

# 집중 태양열에 의한 온도구배가 열전발전모듈의 출력 성능에 미치는 영향

최경후<sup>1</sup>, 안다훈<sup>2</sup>, 부준홍<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 신교통연구본부, <sup>2</sup>한국철도기술연구원 고속철도연구본부,  
<sup>3</sup>한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

## Influence of temperature gradient induced by concentrated solar thermal energy on the power generation performance of a thermoelectric module

Kyungwho Choi<sup>1</sup>, Dahoon Ahn<sup>2</sup>, Joon Hong Boo<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

<sup>2</sup>High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

<sup>3</sup>School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

**요약** 일반적으로 열전발전 소자를 사용하여 에너지 하베스팅을 하는 경우, 시스템의 작동환경에 의해 주어지는 온도구배를 활용하게 된다. 따라서 열전소자의 특성상 큰 온도구배를 기대하기 어려운 작동환경에서는 원하는 출력을 얻을 수 없으며, 작동 온도가 높을 때 얻어지게 되는 최적의 발전효율을 기대하기 힘들다. 자연환경에서 얻을 수 있는 태양에너지를 활용한 신재생 에너지의 활용은 그 동안 태양광발전이나 태양열발전이 국한되어 왔다. 태양광발전은 태양광의 일정 파장대만 사용하고 빛의 산란에 의해 발전효율이 낮아지는 단점이 있으며, 태양열발전은 일반적으로 대규모 설비를 갖춰야 하는 공간상의 제약이 있다. 본 연구에서는 태양열을 집광하여 열전소자에 조사함으로써 큰 온도구배를 형성하여 상용 열전소자의 출력을 향상시킬 수 있는 간단한 소형 발전시스템을 설계 및 제작하였다. 장시간 태양열 집중을 위해 태양 추적 장치를 설치하였으며, 열전소자 하부에 고온의 태양열이 전달되어 온도 편차가 줄어드는 현상을 막기 위해 액체 순환식 냉각기를 설치하여 큰 온도구배를 유지할 수 있도록 설계한 후, 일련의 실험으로 시험하여 그 유용성과 타당성을 검증하였다.

**Abstract** Energy harvesting through a thermoelectric module normally makes use of the temperature gradient in the system's operational environment. Therefore, it is difficult to obtain the desired output power when the system is subjected to an environment in which a low temperature gradient is generated across the module, because the power generation efficiency of the thermoelectric device is not optimized. The utilization of solar energy, which is a form of renewable energy abundant in nature, has mostly been limited to photovoltaic solar cells and solar thermal energy generation. However, photovoltaic power generation is capable of utilizing only a narrow wavelength band from the sunlight and, thus, the power generation efficiency might be lowered by light scattering. In the case of solar thermal energy generation, the system usually requires large-scale facilities. In this study, a simple and small size thermoelectric power generation system with a solar concentrator was designed to create a large temperature gradient for enhanced performance. A solar tracking system was used to concentrate the solar thermal energy during the experiments and a liquid circulating chiller was installed to maintain a large temperature gradient in order to avoid heat transfer to the bottom of the thermoelectric module. Then, the setup was tested through a series of experiments and the performance of the system was analyzed for the purpose of evaluating its feasibility and validity.

**Keywords** : Thermoelectrics, Solar energy, Electric power generation, Energy harvesting, Renewable energy

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원 및 한국항공대학교의 연구비 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Joon Hong Boo (Korea Aerospace Univ.)

Tel: +82-2-300-0107 email: jhboo@kau.ac.kr

Received September 26, 2017

Revised October 12, 2017

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

## 1. 서론

태양에너지는 지구상에서 가장 범용성 있는 자연적, 청정에너지이며 신재생에너지의 대표적인 형태이지만, 근본적으로 자연적 형태로는 그 밀도가 낮아 활용도가 떨어지는 한계가 있다. 일반적으로 태양에너지는 태양광 또는 태양열의 형태로 많이 활용되며, 이러한 활용 방식 차이는 태양에너지 형태 전환 메커니즘과 관계가 있다. 일반적으로 사용되고 있는 태양광발전은 광기전 효과(Photovoltaic effect)를 이용하여 태양광이 포함하는 에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 반면, 태양열발전은 태양으로부터의 복사열을 축적하여 고온의 열원을 만들어 활용한다. 따라서 태양광발전은 광기전 효과가 발생할 수 있는 특정 파장대의 태양광만이 유용한 전기에너지로 전환되는 반면 태양열발전은 가시광선 및 적외선 영역대를 포함한 광대역의 에너지를 열복사에 활용하여 효율이 상대적으로 높다. 또한 태양광발전은 기본적으로 태양광이 없으면 작동하지 못하므로 날씨, 장소 등에 의해 전기 생산 능력이 크게 변화한다. 그러나 태양열발전은 태양열을 이용하므로 태양광이 지표면까지 직접복사로 도달하지 않는 경우에도 산란복사로 인한 열에너지를 활용할 수 있는 장점이 있다[1].

