드는 열전발전모듈을 통해서 전력과 온수가 동시에 생산한다. 발전 모드로 선택을 하고 시스템을 작동하면 열매체는 태양열 집열기와 보조 저장탱크만을 순환하며 보조 저장탱크에 열을 저장한다(Fig. 2 우측, Step 1). 태양열 집열기 출구 온도와 보조 저장탱크의 열매체 온도를 비교하여 태양열 집열기 온도가 보조 저장

탱크보다 온도가 높으면 고온 순환 펌프가 작동하여 보조 저장탱크 열매체 온도를 높인다. 이후 보조 저장탱크에 설정된 온도(약 80°C)가 되면 보조 저장탱크로 연결된 배관이 자동 밸브를 통해 열교환기에서 열전발전모듈로 변경이 되며, 열교환기로 연결되어 있는 냉수 배관 또한 열전발전모듈로 변경 되어 냉각수로 활용된다.(Fig. 2 우측, Step 2). 이후 냉각수로 이용되는 냉수는 열전발전모듈에서 열을 획득하여 온수 저장 탱크에 온수로 저장된다. 해가 떠 있는 낮 시간에는 태양열 집열기를 통해 열이 공급되므로 보조 저장탱크의 온도는 떨어지지 않게 되며 지속적으로 열전발전모듈을 통해 전력을 생산하게 되고 정오를 기점으로 100°C 이상 상승한다. 해가 지게 되면 보조 저장탱크에 열이 공급되지 않기 때문에 보조 저장탱크의 온도는 점차 떨어지며 설정된 온도(약 80°C)가 되면 전력 생산은 멈추고 다시 온수 모드로 변경되며 보조 탱크에 남은 열은 열교환기를 통해 온수의 온도를 높여준다. Fig. 2는 설정 모드에 따른 시스템 작동을 보여주는 대략도이다.

### 2.3 태양열 온수 시스템 제작

일반적으로 태양열 집열기는 일반적으로 건물 옥상에 설치가 된다. 하지만 본 시스템이 장착되는 곳은 건물 옥상과 같은 공간이 없는 지붕 형태이며 집열기 하중을 견디는 구조가 아니다. 따라서 집열기 설치를 위한 거치 공간을 별도로 설계하고 제작하였다. 태양열 온수 시스템을 구동하기 위한 펌프, 밸브, 유량계와 제어반 등은 컨테이너를 이용하여 일체화 시켜 필요에 따라 이동 설치가 가능하다. Fig. 3은 제작이 완료된 태양열 온수 시스템을 보여준다. 좌측 사진은 시스템 전체 모습을 보여주며 우측 사진은 태양열 집열기, 제어실, 제어실 내부를 보여준다.



Fig. 3 Double vacuum type solar hot water system

## 3. 열전발전모듈

### 3.1 열전발전모듈 설계

열전발전모듈의 설계하기에 앞서 열전발전소자의 특성을 먼저 살펴보았다. 모듈의 크기는 사용되는 소자의 크기와 온도차에 따른 출력에 따라 결정되기 때문에 사용 환경에 따른 출력량 산출이 선행 되어야 한다. 본 연구

에서 사용되는 소자는 Bi-Te계 열전반도체 기반의 TGM 소자로 상세 재원은 Table 2와 같다<sup>6,7)</sup>. TGM-127 열전발전소자는 약 200°C 이하에서 활용되는 소자로 약 저온부 30°C를 기준으로 온도차 170°C에서 최대 12.6 W의 출력을 낸다.

**Table 2** Specification of thermoelectric element (TGM-127-2.0-1.3)

Thermoelectric parameter	Value	Thermoelectric parameter	Value
Output power P* (at Th=200°C, Tc=30°C)	12.6 W	U <sub>load</sub> * R <sub>ac</sub> (at 200°C), ±10%	3.1 V 0.75 Ohm
I <sub>load</sub> *	4.1 A	R <sub>t</sub>	0.69 K/W

\* for R<sub>load</sub> = R<sub>ac</sub>, \*R<sub>ac</sub>- Internal TGM resistance at working Temp. \*R<sub>load</sub> - Load resistance, \*R<sub>t</sub> - Heat resistance

