

## 폐열에너지 하베스팅을 위한 열전모듈 발전특성 연구

윤진철<sup>†</sup> · 주정명\* · 황종현\* · 박성진

포항공과대학교 기계공학과, \*현대중공업 중앙기술원

(2016년 11월 21일 접수, 2016년 12월 16일 수정, 2016년 12월 21일 채택)

## Power generation characteristics of thermoelectric module for waste heat energy harvesting

Jin Chul Yun<sup>†</sup> · Jung Myoung Ju\* · Jong Hyun Hwang\* · Seong Jin Park

Department of Mechanical Engineering, POSTECH, \*Hyundai Heavy Industries

(Received 21 November 2016, Revised 16 December 2016, Accepted 21 December 2016)

### 요 약

CO<sub>2</sub> 배출 규제와 에너지 소비 절감의 요구가 늘어남에 따라, 버려지는 열을 수확하여 전기를 생산하기 위한 열전발전 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 폐열 에너지 회수장치로 사용하기 위한 열전모듈의 발전 특성을 분석하였다. Bismuth telluride로 제작된 열전모듈에 다양한 온도 조건을 부여하며 이에 따른 열전 거동을 분석하였다. 또한 다양한 온도 조건에서의 열전모듈의 발전 효율을 실험 및 이론에 의해 분석하였다. 이로 부터, 열전모듈로 열에너지를 보다 효율적으로 회수하기 위한 최적의 작동조건을 제시하였다.

**주요어** : 폐열, 에너지 하베스팅, 열전모듈, 발전효율

Abstract - (Recently, due to limitation of CO<sub>2</sub> gas emission and increase of demand to reduce energy consumption, lots of researches are conducted to harvest wasted heat energy with a thermoelectric module to produce electricity by Seebeck effect. This study was conducted to analyze characteristics of the thermoelectric module to apply for a heat energy harvesting device. Thermoelectric module composed of bismuth telluride was tested with various temperature conditions to analyze thermoelectric behavior of the module. Power generation efficiency of the thermoelectric module for various temperature condition was analysed with both experimental and theoretical methods. From the results, an optimum condition to harvest wasted heat energy with the thermoelectric module more efficiently was proposed.)

**Key words** : Waste heat, Energy harvesting, Thermoelectric module, Power efficiency

## 1. 서론

열전(Thermoelectric)이란 열과 전기 사이의 에너지 변환을 의미하며, 특히 변환소자의 양쪽에 온도차이가 있을 때 소자 내부의 전하 운반체가 이동함으로써 기전력이 발생하는 현상을 제백 효과(Seebeck effect)라고 한다. 열전발전(Thermoelectric Generation, TEG)은

반도체 재료가 가지고 있는 이러한 열전변환 특성을 이용하여 시스템화한 것으로, 소음이 없고 신뢰성이 높을 뿐 아니라, 일반적인 폐열 이용의 한계 온도라고 하는 150 °C 이하의 저급열을 이용해서 전기를 얻을 수 있는 유일한 방법으로 기대되고 있는 발전 방법이다[1].

CO<sub>2</sub> 배출 규제와 에너지 소비 절감의 요구가 늘어남에 따라, 버려지는 열을 수확하여 전기를 생산하기 위한 열전발전에 대한 수요가 높아지고 있다. 특히, 자동차의 폐열을 이용한 발전을 통해 연비를 높이기

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Tel : +82-54-279-8763 E-mail : blwater@postech.ac.kr

위한 연구가 활발히 진행 중에 있다[2,3]. 그러나 아직까지는 에너지 변환 효율과 출력밀도가 비교적 낮으며, 소재 및 모듈의 가격이 고가로서 경제성이 만족되지 못하였기 때문에 널리 실용화되지는 않고 있다. 그러나 지속적인 연구의 결과로 상용 열전모듈의 에너지 변환 효율이 8~11% 정도까지 상승되었으며, 나노기술의 발전과 함께 앞으로 더욱 높은 효율을 가지는 열전소재가 개발될 것으로 기대되고 있다[4].

