

열전소자의 열적조건 변화에 따른 발전 특성

한 훈 식, 김 명 기*, 엄 석 기*, 김 서 영**

한국과학기술원 기계공학과, *한양대학교 기계공학부, **한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터

Performance of Thermoelectric Power Generator with Various Thermal Conditions

Hun Sik Han, Myungkee Kim*, Sukkee Um*, Seo Young Kim**

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 350-701, Korea

*Division of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea

(Received October 8, 2009; revision received January 14, 2010)

ABSTRACT: Experiments have been performed to investigate the key parameters determining the performance of thermoelectric power generation. The experimental results obtained show that the power output significantly increases with the temperature difference between cold and hot sides of thermoelectric generator. However, the effect of the hot side temperature under the identical temperature difference on the overall performance of a thermoelectric generator is meager. The conversion efficiency defined as the ratio of the power generated to the heat absorbed at the hot side increases with the temperature difference. The behavior of the thermoelectric generator is shown to be consistent with the theoretical analysis. The optimum current giving the maximum conversion efficiency and the maximum conversion efficiency are linearly increased with the temperature difference.

Key words: Thermoelectric power generation(열전발전), Figure of merit(성능지수), Conversion efficiency(발전효율)

기 호 설 명

I : 출력전류 [A]
 I_{opt} : 최대 발전효율시 출력전류 [A]
 P : 출력전력 [W]
 Q_h : 열전모듈 흡열량 [W]
 R : 열전모듈 전기저항 [Ω]
 R_t : 알루미늄 블록 열저항 [K/W]
 T_{avg} : 평균 온도 $T_{avg} = (T_h + T_c)/2$ [$^{\circ}\text{C}$]

T_c : 열전모듈 저온부 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_f : 필름히터 상부 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_h : 열전모듈 고온부 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 V : 출력전압 [V]
 Z : 열전모듈 성능지수 [1/K]

그리스 문자

α : 열전모듈 지벡 계수 [V/K]
 ΔT : 열전모듈 양단 온도차, $\Delta T = T_h - T_c$ [$^{\circ}\text{C}$]
 η : 발전 효율 [%]
 Θ : 열전모듈 열저항 [K/W]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5683; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: seoykim@kist.re.kr

하첨자

avg : 평균값, $T_{avg} = (T_h + T_c)/2$ [°C]
 max : 최대값

1. 서 론

전 세계적으로 환경오염 규제강화와 에너지 부존자원양의 감소에 따른 환경적·자원적 요구조건을 충족시킬 수 있는 대안으로 주목받고 있는 신재생에너지 기술은 환경친화성, 에너지공급원의 다원화 등의 다양한 장점으로 인해 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 신재생에너지 기술 분야 중 열전발전장치는 열에너지를 전기에너지로 직접 변환시키는 에너지변환 장치로써 열원이 존재하는 경우 다른 기계적 구동요소 없이 전력을 발생시켜 사용할 수 있다.⁽¹⁾ 2006년 국내 총 에너지 소비는 약 2억 3천만 TOE로 추정되며 이의 약 26%가 배증기, 온수, 배기가스 형태의 폐열로 버려지고 있는 실정이다. 이와 같은 폐열을 재생할 경우 국가 에너지 소비량을 절감할 수 있고 온실가스 배출을 저감할 수 있어 열전발전에 대한 연구가 다방면으로 이루어졌다.

1900년대 초에 시작된 열전발전의 연구는 1940년대 소련에서 가열식 열전발전 시스템을 실용화 하였고 1956년 미국 에너지성(DOE; Department of Energy)에서 인공위성용 열전발전기 연구를 시작하면서 본격화되었다. 1990년대 Hi-Z사에서 디젤 엔진의 폐열을 이용한 1kW급 열전발전 시스템을 개발하였으며,⁽²⁾ 폐열을 이용한 열전발전기의 해석 및 열전발전 시스템의 최적설계⁽³⁻⁵⁾ 등의 연구가 이루어졌고 최근에도 휴대용 전원기기, 발전소 및 자동차 배열 구동 발전시스템에 대한 연구가 수행되고 있다.

