

온도차 및 부하 저항에 따른 열전모듈의 발전 특성 분석

이공훈[†] · 김육중* · 고득용*

Experimental Study on the Power Generation of a Thermoelectric Module with Temperature Difference and Load Resistance

Kong Hoon Lee, Ook Joong Kim, and Deuk Yong Koh

Key Words: Thermoelectric module (열전모듈), Power generation (발전), Load resistance (부하저항), Temperature difference (온도차)

Abstract

A thermoelectric module can be used for cooling or power generation. The basic requirements to achieve a significant thermoelectric performance are the same for both generators and coolers. Thermoelectric modules with Bi_2Te_3 materials are usually employed in the cooling applications below room temperature but it can also be used for the power generation in the similar temperature range. In the present study, the power generation with a Bi_2Te_3 thermoelectric module has been investigated. The temperature difference between the hot and cold sides of the module is maintained with electric heater and cold water from the circulating water bath. The result shows that the electric current generated increases with temperature difference and decreases with the load resistance. However, the voltage increases with both the temperature difference and load resistance. The electric power increases with temperature difference and it has the maximum value when the load resistance is about 4Ω for a given device.

기호설명

A : 열전 컬럼 단면적 (m^2)
 I : 전류 (A)
 K : 전도 컨덕턴스 ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)
 k : 열전도율 ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)
 L : 열전 컬럼 두께 (m)
 P : 전력 (W)
 R : 내부 저항 (Ω)
 R_L : 외부 저항 (Ω)
 T_c : 저온부 온도 ($^{\circ}\text{C}$)

T_h : 고온부 온도 ($^{\circ}\text{C}$)

V : 전압 (V)

Z : Figure of merit

α : Seebeck 계수 ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$)

ρ : 비저항 (Ωm)

η : 발전 효율 (%)

하첨자

c : 저온부, Carnot 사이클

h : 고온부

n : n-형 열전소자

p : p-형 열전소자

[†] 정회원, 한국기계연구원 에너지기계연구센터

E-mail : konghoon@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7291 FAX : (042)868-7335

* 정회원, 한국기계연구원 에너지기계연구센터

1. 서론

열전모듈을 이용하는 발전 기술은 19세기에 열전원리가 발견된 이후로 계속 사용되어 왔다.⁽¹⁾

열전모듈은 그 특성상 모듈의 양단에 온도차가 형성되면 Seebeck 효과에 의하여 전력이 발생하고, 반대로 전력을 가하면 Peltier 효과에 의한 능동적인 열 이동이 이루어진다.^(1,2) 열전모듈은 전자장비의 냉각 등에도 많이 활용되나 여기에서는 주로 전력 발생의 관점에서 살펴보고자 한다. 열전모듈은 기계적인 구동부가 없이 양단의 온도차에 의하여 전력이 발생하므로 전력발생장치로서 구조가 간단하고 수명이 긴 특성을 가진다. 그러나 수 % 이하의 낮은 발전 효율이 상용화에는 장애가 되어서 우주항공용⁽³⁾, 군사용, 산간 오지용⁽⁴⁾ 등 주로 특수 목적의 전원장치, 또는 화장품 냉장고, 와인 냉장고 등 틈새 상품에 주로 사용되었고 광범위한 활용에는 미흡한 점이 있다. 최근에는 에너지 절약을 위한 폐열 회수 발전에 관한 연구도 이루어져 왔다. 최근에는 휴대용 기기, 센서용 전원 등 소형 전원을 위한 열전발전에 대한 연구들도 많이 이루어지고 있다.^(5,6)

발전효율의 향상을 위해서는 결국 열전재료의 성능이 향상되어야 하는데, 최근 몇 년 사이에 마이크로 또는 나노 스케일의 제조 방법을 이용하여 열전재료의 특성을 향상시키려는 연구들이 이루어져 왔고, 크게 향상된 열전 특성에 대한 보고들이 있다.^(7,8) 그러나 그러한 향상된 특성을 가지는 열전재료들은 실험실 수준에서 제작, 시험되고 있고, 양산 공정 기술은 제한적이고 아직 일반화되어 있지 않다.

