

열전발전소자 제작 및 발전특성 분석

최태호¹, 김태영^{2*}

¹서울과학기술대학교 기계자동차공학과 학생, ²서울과학기술대학교 기계자동차공학과 교수

Fabrication of Thermoelectric Module and Analysis of its Power Generation Characteristics

TaeHo Choi¹, Tae Young Kim^{2*}

¹Student, Department of Mechanical and Automotive Engineering,
Seoul National University of Science and Technology

²Professor, Department of Mechanical and Automotive Engineering,
Seoul National University of Science and Technology

요약 본 연구에서는 산업현장에서 미활용되는 열에너지를 회수하여 유용한 전기에너지로 변환하기 위한 Bi₂Te₃ 계열 열전소자를 제작하고 에너지회수 성능 및 물성을 도출하였다. 성능시험을 위하여 카트리지 히터 가열 방식의 가열블록과 냉매가 흐르는 냉각블록으로 구성된 전용 실험장치를 구성하였으며, 가열블록과 냉각블록에는 3×3 배열의 열전대를 장착하여 소자 양 면 온도와 열전달율을 도출하였다. 최소 온도차 27K부터 최대 온도차 172.2K 까지 총 9가지의 온도차에 대해 실험을 수행하여 V-I curve와 P-R curve를 도출하였고 성능에 주요한 영향을 미치는 제벡계수 등 변수 7가지에 대하여 온도차에 대한 함수로 결과를 제시하였다. 최대 발전양 7.5W와 변환효율 11.3%의 결과로부터 개발된 열전소자의 열에너지 회수 성능의 타당성을 검증하였다.

주제어 : 열전발전, 에너지회수, 폐열회수, 제벡계수, 에너지변환

Abstract In this study, a Bi₂Te₃ thermoelectric generator (TEG) was fabricated to convert unused thermal energy into useful electrical energy. For the performance test, a dedicated experiment device consisting of a heating block operating with cartridge heaters and a cooling block through which a refrigerant flows was constructed. A 3×3 array of thermocouples was mounted on the heating block and the cooling block, respectively, to derive the temperature fields and heat transfer rate onto both sides of the TEG. Experiments were conducted for a total of 9 temperature differences, obtaining V-I and P-R curves. The results of 7 variables including Seebeck coefficients that have a major effect on performance were presented as a function of the temperature difference. The feasibility of the energy recovery performance of the developed TEG was verified from the maximum power output of 7.5W and conversion efficiency of 11.3%.

Key Words : Thermoelectric generation, Energy harvesting, Waste heat recovery, Seebeck coefficient, Energy conversion

1. 서론

산업현장 및 생활환경에서 미활용되는 열에너지의

효과적인 회수와 유용한 에너지원으로서의 전환에 대한 관심이 높아지고 있다[1]. 그 중 열전소자 (TEG)를 이

*This study was supported by the Research Program funded by the SeoulTech(Seoul National University of Science and Technology).

*Corresponding Author : Tae Young Kim(tykim@seoultech.ac.kr)

Received December 28, 2020

Revised January 18, 2021

Accepted February 20, 2021

Published February 28, 2021

용한 방식은 구동부가 존재하지 않아서 소음과 진동발생이 적고, 시스템 구성이 간단하고 열원의 조건에 따라 스케일을 유연하게 변화시킬 수 있으며, 다양한 종류의 열원으로의 적용이 가능하다. 또한, 열이 직접 전기로 변환되는 점과 열전소자의 에너지 변환효율이 점차 증가하는 추세에 있음에 따라 앞으로의 활용성도 높아질 것으로 보인다[2]. 열전소자 에너지변환 성능은 열원의 온도차에 의하여 영향을 받으며, 소자의 열 및 전기적 특성의 분석이 있어야만 시스템의 적절한 구성 및 성능 예측, 열원의 효과적인 활용이 가능하다 [3]. 이에 따라 최근 열전소자의 성능 예측에 필요한 물성 도출에 대한 연구가 진행되고 있다. Lee[4] 등은 개발사에서 제공한 제한적인 정보로 열전소자의 기초 물성을 이론적으로 도출할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. Elarus 등[5] 또한 평균 온도를 가정한 이론적인 방법으로 열전소자의 최대 발전양, 전류, 효율을 도출하였다. Lineykin과 Ben-Yakoov[6] 및 Luo[7]도 제조사에서 제공한 정보를 이용하여 소자물성을 해석적으로 도출하는 연구를 수행하였다. Ahiska 등[8]은 컴퓨터 이용 제어기술을 접목하여 열전소자의 성능변수를 측정하였다. 하지만 기존 연구에서는 물성 측정시 온도 측정을 1차원 온도 분포측정에 국한하거나 고온부의 단열 구성이 타당하게 진행되지 않는 단점이 존재한다 [9]. 또한, 기존 연구는 발전용 소자에 대한 결과 및 분석이 부족하다.