에너지를 평가할 때는 양적인 관점과 함께 질적인 관점이 함께 필요하다. 일반적으로 열에너지는 온도 차이가 클수록 그 유용성이 증가한다. 널리 알려진 바와 같이 낮은 온도의 물은 아무리 많이 모아도 높은 온도를 만들 수 없으나, 높은 온도의 물은 필요에 따라 대량의 낮은 온도의 물로 만들 수 있는 것이 그 예이다. 태양에너지는 그 원천이 약 5500℃로 추정되는 태양표면 온도이므로, 이를 광학적으로 집광하면 지구상에서도 이론적으로는 3000℃에 가까운 온도까지 성취할 수 있음이 알려져 있다[2,3,4]. 따라서 대부분의 기존 태양열발전은 집광장치를 활용하여 고온의 열원부를 만들고, 이 열원부로부터의 열을 이용하여 터빈을 구동함으로써 연결된 발전기로 전기에너지를 생산한다. 이러한 일반적인 형태의 태양열발전은 최종 발전설비에 동력원으로 쓰이는 대형 터빈으로 인해 대용량 발전에 주로 사용되며 집광장치를 포함한 전체적인 시스템 설비 또한 대규모로 구성되어 소형 발전 장치로 구현은 어렵다.

본 논문에서는 태양열 집중장치를 응용한 소형 열전발전 시스템을 구성하여 그 성능을 검증한다. 태양열 집

중을 위한 구조물을 열전소자 고온부에 설치하여 인위적인 큰 온도 구배를 조성, 상용 열전소자의 출력을 극대화시킬 수 있는 시스템을 설계 및 제작하고 타당성을 검증하는 기초 연구를 수행한다.

## 2. 본론

### 2.1 열전발전 모듈

열전소자의 가장 큰 장점은 소규모 장치로 열에너지를 전기에너지로 변환할 수 있다는 것이라 할 수 있다. 특히, 기존 태양열발전 시스템의 터빈 및 발전기에 비하여 소형 발전 소자를 이용함으로써 시스템 구조를 매우 간소화시킬 수 있다. 그럼에도 불구하고 열전소자의 낮은 발전효율과 이를 설치할 큰 온도구배를 보이는 자연 환경 조건이 드물어 실용화 된 사례는 아직 보고된 바가 없다. 이에, 태양열 에너지를 집중시켜 인위적인 고온부를 형성하여 열전소자의 발전 출력을 높이려는 연구가 세계 각국에서 진행 중이다. 미국 MIT의 Chen 등은 평면 형태의 태양 열전발전 장치를 개발하여 4.6%의 발전 효율을 달성하였다고 보고했다[5]. 이들은 선택적 태양 스펙트럼 흡수 장치와 나노 구조를 사용한 신개념의 열전소자를 이용하여 효율을 높였다고 주장했다. 한편, Baranowski 등은 해석적인 방법을 통하여 태양열 집중 방식을 이용한 열전발전의 경우, ZT 계수가 2인 소자를 사용하면 1500℃에서 이론적으로 30.6%의 높은 발전 효율을 기대할 수 있다고 주장하였다[6]. 이 경우, 작동 환경이 1500℃의 고온이므로 이러한 고온을 형성할 수 있는 효율적인 태양열 집열 장치 및 고온 유지를 할 수 있는 열공학적 설계가 요구되며 고온에서 최적화된 발전 효율을 낼 수 있는 ZT 계수를 가진 열전소자의 개발이 선행되어야 할 것이다. 미국 NREL (National Renewable Energy Laboratory) 의 Olsen 박사는 최근 투고 논문에서 태양열 집열 장치, 열전소자 및 열관리 시스템으로 이루어진 발전기를 설계/제작하여 NREL의 high flux solar furnace에서 성능을 테스트 하였다고 밝혔다[7]. 그는 전체 발전 장비에서의 열 누출관리 및 발전수명 해석 등을 수행하여 최적화된 프로토타입의 설비를 구축, 발전 장비의 경제적 효과를 예측한 바 있다.

