

열전모듈을 이용한 발전기의 패키징

한경목 · 황창원* · 백동규 · 최승철

아주대학교 재료공학과, *써모텍(주)

The Packaging Technology Thermoelectric Generator

Kyoung Mok Han, Chang Won Hwang*, Dong Kyu Paek and Seung Chul Choi

Department of Material Science and Engineering, *Thermotek Co. Ltd.

초 록: 폐수의 온도차등의 폐열 에너지를 이용한 에너지 절약 시스템으로써 구조가 간단한 소형의 열전 발전기를 개발하였다. 열원으로 끓는 물을 이용하고, Bi-Te 계 열전반도체 모듈 16개를 전기적으로 직렬로 연결하고 패키징하여 열전 변환 시스템을 제작하였다. 열전 발전기의 출력은 온도차가 75 K, 전기 저항이 40 Ω, 전류가 0.35 A에서 약 4.5 W정도를 얻을 수 있었다.

Abstract: A simple and compact type of thermoelectric generator was developed as the energy saving system using waste hot water and low temperature waste heat sources. Sixteen of Bi-Te thermoelectric modules were packaged in series for thermoelectric conversion system using hot water as heat source. The thermoelectric generator shows the power output of about 4.5 W with the temperature difference of about 75 K at 40 Ω and 0.35 A for the electrical resistance and current of the used thermoelectric module, respectively.

1. 서 론

열전발전은 온도차를 이용하여 전기를 얻을 수 있는 직접변환 방법으로 폐열을 이용하여 전기를 얻을 수 있는 발전 방식으로 폐열 이용의 한계라고 할 수 있는 150°C 이하의 열을 이용하여서도 전기를 얻을 수 있어 매우 유망한 기술이다. 종래에는 이 열전발전 기술이 군용이나 우주용과 같은 특수한 상황에서만 이용되어 왔으나, 최근 산업용이나 발전소의 폐열을 이용하려는 시도가 계속되고 있다.^{1,2)}

현 단계의 열전발전은 효율이 낮아³⁾ 연료전지 등에 대체에너지 수단과는 비교할 수 없으나, 폐열 에너지를 이용하는 관점에서는 경제성이 있는 것으로 평가된다. 단점으로 지적되고 있는 효율문제도 열전재료를 경사화 시킴으로 상당 수준으로 향상시킬 수 있는 것이 제시되는등 열전발전 기술은 많은 가능성을 보이고 있다.^{4,5)}

열전 발전은 산업용 열장비에서 나오는 열을 전기로 변환하므로 에너지 유효응용을 극대화 시킬 수 있으며, 또한 구조가 간단하고 소음이 없다. 이용열원의 선

택범위가 넓어 특수 전원장치로 이미 실용화되고 있으며, 자연 에너지를 이용하는 대용량 열전발전 기술도 개발 중에 있다.^{6,7)} 열전재료는 사용 온도 범위에 따라 500~1000°C에서 FeSi₂ 등의 고온용 열전재료, 200~500°C에서 Pb, Ge, Sn 등의 IV족 원소의 Te계 중온용 열전재료, 상온에서 200°C의 온도에서 Bi, Sb 등 V족 원소의 Te 계 저온용 열전재료로 분류된다.⁸⁾ 본 연구에서는 이러한 열전반도체중에서 폐수의 온도차이를 이용하여 발전하는 온도범위에 적합한 Bi-Te계 열전반도체를 이용하여 구조가 간단한 발전기를 설계하고 패키징하여 제작하였다.

2. 실험방법

2-1. 단위 모듈의 제조과정

단위모듈에 들어가는 element의 제조법을 일반화하여 Fig. 1에 나타내었다. 단위 모듈에 대한 성능은 각각 element(p-type, n-type)에 의해 좌우된다. 열전반도체의 성능을 결정하는 Seebeck 계수 (α), 전기전도도 (σ), 열전도도 (κ) 및 성능지수 ($Z=\alpha^2\sigma/\kappa$) 등의 열전특

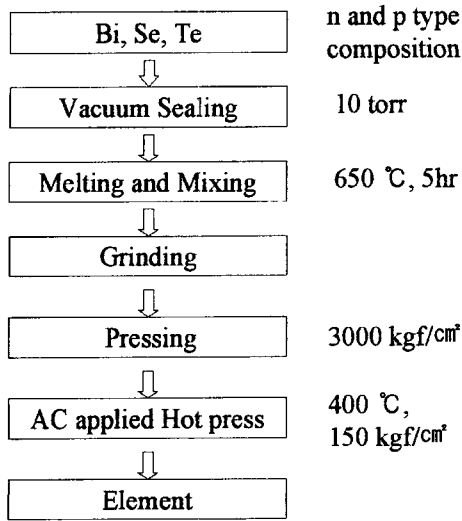


Fig. 1. Thermoelectric element fabrication procedure.