본 연구에서는 열에너지 회수를 위한 열전소자를 제작하고 열원 모사 실험장치를 구성하여 제작된 소자의 발전특성, 제백계수 (Seebeck coefficient), 전기저항, 에너지 변환효율 등을 온도차에 대한 함수로 분석한다.

2. 실험적 연구

2.1 열전소자

본 연구에서는 열전소자 제작 전문업체인 ㈜리빙케어와의 협업을 통하여 Bi₂Te₃ 계열의 열전발전 전용소자를 Fig.1 과 같이 제작하였다. 소자는 161개의 n-p 반도체 커플로 구성하였고 반도체 각각은 구리 전극으로 연결하였으며 소자 양 면을 1 mm 두께의 Al₂O₃ 세라믹 판으로 절연하였다. 소자의 면적은 44x44 mm², 소자의 높이는 3.6 mm 이다.

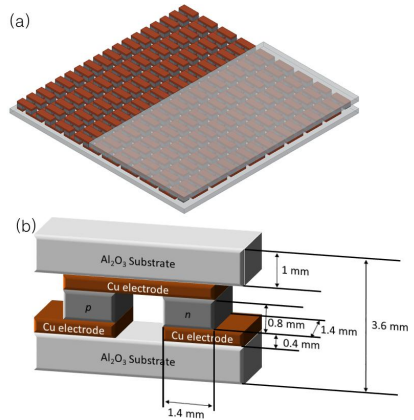


Fig. 1. Isometric views of (a) the fabricated TEG and (b) a p-n thermoelectric couple

2.2 실험장치 및 방법

2.2.1 실험장치

개발된 열전소자의 에너지 변환 특성을 분석하기 위하여 Fig. 2와 같이 열전소자 성능시험기 (TEG tester)를 구성하였다.

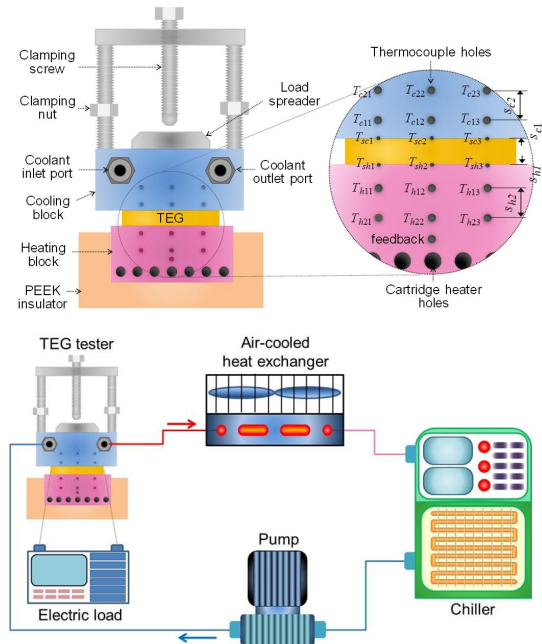


Fig. 2. Schematics of (a) TEG tester (b) the entire experimental setup. Not shown is a power supply.

열전소자는 카트리지 히터 7개로 가열하는 알루미늄 가열블록 위에 배치되며, 가열블록의 나머지 면은 열손

실 방지를 위하여 PEEK 단열재로 감싸져 있다. 열전소자의 윗 면은 물-에틸렌글리콜 50:50 비율의 냉매로 냉각되는 알루미늄 냉각블록에 접촉한다. Clamping screw와 Nut를 토크렌치로 회전하여 열전소자를 가열블록과 냉각블록 사이에서 8kgf·cm의 토크로 장착하였다. 가열블록과 냉각블록에는 3×3 배열의 열전대를 삽입하여 히터로부터 열전소자로 전달되는 열전달율, 열전소자에서 냉매로 전달되는 열전달율, 열전소자의 양 면 온도를 도출하였다. 가열블록의 가장 하단 중앙부 Hole에는 카트리지 히터 제어부와 연결된 열전대를 삽입한다. 해당 열전대로부터 전송받은 가열블록 온도로부터 카트리지 히터에 공급되는 전류가 PID 제어되어 가열블록의 온도를 목표온도로 유지한다. 열전소자로부터 열을 제거한 냉매는 공랭식 열교환기를 통과하며 1차적으로 냉각되고 Chiller로 유입되어 최종 냉각된 후 Pump에 의하여 냉각블록으로 전송된다 [10].

