한국마린엔지니어링학회지 제36권 제1호, pp. 51~56, 2012. 1(ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.1.51

고전력 전자소자에서 열전생성기의 생성효율과 열적성능

김 경 준†

(원고접수일 : 2011년 11월 2일, 원고수정일 : 2011년 11월 24일, 심사완료일 : 2011년 12월 21일)

Generation Efficiency and Thermal Performance of a Thermoelectric Generator with a High Power Electronic Component

Kyoung Joon Kim†

요 약 : 본 논문은 고파워 전자소자의 폐열로부터 에너지 수확을 목적으로 하는 열전생성기의 생성효율과 열적 성능에 대하여 논한다. 열경계저항을 포함하는 열전모델이 적용되어 생성효율과 고전력 전자소자의 junction 온도를 예측하였고 그 결과는 실험치로 검증되어진다. 검증결과는 예측치와 계측치의 오차가 작음을 보인다. 검증후 열전모델은 다양한 로드저항과 열원의 열율에서 생성효율, 열전생성기 양면의 온도차, 소자의 junction 온도를 예측한다. 본 연구는 로드저항이 생성효율, 열전생성기 양면의 온도차, junction 온도에 미치는 영향에 대해서도 탐구한다.

주제어 : 열전, 열전생성기, 에너지수확, 에너지 변환, 폐열

Abstract: This paper reports the generation efficiency and the thermal performance of a thermoelectric generator (TEG) harvesting energy from the waste heat of high power electronic components. A thermoelectric (TE) model containing thermal boundary resistances is used to predict generation efficiency and junction temperature of a high power electronic component. The predicted results are verified with measured values, and the discrepancy between prediction and measurement is seen to be moderate. The verified TE model predicts generation efficiencies, junction temperatures of the component, and temperature differences across a TEG at various source heat flows associated with various electrical load resistances. This study explores effects of the load resistance on the generation efficiency, the temperature difference across a TEG, and the junction temperature.

Key words: Thermoelectric, Thermoelectric generator, TEG, Energy harvesting, Waste heat

1. 서 론

1950-60년대에 반도체에 기반한 열전물질의 개발로 열전모듈(thermoelectric module, TEM)이 개발되었고, TEM은 광전소자와 같은 미세칩의 냉각기로(thermoelectric cooler) 개발, 활용되어져 왔다[1]. 또한 TEM은 고립된 지역에서 화석연료 또는 방사성 동위원소를 소비하여 비상전력을 생산하는 목적의 열전생성기(thermoelectric generator, TEG)로 활용되어져왔다.

90년대 후반부터는 TEG를 활용한 폐열에서의 에너지수확에 대한 연구개발이 활발하게 이루어지고 있다. 수송기계[2], 도시의 오염물질[3], VLSI 칩의 폐열에서 열전 에너지수확에[4-5] 관한 연구가 그 예이고, 인체의 폐열을 활용한 열전에너지수확에 의해 구동되는 손목시계가 상용화되기도 하였고, 마이크로 공정을 적용하여 제작된 소형의 TEG를 적용한 센서구동기술에 대한 연구도 활발하다. 또한 나노물질을 활용한 효율이 우수한 열전물질의

† 교신저자(부경대학교 기계자동차공학과, E-mail: kjkim@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6168)

개발을 위한 많은 연구가 지속되어 왔다[6,7].

중장거리 무선통신에 적용되는 전력증폭소자와 같은 고파워소자에서 열전수확에 대한 연구가 최근에 보고되었는데, 열전모델의 개발과 실험을 통한 검증 그리고 한정적 변수범위 내에서 생성되는 전력과 고파워소자의 junction 온도의 분석에 중점을 둔 연구결과였다[8,9]. 하지만 고파워소자에서 열전생성기의 TEG 고온면과 저온면의 온도차와 같은 열적성능과 전력생성효율을 다양한 패리미터에서 예측, 분석한 연구결과는 구체적으로 보고되지 않았다.