국내의 경우, 한국기계연구원의 한승우 등은 태양열 집중장치 및 열전소자를 이용하여 발전성능을 테스트 하

였으며, 50 °C의 온도 구배에서 약 0.74 W의 출력을 얻은 바 있다[8]. 또한, 기존의 태양전지에서 버려지는 40%정도의 자외선과 적외선을 활용할 수 있도록 태양 광발전과 태양 열전발전을 접목시킨 하이브리드 형태의 발전기를 개발하였다. 광필터를 통해 가시광선은 솔라셀로, 나머지 파장은 프레넬 렌즈로 모아서 열전발전기로 발전하는 원리이다. 또한 한국에너지기술연구소에서는 compound parabolic concentrator (CPC)를 사용하여 열전발전기의 고온부에 적용하였다. CPC는 일정 범위 내의 입사각을 갖는 입사광 모두가 흡수면에 도달하고 이외의 입사광은 방출된다. 이들은 12개의 열전발전 모듈을 한 조로 직렬연결 하였으며, 열전모듈 양면간 143.6 °C의 온도차(이때 열전모듈의 고온측 190.9 °C 및 저온측 57.3 °C)에서 51.3 W의 전력을 얻었다[9]. 이들은 발전성능을 극대화시키기 위해 일체형 스카이브(skyve) heat sink를 사용하여 보다 효율적인 저온부 방열을 실현하였다. 그러나 이 연구에서 열전소자의 고온측 온도가 100 °C이하에서는 전력 생산이 전무했으며, 열전소자 개당 평균 출력은 최대 4.3 W 이하이었고, 이를 성취하기 위해 80분 이상이 소요되었으므로 성능 개선의 여지가 있을 것으로 생각된다.

## 2.2 태양열 집중장치

굴절식 태양광 집광에 속하는 대표적인 것이 볼록렌즈이다. 그러나 볼록렌즈는 집광면적에 따라 두께와 무게가 증가하는 단점이 있어, 이를 평면 형태로 개조한 것이 프레넬 렌즈(fresnel lens)라 불리는 평면형 렌즈이다. 이 원리는 초점을 공유하지만 초점거리가 다른 여러 개의 볼록렌즈를 작은 폭을 갖는 동심의 고리형태로 만들어 얇은 두께로 평면적으로 배치한 것이다. 따라서 렌즈의 두께와 무게가 커지는 단점을 극복할 수 있고, 금형을 만들면 대량 생산으로 저가화가 가능하므로 현재 산업적으로 다양한 목적으로 광범위하게 사용하고 있다.

이용하고자 하는 태양열의 양과 질에 따라 적절한 집광장치의 선택은 필수적이다. 태양열의 양은 집광면적에 비례하며, 집열온도는 태양광의 밀도 즉 집광비(집광면적과 이용면적의 비)에 비례한다. 본 연구에서는 소형이면서 높은 집광비를 얻을 수 있으며 구조가 단순한 프레넬 렌즈를 채택하여 장치를 설계하였다.

## 2.3 태양열 집중 소형 열전발전 장치 구성

### 2.3.1 열전발전 모듈 구성

열전발전 모듈의 구성은 아래 그림과 같다.

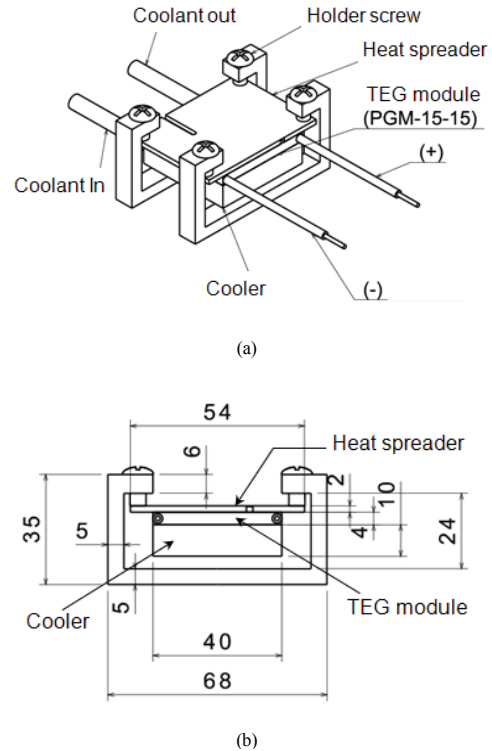
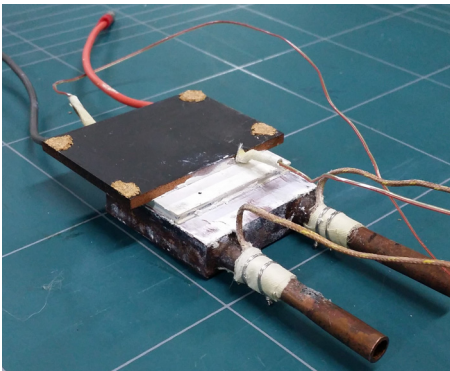


