

열전 발전 모듈 설계를 위한 열전 성능 해석

Simulation of thermoelectric performance for thermoelectric generation module design

*장봉균¹, #한승우¹, 김정엽¹
 *B. Jang¹, #S.-W. Han(swhan@kimm.re.kr)¹, J.-Y. Kim¹
¹ 한국기계연구원 나노융합생산시스템연구본부

Key words : Thermoelectric generation module, Seebeck effect, Peltier effect

1. 서론

두 종류의 도체의 양쪽 끝에 일정한 온도차이를 주었을 때, 온도 차이에 비례하는 기전력이 발생하는 것을 Seebeck 효과라고 한다. 이와는 반대로, 전류를 흘려 주었을 경우에 도체의 한 쪽은 열이 발생하고, 다른 한 쪽은 열을 흡수하는 효과를 Peltier 효과라고 한다. 이 두 효과를 총칭하여 열전 효과라고 하며, 열전 효과가 지배적인 물질에서 열의 흡수와 방출, 기전력의 발생을 이 효과들은 설명하고 있다.

열전 현상은 약 200년 전에 발견된 효과로 에너지 변환 효율이 열기관에 비하여 작기 때문에 발전 모듈로 많이 이용되어 오지는 않았다. 그러나 20세기, 산업화와 더불어 폐열을 이용한 발전 및 우주선에 사용하기 위한 발전 모듈로써 각광받기 시작하면서 열전 발전 모듈이 활발히 개발되기 시작하였다. 이와 더불어, 나노 테크놀로지를 이용하여 열전 효율을 크게 높일 수 있는 가능성이 대두되기 시작하면서 나노 테크놀로지를 비롯한 첨단 기술을 이용한 열전 모듈 개발이 활발하게 이루어지고 있다[1-2].

열전 모듈에 관한 연구의 방향은 크게 나누어서 높은 열전 성능을 갖는 열전 물질의 개발과 높은 효율을 갖는 열전 모듈을 제작하는 것으로 구분할 수 있다. 열전 효율을 높이기 위해서는 높은 열전 성능 지수를 갖는 물질 개발을 위하여 많은 연구들이 수행되고 있다[3-4]. 하지만, 높은 성능을 갖는 열전 물질의 개발뿐만 아니라 열전 물질 외의 전극, 단열재 등의 설계 없이는 높은 성능의 열전 모듈 제작에는 어려움이 따른다. 특히 반도체 공정으로 제조한 열전 박막을 활용한 마이크로 열전 모듈의 경우에는, 기존의 열전 모듈에 비하여 모듈의 열전 성능을 높이기 위한 주의 깊은 설계가 필요하게 된다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 열전 발전 모듈의 성능을 평가하여, 높은 효율을 갖는 열전 발전 모듈 설계를 위한 방향성을 제시하는 것을 목표로 하였다. 이를 위하여 열전 성능 및 열전도, 전기적 특성을 나타내는 지배방정식들을 이용하여 모델링을 한 후에 온도와 전압 분포를 구하여 열전 발전 효율을 평가하였다. 또한 열전 모듈에서 상하의 기판이 발전 효율에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

2. 열전 지배방정식

열전 반도체의 양 끝에 일정한 온도 차이 ∇T 를 주었을 때 발생하는 전기장 \vec{E} 는

$$\vec{E} = \alpha \nabla T - \rho \vec{j} \quad (1)$$

로 Seebeck 계수 α 와 비저항 ρ 를 이용하여 나타낼 수 있다. 식 (1)은 Seebeck 효과에 의한 항 $\alpha \nabla T$ 과 전류 밀도 \vec{j} 를 갖는 전류가 열전 반도체 속을 흘러갈 때 발생하는 전압 강하 $\rho \vec{j}$ 에 의한 항으로 구성된다. 또한 열전 반도체 속에 전류가 흐를 때에는 Peltier 효과에 의해서 열량의 흡수와 방출이 일어나게 된다. 이 때에 발생하는 열유동 \vec{q} 는

$$\vec{q} = \alpha T \vec{j} + \kappa \nabla T \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 κ 는 열전도 계수를 나타내며, 첫 번째 항은 Peltier 효과에 의한 항, 두 번째 항은 열전도를 의미한다. 식 (1)은 열전 물질 내부의 전기적인 성질을 나타내는 방정식이며, 식(2)는 열전 물질에서 발생하는 열량 및 열량의 출입 관계를 나타내는 식이다. 이 두 방정식과 함께 에너지 보존 법칙과 전류의 연속성을 나타내는 다음과 같은 식을 이용하여 열전 소자 내부의 전기적 성질과 열적 성질을 표현할 수 있게 된다.

$$\nabla \cdot \vec{q} = P \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (4)$$