2.2.2 실험방법

PID 제어를 통하여 가열블록이 목표온도에 도달한 후 시스템이 정상상태에 도달하면 가열블록과 냉각블록에 삽입된 열전대로부터 온도측정을 수행한다. 정상상태는 열전대로부터 도출되는 열전소자 표면 온도를 1초마다 측정하고, 이 표면 온도가 120초 동안 0.1K 이하로 변화할 때로 정의하였다. 정상상태에서는 전자로더의 저항을 0.2Ω부터 300Ω 까지 변화시켜가며 열전소자의 발전특성도 함께 측정한다. Feedback 열전대로부터 측정되는 고온부의 목표온도를 313K부터 473K까지 20K 간격으로 변화시키며 결과를 측정하였다. 열전소자 고온 및 저온면에 실제로 인가된 온도 값은 가열블록 및 냉각블록에 각각 삽입된 3×3 배열의 열전대의 온도 측정 결과를 Fourier 법칙에 적용하여 도출하였다. 해당 계산시 가열 및 냉각 블록을 구성하는 알루미늄의 열전도도는 170 W/m·K로 사용되었으며, 3개 열 (Row)의 열전대로부터 도출된 표면 온도를 평균하여 평균 고온부 표면 온도 및 저온부 표면 온도로 사용하였다.

카트리지 히터에서 열전소자 고온면으로 전달된 열전달율과 열전소자 저온면에서 냉각수로 전달된 열전달율의 차이에서 열전소자의 발전량을 소거하면 대기로의 손실 열전달율으로 볼 수 있다. 카트리지 히터에서 전달된 열전달율 중에서 대기로 손실된 열전달율

의 비율은 카트리지 히터에서의 발열량이 낮을수록 커지는 것으로 계산되었으며 소자 고온부와 저온부 온도차가 27K일 때 최대 13.5%, 온도차가 172.2K 일 때 최소 3.5%를 차지하는 것으로 나타났다. 해당 열손실은 고온 블록을 감싸고 있는 PEEK 단열재를 통한 손실과 공기에 직접 노출되어 있는 열전소자의 측면, 냉각블록의 측면을 통한 것으로 볼 수 있다.

측정결과에 대해 Bias error와 Precision error를 도출하여 95% 신뢰도를 갖는 불확실도를 계산하였다. Bias error는 측정장치의 정확도와 측정변수의 Sensitivity coefficient를 도출하여 계산하였으며, Precision error는 3번 반복 측정한 실험결과의 표준편차와 t-분포를 이용하여 계산하였다. 이로부터 Open circuit voltage (V_{oc}), short circuit current (I_{sc}), Electrical resistance of TEG (R_e), power output (P_{max}), conversion efficiency (η_{conv}), thermal conductivity (k), Seebeck coefficient (α)의 최대 측정오차가 각각 1.2%, 3.7%, 4.1%, 3.3%, 7.7%, 9.2%, 8.7%로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1 V-I curve

Fig. 3은 개발된 열전소자의 Voltage output-current output (V-I) curve 들을 보여준다. 그래프를 가리키는 온도는 소자 양 면에 인가되는 온도차를 의미하며, 괄호 안의 값은 각 V-I curve의 기울기 절대값으로서 소자의 전기저항을 의미한다.

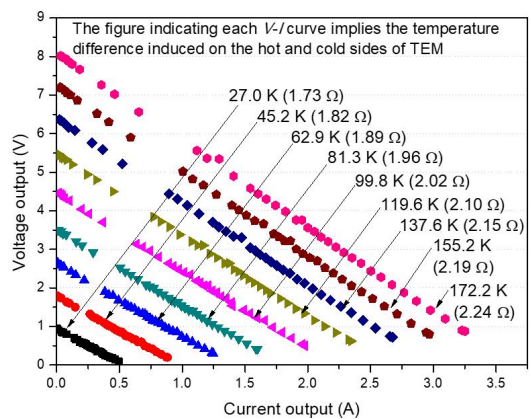


Fig. 3. V-I curves for various temperature difference across the developed TEG.