본 연구에서는 일반적인 벌크형 열전모듈을 사용하여 온도차 및 부하저항에 따른 발전특성에 대한 측정을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

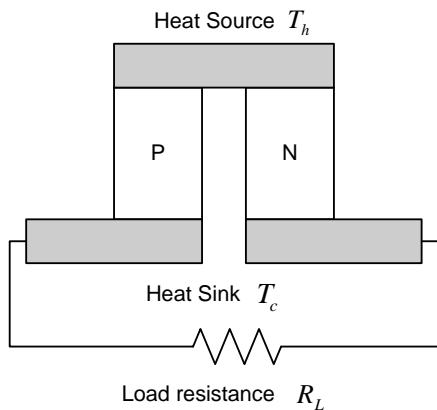


Fig. 1 Schematic of the thermoelectric power generation

2. 열전모듈의 발전 특성

열전모듈에 공급되는 열량은 온도차의 의한 열 전달, Peltier 효과에 의한 열에너지, Joule 가열에 의한 에너지로 구성된다.⁽¹⁾

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

여기에서 Seebeck 계수는 $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$ 이고, K 와 R 은 p와 n 형 열전재료 각각의 값으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = k_p \left(\frac{A_p}{L_p} \right) + k_n \left(\frac{A_n}{L_n} \right) \quad (2)$$

$$R = \rho_p \left(\frac{L_p}{A_p} \right) + \rho_n \left(\frac{L_n}{A_n} \right) \quad (3)$$

열전모듈에서 발생하는 전류는 온도차, Seebeck 계수, 내부, 외부저항의 함수로 주어진다.

$$I = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R + R_L} \quad (4)$$

따라서 열전모듈의 출력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P = I^2 R_L = \frac{R_L}{(R + R_L)^2} \alpha^2 (T_h - T_c)^2 \quad (5)$$

또는 저항비 $m = R_L/R$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$P = \frac{m}{(1+m)^2} \left(\frac{\alpha^2}{R} \right) (T_h - T_c)^2 \quad (6)$$

이 식으로부터 열전모듈의 출력은 열전재료의 특성 (Seebeck 계수), 온도차, 모듈의 내·외부 전기 저항에 의하여 결정되는 것을 알 수 있다. 식 (6)으로부터 열전모듈의 최대 출력은 내부저항 R 과 외부저항 R_L 이 같을 때 발생하는 것을 알 수 있다.

열전모듈의 효율은 식 (1)과 (6)을 이용하여 발전량에 대한 공급열량의 비로 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{m}{(1+m)^2} \frac{\eta_c}{ZT_h + (1+m) - \eta_c/2} \quad (7)$$

여기에서 Figure of merit Z 와 Carnot 효율 η_c 는 다음과 같이 정의된다.

$$Z = \frac{\alpha^2}{KR} \quad (8)$$

$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (9)$$

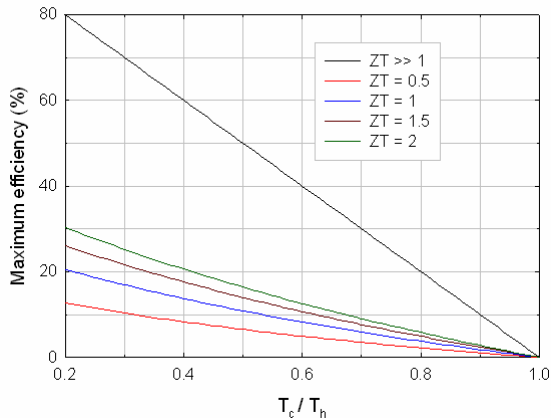


Fig. 2 Maximum efficiency of the power generation with the temperature ratio

주어진 열량에 대하여 최대 발전량을 얻기 위해서는 부하의 저항을 발전 효율이 최대가 되도록 선정해야 하는 것을 위의 식으로부터 알 수 있다.

최대 효율은 식 (7)의 발전효율 η 가 m 에 대한 변화가 최소가 될 때 ($d\eta/dm = 0$) 구할 수 있다. 최대 효율을 얻을 수 있는 m 의 값을 M 이라 하면 최대효율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_{\max} = \eta_c \frac{M-1}{M+T_c/T_h} \quad (10)$$

여기에서 $M = (1 + ZT_M)^{1/2}$, $T_M = (T_h + T_c)/2$ 이다. 최대효율은 Carnot 효율에서 $(M-1)/(M+T_c/T_h)$ 비율만큼 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 최대 효율은 고온부와 저온부의 온도의 함수이며, 열전재료의 특성에 따라 달라지는 것을 알 수 있다.