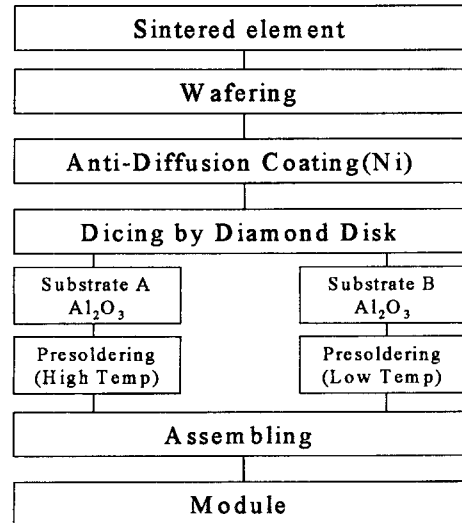


Fig. 2. Fabrication procedure for thermoelectric module.

성은 전자물성과 연관되어 있으므로 열전반도체의 전자물성을 파악하는 것은 열전특성을 향상시키는데 필수적이라고 할 수 있다.

열전모듈 제조 과정과 열전모듈의 단면도를 간단하게 도식화한 것을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 열전 재료를 이용하여 모듈을 제조하는 경우, 알루미늄 기판(substrate A)위에 Cu를 direct bonded copper⁹⁻¹¹⁾으로 접합한 후에 그 위에 땀납재를 사용하여 n, p-type의 반도체를 순서대로 접합한다. Cu전극과 element(n, p-type)사이에는 Ni를 도금하는데 이것은 Cu의 산화를 방지하기 위해서이다. 또한 같은 방식으로 알루미늄 기판(substrate B) 위에 전극을 접합한 후 알루미늄 기판(substrate A)과 함께 조립하여 모듈을 완성한다.

열전모듈에 의한 발전원리와 실제 만들어진 열전 모듈을 Fig. 4에 나타내었다.

Harmon 법¹²⁾으로 모듈의 성능지수 ($Z = \alpha^2 \rho / \kappa$)와 저항값을 구하였고, 모듈에서의 열전능(Open Voltage/K)을 측정하여 모듈의 특성치를 Table. 1에 나타내었다.

완성된 모듈에서의 각 특성치는 재료에 의한 각 열전반도체의 물성으로부터 예상하였던 값에 비하여 상당한 차이가 있다. 이는 열전반도체와 전극과의 전기적 접합저항 및 사용된 알루미늄 기판과 전극재료가공 접합 조건에 따른 열전도에 의한 것으로 생각되며, 발전모듈 구성상에서의 손실은 불가피한 것으로 최대의 성능지수를 갖는 열전반도체 물질, 최소의 접합 전기 저항, 최대의 열전도 구조의 기판조건이 필요하다.

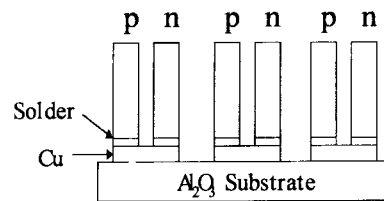


Fig. 3. The cross-sectional view of thermoelectric module.

Table 1. 모듈의 특성치 (at $T_h = 300K$)

특성항목	실측값	설계값
Open Voltage (mV/K)	41.10	50.10
Electrical Resistance (Ω)	2.00	2.12
Thermal Conductance (W/cmK)	0.35	0.45
Figure of Merit ($\times 10^{-3}/K$)	2.45	2.63

2-2. 열전발전

고온접합부 온도를 T_H , 저온접합부 온도를 T_C , 고온 접합부 온도와 저온접합부의 온도차를 ΔT , 소자의 Seebeck 계수를 α , 소자의 열전도율을 κ , 회로전류를 I , 소자의 내부 저항을 R_L 로 표시하면 외부 부하저항 (R_L)에 의해 발생하는 전력, P 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹³⁾

$$P_{max} = \left[\frac{\alpha_{A-B} \cdot \Delta T}{R_L + R_t} \right]^2 R_L (\alpha_{A-B} = \alpha_A - \alpha_B) \quad (1)$$