열전발전은 서로 다른 두 금속을 연결하고 양단간의 온도차에 의해 기전력이 발생하는 지벡(Seebeck) 효과를 이용한 것으로 Fig. 1에 나타나듯이 열전모듈의 흡/발열 현상에 의하여 전류가 흐르게 된다. 본 연구에서는 열전모듈(TEM)의 열적조건이 열전발전 성능에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보았으며 이 실험 결과를 바탕으로 양단의 온도차가 발전효율에 미치는 영향을 이론적으로 분석하여 비교하였다.

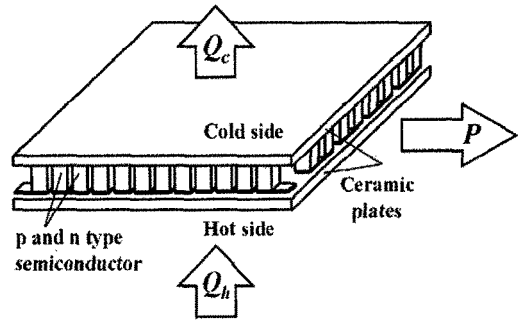


Fig. 1 Typical one-stage TEM.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 온도조절이 가능한 고온부와 저온부, 열전모듈의 발전부, 실험 결과 측정을 위한 계측부로 구성되었으며 고온부에는 40 mm × 40 mm 크기의 필름히터(5 A/40 W)를 설치하여 고온부의 온도를 조절하였다. Bi-Te계 열전모듈(Huimao: TEC1-012707T125)를 사용하여 열전발전을 하였으며 저온부의 온도조절을 위하여 발전부와 동일한 열전모듈과 열교환기 및 이를 냉각시키기 위한 팬을 설치하였다. 또한 시험부를 단열처리하여 열손실을 최소화하였다. 열전발전 성능 측정을 위해 전기부하기(KIKUSUI PLZ334W)를 사용하였으며 발전전류를 순차적으로 증가시키며 정상상태의 발전전압을 데이터 수집장치(Yokogawa DA100)를 사용하여 기록하였다.

열전모듈 양단에 인접하여 설치한 알루미늄 블록(Heat spreader)에 홈을 가공하고 열전대(T-type)를 삽입하여 열전모듈 고온부와 저온부의 온도를 측정하였다. 또한 히터와 열전모듈 사이의 알루미늄 블록 양단 온도를 측정함으로써 열전모듈로 인가되는 흡열량을 산정하였다. 이때 알루미늄 블록과 열전모듈간의 접촉열저항을 최소화하기 위해 써멀컴파운드(thermal compound)를 접촉부위에 도포함으로써 열전모듈과 알루미늄 블록과의 간의 발생을 방지하였다.

발전전류를 증가시키에 따라 열전모듈의 흡열량 및 발전량이 달라져 열전모듈 고온부와 저온부의 온도가 변하게 된다. 따라서 모든 실험 경우마다 고온부 측의 히터와 저온부 측의 냉각용 열전모

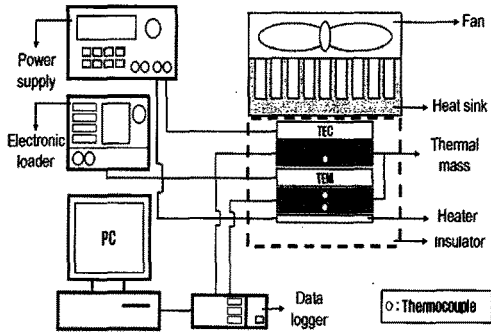


Fig. 2 Experimental setup.

물에 인가되는 전압을 조절하여 양단의 온도를 설정온도의 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 로 제어하였다.