본 연구는 폐열에너지 회수를 위한 열전발전 시스템 개발의 선행연구로, 열전모듈의 발전특성을 상세히 분석하고, 이를 바탕으로 보다 높은 효율을 가지는 열에너지 하베스팅 시스템을 구성할 수 있는 방안을 제시하기 위해 수행되었다.

## 2. 열전모듈 특성분석

### 2-1. 열전모듈 소개

제백 효과를 구현하기 위해서는 두 개의 서로 다른 금속이 2개의 접점을 가지고 있어야한다는 전제조건이 필요하다. 그러나 한 쌍의 소자로는 큰 발전 또는 냉각 효과를 기대하기 어렵기 때문에, 이들 소자를 여러 개 직렬로 연결한 형태를 하고 있다. 이를 열전모듈 (Thermoelectric module, TEM)이라고 한다.

열전모듈의 특성상 최고의 효율을 내기 위해서는 높은 제백 계수, 낮은 전기저항 그리고 낮은 열전도성을 가지는 재료를 사용해야 한다. 제백 계수가 높다는 것은 작은 온도차에서도 높은 발전효과를 가질 수 있다는 것을 의미한다. 전기저항이 개입되는 이유는 반도체 스스로의 발열 때문이다. 이는 열전모듈의 효율을 떨어트리는 요인으로 작용하게 된다. 열로 손실되는 에너지의 양은 저항값의 제곱에 비례하기 때문에 저항이 낮으면 낮을수록 소자 자체의 발열이 적어서 소자 자체의 발열로 인한 전체적인 온도의 상승을 억제할 수 있다.

열전도성이 낮아야 한다는 것은 전위차에 의해 유도된 소자 양단의 온도차를 그대로 유지시키기 위함이다. 만약 열전도성이 높다면 양단의 온도차를 만들어준 것이 무의미하게 되기 때문이다.

이러한 모든 성질을 종합한 것이 메리트 상수(Figure of merit)이다. 메리트 상수는  $Z$ 라는 약자로 표기되며 절대온도  $T$ 를 곱한 무차원 계수로서 다음과 같은 식으로 표현된다[3].

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} T$$

where:

$\alpha$  : 제백 계수 (volt · kelvin<sup>-1</sup>)

$\sigma$  : 전기전도도 (ampere · volt<sup>-1</sup> · meter<sup>-1</sup>)

$\kappa$  : 열전도도 (watt · meter<sup>-1</sup> · kelvin<sup>-1</sup>)

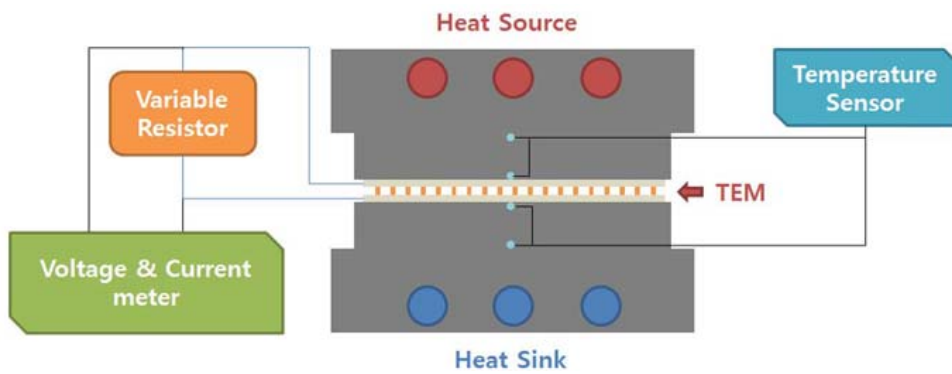
$T$  : 온도 (kelvin)

열전소재의  $ZT$  값이 최소한 2 이상이 되어야 열전발전의 상용화가 가능할 것으로 보고 있다. 현재 열전소재로 널리 사용되고 있는 Bismuth telluride는 0 ~ 200 °C 사이의 온도에서 최대 1 정도의  $ZT$  값을 가지는 것으로 알려져 있다[5].