열전발전모듈의 설계는 열전발전소자의 특성을 바탕으로 다음과 같이 진행하였다. 열전발전소자에 인접한 고온부 온도는 120°C, 저온부 온도 35°C, 각각의 유량은 20 L/min이며 이를 위해 태양열 집열기에서 집열되는 작동유체는 약 140°C, 초기 냉각에 이용되는 물의 온도는 약 25°C이다. TGM-127 열전발전소자는 특성상 온도차 170°C에서 최고의 출력을 발생하지만 저온부 온도가 약 50°C 가까이 상승했을 때, 고온부 온도는 200°C가 넘기 때문에 태양열 집열기에 이상이 발생할 수 있다. 따라서 집열온도를 150°C 이하로 운영한다는 가정 하에 다음과 같은 열전발전모듈의 설계 사양을 도출하였다. Table 3은 100 W급 열전발전모듈의 설계 사양을 보여준다.

**Table 3** Design condition of thermoelectric module

Component	Value	Description
Thermoelectric element	134 W	TGM-127-2.0-1.3 (at cool side temp. 30°C, temp. difference 70°C)
Hot & cool side temperature	120°C / 35°C	
Hot side flow rate	20 LPM	Hot side inlet working fluid temp. 140°C
Cool side flow rate	20 LPM	Cool side inlet cooling water temp. 25°C
Thermoelectric element placement	6 pass	Arrange 4 for each pass
Working-fluid	water	Hot and cool side

열전발전모듈은 중앙 고온부를 기준으로 상부와 하부에 냉각을 담당하는 저온부로 구성되어 있으며 그 사이에 열전발전소자가 장착된다. 열전발전소자에 열을 공급하는 고온 블록과 열전발전소자에서 열을 흡수(냉각)하는 저온 블록의 기본 형상은 작동유체가 흐르는 워터 자켓형 구조를 갖추고 있으며 내부는 유로를 분기하여 넓은 면적에 열을 고르게 주고 빼앗는다<sup>8)</sup>. 열전발전모듈의 사용되는 열전발전소자의 개수는 상부 24개, 하부 24개로 총 48개가 사용되었다. 상·하부 내부는 6개의 유로로 분기되어 있으며 각 유로에 4개의 소자가 장착된다. 방열 블록 일부는 양각 가공을 하였으며 2중 오링을 통해 작동유체의 누수를 방지하도록 하였다. Fig. 4는 열전발전모듈의 흡열부와 방열부 형상((a)~(d))과 열전발전모듈이 조립된 모습((e)~(g))을 보여준다.

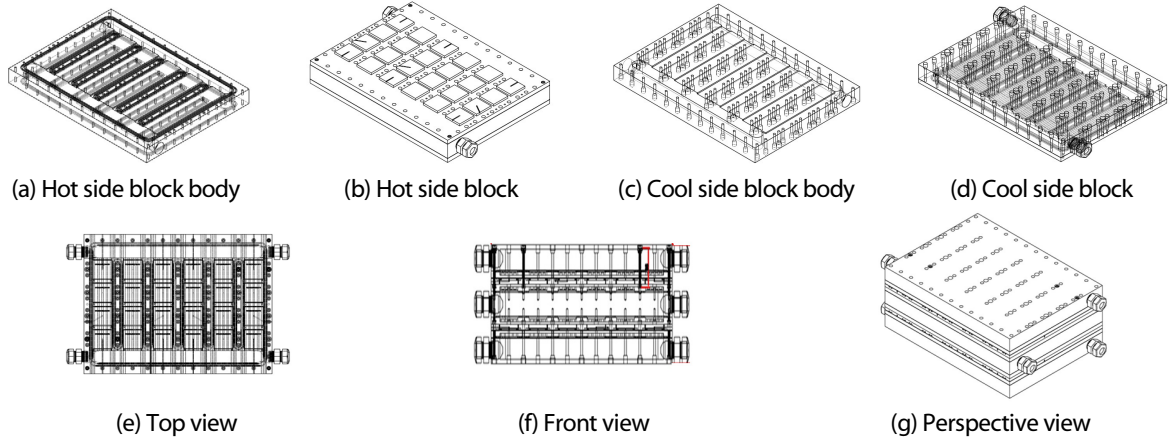


Fig. 4 Picture of hot & cool side block and thermoelectric module

### 3.2 열전발전모듈 제작

열전발전소자는 위·아래로 24개씩 총 48개가 장착된다. 유로는 블록 내부에 6개로 분기되었다가 다시 합쳐지는 형태로 구성되어 있으며 하나의 유로에 4개의 소자가 장착된다. 모듈은 고온부 1개와 상·하부 저온부 2개로 제작되었다. 열전발전소자에 고온 및 저온부 온도 측정을 위하여 처음, 중간, 끝 유로에 각각 3부분으로 나누어 소자에서 약 2 mm 지점에 총 18개를 삽입하였다. Fig. 5는 열전발전모듈 조립 과정과 온도센서 위치를 보여준다.