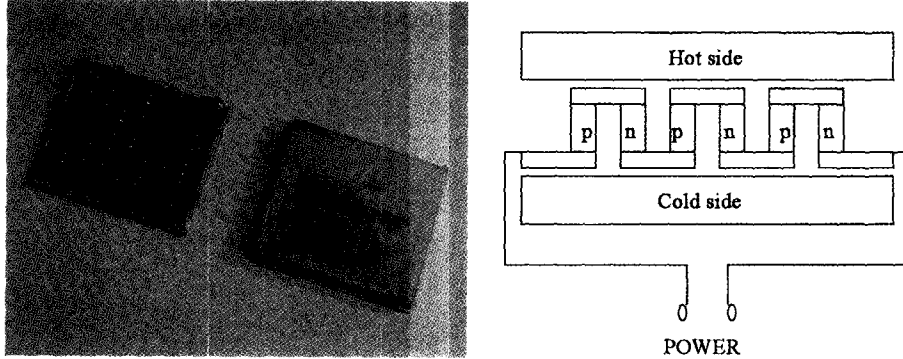


Fig. 4. Thermoelectric modules and its configuration.

$$P_{max} = \frac{(\alpha_{A-B} \cdot \Delta T)^2}{4R_i} (R_L = R_i) \quad (2)$$

(1) 식과 (2) 식에 의하면 열전발전에서 큰 출력을 얻기 위해서는 우선 단위소자의 양단간의 온도차와 Seebeck계수의 값이 커야 한다. 소자재료의 직경이 크고 길이가 짧으면 저항을 최소화할 수 있기 때문에 큰 출력을 얻을 수 있다. 그러나 형상계수에만 너무 치우치면 저항을 줄일 수 있지만 양단간의 온도차가 그만큼 작아지기 때문에 전체 효율 면에서는 불리할 수도 있으므로 최적 조건을 찾아야 한다. 열전시스템의 출력에 좌우되는 인자는 적용된 온도대, 고온부와 저온부의 온도차, 소자재료의 열전변환성능 등이다.

최적 효율 η 는 고온부에서 발생열에 의한 열 유동량 Q_H 에 대한 부하저항 R_L 에서 발생되는 출력 P 로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{P}{Q_H} \quad (3)$$

그러므로 효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹³⁾

$$\eta = \frac{I^2 R_L}{\kappa \Delta T + \alpha_{A-B} T_H I - \frac{1}{2} I^2 R_i} \quad (4)$$

열전발전의 최대 효율(η_{max})은 Carnot 효율 $\eta_c = (T_H - T_C)/T_H$ 과 소자효율 $\eta_d = (R_L/R_i - 1)/(R_L/R_i + T_C/T_H)$ 의 곱으로 표시되는데 η_d 는 R_L/R_i 값이 무한대인 경우에 최대 값을 가지며, T_H 와 T_C 가 일정한 경우에는 열전재료의 성능지수(Z) 값이 클수록 효율은 커진다. 고 효율의 열전발전을 위해서는 작동온도 T_H 를 높여 Carnot 효율을 크게 하며, 동시에 Z 값이 큰 재료를 사용하여야 한다.

양단의 온도차에 의해서 발생되는 기전력은 저항이 연결된 상태에서 전류와 전압을 측정하여 출력을 측정

할 수 있다. 그러나 열전 발전시 발생하는 출력의 특성상 전압보다는 전류가 큰 관계로 일반적인 저항으로는 측정이 어렵게 되며 이러한 특징으로 인해서 하나의 열전발전 모듈에서 얻어지는 결과를 먼저 측정하고 다음 열전발전기 전체 설계를 진행하였다.

외부 부하저항 R_L 과 소자의 내부저항 R_i 의 비가 $R_L/R_i = m$ 이라 하면, 전류 I 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R_i + R_L} = \frac{\alpha \Delta T}{(1 + m)R_i} \quad (5)$$

온도는 모듈에 열전대를 직접 접촉시켜 측정하였으며 고온부와 저온부에서 냉·온수의 유속 변화에 따라서 발생하는 출력도 같이 변화한다. 여러 개의 모듈을 직렬로 배치할 경우는 전기적 내부저항이 증가하므로 식 (5)에 의하여 출력 전류의 감소가 일어나고, 이러한 특성은 기전력에도 영향을 미쳐 직렬인 경우에는 사용한 열전모듈의 수에 비례하여 전압이 증가한다.