### 2-2. 실험 방법

열전모듈의 발전출력은 열전모듈 고온단과 저온단의 온도 자체에 의해서도 크게 달라진다. 따라서 최적의 효율을 가지는 열전발전 시스템을 설계하기 위해서는, 열전모듈의 온도조건 변화에 따른 발전특성의 상세한 측정결과가 필요하다. 이를 위해 다양한 온도 조건에서의 열전모듈의 발전특성을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 온도제어가 가능한 가열부와 냉각부 사이에 열전모듈을 삽입하고, 온도조건을 변화시켜가며 열전모듈에서 발생하는 전압과 전류를 측정하였다. 이 때, 열전모듈의 상하단 온도센서 외에 2개의 온도센서를 추가로 장착하여, 열량을 측정할 수 있도록 하였다. Fig. 2-1에 열전모듈 발전특성 실험장치의 개략적인 구성도 및 실제 형상, 그리고 열전모듈의 형상을 나타내었다.

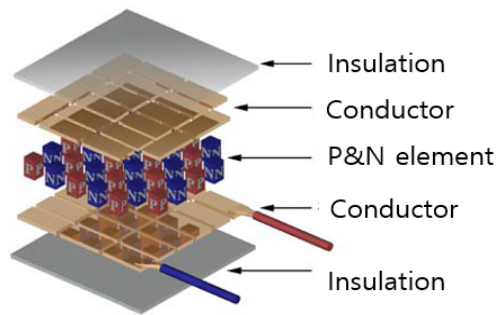
열전모듈이 전기회로에 연결되면 자체적인 내부 전기저항이 발생한다. 이 전기저항이 회로에 걸리는 부하저항과 정확히 일치할 때 최대의 전기 출력이 발생하게 된다(Fig. 2-2). 따라서 최대의 출력을 낼 수 있는 열전발전시스템을 구성하기 위해서는 온도조건에 따른 열전모듈의 내부저항을 파악해야 한다. 실험에 사용된 열전모듈은 Bismuth telluride 계열로 제작되었다. 다양한 범위의 저온단 및 고온단의 온도 조건에 대해, 회로에 연결된 내부저항의 값을 변화시켜가며 최대의 출력을 나타내는 저항값 및 그 때의 전압과 전류를 측정하였다. 또한 실험장치에 장착한 온도센서들로부터 열전모듈에 흐르는 열량을 계산하여, 이를 바탕으로 열전모듈의 열전도도를 계산하였다.