소자의 전압과 전류는 소자 양 면 온도차가 일정하

게 유지될 경우 선형적으로 표현될 수 있으며, 소자 양면의 온도차가 증가할수록 V_{oc} 와 I_{sc} 이 함께 증가하여 $V-I$ curve가 평행이동하는 형태로 나타난다. 고온에 노출된 소자의 경우 소재의 물성변화에 따라 $V-I$ curve의 경향성 변화가 나타나기도 한다 [11]. Fig. 3으로부터 본 열전소자는 온도차 172.2 K (고온부 온도기준 473 K) 까지 소자를 구성하는 n 형 및 p 형 반도체, Solder 물질의 물성 변화없이 열전에너지 변환을 통한 에너지 회수를 수행할 수 있음을 확인하였다. 소자의 전기저항 또한 소자 양면 온도차가 증가할수록 증가하는 추세를 보인다. $V-I$ curve로부터 도출할 수 있는 V_{oc} , I_{sc} , R_{el} 세 가지 물성을 온도차에 대한 함수로 표현하면 Fig. 4와 같다.

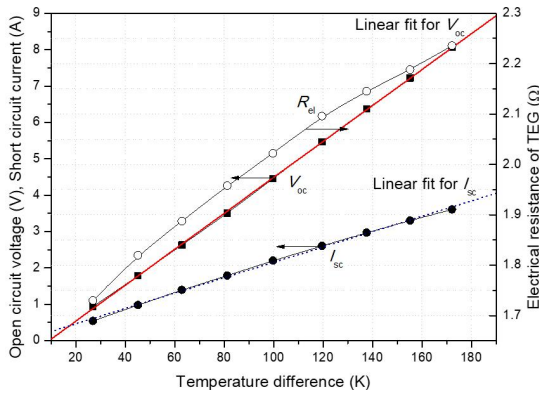


Fig. 4. Open circuit voltage, short circuit current, and electrical resistance of the developed TEG as a function of the temperature difference across the TEG.

열전소자가 본 연구에서의 최소 온도차 (27.0 K)을 경험할 때에 V_{oc} 는 0.94 V 수준이며 최대 온도차 (172.2 K)를 경험할 때 8.1 V까지 상승하며, 기울기가 거의 선형적으로 나타남을 알 수 있다. I_{sc} 의 경향성도 온도차에 거의 비례하게 나타나며 최소 온도차일 때 0.54 A에서 최대 온도차일 때 3.6 A로 증가한다. 열전소자의 최대 발전량은 이 후에 제시될 $P-R$ curve 등으로부터도 도출가능하나, 일반적으로 최대 발전량 시의 전압과 전류가 각각 V_{oc} 와 I_{sc} 의 절반에 해당한다는 점을 이용하면 Fig. 4에 제시된 관계로부터도 수월하게 도출 가능하다. V_{oc} 와 I_{sc} 는 다음의 수식 (1)과 (2)와 같이 Linear fit으로 도출가능하며, Fig. 4에서 각각 빨간 점선과 파란 점선으로 표시되어 있으며 V_{oc} 와 I_{sc} 추세를 본 연구에서의 온도차 범위에서 높은 정확도로 예측하

고 있음을 알 수 있다.

$$V_{oc} = 0.05\Delta T - 0.45 \quad (1)$$

$$I_{sc} = 0.02\Delta T + 0.042 \quad (2)$$

Fig. 4에 나타난 또 다른 물성은 열전소자의 전기저항이다. 소자의 전기저항 또한 소자가 경험하는 양면의 온도차가 증가할수록 함께 증가하는 추세를 보이며 최소 온도차인 27K 일 때 1.73 Ω, 최대 온도차인 172.2 K일 때 2.24 Ω으로 나타난다. 이처럼 Fig. 4에 주어진 V_{oc} 와 I_{sc} 추세는 소자의 성능예측에 활용될 수 있으며 소자의 전기저항은 소자의 최적사용 및 최대 발전량 도출에 활용될 수 있다.