2.2 실험결과 처리 방법

열전발전 성능은 식(1)~식(4)로 표현되며⁽¹⁻³⁾ 식(1)로부터 열전모듈의 지백계수(a)와 전기저항(R)을 실험적으로 산정할 수 있다.⁽⁶⁾ 무부하 상태($I=0$)일 때 발생하는 전압(V)과 열전모듈 양단 온도차(ΔT)를 이용하여 지백계수를 구하였고 이로 부터 각 발전전류마다 전기저항을 평균하여 산정하였다. 또한 Z-Meter(RMT Ltd. DX4065 Series)를 사용하여 열전모듈의 성능지수(Z)를 측정하였으며 식(2)로부터 열전모듈 열저항(θ)을 산정하였다. 실험적으로 산정된 지백계수, 전기저항, 열저항을 식(3)에 대입하여 열전모듈 흡열량을 계산하였고 식(4)로부터 발전효율을 산정하였다.

$$P = VI = (\alpha\Delta T - IR)I \quad (1)$$

$$Z = \alpha^2\theta/R \quad (2)$$

$$Q_h = \alpha T_h + \frac{\Delta T}{\theta} - \frac{1}{2} I^2 R \quad (3)$$

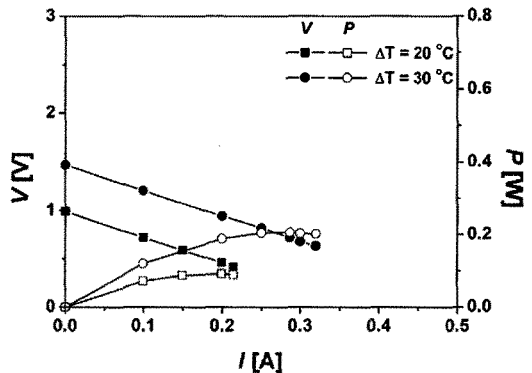
$$\eta = P/Q_h \quad (4)$$

이론식으로부터 구한 발전효율을 실제 실험값과 비교하기 위해 알루미늄 블록 양단 온도차로부터 식(5)와 같이 열전모듈 흡열량을 산정하였고 이로 부터 발전효율을 실험적으로 구하였다.

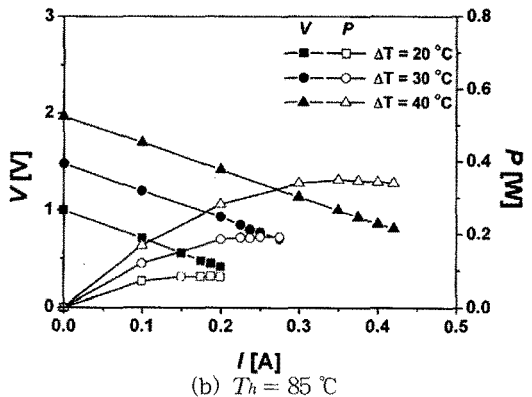
$$Q_h = (T_f - T_h)/R_t \quad (5)$$

3. 실험결과 및 고찰

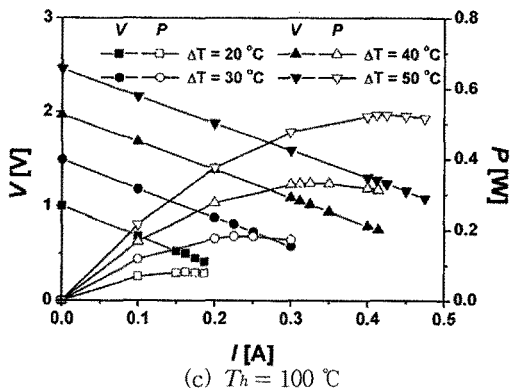
열전모듈 고온부와 저온부의 온도차에 따른 열전발전 성능곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 전류가 증가함에 따라 출력전압은 선형적으로 감소하고 출력전력은 증가 후 감소하여 최대출력 점이 나타나는 양상을 보인다. 열전모듈 양단 온도차가 증가할수록 발전전압과 그에 따른 출력전력이 크