(a) Systematic view of the experimental apparatus

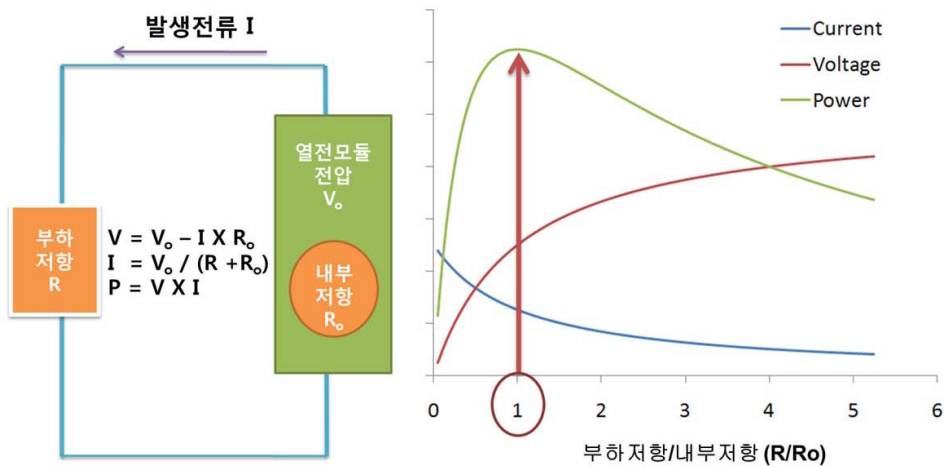


(b) Experimental apparatus



(c) Thermoelectric module

**Fig. 2-1.** Test apparatus for characteristic analysis of thermoelectric module



**Fig. 2-2.** Relation between internal resistance and electric power of TEM

**2-3. 발전특성 분석**

열전모듈 양단의 온도조건에 따른 최대 발전출력 측정결과는 Fig. 2-3과 같다. 열전모듈의 최대 발전출력은 같은 온도차에서는 저온단의 온도가 낮을수록

크며, 같은 저온단의 온도에 대해서는 온도차가 클수록 커짐을 알 수 있다. 이 결과로부터 열전모듈에서 발생하는 전압은 모듈 양단의 온도차에 비례함을 알 수 있다.