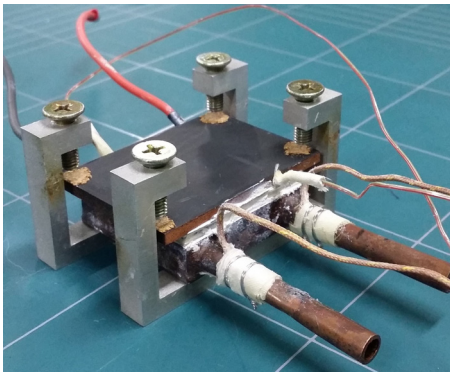
Fig. 1. Structure of the TEG(Thermo Electric Generator) module (a) 3D drawing of the TEG module (b) Dimensions of the TEG module (units: mm)

열전발전 모듈은 heat spreader, 열전소자(TEG: Thermo-Electric Generator), 그리고 냉각기가 holder에 의해 결합되어 구성된다. 상용제품 중에서 선정된 열전소자(PGM-15-15, HTRD, Korea)는 40 × 40 × 4 mm의 크기이며 상하면의 온도차가 220 °C일 때, 최대 전력은 8.2 W (전압 5.1 V, 전류 1.5 A) 출력을 갖는다. heat spreader는 2 mm 및 3 mm 두께의 구리로 제작되어 태양열을 흡수하고 전도에 의해 분산시켜 열전소자 상면에 열에너지를 고르게 공급한다. 태양광을 받는 면은 흡열을 극대화하기 위해 흑색도료로 도장하며, spreader 상하면에는 열전대(K-type)를 장착하여 공급 열의 온도를 측정한다. 열전소자의 두께를 가로지르는 온도구배를 최대로 유지하기 위해 하면에는 액체 순환유로가 가공된 냉

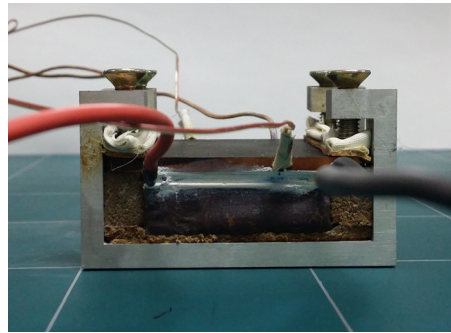
각기를 구리로 제작하여 부착하고 일정온도로 제어된 냉각수를 공급한다. 그림의 holder는 heat spreader, 열전소자, 그리고 냉각기를 결합하기 위한 구조물로서 알루미늄 합금재로 제작하고 체결구를 통해 heat spreader 상면에 결합 압력을 가한다. 각 부품과 holder 사이의 공간은 단열재로 충전하여 열의 전달 경로가 heat spreader 상판으로부터 열전소자를 가로질러 냉각기로 이루어지도록 하였다. 열전소자의 상하면에는 heat spreader 및 냉각기의 접촉면에서 열저항을 최소화 하기 위해 열그리스(thermal grease)를 얇게 도포하였다. 열전소자의 상판에 직접 열전대를 설치할 수가 없으므로 heat spreader 하판에 설치한 열전대로 측정된 온도가 열전소자의 상판 온도와 같다고 추정하였다. 또한, 열전소자 하판에도 열전대를 설치하기 어려워 이에 접촉하는 액체 순환식 냉각기의 냉매 입구와 출구관의 온도를 측정하여 이들의 평균온도를 열전소자 하판의 온도로 추정하였다.



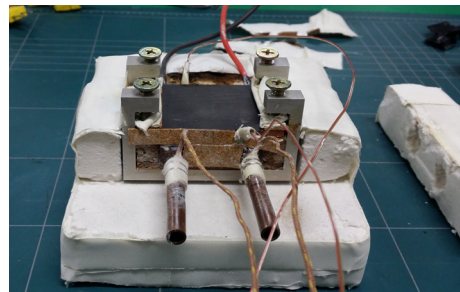
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2. Implementation process of the thermoelectric power generation module (a) Lamination of Heat spreader-TEG-Cooler layers (b) Heat spreader-TEG-Cooler layers contained by the holder (c) Thermal insulation of the TEG by cork board and glass-wool tape between the TEG and the holder (d) Thermal insulation of the thermoelectric power generation module by plaster board and glass-wool tape wrapping the exterior

### 2.3.2 태양에너지 집중장치 구성

프레넬 렌즈와 열전발전 모듈을 포함한 실험장치 구조물의 구성은 아래 그림과 같다. 프레넬 렌즈의 크기는  $470\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 이고, 초점거리  $500\text{ mm}$ , 골간격  $0.5\text{ mm}$ , 재료는 PMMA(PolyMethyl MethAcrylate)를 사용하였다. 프레넬 렌즈의 초점거리 인근에 열전발전 모듈이 위치되고, 필요에 따라 거리를 조절할 수 있으며, 온도 및 전력 측정에 필요한 센서 배선, 냉각수 배관 등을 위해 알루미늄 프로파일을 이용하여 최소의 구조물(frame)을 구성하였다. 구조물의 크기는  $560\text{ mm} \times 700\text{ mm} \times 537\text{ mm}$  이고, 프레임의 상면에 프레넬렌즈가 위치하며, 옆 벽과 아래의 공기 유동 가능 통로들은 대류 열손실을 줄이기 위해 모두 아크릴판으로 차단하였다. 프레임에 프레넬 렌즈와 열전발전 모듈이 장착된 전체 실험모델은 solar tracker에 탑재되었다. solar tracker는

태양 궤적을 추종하기 위해 2축 모터로 구동되며 태양 추적 가능한 센서를 탑재하고 있다. 태양 추적 정밀도는  $\pm 0.5^\circ$ 이다.