일반적으로 열전재료의 ZT 는 1 근처의 값을 가지므로 이론상 최대 효율은 온도차에 따라 다르나 20% 이하이고, 실제의 효율은 이보다 낮게 나타남

3. 실험장치 및 실험 방법

열전모듈의 전력 발생 특성을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같은 장치를 구성하였다. 열전모듈의 고온부는 구리 블록 내부에 삽입된 원통형 카트리지 히터를 이용하여 필요한 온도를 정밀하게 제어할 수 있도록 하였다. 또한 저온부는 순환형 항온 수조(모노텍, MRC-3031D)를 이용하여 방열

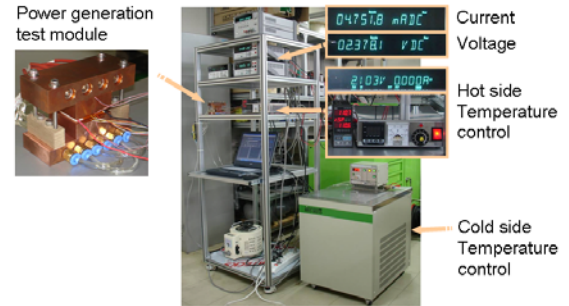


Fig. 3 Experimental apparatus to measure the characteristics of the thermoelectric power generation

부의 온도를 정밀하게 모사하여 열전발전에 필요한 고온부와 저온부의 온도차를 설정할 수 있게 하였다.

외부 저항에 따른 발전 성능을 측정하기 위하여 0.1 ~ 1111.21 Ω 범위에서 단계별 조절이 가능한 정밀저항 (2793 Decade Resistance Box, Yokogawa)을 외부저항으로 사용하였다. 열전모듈 1개에서 발생하는 전력의 크기가 크지 않으므로 간섭을 최소화하기 위하여 Digital multimeter(Agilent 34411A)를 이용하여 전압을 측정한 후에 외부 저항에 흐르는 전류를 환산하여 발생 전력을 측정하였다. 히터의 제어, 온도, 전압의 측정이 일관적으로 이루어질 수 있도록 GPIB 통신을 이용하여 PC에서 제어 및 데이터 저장이 가능한 제어 및 측정 프로그램을 구축하여 사용하였다.

측정에 사용한 열전 모듈은 BiTe 계열로서 Fig. 4와 같이 외형 크기는 40 mm x 40 mm x 4.2 mm이고, 각각의 열전 Column의 크기는 1.3 mm x 1.3 mm x 2 mm (1.1 mm spacing)로서, 열전쌍의 개수가 128개인 벌크형 모듈이다.

본 연구에서 시험 조건으로는 열전모듈 양단의 온도차와 외부저항의 크기가 가장 중요한 파라미터이다. 저온부의 온도는 15 ~ 45 $^{\circ}\text{C}$, 고온부의 온도는 20 ~ 155 $^{\circ}\text{C}$ 범위에서 변화시켜 5 ~ 120 $^{\circ}\text{C}$ 범위의 온도차를 얻을 수 있도록 하였다. Fig. 5는 실험을 하는 동안 시간에 따라 열전모듈 양단의 온도차를 변화시키는 예를 보여준다.

외부 저항은 앞에서 설명한 Decade Resistance Box를 단계적으로 조절하여 1 Ω 에서 1000 Ω 까지 변화시켜 외부저항의 크기에 따른 발전량을 측정할 수 있게 하였다.