본 연구에서는 고전력 전자소자에서 TEG를 적용한 에너지 수확효율과 열적성능에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문은 우선 열전모델을 논하고, 모델이 예측하는 효율과 junction 온도를 검증하기 위한 실험장치 및 방법을 소개하고, 예측치의 검증결과를 보여준다. 논문은 검증된 열전모델을 적용하여 생성효율, TEG 온도차, junction 과 대기의 온도차를 다양한 로드저항과 열원의 열율에 대하여 예측하고 분석한 결과에 대해서도 논한다.

2. 열전모델

TEG 는 다수의 thermocouple로 구성되어지며, thermocouple 은 pellets, interconnects, 단열층으로 이루어진다. Pellet 은 p 또는 n형의 반도체소자이며, 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병렬로 연결되어져 있다.

Figure 1은 고전력 전자소자에서의 열전에너지 수집에 대한 열전모델의 물리적 구조를 보여주는데, 여기서 q는 전자소자로부터의 열율이고, q_c는 TEG의 저온면으로 방출되는 열율이며, Ψ_{jh} 는 junction과 TEG 고온면사이의, Ψ_{ca}는 TEG의 저온면과 대기사이의 열저항이고, I는 생성되는 전류이고, R_L은 로드저항이다.

Figure 1이 보여주는 것처럼, 열전모델은 열경계저항을 TEG의 경계조건으로 포함하는 모델이고, q와 q_c는 다음의 식으로 표현된다.

$$q = NI\alpha T_h + (T_h - T_c)/\psi_{TEG} - NI^2R/2 = (T_j - T_h)/\psi_{jh} \quad (1)$$

$$q_c = NI\alpha T_c + (T_h - T_c)/\psi_{TEG} + NI^2R/2 = (T_c - T_a)/\psi_{ca} \quad (2)$$

여기에서 N은 thermocouple의 수, α는 Seebeck계수, T_h는 TEG 고온면 온도, T_c는 TEG 저온면 온도, T_j는 junction 온도, T_a는 대기온도, Ψ_{TEG}는 TEG의 열저항, R은 thermocouple의 전기저항이다.

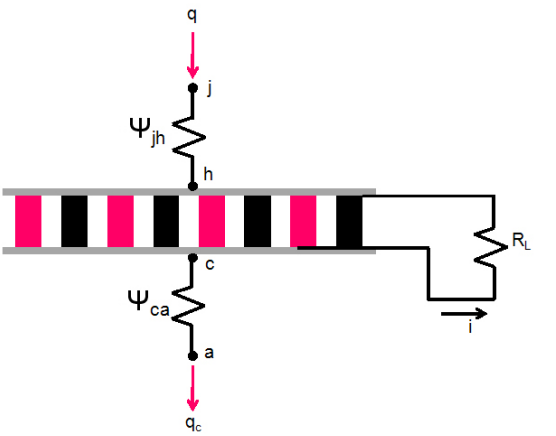

Figure 1: Structure of thermoelectric model

식 (1)과 식 (2)에서 $NI\alpha T_h$ 또는 $NI\alpha T_c$는 peltier 효과를 나타내고, $(T_h\text{-}T_c)/\Psi_{TEG}$는 TEG의 고온면에서 저온면으로의 열전도를 의미하고, $NI^2R/2$는 줄열의 영향을 나타낸다. q는 junction에서 TEG 고온면으로 열율이고, q_c는 TEG의 저온면에서 대기로 방출되는 열율이므로, 열저항과 온도차를 고려하여 표현이 가능하고, 위 식에서 보여주는 것처럼 열전이론에 의한 식과 결합이 가능하다.

생성되는 전류는 다음과 같다.

$$I = \frac{N\alpha(T_h - T_c)}{NR + R_L} \quad (3)$$

Thermocouple의 전기저항은 다음과 같이 표현되고

$$R = \frac{2\rho H}{A_p} + R_c \quad (4)$$

여기서 ρ는 전기저항성, H는 pellet 높이, Ap는 pellet의 단면적이고, R_c는 접촉저항이다.

TEG의 열저항은 다음과 같으며,

$$\psi_{TEG} = \frac{H}{2NkA_p} \quad (5)$$

여기서 k는 열전도율이다.