식 (1)-(4)은 연립 편미분 방정식을 나타내며, 이 방정식에 대한 엄밀해는 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 이 지배방정식을 이용, 유한 요소 해석을 수행하여 열전 모듈의 전압 분포 및 온도 분포를 구하였다. 이 때에 전기장과 전기적 포텐셜과의 관계 $\vec{E} = -\nabla V$ 를 이용하였다. 이를 바탕으로 식 (1)과 (2)를 이용하면, 열전 모듈을 흐르는 전류와 열 유동을 계산할 수 있다. 또한 고온부로부터 들어오는 열량을 Q_h , 발생하는 전력을 $P = \vec{j} \cdot \vec{E}$ 라고 하였을 때 열전 발전 모듈의 발전 효율은

$$\eta = P / Q_h \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 이와 같은 방법으로 열전 모듈의 발전 효율을 평가하여 온도 조건 및 모듈에 사용되는 물질에 대한 의존성을 파악할 수 있다.

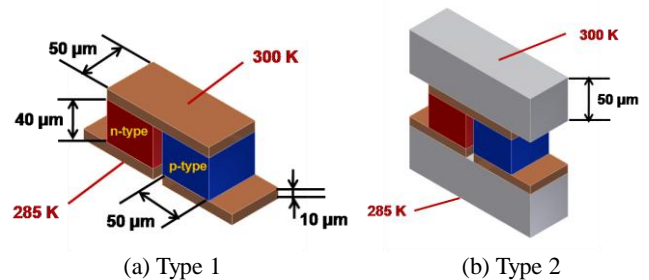


Fig. 1 Geometries of thermoelectric generation modules (a)without substrates and (b)with silicon substrates.

Table 1 Material properties used in the FE analysis[5].

Materials	Thermal conductivity (κ)	Electrical conductivity (σ)	Seebeck coefficient (α)
n type TE (Bi_2Te_3)	1.6 W/m·K	7.69×10^4 S/m	-2.28×10^{-4} V/K
p type TE (Sb_2Te_3)	2.1 W/m·K	9.62×10^4 S/m	1.71×10^{-4} V/K
Electrode (Cu)	350 W/m·K	5.90×10^8 S/m	
Substrate (Si)	130 W/m·K		

3. 해석 모델 및 조건

열전 발전 모듈의 유한 요소 해석을 위하여 그림 1(a)와 같은 파이(π)형 열전 모듈을 가정하였다. 열전 모듈에 사용되는 n 형 반도체로는 Bi_2Te_3 를, p 형 반도체로는 Sb_2Te_3 를 가정하였으며 단면은 길이 $50 \mu\text{m}$ 의 정사각형, 높이는 $40 \mu\text{m}$ 라고 하였다. 그리고 상하에 부착된 전극은 두께 $10 \mu\text{m}$ 의 구리로 하였다. 모듈에 부착된 기판이 열전 효율에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 알아보기 위해서 그림 1(b)와 같이 모듈의 상하부에 두께 $50 \mu\text{m}$ 의 실리콘 기판이 부착되어 있는 모델(Type 1)을 해석하여 기판이 없는 경우(Type 2)와 비교하였다. 열적 경계조건으로는 Type 1에서는 상부 전극의 윗면에 온도 300 K , 하부 전극의 아랫면에는 온도 285 K 의 온도 일정 조건을 주었으며, 그 밖에 면에 대하여 단일 조건하에서 해석을 수행하였다. Type 2의 경우에도 상, 하부 실리콘 기판에 각각 300 K , 285 K 의 온도 고정 조건을 주어 온도차 15 K 의 같은 조건에서 두 모델을 비교하였다. Type 1의 경우에는 위에서 정립한 열전 지배방정식을 이용하여 해석을 수행하였으며, Type 2에서는 열전 반도체와 전극 부분에서는 열전 지배방정식을 이용하여 해석, 기판 부분에서는 열전도 방정식을 이용하였고 각각의 물성값은 표 1의 값을 이용하여 해석을 수행하였다.

일반적으로 발전 모듈에서 발생하는 기전력과 연결된 부하 저항에 의하여 모듈 속을 흐르는 전류의 크기가 결정되는데, 이 전류의 크기에 따라서 발전 모듈의 효율이 달라지게 된다. 따라서 열전 모듈의 성능은 모듈을 흐르는 전류의 크기가 달라졌을 때, 모듈의 최대 발전 효율로 평가하는 것이 타당하다. 발전 모듈 속을 흐르는 전류의 크기를 변화시켜가며 전압과 온도 분포를 구하였다.