2-3. 열전발전기의 제조과정

열전발전기는 각각의 단위 모듈을 전기적으로 직렬로 연결하여 작동시켰다. 열전발전 소자는 단위당 발전 출력이 수 W 정도이므로 보다 큰 출력을 얻기 위해서 다수의 열전모듈을 연결 사용하였다. 본 연구에서는 40 × 40 mm의 열전모듈 16개를 전기적으로 직렬로 연결하였다.

발전기의 설계 모델의 구조를 Fig. 5에 나타내었다. Water jacket(85 × 23 × 21.9 mm) 중심부로 열원이 흐를 수 있도록 Cu관을 설치한 후, 열전모듈 8개를 배치한다. 그 위에 다시 water jacket을 설치하고, 같은 방식으로 8개의 모듈을 배치하고, 다시 water jacket을 설치한다. 여기에서 water jacket 사이에 다수의 모듈은 전기적으로 직렬 연결한 후, 열교환기 모듈의 열응력의 완화를

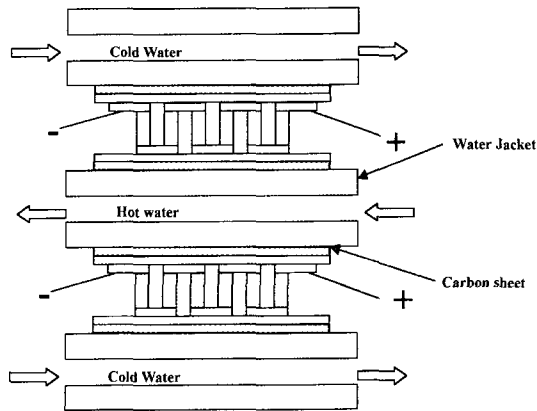


Fig. 5. The structure of generator.

위하여 carbon sheet를 설치하고, 열교환기에 Fig. 5와 같이 교차방식으로 냉, 온수를 흘려줌으로써 75 K의 온도차를 부여하여 전기를 발생하도록 설계하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 열전형 발전기를 Fig. 6에 나타내었고, 이것은 폐수의 온도차이를 이용한 발전에 적용할 수 있는 온도범위에 적당한 Bi-Te 계 열전발전기를 이용하여 제작하였다. 실험에서는 냉·온수를 이용하여 고온측을 90°C, 저온측을 15°C로 온도차를 부여하여 출력단 부하저항과 전류에 따른 출력을 측정하여 그 성능을 평가하였다.

발전 시스템에 대해서 온도차에 따른 무부하 기전력 (open circuit voltage)을 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과는 열전소자 내부에서 존재하는 저항만으로 이루어진 경우의 기전력 변화로서, 저온단과 고온단이 같은 온도(25°C)에서 시작하여 고온단의 온도를 100°C에 가깝게 상승시켰을 경우에 발생된 기전력의 변화이다. 이 고온단의 온도변화에 따라 저온단에도 열이 전달되어 저온단의 온도가 상승하므로 실질적으로는 ΔT 가 약 75 K 정도에 그쳤다. 또한 $V = \alpha \Delta T - R_i I$ 에서 외부부하가 걸리지 않은 상태이므로 $I=0$ 일 때 $V = \alpha \Delta T$ 이 되므로 Fig. 7에 나타내었듯이 온도차(ΔT)에 따라 선형적으로 변할 것으로 예상할 수 있다. 그러나, 이와 같은 특성은 아무런 외부부하를 걸지 않은 상태이므로 실제적으로 사용되는 상황에서는 이 결과와는 차이가 있다. 즉, 식 (5)에 의하면 저항의 크기에 따라서 출력의 변화가 발생하게 되고 이러한 조건하에 내부저항에 따른 특성의 변화는 발전소자와 부하와의 임피던스 matching에 따른 유효 발전출력이 변화한다. 특



Fig. 6. Thermoelectric generator.

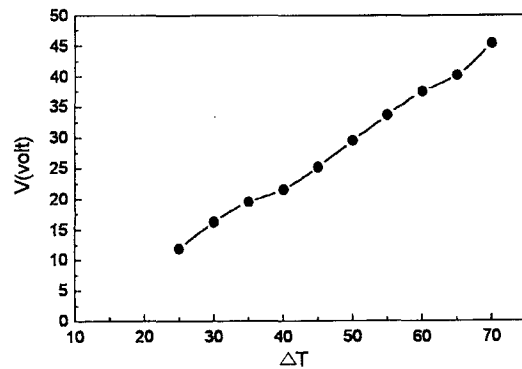


Fig. 7. The temperature difference dependence of voltages in generator.