생성된 전력은 다음과 같이 표현되고

$$P_L = I^2 R_L \quad (6)$$

생성효율은 다음과 같다.

$$\eta = P_L / q \quad (7)$$

Carnot 효율 대비 상대효율은 다음과 같이 결정된다.

$$\eta_r = \frac{\eta}{1 - T_c / T_h} \quad (8)$$

식 (1)에서 식 (8)를 동시에 적용하여 상대효율, 전자소자의 junction 온도, TEG의 고온면과 저온면의 온도차를 예측할 수 있다.

3. 실험방법

현 연구에서는 열전모델을 적용하여 예측된 에너지 변환효율과 열원의 junction 온도를 계측결과와 비교하여 모델을 검증하기 위해 실험이 수행되었고, Figure 2는 실험장치를 보여준다.

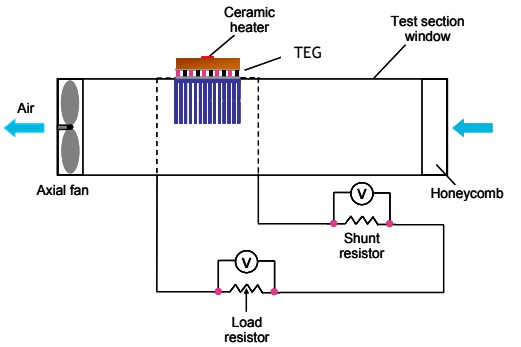

Figure 2: Experimental setup

test vehicle은 TEG와 센서가 장착된 세라믹 히터, heat sink로 구성되어진다. 사용된 TEG는 Marlow TEG(TG 12-2.5)이고, TEG의 footprint 면적은 30mm×34mm이고, thermocouple의 수는 127이고, pellet의 높이는 1.78mm이며, pellet의 단면적은 0.98mm^{2}이다. 직류 파워 공급기에서 전류가 공급되는 세라믹 히터는 고전력 전자소자를 실험적으로 모사하며, 이동식 풍동에서의 공기유동에 의한 heat sink에서의 강제대류로 TEG 저온면의 온도를 제어한다. 여기서 heat sink는 base 면적이 60mm × 57mm인 plate fin heat sink이고, heat sink의 열저항은 공기속도가 2m/s일 때 0.5K/W이다. 이동식 풍동의 크기는 120mm×120mm×400mm이고, 50mm 두께의 honeycomb이 풍동의 입구에 설치되어 유동의 균일성을 향상시킨다. shunt resistor에 생성된 전압을 측정하여 결정된 전류값과 로드 resistor에서 측정된 전압을 곱하여 생성전력을 구하고, 전력을 투입한 열율로 나누어 생성효율을 구한다. junction 온도는 세라믹 히터에 내장된 센서로 계측되고, 대기온도는 heat sink 출입부에 설치된 열전대로 계측된다.

4. 모델검증

열전모델이 예측한 효율과 junction 온도를 계측된 효율과 junction 온도와 비교하여 모델을 검증하였고 그 결과를 이장에서 보여주고 있다. 식 (8)이 보여주듯이, 효율은 카노효율대비 상대효율이고, 이를 다시 주지시키고자 한다.

4.1 예측 변수 및 조건

카노효율대비 상대효율과 junction 온도가 다양한 로드저항에 대해서 예측되어 계측값과 비교되어졌는데 예측시 사용된 TEG pellet의 변수, 경계조건, pellet의 물성치, 열, 전기조건이 Table 1에 나타나있다.

Table 1: Parameters for prediction [10]

Basic Parameters		
Parameter	Symbol	Value
Pellet height	H	1.78 mm
Pellet cross sectional area	A_p	0.98 mm^2
Number of thermocouples	N	127
Evaluated Parameters		
Parameter	Symbol	Value
Thermal resistance between junction and TEG hot side	Ψ_{jh}	3.3 K/W
Thermal resistance between TEG cold side and ambient	Ψ_{ca}	1.1 K/W
Material Properties of Pellet		
Parameter	Symbol	Value
Seebeck coefficient	a	4×10^{-4}V/K
Electrical resistivity	ρ	$2 \times 10^{-5}\Omega$-m
Thermal conductivity	k	2.1 W/m-K
Thermal and Electrical Conditions		
Parameter	Symbol	Value
Ambient temperature	T_a	23 °C
Electrical contact esistivity at pellet interface	$R_{c\text{-}\rho}$	1×10^{-9} Ω-m^2