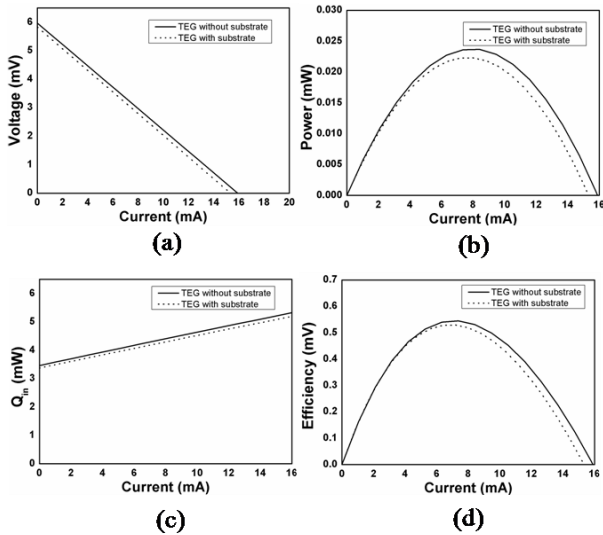


Fig. 2 Results from FE analysis: (a) electrical potential, (b) power, (c) the flow of thermal energy into the modules through a hot side boundary and (d) efficiency generated the modules with respect to various current.

4. 해석 결과 및 고찰

그림 2는 해석 결과로 얻어진 전압, 전력, 모듈로 유입되는 열량, 그리고 열전 모듈의 효율을 나타낸 그래프이다. 열전 모듈의 양 끝에 온도차가 발생하였을 때, 이에 비례하는 기전력이 발생하는데 열전 모듈 속을 흐르는 전류의 크기가 커지면 열전 모듈의 저항에 의하여 발전 모듈 양단의 전압은 감소하여 0이 된다. 이러한 이유로 그림 2(b)와 같이 전력이 최대 발생하는 전류의 값이 존재하게 된다. Type 2의 경우에는 실리콘 기판 때문에 열손실이 발생, 열전 반도체 상하의 온도차는 Type 1에 비하여 작게 나타나

게 되는데, 이로 인하여 발생 기전력과 발생 전력 또한 작게 나타나는 것을 그림 2(a), (b)에서 확인할 수 있다. 고온부에서 흡수하는 열량의 경우에도 Type 1보다 Type 2이 실리콘 기판의 영향으로 열흡수량이 작다. 하지만 최대 전력량이 온도차의 제곱에 비례하기 때문에 결과적으로 열전 발전 효율은 Type 1보다 Type 2가 더 작게 나타난다. 이것은 일반적으로 기판에 의한 온도차 손실이 열전 효율에 크게 영향을 미치는 것을 나타낸다. 실제 모듈 제작에 있어서 열전 모듈의 상하에는 전기적 절연을 위하여 절연 기판을 사용하게 된다. 이러한 절연 기판들은 일반적으로 열전도도가 낮기 때문에 열전 발전 성능의 저하를 야기시키게 된다. 열전 모듈 설계를 할 때에 기판의 두께를 줄이거나 열전도성이 좋은 재료를 선택하는 것이 필요하다. 또한 열전 반도체와 전극, 전극과 기판을 접합하는 과정에서의 열저항을 줄이는 노력 또한 필요할 것이다.

4. 결론

마이크로 열전 모듈을 제작할 시에 전기적 저항과 열저항에 의한 성능 저하를 피하는 것이 중요하다. 그러기 위해서는 열전 성능을 최대화 할 수 있는 설계가 필수적이다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 통하여 열전 발전 모듈의 성능을 평가하여 높은 성능을 갖는 열전 발전 모듈 설계에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 열전 모듈의 기판의 유무에 따른 열전 발전 효율을 계산하여 성능을 평가하였고, 기판이 모듈의 성능 저하에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 열저항에 의하여 발전 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 지식경제부 열전 나노 구조체 박막 소재 및 모듈 개발(과제번호: 2008-E-ID11-P-08-0-000)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- Hicks, L. D. and Dresselhaus, M. S., "Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor," *Phys. Rev. B*, **47**, 16631-16634, 1993.
- Hicks, L. D. and Dresselhaus, M. S., "Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit," *Phys. Rev. B*, **47**, 12727-12731, 1993.
- Venkatasubramanian, R., Siivola, E., Colpitts, T., O'Quinn, B., "Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit," *Nature*, **451**, 579-602, 2001.
- Rhyee, J.-S., Lee, K. H., Lee, S. M., Cho, E., Kim, S. I., Lee, E., Kwon, Y. S., Shim, J. H. and Kotliar, G., "Peierls distortion as a route to high thermoelectric performance in $\text{In}_4\text{Se}_3-\delta$ crystals," *Nature*, **459**, 965-968, 2009.
- Da Silva, L. W. and Kaviany, M., "Micro-thermoelectric cooler: Interfacial effects on thermal and electrical transport," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **47**, 2417-2435, 2004