3.2 P-R curve

Fig. 5는 Power output-load resistance ($P-R$) curve를 나타낸다. 전자로터의 저항이 0에 가까운 작은 값일 때에는 소자로부터의 발전량 또한 0에 수렴하는 모습이 나타나며, 로터의 저항이 증가함에 따라 소자의 발전량이 증가하는 추세가 나타난다. 소자로부터의 발전량은 전자로터 저항 약 2Ω 부근에서 최대가 되며, 로터의 저항이 더 증가할 경우 소자의 발전량이 완만하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 소자 양면의 온도차가 증가할수록 발전량 최대값 또한 함께 증가하며 온도차 172.2 K 경우 최대 발전량 7.5 W가 나타난다.

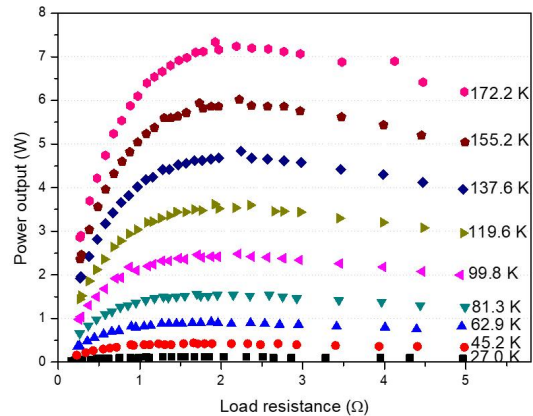


Fig. 5. $P-R$ curves for various temperature difference across the developed TEG.

Fig. 5로부터 도출할 수 있는 열전발전용 소자의 특

성은 소자 양 면의 온도차에 따른 최대 발전양과 에너지 변환 효율이다. 열전소자 양 면의 온도차가 주어질 때의 최대 발전양은 Fig. 5에 보이는 각 그래프의 최대 발전양 값으로부터 도출할 수 있으며, 최대 발전양과 가열히터로부터 열전소자로의 열전달율의 비를 이용하여 열전소자의 에너지 변환효율을 구할 수 있다.

Fig. 6으로부터 소자의 발전양은 온도차 증가에 따라 함께 증가함을 알 수 있으며, 빨간 선은 소자의 발전양을 온도차에 대한 2차 함수로 다음처럼 표현한 것이다.

$$P_{out} = 0.00025\Delta T^2 + 0.00108\Delta T - 0.117 \quad (3)$$

본 연구에서의 열전소자의 발전양은 일반적으로 알려져 있는 바와 같이 온도차의 제곱에 비례하는 형태로 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

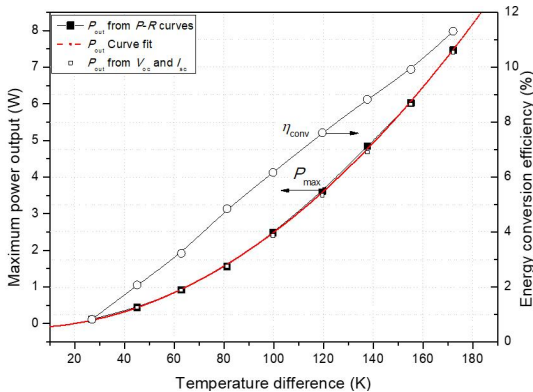


Fig. 6. Maximum power output and energy conversion efficiency as a function of the temperature difference across the TEG.

앞서 Fig. 3의 추세로부터 V_{oc} 와 I_{sc} 예측 상관식을 식 (1), (2)와 같이 온도차에 대한 1차 함수로 도출하였다. V_{oc} 와 I_{sc} 각각의 절반에 대한 값을 곱하여 열전소자의 발전양을 도출하여 Fig.6에 빈 네모 형태로 표현하였다. $P-R$ curve로부터 도출된 실제의 최대 발전양과 V_{oc} 와 I_{sc} 상관식으로 도출된 최대 발전양이 거의 일치함을 볼 수 있으며, 이 둘 간의 최대 오차는 3.5%로 나타났다.

에너지 변환효율은 온도차가 낮은 27K의 경우 0.8%로 미미한 수준으로 나타났으며, 온도차가 커질수록 함께 증가하여 최대 온도차인 172.2K에서 11.3%의 변환

효율을 보이고 있다. 이에 대한 원인으로는 온도차가 커질수록 소자로 전달되는 유효열전달율 대비 열손실 비율이 감소하기 때문이며, 저온 열전물질의 경우에도 낮은 온도나 온도차에서는 제백계수나 Figure of merit 값이 유의미한 값을 갖기 어렵게 때문이다.