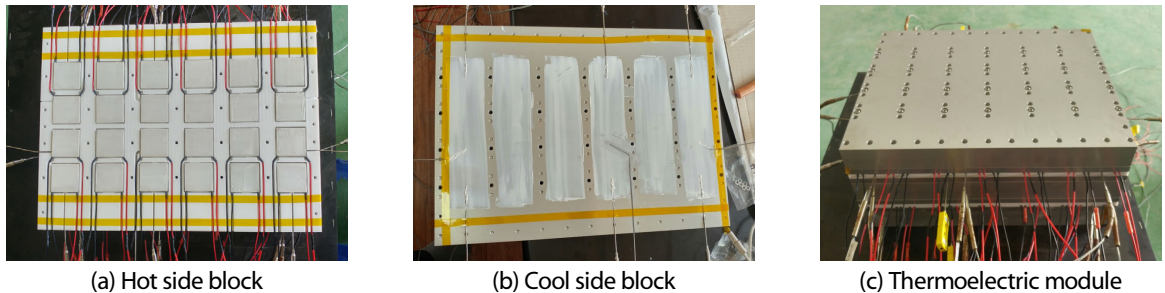


Fig. 5 Picture of thermoelectric module

## 4. 태양열 온수 시스템을 이용한 열전발전모듈 성능 시험

### 4.1 태양열 온수 시스템을 이용한 성능 시험

태양열 온수 시스템을 이용한 열전발전모듈의 성능 시험을 위하여 열전발전모듈을 태양열 온수 시스템 기계실에 장착하였다. 태양열 온수 시스템은 일출부터 일몰까지 발전모드를 통해 작동되며 일사량, 열전발전모듈 각 부분의 온도 및 출력량을 알아보았다. Fig. 6은 성능시험에 활용된 태양열 온수 시스템과 제어실에 장착된 열전발전모듈을 보여준다.



Fig. 6 Picture of solar hot water system and thermoelectric module installed in control room

#### 4.2 열전발전모듈 성능 시험 결과

열전발전모듈은 투입되는 열과 냉각에 따른 온도차에 따라 출력이 결정된다. 따라서 본 성능 시험은 태양열 온수 시스템의 열매체 유량과 냉각에 사용되는 냉수의 유량을 제작 사양에 따라 일정하게 유지하면 시간에 따른 일사량과 냉각에 활용되는 냉수 온도에 따라 출력이 결정된다. 태양열 집열기의 집열 효율은 외기 온도에 따라 변하기 때문에 외기 온도에 따른 영향을 고려해야 해야 하지만 열전발전모듈에 투입되는 열량을 모듈 전·후를 기준으로 잡았다. 이는 우선 태양열 온수 시스템의 성능을 제외한 집열 후 열량을 활용한다는 의미로 볼 수 있다. 본 성능시험의 결과는 일사량이 풍부하고 구름 등의 영향이 없는 2017년 11월 11일을 기준으로 정리하였다. 이날의 평균 외기 온도는 오전 9시부터 오후 6시까지 약 14.8°C이다. Table 4는 시간에 따른 평균 외기 온도를 보여준다.

Table 4 Ambient temperature (at date 2017. 11. 11)

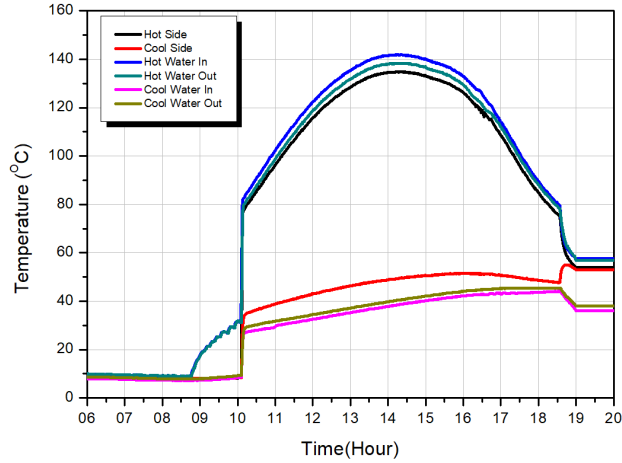
Time	9:00 ~ 10:00	10:00 ~ 11:00	11:00 ~ 12:00	12:00 ~ 13:00	13:00 ~ 14:00	14:00 ~ 15:00	15:00 ~ 16:00	16:00 ~ 17:00	17:00 ~ 18:00	Average
Temp. (°C)	11.9	14.4	14.5	15.4	17.1	16	15.6	14.9	13.6	14.8