4.2 검증결과

Figure 3은 열원으로부터의 열율이 20W일 때 카노효율대비 상대효율의 예측값과 계측값을 상대비교한 결과를 보여주는데, 이때 평균차이는 약 10%이다. TEG 양면의 경계조건이 일정온도인 모델에 의한 예측결과와 실험결과는 기존 문헌에 잘 나타나 있지만[1], 본 연구처럼 TEG 양면의 경계조건이 열저항인 경우의 예측치와 실험치는 기존문헌에 잘 나타나있지 않다.

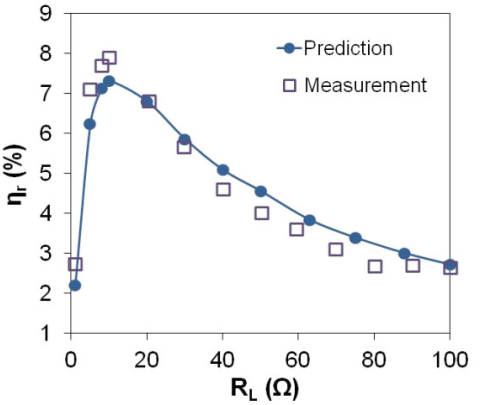

Figure 3: Predicted and measured efficiencies as a function of load resistance at a source heat rate of 20W

계측값과 예측값의 차이는 pellet의 물성치가 온도에 종속적인 점과, 예측된 TEG 고온면과 저온면에서의 열저항들과 실제 test vehicle의 TEG 계면에서의 열저항들 사이의 오차에서 기인한 것으로 보인다. 따라서 온도 종속적인 물성치와 TEG의 경계조건의 복잡성을 고려할 때, 상대효율의 예측값과 계측값의 차이는 크지 않은 오차라고 볼 수 있다.

Figure 3의 결과는 효율이 로드저항에 매우 종속적임을 보여주고, 10Ω에서 효율이 최대임을 결과는 보여주는데, 이는 TEG의 내부 전기저항이 약 10Ω이기 때문이다.

Figure 4는 junction 온도와 대기온도차의 예측값과 계측값을 비교한 결과를 보여주고, Figure 3의 경우처럼 열원의 열율은 20W이고, 대기온도는 23 ^oC로 일정하다. 계측값과 예측값의 평균차는 약 2%로 매우 작다. 이처럼 생성효율의 예측보다 junction 온도의 예측이 실험치에 대해 더 작은 오차를 보이는 것은 pellet의 물성치들의 온도종속성이 생성효율에 미치는 영향이 junction 온도에 미치는 영향보다 더 크기 때문인 것으로 보인다.

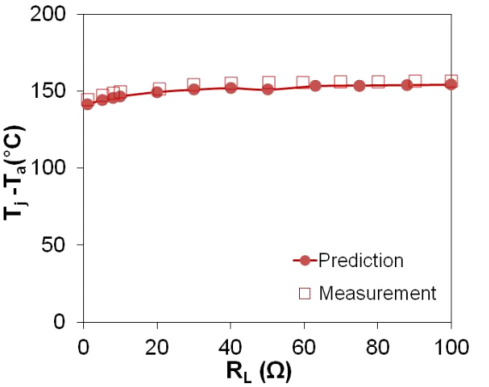

Figure 4: Predicted and measured excess junction temperatures as a function of load resistance at a source heat rate of 20W

5. 효율과 열적성능

이장은 5, 15, 25W의 열원의 열율에 대해 예측된 카노효율 대비 상대효율, TEG의 고온면과 저온면의 온도차, junction과 대기의 온도차를 로드저항의 함수로 보여준다.

5.1 효율

Figure 5는 다양한 로드저항과 열원의 열율에 대해 예측된 생성효율을 보여준다.