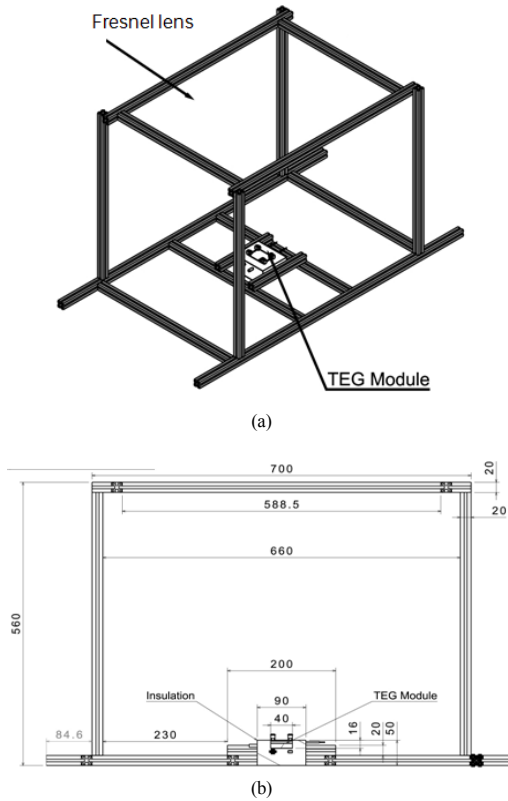


Fig. 3. Structure of the frame with Fresnel lens and thermoelectric power generation model (a) Schematic drawing of the frame (b) Dimensions of the frame (units: mm)

### 2.3.3 계측기 및 기타 장치 구성

냉각기에 유입되는 냉매의 온도를 조절하기 위해 항온조를 사용하였다. 유량은 면적식 유량계(rotameter)로 측정하고 밸브로 조절된다. 열전발전 모듈로부터 출력되는 전압 및 전류, 전력과 함께 발전효율을 계측하기 위해 PV(Photo Voltaic) analyzer(PROVA 210, Prova Instruments Inc.)를 사용하였다. 발전효율 계측에 활용되는 일사량 값을 얻기 위해 전일사량 계측이 가능한 일사량 측정기(TES-1333R, TES Electrical Electronic Corp.)를 사용하였다. 열전발전 장치에 부착된 열전대로부터 온도를 측정하고 분석하기 위해 상용 자료획득 장비(Fluke-2645A NetDAQ)을 활용하였다.

## 2.4 태양열 집중 소형 열전발전 장치 실험

### 2.4.1 성능실험의 인자 제어

열전발전 모듈의 성능에 영향을 미치는 인자로 다음과 같은 항목을 고려하였다.

- 열전소자 상하면의 온도차: 열전소자 전기 출력의 직접적 구동원으로 태양 조사량에 의해 영향을 받는다.
- 일사조건: 전일사량(GHI: Global Horizontal Irradiance)은 열전소자 상면(고온부) 입열량을 결정하는 주된 인자이다.
- Heat Spreader 성능: 열전소자 상면에 얇은 heat spreader를 덮어 집중된 열을 고르게 분산시키는 인자로 활용하였다. heat spreader 상하면의 온도차가 적어야 가능한 높은 온도를 열전소자 상면에 전달 가능하므로 열전도율이 높은 재질인 구리를 사용하고, 결합 시 집중 하중에 의한 휨이 발생하지 않는 한 가능한 얇은 두께를 선정한다.
- 냉각성능: 열전소자 하면(저온부)에 접촉하여 일정 온도를 유지시켜야 열전소자 상하면의 온도차를 유발할 수 있으므로 물을 냉매로 하여 강제대류에 의해 냉각한다.
- 단열 성능: 열전소자 상하면의 온도차를 높이기 위해 집중된 태양열이 최대한 온전히 열전소자 상면으로만 이동하고 이외의 방향으로 흐르지 않도록 주변 단열이 필요하다. 열손실은 결합구조물에 의한 전도 손실, 주변 공기에 의한 대류 손실, 그리고 heat spreader 상면으로부터의 복사열손실을 모두 고려해야 한다. 한편 냉각기는 열전소자 하면으로부터의 열만 냉각하도록 접촉면 외의 주변과는 단열이 필요하다. 구조물의 단열은 ceramic wool, plaster board, cork board, glass wool tape 등을 이용하였다. TEG 모듈의 출력 성능으로는 아래와 같은 항목을 측정한다.