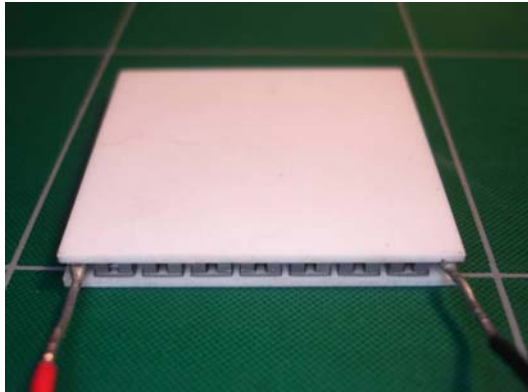


Fig. 4 Thermoelectric module used for the power generation

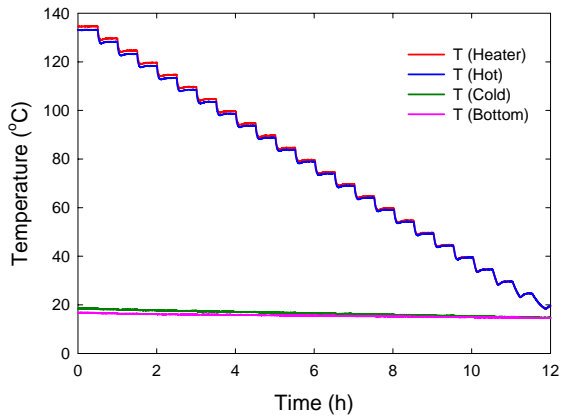


Fig. 5 Temperature control of the hot side

4. 결과 분석

전류는 Seebeck 계수, 온도차, 내부 및 외부 저항에 따라 결정되는데 일단 열전모듈이 선정되면 Seebeck 계수가 결정되므로 전압과 전류는 온도차와 외부 저항에 따라 변화된다. 이론적 분석에서 보면 열전모듈의 내부 저항과 외부저항이 같을 때 최대 출력이 발생한다. 실험에 사용한 열전모듈의 경우에는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 약 4 Ω에서 최대출력이 발생하고, 4 Ω 이하의 외부저항에 대해서는 외부저항의 증가에 따라 발생 전력이 증가하고 4 Ω 보다 큰 외부 저항에 대해서는 외부저항의 증가에 따라 전압 발생량이 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 열전모듈을 이용하여 얻을 수 있는 최대 출력이 있음을 확인하였고, 사용하고자 하는 열전모듈에 대하여 최대 출력이 발생하는 외부저항의 크기를 사전에 확인하는 것이 열전모듈을 효율적으로 사

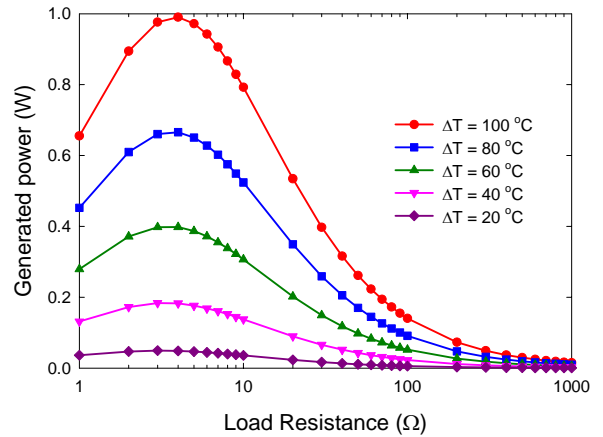


Fig. 6 Power generation with the temperature difference and load resistance

용하기 위한 준비가 될 것이다.

Fig. 6에서 보면 최대 출력의 크기는 온도차가 100°C인 경우에 약 1 W이고 온도차가 작을 때에는 최대 출력이 감소하는데, 온도차가 40°C일 때에는 최대출력이 약 0.2 W이다.

이와 같이 특정한 외부저항에 대하여 최대 출력이 발생하는 것은 외부저항의 크기에 따른 전압과 전류의 변화로부터 설명할 수 있다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 전류는 열전모듈에 작용하는 내 외부 저항에 따라 감소하는 것을 알 수 있고, 이는 측정 결과인 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 전류의 변화는 외부저항의 크기가 100 Ω 이하일 때 분명하게 관찰되며, 그 이상의 외부저항에 대해서는 발생전류가 너무 작아서 변화를 관찰하기 어렵다. 이는 Fig. 8에서 보듯이 외부 저항이 클 때 외부저항의 변화에 따른 전압의 변화가 작은 것으로부터도 확인이 가능하다.

전압은 Fig. 8과 같이 외부저항에 따라 증가하며 약 100 Ω 이상의 외부저항에 대해서는 증가폭이 줄어서 거의 일정한 전압을 나타낸다. 이에 따라 Fig. 6과 7에서도 나타났듯이 100 Ω 이상의 외부 저항에 대해서는 발생 전류와 전력이 거의 없기 때문에 이러한 크기의 외부저항에 대해서 실험에 사용한 열전모듈을 발전용으로 적용하는 것을 무의미한 결과를 얻게 될 것이다.