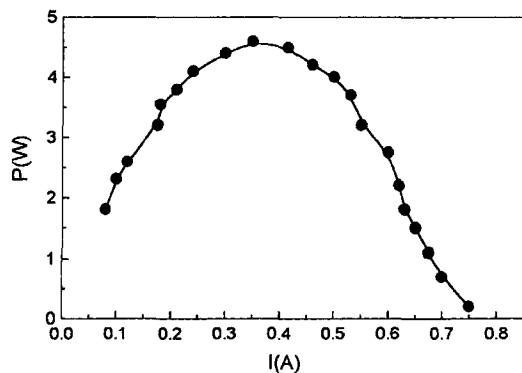


Fig. 8. The electrical current dependence of power output in generator. ($Z=2.45 \times 10^{-3}/K$, $\Delta T=75$ K).

히 발전소자의 전기저항은 열전소재의 온도에 대한 특성에 종속적이므로 전체 발전시스템의 작동온도 영역에서의 분석이 중요하다.

발전기의 전류값에 따른 출력의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 16개의 모듈을 직렬로 연결한 발전시스템의

경우를 고려해 보면 단위 모듈에서 얻어질 수 있는 전압은 온도차에 따라 다르지만 ΔT 가 75K에서 대개 2 V 정도이고, 전류는 0.6 A 정도이므로 단위 모듈에서 얻어질 수 있는 전력량은 1.2 W이다. 따라서 16개의 모듈을 직렬로 연결한 발전기의 예상 전력량은 19W 정도가 된다. 그러나, 실제 제작한 발전기의 최대 출력은 전류가 0.35 A 일 때 4.5 W 정도로 계산치보다 낮은 결과가 나왔다. 이 출력의 감소는 열전모듈의 배치와, 발전기 내부의 구리관과 알루미늄관 등에서 열손실과 회로내의 저항 등에 기인하는 것으로 추정된다.

발전시스템의 저항에 따른 출력의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 최대 출력은 발전시스템의 내부저항과 외부 부하저항을 같아주었을 때 이론적으로는 내부저항과 외부 부하저항이 같아질 때 최대 발전량을 얻을 수 있다. 저항변화에 따른 출력은 저항이 40 Ω 에서 최대 출력 4.5 W를 얻을 수 있었는데 이것은 내부저항이 약 33.6 Ω 이므로 식(1)과 식(2)에 의해서 외부저항이 약 33.6 Ω 근방에서 최대 출력을 얻을 수 있음을 예상할 수 있으나, 실험치는 40 Ω 에서 최대 출력을 얻었다. 이

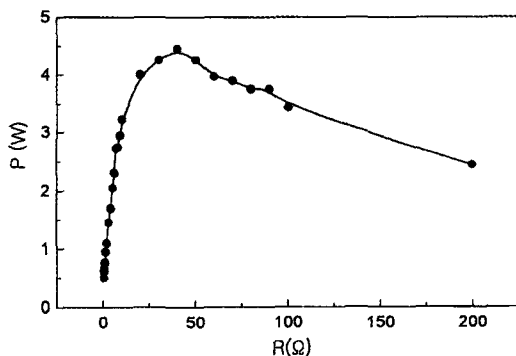


Fig. 9. The electrical resistance dependence of power output in generator. ($Z=2.45 \times 10^{-3}/K$, $\Delta T=75$ K).

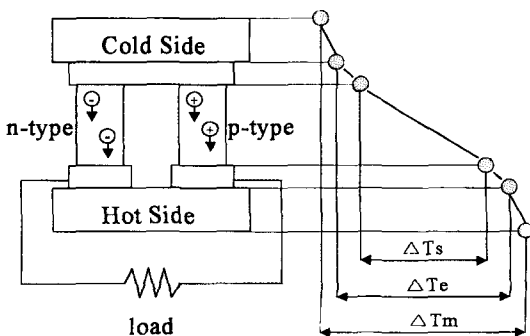


Fig. 10. Temperature differences in thermoelectric module.

것은 작동온도 구간에서의 열전변환소자의 온도 특성에 기인한 것으로 300 K에서의 내부저항 33.6 Ω 에 대하여 6.4 Ω 의 전기저항의 증가를 의미한다. 또한 외부 저항에 따른 출력은 예상되는 발전시스템의 출력보다 낮은 4.5 W의 출력을 나타냈다.