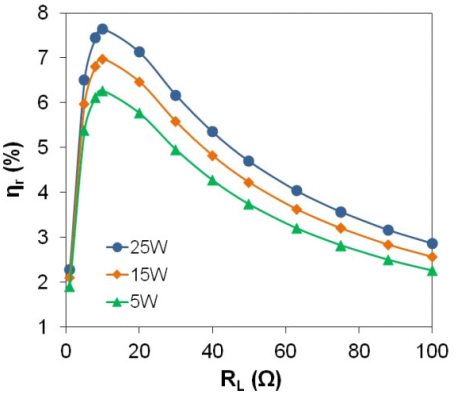

Figure 5: Predicted efficiencies as a function of load resistance at various source heat rates ranging from 5W to 25W

Figure 5에서 보여주는 결과로서 최대효율은 열율에 관계없이 10Ω에서 발생함과 열원의 열율이 증가함에 따라 효율이 증가함을 알 수 있다. 예를 든다면 25W일 때 최대효율은 5W일 때 최대효율보다 약 25% 크다.

5.2 열적성능

Figure 6은 다양한 로드저항과 열원의 열율에 대해 예측된 열전생성기의 양면(고온면과 저온면)의 온도차를 보여준다. 로드저항이 증가할수록 양면의 온도차가 증가하지만, 로드저항 대비 양면온도차의 변화율이 서서히 감소함을 알 수 있는데 이로서 효율과 로드저항의 관계를 설명할 수 있다. 즉 Figure 5에서 효율의 변화율은 로드저항의 증가에 따라서 서서히 감소함을 알 수 있는데, 여기에는 로드저항의 증가에 따라 감소하는 양면온도차의 변화율의 영향도 존재한다.

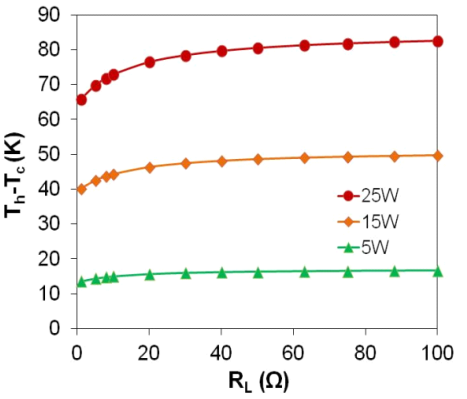

Figure 6: Predicted temperature differences across a TEG as a function of load resistance at various source heat rates ranging from 5W to 25W

열율의 증가에 따라 양면의 온도차는 거의 선형적으로 증가한다. 열원에서의 전도열이 열전생성기의 양면의 온도차에 미치는 영향이 생성전력이 미치는 영향보다 더 크기 때문에, 이러한 선형적인 증가를 보이는 것으로 해석이 가능하다.

Figure 7은 다양한 로드저항과 열원의 열율에 대해 예측된 junction 온도와 대기온도의 차를 보여준다. 열율의 증가에 따라 junction 온도와 대기온도의 차는 증가하는데 이는 물리적으로 당연하다. 로드저항의 증가에 따라 junction 온도와 대기온도의 차는 증가함을 보이고, junction 온도와 대기온도의 차의 변화율은 서서히 감소하는데, 이는 앞에서 논의했던 양면온도차의 로드저항에 대한 행동양식으로 설명이 가능하다.

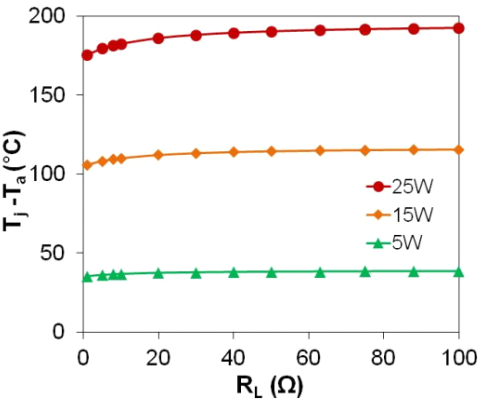

Figure 7: Predicted excess junction temperatures as a function of load resistance at various source heat rates ranging from 5W to 25W