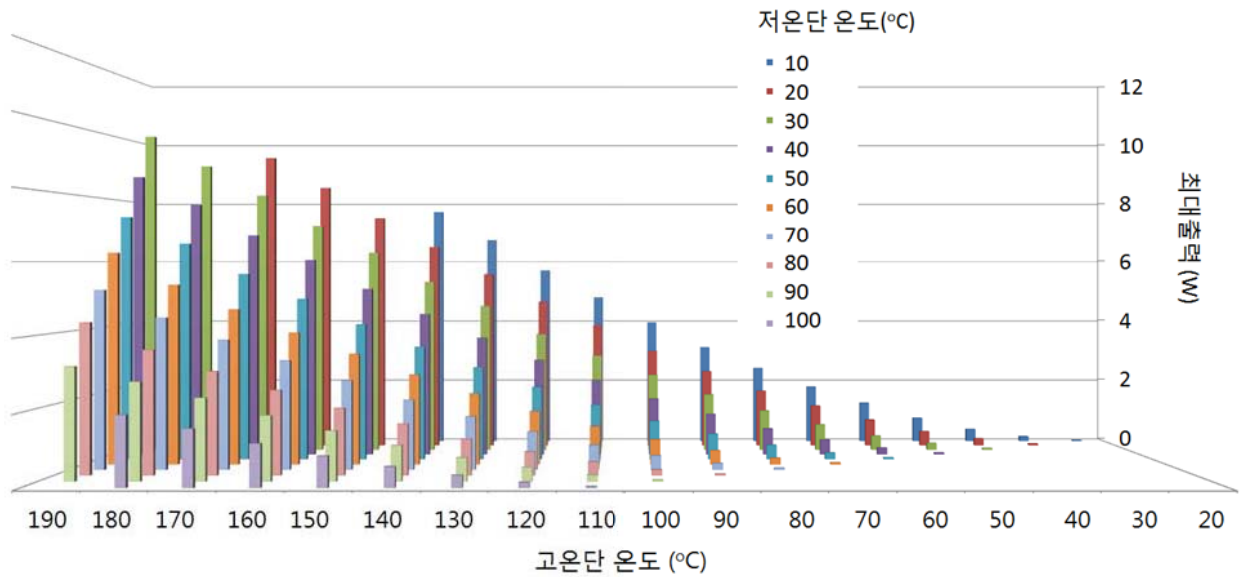


Fig. 2-3. Maximum power measurement of TEM for variable temperature condition

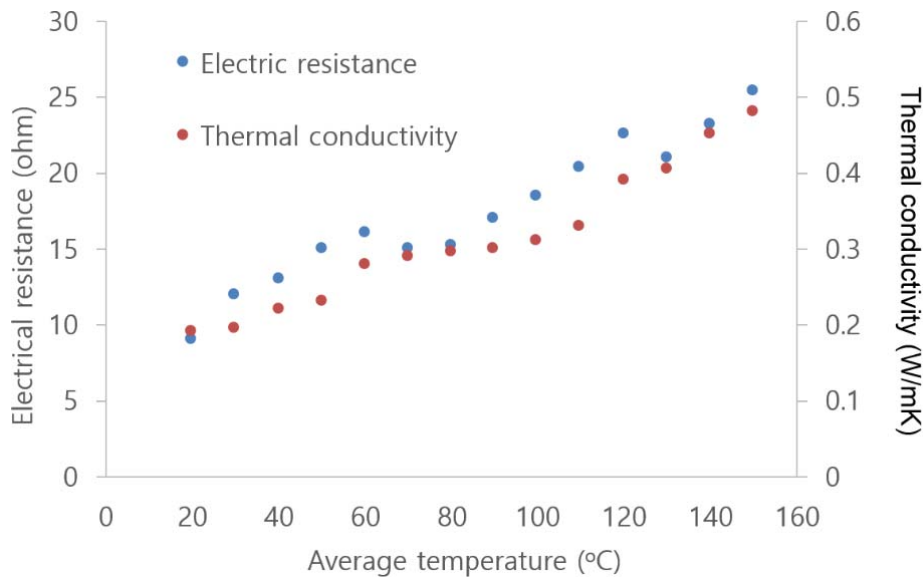


Fig. 2-4. Electrical & thermal properties on power generation vs. average temperature

#### 2-4. 내부저항 분석

다양한 온도조건에 따른 열전모듈의 내부저항을 최대의 전기출력이 발생하는 조건에서의 가변저항 값으로부터 측정하였다(Fig. 2-4). 열전모듈의 최대 발전출력은 열전모듈의 내부저항과 부하저항이 일치할 때 나타나므로, 열전모듈의 양단 평균온도가 높아질수록 열전모듈의 내부저항이 서서히 증가한다는 사실을 알 수 있다. 온도가 올라가면 결정을 이루고 있는 원자들의 운동이 활발해져서 열전소재 내부의 결함의 수가

증가한다. 또한 격자를 이루고 있는 원자들의 진동 운동도 활발해져서 전자의 이동을 방해한다. 이러한 현상들은 열전소재 내부를 흐르는 전자의 유동을 방해하는 요인으로 작용하게 되므로, 열전모듈의 온도가 올라가면 전기 저항이 증가하게 된다[6]. 2-1장에서 언급한 메리트 상수의 정의로부터, 상온 영역에서는 열전모듈의 온도가 낮아질수록 전기전도도가 증가하여 메리트 상수가 커지므로 발전효율이 높아질 것임을 예측할 수 있다.

2-5. 열전도도 분석

열전모듈 양단의 평균온도에 따른 최대출력 발생 시 열전도도 측정결과를 Fig. 2-4에 나타내었다. 열전모듈의 양단 평균온도가 높아질수록 열전모듈의 열전도도가 서서히 증가한다는 사실을 알 수 있다. 고체물질에서의 열전도 현상은 자유전자의 이동에 의한 열에너지 이동과 결정 격자구조의 진동에 의한 파동에너지 이동의 합으로 정의된다. 금속과 같은 도체의 경우 온도가 상승함에 따라 전기저항이 증가하고, 이에 따라 자유전자에 의한 열에너지 이동을 방해하게 되어 열전도도가 감소하는 효과가 있다[7]. 그러나 Bismuth telluride와 같은 혼합 물질의 경우, 불순물이 들어 있기 때문에 격자진동을 주요한 열전달 메커니즘으로 볼 수 있다. 온도가 상승할수록 결정격자의 진동이 증가하며 이에 의한 에너지 전달이 더 용이하게 되어, 전체 열전달계수가 높아지게 된다. 앞서 2-1장에서 언급한 메리트 상수의 정의로부터, 상온 영역에서는 열전모듈의 온도가 낮아질수록 열전도도가 감소하여 메리트 상수가 커지므로 발전효율이 높아질 것임을 예측할 수 있다.