이 이유 또한 열전모듈의 배치와 발전기 내부에서의 모듈과 열교환기 사이의 열저항에 의해 실제 열전소자에서의 온도차가 작게 일어난 것에 기인한다. 실제로 모듈과의 접촉블록온도의 측정결과 실제온도차는 69 K 이었다. Fig. 10에 실제 모듈에서 각 부분의 온도차의 변화를 나타내었다. Fig. 10에 의하면 열전반도체 양단의 온도차(ΔT_s), 전극사이에서의 온도차(ΔT_e), 모듈의 기판사이에서의 온도차(ΔT_m)가 서로 다를 수 있다. 이러한 이유로 해서 열교환기간의 온도차와 실제 열전소자에서의 온도차는 서로 차이가 있다. 따라서, 발전기의 효율을 높이기 위해서는 발전 시스템 모듈내의 열손실을 최소화하여 ΔT 를 높일 때 적용 모듈의 출력을 최대로 할 수 있다.

위와같은 결과는 발전모듈과 water jacket을 독립적으로 사용했기 때문에 계산치보다 낮은 출력을 나타낸 것으로 생각된다. 그러므로, 출력과 발전효율을 높이기 위해서는 ΔT 와 열교환 효율을 높이고 열매체와 발전모듈 사이의 열저항을 최소화 하여야 한다. Water jacket의 방열핀 구조, 표면 조건 및 재질을 개선을 통하여 시스템 효율을 높일 수 있다. 또한 발전 모듈과 열출입 디바이스가 독립적으로 사용될 수 있는 water jacket의 개선, 즉 각각의 단위모듈과 열원이 직접 접할 수 있도록 슬랩화 모듈 제작을 통하여 보다 효율이 높은 발전기를 설계할 수 있다.

4. 결 론

열전반도체 모듈을 이용한 발전기는 온도차만 부여하면 전기를 발생시킬 수 있기 때문에 상온에서 200°C 사이에서 우수한 성능지수를 나타내는 Bi-Te계 열전반도체 모듈을 이용하여 냉·온수 열교환식 발전기를 제작하였다. 열전 반도체 모듈 16개를 패키징 하여 제작한 발전기의 출력은 전류가 0.35 A, 40 Ω 부하에서 최대 4.5 W를 나타냈다. 이것은 예상되는 계산치보다 낮은 출력이었으나, 본 연구에서 제조된 발전시스템은 90°C 이하의 폐열수를 유용하게 이용할 수 있는 저급 폐열 에너지 시스템의 개발로 에너지의 유효활용에 큰 가능성이 있는 방법이다. 또한 간단한 구조의 발전기로 유지관리가 용이하고 신뢰도가 높은 특징을 갖는 에너지 변환 시스템이다.

5. References

1. D.M.Rowe and C.M.Bhandan, "A Review of Lead Telluride Technology at UWIST," in Proc. 6th Int. Conf. on Thermoelectric Energy Conversation, Univ. of Texass, Arlington, 43-54 (1986).
2. 上村欣一, 西田勳夫, "熱電半導體とその應用," 日刊工業新聞社, (1988).
3. M.Telks, "The efficiency of thermoelectric generator," Int. J. Appl. Phys, 18, 1116 (1947).
4. I. Shiota and I. Nishida, "Development of FGM thermoelectric materials in Japan," 16th Int. Conf. on Thermoelectronics, 364-370 (1997).
5. Z. Dashevsky, I. Drabkin, V. Korotaev and D.Rabinovich, "Improved materials for thermoelectric conversion(generation)," 16th Int. Conf. on Thermoelectronics, 382-385 (1997).
6. 심재동 외, "에너지 변환용 열전재료 개발," 3차년도 KIST 보고서 (1990).
7. H. Kaibe, J. Jpn. Inst. Met, 53, 958 (1958).
8. D.M. Rowe and C.M. Bhandari, "Modern Thermoelectrics," 13 (1983).
9. J. Curry, G. Fitzgibben, Y. Guan, R. Muollo, G. Nelson and A. Thomas, Proc. Reliability Physics Symp, IEEE, 6 (1984).
10. L.D. Hart, "Alumina Science Chemical and Technology Handbook," Am. Ceram. Soc. 70, 12 (1987).
11. 정한상, 박기섭, 황창원, 백동규, 최승철, "세라믹 IC 기판에서의 DBC공정," J. Microelec. Packag. Soc. Vol. 5, No. 1, June, 39-44 (1998).
12. T.C. Harman, J.H. Chan and M.J. Logan J. Appl. Phys., 30, 1351 (1959).
13. D.M. Rowe, Ed., "CRC Handbook of Thermoelectrics," CRC Press, Inc., 24-25 (1994).