Table 1. Performance indices of the concentrated solar powered thermoelectric generator

Nomenclature	
$V_{oc}$	Open circuit voltage
$I_{sc}$	Short circuit current
$P_{max}$	Maximum power at optimal load
$V_{maxP}$	Voltage at maximum power
$I_{maxP}$	Current at maximum power
$\eta_{maxP}$	Power conversion(solar to electric) efficiency at maximum power



2.4.2 성능실험 결과

열전소자의 고온부 및 저온부의 온도 데이터는 DAQ 장비에 의해 실시간으로 획득되고 저장되었다. 열전발전 모듈로부터의 출력 관련 데이터는 PV analyzer에 의해 측정되었다. 대부분의 실험은 옥외에서 전조사  $600 \text{ W/m}^2$ 의 태양조사가 가능한 시간 동안 이루어졌으며, 일자에 따라 1회당 2시간에서 5시간 정도의 편차가 있었다.

프레넬 렌즈에 의해 집광된 빛은 열전소자의 일부분에 조사되어 고온부의 온도가 동일하게 유지되지 않을 가능성이 크며, 등온으로 유지되지 않는 고온부는 소자의 출력저하를 유발할 수 있다. 따라서 등온 유지에 직접적인 역할을 하는 소자 상부의 heat spreader의 두께를 2mm (2t) 및 3mm (3t)로 제작하여 출력 및 발전 효율을 측정하고 이를 다 Fig. 4에 도시하였다.

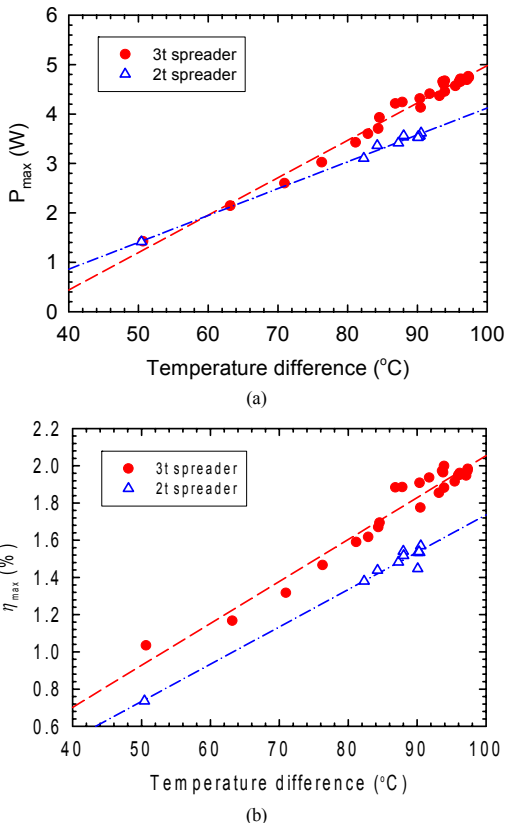


Fig. 4. Electric power and power conversion efficiency of the thermoelectric power generation module with varying temperature gradient between hot and cold side of the TEG and the thickness of the heat spreader (a) Electric power (b) Power conversion efficiency

또한, PV analyzer로 생성한 전류전압 곡선과 성능지수는 Fig. 5에 나타내었다.

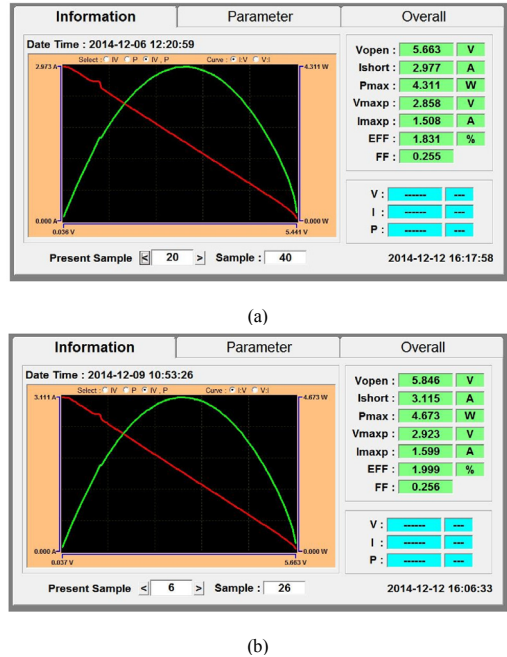


Fig. 5. Output power measurement result of the thermoelectric power generation module by PV analyzer (a) Thickness of the heat spreader is 2 mm (b) Thickness of the heat spreader is 3 mm