3. 열전모듈 발전효율 분석

3-1. 양단온도별 최대효율 분석

열전발전의 효율은 열전모듈에 들어온 열과 발전출력의 비로, 옴의 법칙과 카르노 열기관 효율공식 및 열전모듈의 상수 등으로부터 다음과 같은 식으로 표현

할 수 있다[8].

$$\eta_{max} = \frac{P}{Q} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + T_c/T_h}$$

where:

- $\eta_{max}$  : TEM 최대효율
- $P$  : TEM 발전출력 (watt)
- $Q$  : TEM 입사열 (watt)
- $T_h$  : TEM 고온단 온도 (kelvin)
- $T_c$  : TEM 저온단 온도 (kelvin)
- $Z$  : 상수 (kelvin<sup>-1</sup>)
- $T$  : TEM 양단 평균온도 (kelvin)

위의 식을 바탕으로, Bismuth telluride의 Z값과 양단의 온도를 변수로 하여 열전모듈 양단의 온도 조건에 따른 최대효율을 Fig.3-1에 나타내었다. 입사열과 발전출력 측정결과로부터 계산한 열전모듈의 효율은 Fig. 3-2와 같다. 이로부터, 이론과 실제 측정결과가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다.

3-2. 온도차별 최대효율 분석

이론식으로부터 계산한 열전모듈의 최대 발전효율을 양단 온도차와 저온단 온도의 관계로 재정리하여 Fig. 3-3에 나타내었다. 이로부터, 각 온도차별로 최대의 효율을 나타내는 최적의 온도조건이 존재함을 알 수 있다. 이는 최고의 발전효율을 얻기 위한 폐열회수 시스템의 냉각설계 시 중요 자료로 이용될 수 있다.

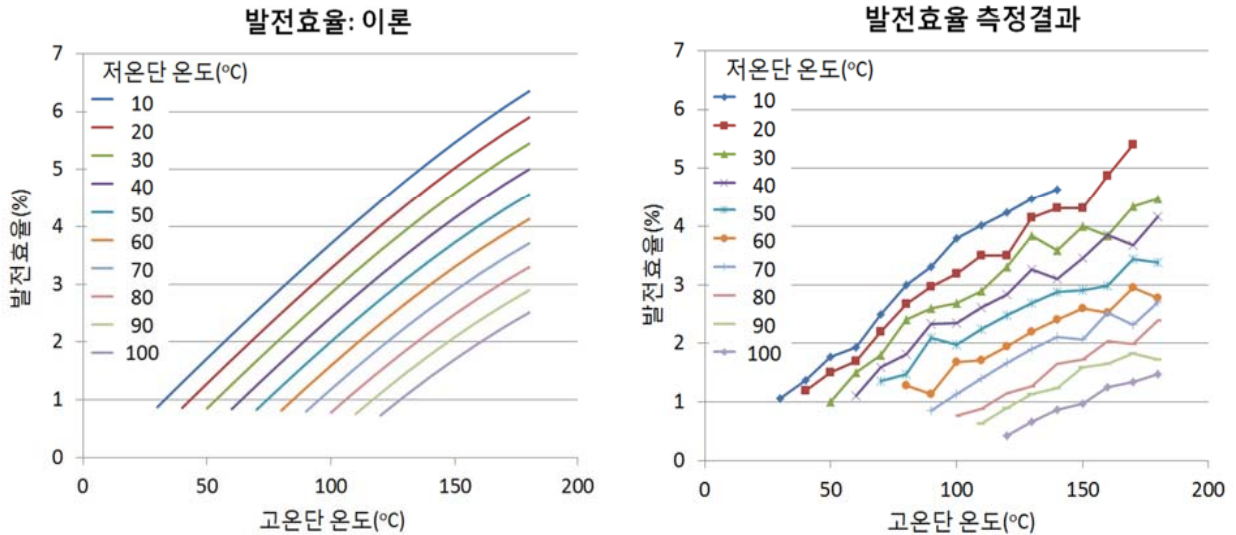


Fig. 3-1. Theoretical and experimental efficiency vs. temperature difference of TEM