소자 양 면의 온도차가 주어질 때, 소자로부터의 최대 발전양은 전자로터의 저항과 소자의 전기 저항이 일치하는 경우에 나타난다. Fig. 3 $V-I$ curve의 기울기와 Fig. 4 $P-R$ curve에서 최대 발전양이 나타날 때의 저항을 비교하면 Table 1과 같다. 단, $P-R$ curve로부터 얻어지는 최적 전자로터 저항은 데이터의 분산을 고려하여 발전양이 최대가 되는 부근에서 Curve fit을 먼저 도출한 후 최대 발전양에 해당하는 저항 값으로 정의하였다. 이때 Curve fit로부터 도출된 최대 발전양과 실제 발전양의 최대 오차는 4.3% 수준으로 나타남을 확인했다. Table 1에서 정리된 바와 같이 열전소자의 발전양을 최대로 하는 전자로터의 전기저항 $R_{load,opt}$ 또한 $V-I$ curve로부터 도출된 열전소자의 전기저항 R_{el} 와 마찬가지로 열전소자 양 면의 온도차가 증가할수록 함께 증가하는 경향이 있으며 1.9Ω에서 2.35 Ω 범위에 존재한다. R_{el} 와 $R_{load,opt}$ 의 백분율 차이의 절대값도 Table 1에 제시되어 있으며, 최대 약 9.8% 차이를 보 이면서 두 변수의 값이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 소자의 전기저항 값의 타당성 확보 및 해당 값에서의 최대 발전양에 대한 검증이 이루어졌다.

Table 1. Comparison of the electric resistance of the developed TEG obtained from the slope of $V-I$ curves and the electric load resistance that corresponds to the maximum power output yielded from Fig. 4.

| Temperature difference (K) | Resistance of TEG, R_{el} (Ω) | Load resistance, $R_{load,opt}$ (Ω) | Percentage difference (%) |
|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 27.0 | 1.73 | 1.9 | 9.8 |
| 45.2 | 1.82 | 1.97 | 8.3 |
| 62.9 | 1.89 | 1.98 | 4.9 |
| 81.3 | 1.98 | 2.12 | 8.3 |
| 99.8 | 2.02 | 2.16 | 6.8 |
| 119.6 | 2.10 | 2.2 | 5.0 |
| 137.6 | 2.15 | 2.27 | 5.8 |
| 155.2 | 2.19 | 2.35 | 7.4 |
| 172.2 | 2.24 | 2.32 | 3.8 |

3.3 열전소자의 추가적인 물성

열전소자가 Seebeck 효과를 이용하여 열전발전을

수행하고 있을 때 소자의 고온부로부터 유입되는 열량 (Q_h)와 소자의 저온부로부터 방출되는 열량 (Q_c)는 각각 다음의 수식 (4) 및 (5)와 같다.

$$Q_h = \alpha IT_h + K\Delta T - \frac{1}{2}I^2R \quad (4)$$

$$Q_c = \alpha IT_c + K\Delta T + \frac{1}{2}I^2R \quad (5)$$

여기서 α , I , T_h , K , ΔT , R , T_c 는 각각 제벡계수, 전류, 고온부 온도, Thermal conductance, 소자 양면의 온도차, 전기저항, 소자 저온부 온도를 의미한다. 소자로부터 발생하는 전압과 전류의 곱인 발전량은 Q_h 와 Q_c 의 차이로 볼 수 있으며, 전류가 0이 되어 V_{oc} 가 발생하는 경우 유효 Seebeck 계수는 다음의 수식 (6)과 같이 정의되어 실험결과로부터 도출될 수 있다.

$$\alpha = \frac{V_{oc}}{\Delta T} \quad (6)$$

열전소자의 추가적인 핵심 물성 중 하나인 열전도도는 Fourier 법칙으로부터 도출할 수 있다. 가열블록 및 냉각블록에 각각 삽입된 3×3 배열의 열전대 온도 측정 결과로부터 열전소자의 고온면 및 저온면 온도 뿐만 아니라 가열히터로부터 열전소자의 고온면로 전달된 열전달율과 열전소자의 저온면으로부터 냉매로 전달된 열전달율을 구할 수 있다. 열전소자의 열전도도를 구하기 위해서는 해당 두 가지 열전달율의 평균값을 활용하여 도출하였다.