위의 실험결과를 살펴보면, 예상했던 바와 같이 동일한 집광조건이라 하더라도 열전소자의 고온부의 온도분포를 균일하게 해 주는 것이 중요한 것으로 나타난다. Fig.4의 전력발생 추이를 살펴보면, 같은 온도 차이에서 두께 3 mm heat spreader의 출력이 더 좋은 것으로 나타나며 출력의 차이는 온도차이가 커질수록 더욱 커진다. 즉, 발전 출력은  $60^{\circ}\text{C}$  이하의 온도 차이에서는 heat spreader의 두께에 거의 영향을 받지 않지만, 고출력을 기대할 수 있는 약  $100^{\circ}\text{C}$  정도의 온도 차이에서는 두께 3 mm heat spreader를 사용하는 것이 약 20%의 출력 증가를 나타낼 것으로 보인다.

프레넬 렌즈에 의해 열전소자 상하면에서 유도된 최대의 온도차는 PV analyzer로 측정한 경우 전조사를  $870 \text{ W/m}^2$ 의 조건에서  $101.3^{\circ}\text{C}$  정도였으며, 이때의 개방전압은 5.663 V, 단락전류는 2.977 A, 최대 전기출력은 4.311 W, 최대 출력에서 전압은 2.858 V, 전류는 1.508 A이었으며, 이에 해당하는 전기효율은 1.831%로

나타났다. 이때 heat spreader의 두께는 2 mm 였다. 전 조사율 870 W/m<sup>2</sup>의 조건에서 열전소자 상하면의 온도차는 94 °C인 경우, 개방전압은 5.846 V, 단락전류는 3.115 A였으며, 최대 전기출력은 4.673 W, 이때의 최대 출력에서 전압은 2.923 V, 전류는 1.599 A이었다. 전기효율은 약 2 % 이었으며, heat spreader의 두께는 3 mm 였다. 전기출력이 약 9.2 % 증가하였다.

전기출력이 가장 컸던 경우는 4.764 W로서 이때의 전압은 2.94 V, 전류는 1.62 A이었다. 그러나 해당 전기효율은 앞선 사례보다 약간 작은 1.97%로 측정되었다.

이상의 결과는 1개의 열전소자에 대한 것이므로 요구되는 전력에 따라 다수의 열전소자를 사용할 수 있으며, 이들의 전기회로를 직렬 또는 병렬로 연결함에 따라 전압과 전류를 조절할 수 있다. 또한 하나의 태양 추적 장치에 다수의 열전소자로 구성된 발전시스템 탑재하면 운영상의 경제성도 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 프레넬 렌즈를 이용한 태양에너지 집중 열전 발전 장치를 구성하여 그 발전 특성을 실험하였다. 기존의 heat spreader 자체의 열전달 성능 개선[10] 또는 방열을 통한 냉각성능[11]에 한정되었던 연구에서 나아가 열전 소자의 고온부 유지에 적용된 heat spreader의 특성에 따른 최종 발전 성능에의 영향을 분석하였다. 태양에너지 집중 장치 및 단열부 개선 등으로 고온부와 저온부의 온도차가 증가할 경우 heat spreader의 등온 조건 유지 역할은 성능에 더 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

### 3. 결론

본 연구에서 구성한 태양열 집중 열전발전 장치 실험에 따라 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. 동절기 태양열 집중 열전발전 장치의 열전소자 상하면에서 유도할 수 있는 최대 온도차는 약 101 °C 이었다. 전기부하가 있는 경우 실용 가능한 발생 전력은 최대 4.764 W로서 이때의 전압과 전류는 각각 2.94 V와 1.62 A이었다. 또한 전기변환 효율의 최대치는 2% 정도로 나타났다. 동절기 기준으로 실험시간 2시간 40여분 동안 획득된 총 에너지는 3 mm heat spreader의 경우 약 42833 J 이었다. 기상상태 등에 따라 발전 효율이 절반으로 낮아지고, 전력관리 회로의 효율이 50 %로 가정하더라도 낮 시간 동안

의 발전만으로도 24시간동안 평균 124 mW의 소모전력을 유지할 수 있는 수준이다.

전기효율과 발생전력의 절대적인 수치는 낮으나, 현재 수준의 장치를 이용하여 다양한 센서 및 무선통신 구동에 필요한 전력을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 통상 전기기기의 구동에 필요한 정전압 요건을 조정기, 전력저장을 위한 DC-DC 전환기 등에 필요한 전력을 감안하더라도 약 2개 채널의 무선 센서 구동에는 충분한 것으로 보인다.