태양열 온수 시스템을 이용한 열전발전 성능시험은 일출부터 집열을 시작하여 오전 9시부터 오후 6시까지 발전모드를 통해 진행하였다. Fig. 7은 시간에 따른 열전발전모듈로 유·출입되는 집열부 열매체 온도와 온수탱크 물온도, 열전발전모듈의 고온·저온부 온도를 보여준다. 일출부터 집열기에 충분한 온도가 되기까지 집열부 열매체는 집열기와 보조 저장탱크만을 순환하게 되며 열전발전모듈로는 흐르지 않는다. 이후 열매체 온도가 80°C를 넘는 약 10시부터 열전발전모듈로 집열부 열매체와 냉각을 위한 물이 순환하면서 각 부분의 온도가 변하는 것을 볼 수 있다.

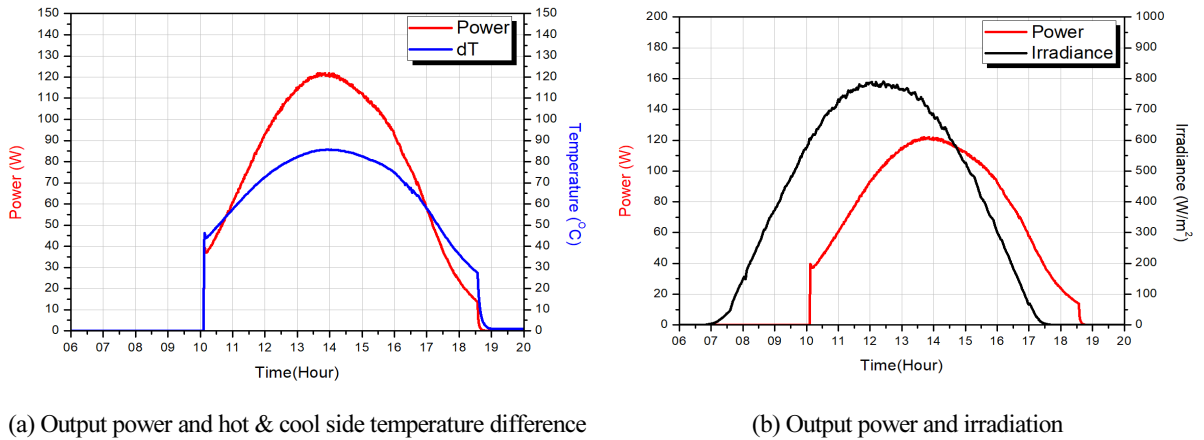
열전발전모듈의 냉각을 담당하는 온수 탱크에 저장된 물의 온도는 시간이 흐름에 따라 조금씩 상승한다. 해가 지는 18시 이후에는 발전모드를 종료하며 이후 온수 모드로 변경되어 열전발전모듈에는 더 이상의 고온수와



냉각수가 흐르지 않고 집열부의 남은 열은 온수로 열교환 된다. 온수 저장탱크의 온도는 약 26°C에서 약 48°C로 상승하였다.



**Fig. 7** Temperature of working fluid, hot water, hot side block and cool side block (at average ambient temperature 14.8°C, date 2017. 11. 11)



(a) Output power and hot & cool side temperature difference

(b) Output power and irradiation

**Fig. 8** Experimental result of thermoelectric module (at average ambient temperature 14.8°C, date 2017. 11. 11)

열전발전모듈의 고온부와 저온부 온도차와 이에 따른 열전발전모듈의 출력을 나타내는 Fig. 8의 (a) 그래프를 살펴보면 오전 10시부터 온도차가 발생하고 이에 따라 열전발전모듈에 출력이 발행하는 것을 알 수 있다. 초기 온도차 45°C에서 약 40 W의 출력이 발생하며 온도차가 증가함에 따라 열전발전모듈의 출력 또한 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 최대 출력은 약 13시 40분경 약 122 W이고 최대 출력을 기준으로 전후 2.5시간 평균 출력은 약 105 W로 나타났다. 이때 Fig. 7의 온도분포를 살펴보면 열전발전모듈로 유입되는 열매체의 온도가 최대일 때, 열전발전모듈의 고온부 온도는 134.2°C, 저온부 온도는 48.6°C이며 고온부와 저온부 온도차는 약 85°C이다. Fig. 8의 (b) 그래프는 일사량에 따른 열전발전모듈의 출력을 보여준다. 정오를 기점으로 최대 일사량