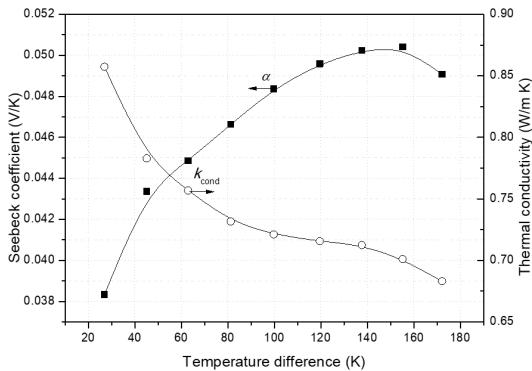


Fig. 7. Seebeck coefficient and thermal conductivity of the developed TEG as a function of the temperature difference across the TEG.

Fig. 7은 개발된 열전소자의 제벡계수와 열전도도를 소자 양 면 온도차에 대한 함수로 표현한 것이다. 제벡 계수는 최소 온도차 27K 일 때 0.0384 V/K의 값을 보이며 온도차 증가에 따라 함께 증가하여 온도차 155.2K 에서는 0.05V/K의 최대값을 보인다. 온도차가 더욱 증가할 경우 제벡계수는 감소하는 경향을 보이며 172.2K의 온도차에서 0.049V/K으로 최대값 대비 약 2.6% 감소한다. 제벡계수의 감소 원인으로는 본 열전소자의 경우 Bi₂Te₃ 기반 반도체로 구성되었다는 점을 들 수 있다. 해당 반도체 물질은 저온성능이 우수한 반면 고온에서는 Seebeck 계수를 비롯한 Power factor 가 감소하는 경향이 있으며, 온도차 172.2K일 때 고온면 평균온도가 473K으로 중온영역에 접근한 값을 보이기 때문이다.

본 열전소자의 열전도도 (k_{cond})는 소자 온도차에 따라 감소하는 경향이 나타나며 최소 온도차인 27K에서 0.86 W/m·K, 최대 온도차인 172.2K에서 0.68 W/m·K로 감소하는 경향이 나타난다. 열전소자의 성능을 대표하는 Figure of merit, ZT 는 $\alpha^2 \sigma T / k_{cond}$ 로 표현되며 σ 는 전기전도도를 의미한다. 이에 따라 낮은 열전도도의 소자일수록 높은 ZT 값을 갖을 수 있음에 따라 낮은 열전도도를 갖는 소자 개발에 대한 요구가 있다. 본 연구에서의 소자는 1 W/m·K 이하의 열전도도를 가지며 온도 및 온도차 증가에 따라 감소하는 경향을 보유했으며 저온 열원의 효율적인 에너지 회수에 대한 가능성을 가지고 있다 [12]. 단, 본 연구에서 측정된 열전도도는 개발된 열전소자의 열저항 뿐만 아니라 열전소자와 가열블록, 열전소자와 냉각블록 사이에 존재하는 접촉 열저항이 반영되어 도출된 결과이므로 열전소자만의 열전도도를 얻기 위해서는 접촉 열저항을 계산 [13]이나 실험적인 방법 [2]에 의하여 획득 후 제거함으로써 도출할 수 있을 것으로 보인다. 또한 열전소자의 내부가 p 형 및 n 형 반도체가 물질이 잘 알려진 구리 전극과 알루미늄 판 사이에 주기적으로 배치된 형태라는 점을 이용하여 구성 물질의 두께와 길이 등의 치수정보로부터 열전도도의 평균적인 값을 계산하여 사용할 수 있을 것으로 보인다 [13].