온도차에 따라서는 전압의 증가가 거의 일정한 증가폭을 보여 거의 선형적으로 증가하는 것을 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 그러나 전류의 경우에는 Fig. 7에서 보면 온도차의 증가에 따라 증가하기는 하지만 그 증가 폭이 감소하는 것을 알

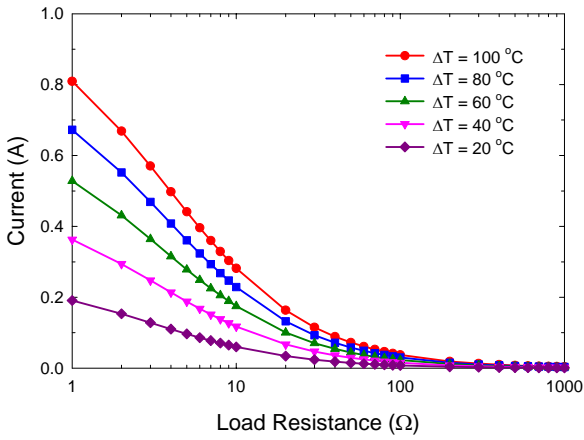


Fig. 7 Current variation with the temperature difference and load resistance

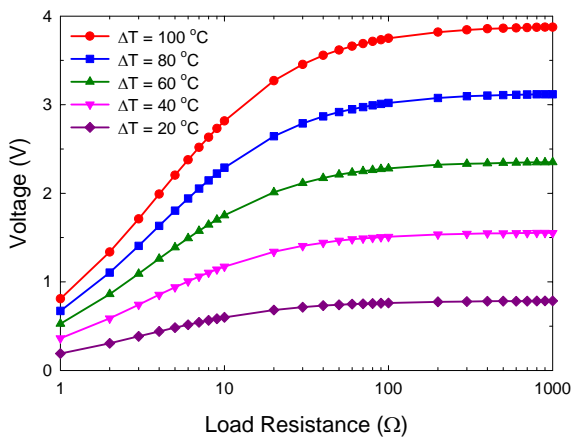


Fig. 8 Voltage variation with the temperature difference and load resistance

수 있다. 이러한 결과는 Fig. 6에서 보듯이 온도차의 증가에 따라 전력 발생량이 빠르게 증가하는 것으로 귀결된다. 이러한 결과는 Fig. 9와 10에 나타낸 결과로부터 분명히 알 수 있다.

Fig. 9와 10에 나타낸 결과는 실험에 사용한 열전모듈에 대해서 최대 출력이 얻어지도록 외부저항의 크기를 4 Ω에 고정시킨 후 모듈 양단의 온도차를 변화시키면서 측정한 결과이다. 이 결과들로부터 앞에서 설명한 내용을 분명하게 확인할 수 있는데, 전압은 Fig. 9에서 보듯이 온도차의 증가에 따라 선형적으로 증가한다. 전류는 온도차의 증가에 따라 약간 완만하게 증가하는 경향을 보인다. 이에 따라 전력은 온도차가 작을 때에는 발생량이 작으나 온도차의 증가에 따라 크게 증가한다. 이는 식 (6)에서 전력이 온도차의

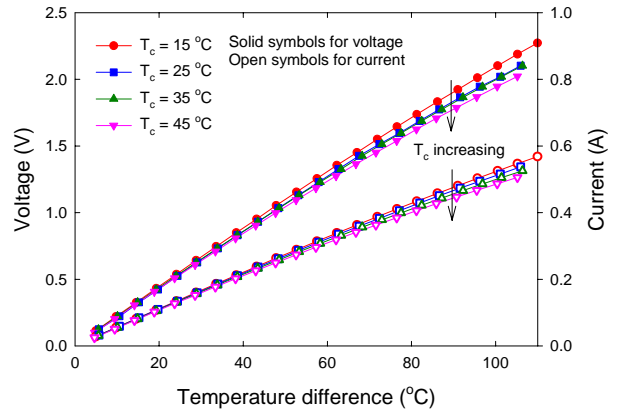


Fig. 9 Voltage and current with the temperature difference for maximum power generation