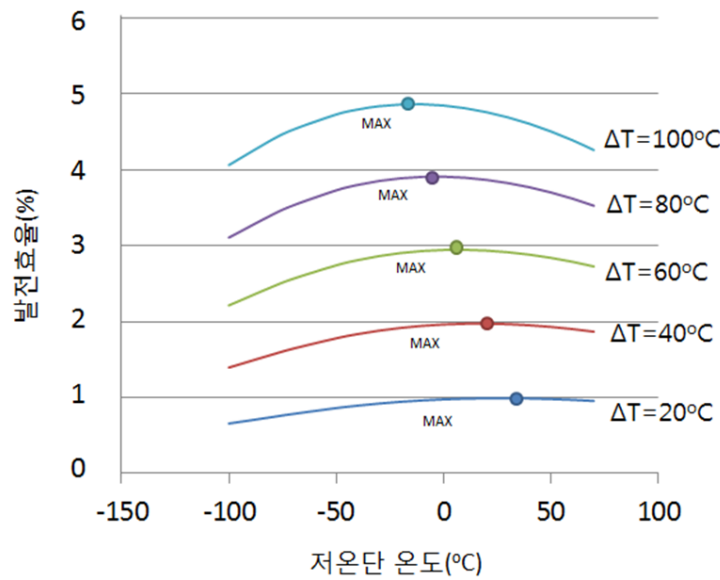


Fig. 3-3. Relation between theoretical maximum efficiency and temperature difference of TEM

#### 4. 결론

본 연구는 열에너지 하베스팅을 위한 열전발전 시스템 개발의 선행연구로, 열전모듈의 발전특성을 상세히 분석하고, 이를 바탕으로 보다 높은 효율을 가지는 열에너지 하베스팅 시스템을 구성할 수 있는 방안을 제시하기 위해 수행되었다. 연구 결과, Bismuth telluride 계열의 열전모듈은 모듈 양단의 온도차에 비례하여 발전출력 및 효율이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 발전효율은 상온의 경우 저온단의 온도가 낮을수록 효율이 높아짐을 실험으로 확인하였으며, 상온보다 낮은 온도에서는 최대의 효율을 가지는 최적의 온도조건이 존재함을 확인하였다. 향후 열에너지 하베스팅을 위한 열전발전 시스템 설계 시, 최적의 온도조건을 찾아내는 데 본 연구 결과를 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

1. Sim, J. D., 2010, Development trends in thermoelectric materials for energy converting, KISTI, pp. 1-10
2. Tang, Z. B., et al., 2015, A research on thermoelectric generator's electrical performance under temperature mismatch conditions for automotive

- waste heat recovery system, Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 5, No. 17, pp. 143-150
3. Huang, G. Y., et al., 2016, Optimization of a waste heat recovery system with thermo electric generators by three-dimensional thermal resistance analysis, Energy Conversion and Management, Vol. 126, No. 26, pp. 581-594
4. Lee, H. W., 1999, Development of 1kW thermoelectric generator, KERI, pp. 10-30
5. T. Hendricks., et al., 2006, Engineering scoping study of thermoelectric generator systems for industrial waste heat recovery, U.S. Department of Energy, pp. 8-13
6. W. W. Tyler, et al., 1953, Thermal conductivity, electrical resistivity, and thermo-electric power of graphite, Physical Review Letters, 1953, Vol. 89, No. 4, pp. 870-875
7. Kim, S. W., 2013, Nanostructure-based high-performance thermoelectric energy conversion technology, Physics and high technology, Vol. 22, pp. 10-14
8. G. Snyder, et al., 2003, Thermoelectric efficiency and compatibility, Physical review letters, Vol. 91, pp. 14-17