4. 결론

본 연구에서는 Bi₂Te₃ 계열의 에너지 회수용 열전소자를 제작하였으며 전용 실험장치를 구성하여 발전 특

성과 물성을 도출하였다. 카트리지 히터로 구성된 가열 블록과 냉매가 흐르는 냉각블록 사이에 열전소자를 장착한 후 정상상태에서 성능을 측정하였으며, 가열블록과 냉각블록에서의 온도를 측정하여 소자 표면 온도 및 소자로의 열전달율을 함께 도출하였다. 결과로부터 $V-I$ 및 $P-R$ curve를 도출하였으며, 열전발전 특성과 밀접한 연관성이 있는 V_{oc} , I_{sc} , R_{el} , P_{out} , η_{conv} , α , R_{cond} 의 총 7가지의 변수 값을 소자 양 면의 온도차에 대한 함수로 표시하였다. 본 연구에서 다룬 최대 온도차인 172.2K에 대하여 최대발전양 7.5W 및 최대 에너지 변환 효율 11.3%를 획득하였다. 온도차에 대한 최대 발전양은 V_{oc} 및 I_{sc} 를 예측하는 상관식으로부터도 도출가능하며, 실험적으로 얻은 결과 대비 3.5%의 낮은 오차만을 보이는 것을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] D. Kong, W. Zhu, Z. Guo & Y. Deng. (2019). High-performance flexible Bi₂Te₃ films based wearable thermoelectric generator for energy harvesting. *Energy*, 175, 292-299. DOI : 10.1016/j.energy.2019.03.060
- [2] M. S. El-Genk & H. H. Saber. (2003). High efficiency segmented thermoelectric uncouple for operation bettwe 973 and 300 K, *Energy Converse and Manage*, 44, 1069-1088. DOI : S0196-8904(02)00109-7
- [3] G. Tan, L.-D. Zhao & M. G. Kanatzidis. (2016). Rationally designing high-performance bulk thermoelectric materials, *Chem Rev*, 116, 12123-12149. DOI : 10.1021/acs.chemrev.6b00255
- [4] H. Lee, A. Attar & S. Weera. (2015). Performance prediction of commercial thermoelectric cooler modules using the effective material properties. *J Electron Mater*, 44(6), 2157-2165. DOI : 10.1007/s11664-015-3723-7
- [5] A.H. Elarus, H. Fagehi, H. Lee & A. Attar. (2017). Theoretical approach to predict the performance of thermoelectric generator modules. *J Electron Mater*, 47(2), 872-881. DOI : 10.1007/s11664-016-4948-9
- [6] S. Lineykin & S. Ben-Yaakov (2007). Modeling and analysis of thermoelectric modules. *IEEE Trans Ind Appl*, 43(2), 505-512. DOI : 10.1109/TIA.2006.889813
- [7] Z. Luo. (2008). A simple method to estimate the physical characteristics of a thermoelectric cooler from vendor datasheets. *J Electr Cool Thermal Control*, 1-14.
- [8] R. Ahiska, S. Dislitas & G. Omer (2011). A new method and computer-controlled system for measuring the time constant of real thermoelectric modules. *Energy Convers Manage*, 53, 314-321. DOI : 10.1016/j.enconman.2011.09.003
- [9] S. Weera, H. Lee & A. Attar. (2020). Utilizing effective material properties to validate the performance of thermoelectric cooler and generator modules. *Energy Convers and Manage*, 205, 112427. DOI : 10.1016/j.enconman.2019.112427
- [10] D. Kim, C. Kim, J. Park & T.Y. Kim. (2019). Highly enhanced thermoelectric energy harvesting from a high-temperature heat source by boosting thermal interface conduction. *Energy*, 183, 360-368. DOI : 10.1016/j.enconman.2018.12.108
- [11] T. Y. Kim, A. Negash & G. Cho. (2017). Experimental study of energy utilization effectiveness of thermoelectric generator on diesel engine. *Energy*, 128, 531-539. DOI : 10.1016/j.energy.2017.04.060
- [12] S. Nag, A. Saini, R. Singh & R. Kumar. (2020). Ultralow lattice thermal conductivity and anisotropic thermoelectric performance of AA stacked SnSe bilayer. *Applied Surface Science*, 512, 145640. DOI : 10.1016/j.apsusc.2020.145640
- [13] T. Y. Kim, S. Lee & J. Lee. (2016). Fabrication of thermoelectric modules and heat transfer analysis on internal plate fin structures of a thermoelectric generator, *Energy Convers and Manage*, 124, 470-479. DOI : 10.1016/j.enconman.2016.07.040

최 태 호(Taeho Choi)

[정회원]



- 2020년 2월 : 전북대학교 기계시스템공학부 (공학사)
- 2020년 8월 : 서울과학기술대학교 미래기계기술연구소 (연구원)
- 2020년 9월~현재: 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 석사과정

- 관심분야 : 열전달, 열공학, 에너지
- E-Mail : dkfkql97@naver.com

김 태 영(Tae Young Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 연세대학교 기계공학과(공학사)
- 2010년 2월 : KAIST 기계항공우주공학과 (공학박사)
- 2020년 2월~현재 : 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 조교수

- 관심분야 : 열전달, 열공학, 에너지
- E-Mail : tykim@seoultech.ac.kr