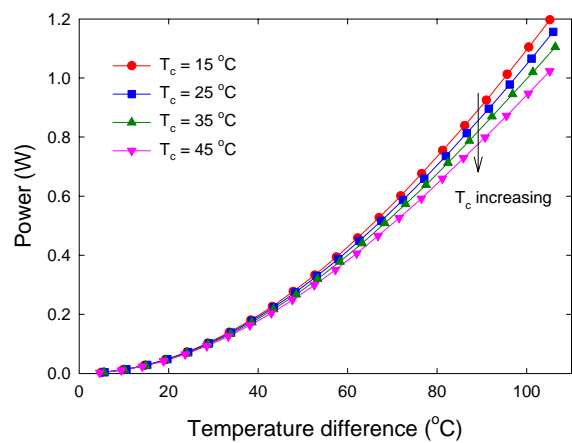


Fig. 10 Power generation with the temperature difference for maximum power generation

제곱에 비례한다는 것과 거의 일치하는 결과를 보여주는 것이다.

Fig. 9와 10에는 저온부의 온도 변화에 따른 결과도 함께 나타내었는데, 저온부의 온도 증가에 따라 출력이 감소하는 것을 보여준다. 이는 온도에 따른 열전모듈의 물리적 성질의 변화에 기인하는 것으로 판단되며, 다른 요인으로는 열전모듈 상하부의 온도측정에 대한 오차가 온도가 상승함에 따라 다소 증가하는 것도 그 요인이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 105 ~ 110°C까지 온도차를 증가시키면서 전력의 측정을 측정하였는데, 온도차를 더 증가시키면 발생 전력은 식 (6)과 Fig. 10과 같이 온도차의 제곱에 비례하여 더 크게 증가할 것으로 판단된다.

4. 결 론

열전모듈의 발전 특성을 확인하기 위하여 본 연구에서는 벌크형 열전모듈을 사용하여 온도차 및 부하저항의 변화에 따른 발전특성에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 열전모듈의 발전 특성 실험으로부터 이론적 분석에서 나타난 바와 같이 특정한 외부저항의 크기에 대하여 최대 출력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에 사용한 열전모듈에 대하여 그 저항은 약 4 Ω 이었으며, 온도차가 100 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 약 1 W의 출력을 발생시켰다. 외부 저항이 100 Ω 이상으로 크게 증가하면 출력이 현저하게 감소하여 유용한 출력을 얻을 수 없음을 확인하였다. 일정한 크기의 외부저항에 대하여 전압은 온도차의 증가에 비례하여 선형적으로 증가하고 전력은 온도차의 제곱에 비례하여 온도차의 증가에 따라 크게 증가하는 것을 확인하였다. 저온부 온도의 증가는 열전모듈의 출력을 일부 감소시키는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 기본사업 “유비쿼터스 진단기기의 미세열유체 핵심부품 요소기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Rowe, D. M., ed., 1995, CRC Handbook of Thermoelectrics, CRC Press, Boca Ration.

- (2) Min, G., and Rowe, D. M., 2002, "Recent Concepts in Thermoelectric Power Generation", *Proc. of 20th Int. Conference on Thermoelectrics*, pp. 365-374.
- (3) El-Genk, M. S., 2002, "Energy Conversion Technologies for Advanced Radioisotope and Nuclear Reactor Power Systems for Future Planetary Exploration", *Proc. of 20th Int. Conference on Thermoelectrics*, pp. 375-380.
- (4) Eakburanawat, J., Khedari, J., Hirunlabh, J., Maneewan, S., Daguinet, M., and Teekasap, S., 2003, "Solar-biomass thermoelectric power generation simulation", *Proc. of 21st Int. Conference on Thermoelectrics*, pp. 582-584.
- (5) Jacobson, S. A. and Epstein, A. H., 2003, "An Informal Survey of Power MEMS", *Int. Symp. Micro-Mechanical Engineering*, Paper No. ISMME2003-K18.
- (6) Jacquot, A., Liu, W. L., Chen, G., Fleurial, J.-P., Dauscher, A., and Lenoir, B., 2002, "Fabrication and Modelling of an In-plane Thermoelectric Micro-generator", *Proc. of 21st Int. Conference on Thermoelectrics*, pp. 561-564.
- (7) Shakouri, A., 2004, "Nanoscale devices for solid state refrigeration and power generation", *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, pp. 1-9.
- (8) Stordeur, M. and Willers, W. 2004, "Thermoelectric films - Potential for New Miniaturized Devices", *Proc. of 2nd European Conference on Thermoelectrics of European Thermoelectric Society*, Paper No. 50.