6. 결 론

본 논문은 고전력 전자소자에서 폐열을 회수하기 위한 열전생성기의 생성효율과 열적성능에 대하여 보고한다. 열경계저항으로 표현되는 열전생성기의 경계조건을 갖는 열전모델이 고전력 소자의 junction 온도와 생성효율을 예측하기 위해 이용되어졌고, 이 결과는 계측결과와 비교되어 모델이 검증되었다. 열전모델을 적용하여 다양한 로드저항과 열원의 열율에 대하여, 카노효율에 대한 상대적 생성효율, 열전생성기의 저온면과 고온면의 온도차, 그리고 junction 온도와 대기온도의 차를 예측하였다.

예측값들은 몇 가지 주요한 결과로 요약이 가능하다. 첫째 최대효율은 열율에 관계없이 10Ω에서 발생하고, 열원의 열율이 증가함에 따라 효율이 증가한다. 이는 열전생성기의 내부저항이 약 10Ω이고, 효율은 열전생성기 양면의 온도차에 종속적이기 때문이다.

둘째, 로드저항이 증가할수록 열전생성기양면의 온도차가 증가하지만, 로드저항 대비 양면온도차의 변화율이 서서히 감소한다. 셋째, 열율의 증가에 따라 양면의 온도차는 거의 선형적으로 증가한다. 이는 열원에서의 전도열이 열전생성기양면의 온도차에 미치는 영향이 생성전력이 미치는 영향보다 더 크기 때문이다. 넷째, 로드저항의 증가에 따라 junction 온도와 대기온도의 차는 증가함을 보이지만 그 변화율은 서서히 감소한다. 이는 언급했던 양면온도차의 로드저항에 대한 행동양식으로 설명이 가능하다.

후 기

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

[1] D. M. Rowe, CRC Handbook of Thermoelectrics, CRC, Boca Raton, USA, 1995.

[2] K. Ikoma, M. Munekiyo, K. Furuya et al., “Thermoelectric module and generator for gasoline engine vehicles”, Proceedings of the 17th Int. Conf. on Thermoelectrics, Nagoya, Japan, pp. 464-467, 1998.

[3] T. Kajikawa, “Status and future prospects on the development of thermoelectric power generation systems utilizing combustion heat from municipal solid waste”, Proceedings of the 16th Int. Conf. on Thermoelectrics, Dresden, Germany, pp. 28-36, 1997.

[4] G. L. Solbrekken, K. Yazawa, and A. Bar-Cohen, “Heat driven cooling of portable electronics using thermoelectric technology”, IEEE Trans. Adv. Packaging, vol. 31, pp. 429-437, 2008.

[5] K. Yazawa, G. L. Solbrekken, and A. Bar-Cohen, “Thermoelectric powered convective cooling of microprocessors”, IEEE Trans. Adv. Packaging, vol. 28, pp. 231-239, 2005.

[6] A. I. Hochbaum, R. Chen, R. D. Delgado et al., “Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires”, Nature, vol. 451 (7175), pp. 163-167, 2008.

[7] K. F. Hsu, S. Loo, F. Guo et al., “Cubic AgPbmSbTe2+m: bulk thermoelectric materials with high figure of merit”, Science, vol.303 (5659), pp. 818-821, 2004.

[8] K.J. Kim, F. Cottone, S. Goyal et al., “Energy scavenging for energy efficiency in networks and applications”, Bell Labs Tech. J. vol.15, no.2, pp. 7-30, 2010.

[9] K.J. Kim, “Thermoelectric energy recovery from power amplifier transistors”, Proceedings of the 14th Int. Heat Transfer Conf., Washington D.C., U.S.A, 22892, 2010.

[10] Product specification sheets, Marlow Industries Inc., 2009.

저 자 소 개

김경준(金京俊)

1999년 중앙대학교 기계설계학과 졸업 (공학사),2002년 University of Minnesota 기계공학 (공학석사), 2006년 University of Maryland 기계공학 (공학박사), 2008-2011년 Alcatel-Lucent Bell Laboratories (Member of Technical Staff), 2011년- 현재 부경대학교 기계자동차공학과 교수