은 약 800 W/m<sup>2</sup>이다. 일사량과 열전발전모듈의 출력의 경향을 보면 일사량의 변화에 따라 출력도 같이 변하는 것을 알 수 있다.

열전발전모듈의 발전 효율(Generation efficiency)은 태양열 집열기를 통해 획득된 태양에너지가 열전발전모듈을 통과하면서 전해지는 열량과 열전발전모듈 출력의 비로 이를 열량으로 환산하면 식 (1)과 같다.  $E_{out}$ 은 열전발전모듈의 출력,  $Q_{in}$ 은 열전발전모듈에 입력되는 열량을 나타낸다. 열전발전모듈에 입력되는 열량은 열전발전모듈을 통과하면서 생기는 온도차와 유량, 열매체 비열로 산출 할 수 있다. 온도차( $\Delta T_h$ )는 열전발전모듈의 고온부를 통과하는 열매체 입구온도( $T_{h, in}$ )와 출구온도( $T_{h, out}$ )의 차이이다.

$$\eta_{gen} = \frac{E_{out}}{Q_{in}} \quad (1)$$

- $Q_{in} = \dot{m}_h C_{p,h} \Delta T_h$ , ( $\Delta T_h = T_{h,out} - T_{h,in}$ ) : 열전발전모듈에 입력되는 열량
- $E_{out}$  : 열전발전모듈 출력

온수 변환 효율(Hot water conversion efficiency)은 태양열 집열기를 통해 획득된 태양에너지가 열전발전모듈을 통과하면서 전해지는 열량과 열전발전모듈에서 열교환 되어 생성된 온수에 대한 열량의 비로 열전발전모듈에서 냉각에 사용된 저온의 물이 열전발전모듈을 통해 획득된 온수를 열량으로 환산하면 아래와 같다.  $Q_{in}$ 은 열전발전모듈에 입력되는 열량,  $Q_{out}$ 은 열전발전모듈을 통해 생산된 온수 열량을 나타낸다. 생산된 온수 열량은 열전발전모듈 냉각에 사용되는 냉수의 유량, 물의 비열, 열전발전모듈을 통과하는 냉수의 온도차( $\Delta T_c$ )로 구할 수 있으며 냉수의 온도차는 열전발전모듈의 저온부를 통과하는 물의 입구 온도( $T_{c, in}$ )와 출구 온도( $T_{c, out}$ )의 차이이다.

$$\eta_{ht} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (2)$$

- $Q_{in} = \dot{m}_h C_{p,h} \Delta T_h$ , ( $\Delta T_h = T_{h,out} - T_{h,in}$ ) : 열전발전모듈에 입력되는 열량
- $Q_{out} = \dot{m}_c C_{p,c} \Delta T_c$ , ( $\Delta T_c = T_{c,in} - T_{c,out}$ ) : 열전발전모듈을 통해 생산된 온수 열량

따라서 열전발전모듈의 발전 효율은 2.62%, 온수 변환 효율은 62.46%로 산출되었다. Table 5는 2017년 11월 11일 태양열 온수 시스템을 이용한 열전발전모듈의 성능시험 결과를 보여준다. 오전 9시부터 오후 6시까지 평균 일사량은 706.6 W/m<sup>2</sup>, 온도차 85.6°C에서 최대 출력은 121.95 W의 성능을 나타냈다.

**Table 5** Experimental results of thermoelectric module using solar collector (at date 2017. 11. 11)

Component	Value	Component	Value
Average irradiation (W/m <sup>2</sup> )(at 9:00~18:00)	706.6	Hot side block (°C)	134.2
Max. Output power (W)	121.95	Cool side block (°C)	48.6
Generation efficiency (%)	2.62	Hot & cool side temperature difference (°C)	85.6
Hot water conversion efficiency (%)	62.46		

## 5. 결론

본 연구는 태양열 온수 시스템에 적용 가능한 열전발전모듈을 통하여 태양열 온수 시스템의 열을 효율적으로 사용하고 전력을 생산하는 시스템 개발에 있다. 이를 위하여 집열면적 30 m<sup>2</sup>, 온수 저장량 2 m<sup>3</sup>의 태양열 온수 시스템에 발전용량 100 W급 열전발전모듈을 설계·제작하고 태양열 온수 시스템에 장착하여 그 성능을 알아보았다.