일반적으로 열전소자는 상하 양면의 온도차가 클수록 출력과 효율이 증가하므로, 가능한 큰 온도차를 유발할 수 있도록 다음을 개선할 경우 시스템의 성능 증진이 기대된다. 보다 큰 면적의 프레넬 렌즈를 적용하여 수광면적이 큰 렌즈 적용 시 면적에 비례한 온도 상승이 기대된다. 현재 상용 태양열 집열기에 사용되는 선택적 흡수막 코팅을 heat spreader 상면에 적용해 볼 수 있다. 또한 단열재 등을 보강하기 위하여 발전 모듈 결합체의 구조를 개선할 여지가 있다.

### References

- [1] Jae Hyuk Shin, Seung Shin Yi, Sang Min Kim, Joon Hong Boo, "An experiment study on the performance of a concentrating photovoltaic cell as a function of temperature", Proceedings of KSES 2013 spring conference, 32, pp. 96-101, 2012.
- [2] Eui-Guk Jung, Jong-Kyu Kim, Yong-Heack Kang, Joon-Hong Boo, "Heat Transfer Analysis of the Solar Thermal Storage System with Heat Pipe Array", Proceedings of KSES 2010 spring conference, 1, pp. 219-226, 2010.
- [3] Jung Ryun Lee, Joon Hong Boo, "Design of a Solar Thermal Storage System Employing Heat Pipes and Molten Salts", Proceedings of KSES 2011 spring conference, 1, pp. 86-91, 2011.
- [4] Min Kyu Park, Joon Hong Boo, "The Effect of Working Fluid Charge on the Performance of a Heat Pipe for Medium-temperature Solar Thermal Storage System", Proceedings of KSES 2011 spring conference, 31, pp. 68-73, 2011.
- [5] Daniel Kraemer, Bed Poudel, Hsien-Ping Feng, J. Christopher Caylor, Bo Yu, Xiao Yan, Yi Ma, Xiaowei Wang, Dezhi Wang, Andrew Muto, Kenneth McEnaney, Matteo Chiesa, Zhifeng Ren, Gang Chen, "High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration", Nature Materials, 10, pp. 532-538, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat3013>
- [6] Lauryn L. Baranowski, G. Jeffrey Snyder, Eric S. Toberer, "Concentrated solar thermoelectric generators",

Energy and Environmental Science, 5, pp. 9055-9067, 2012.

DOI: <https://doi.org/10.1039/c2ee22248e>

- [7] M. L. Olsen, E. L. Warrenb, P. A. Parillaa, E. S. Toberera, b, C. E. Kennedy, G. J. Snyder, S. A. Firdosyd, B. Nesmithd, A. Zakutayeva, A. Goodricha, C. S. Turchia, J. Nettera, M. H. Graya, P. F. Ndionea, R. Tirawata, L. L. Baranowskib, A. Graya, D. S. Ginleya, "A High-temperature, high-efficiency solar thermoelectric generator prototype", Energy Procedia, 49, pp. 1460-1469, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.155>
- [8] Dae-Ho Kim, Seungwoo Han, "Evaluation of effects on the performance of thermoelectric generators using solar energy", Proceedings of KSES 2013 spring conference, 33, pp. 41-46, 2013.
- [9] Y. S. Cho, Y. H. Park, Y. S. Yang, "An Experimental Study of the Solar Thermoelectric Generation System," Solar Energy, Journal of KSES), vol. 18, no. 3, pp. 113-118, 1998.
- [10] Min-Gyu Kang, Woo-Jin Seo, In-Sung Her, Young Moon Yu, Hee-Lack Choi, "Study on Heat Transfer Performance of Heat Spreader depending on the Filling Rate of Working Fluid", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineer, vol. 31, no. 2, pp. 1-10, 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2017.31.2.001>
- [11] Hong-Koo Noh, Kyung Bin Lim, Man Heung Park, "Colling performance of a Notebook PC Mounted with heat Spreader", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, vol. 25, no. 6, pp. 766-775, 2001.

---

### 최 경 후(Kyungwho Choi)

[정회원]



- 2006년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학사)
- 2008년 4월 : University of Michigan 기계공학과 (공학석사)
- 2013년 12월 : Texas A&M University 기계공학과 (공학박사)
- 2013년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

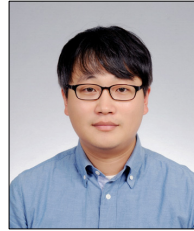
<관심분야>

열전발전, 유연 열전소자, 에너지 하베스팅

---

### 안 다 훈(Dahoon Ahn)

[정회원]



- 2006년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학사)
- 2013년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2014년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

에너지 하베스팅, 정밀 모션 기구

---

### 부 준 흥(Joon Hong Boo)

[정회원]



- 1978년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1984년 12월 : Georgia Institute of Technology 기계공학과(공학석사)
- 1989년 3월 : Georgia Institute of Technology 기계공학과 (공학박사)
- 1989년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 조교수, 부교수, 교수

<관심분야>

열전달, 히트파이프, 신재생에너지