- (1) 태양열 온수 시스템에 열전발전모듈을 적용하기 위하여 차온 제어 시스템을 구축하여 온수 모드와 발전 모드로 나누어 선택에 따라 온수만을 생산하거나 온수와 전력을 동시에 생산하는 시스템을 구축하였다.
- (2) 고온부와 저온부 유량 20 L/min, 온도차 약 80°C에서 최대출력 130 W의 전력을 생산하는 열전발전모듈을 설계하고 제작하였다. 열전발전모듈은 하나의 고온부와 고온부 상·하부에 부착이 가능한 저온부 2개를 갖추고 있으며 고온부와 저온부는 6개의 유로로 구성되어 있다. 열전발전소자는 고온부 상부에 24개, 하부에 24개, 총 48개의 Bi-Te 계열의 TGM-127 소자를 부착하였다.
- (3) 열전발전모듈의 성능시험은 평균 일사량 706.6 W/m<sup>2</sup>, 외기 평균온도 14.8°C인 2017년 11월 11일을 기준으로 정리 하였으며 열전발전모듈의 고온부 134.2°C, 저온부 온도 48.6°C, 온도차 약 85°C에서 최대 출력 121.96 W의 전력을 생산하였다. 발전이 끝나고 온수 저장탱크에 저장된 온수의 온도는 약 48°C이다. 또한 열전발전모듈의 발전 효율은 2.62 %, 온수 변환 효율은 62.46 %로 산출 되었다.
- (4) 본 연구는 태양열 온수 시스템에 적용이 가능한 열전발전모듈을 개발하기 위하여 태양열 온수 시스템의 제작 사양에 따른 열전발전모듈을 설계하고 제작하였다. 또한 열전발전모듈의 성능 시험을 통해 결과를 얻었다. 본 결과는 기존 설치가 되었거나 설치가 예정된 태양열 온수 시스템에 일부 부품을 추가하여 열전발전모듈을 접목하는데 있다. 따라서 태양열 온수 시스템의 성능을 제외한 열전발전모듈의 발전 성능에 초점을 두고 시험을 진행하였다.
- (5) 향후 본 시스템을 통해 태양열 온수 시스템의 성능과 열전발전모듈의 성능을 최적화하는 연구를 통해 태양열을 이용한 열전발전모듈의 개발을 지속하고자 한다.

## 후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구비지원으로 수행되었음(과제 번호: 20162020107360).

## REFERENCES

1. New & Renewable Energy White Paper, Korea Energy Agency, 2017.
2. Choi, B. J., Choi, Y. C., Hong, G. C., Park, T. J., Park, J. S., D. M. Rowe, Research on the Development of Thermoelectric Generation System for Industrial Waste Heat Recovery, *Energy Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 19-27, 2000.
3. Chun, T. K., Yang, Y. J., Study on Power Device Using Solar Collector, *New & Renewable Energy* Vol. 10, No. 4, pp. 22-28, 2014.
4. Choi, K. W., Ahn, D. H., Boo, J. H., Influence of Temperature Gradient Induction by Concentrated Solar Thermal Energy on the Power Generation Performance of a Thermoelectric Module, *Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 18, No. 10, pp. 777-784, 2017.
5. Jong, J. W., Kang, B., Tong, Y. J., Cho, H. H., Performance Analysis of R-134a Rankine Cycle to Apply for a Solar Power Generation System Using Solar Collector Modeling, *Journal of The Korean Solar Energy Society*, Vol. 34, No. 3, pp. 57-65, 2014.
6. Lee, J. K., Kim, J. W., and Lee, J. Y., Current Status of Thermoelectric Power Generation Technology, *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 353-357, 2016.
7. Kim, I. H., Thermoelectric Energy Conversion Technology, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 16, No. 4, pp. 18-26, 2013.
8. Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y., and Li, B., A Comprehensive Review of Thermoelectric Technology: Materials, applications, modelling and performance improvement, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 65, pp.698-726, 2016.