(a) $T_h = 70\text{ }^\circ\text{C}$



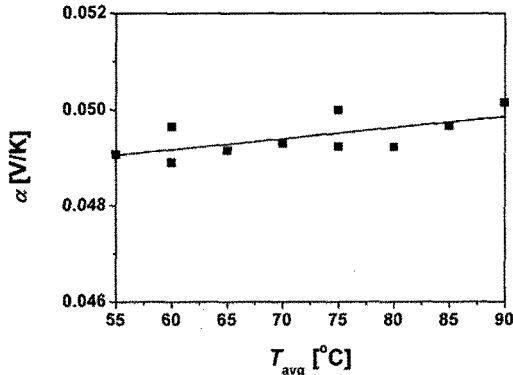
(b) $T_h = 85\text{ }^\circ\text{C}$



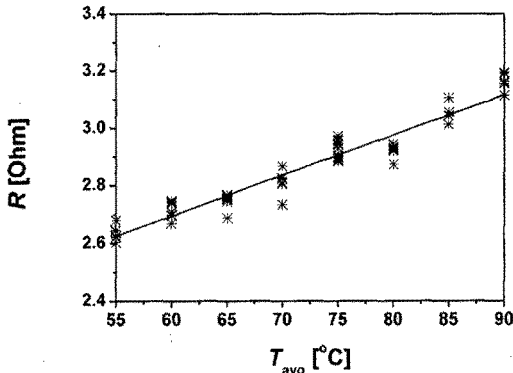
(c) $T_h = 100\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 3 Performance curves according to ΔT .

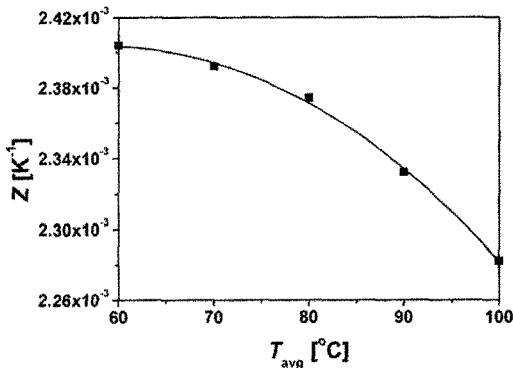
게 향상되는 것을 알 수 있으며 이는 온도차가 증가함에 따라 고온부의 흡열량이 증가하는 것에서 기인한다. 또한 동일한 양단 온도차일 경우 고온부 온도의 변화에 따른 발전성능은 거의 차이가 없음을 확인하였고 이로부터 열전발전에 있어 양단 온도차의 열적 조건이 발전성능을 결정하는 주요 인자임을 알 수 있다.



(a) Seebeck coefficient



(b) Electrical resistance



(c) Figure of merit

Fig. 4 Physical properties of the TEM.

열전모듈 제조사가 제공하는 열전모듈 성능지수는 $T_h = 27\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 $Z = 2.41 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ 으로 온도에 따른 정보가 제한적임을 고려할 때 작동온도에 따른 열전모듈 물성치를 측정하여 해석을 수행할 필요가 있다. 위의 실험결과로부터 산정한 열전모듈 지백계수 및 전기저항, Z-Meter를 사용하여 측정된 열전모듈 성능지수를 Fig. 4에 도시하였다. 지백계수와 전기저항은 열전모듈 평균온도에 따라 증가하고, 열전모듈 성능지수는 온도에 따라 감소하는 것을 확인하였다. 이로부터 본 연구에서 사용한 Bi-Te계 열전모듈의 경우 동작온도가 증가함에 따라 열전발전성능이 감소하게 됨을 짐작할 수 있다.

온도차에 따른 최대출력전력을 Fig. 5에 도시하였다. 열전모듈 양단간 온도차가 커질수록 최대출력전력이 증가하는 양상을 보이며 동일한 온도차의 경우 고온부의 온도가 높아짐에 따라 증가된 전기저항으로 인한 열전모듈 성능지수의 감소로 최대출력전력이 다소 줄어드는 것을 알 수 있다. 측정된 열전모듈 물성치를 이용하여 식(1)~식(4)로부터 해석적으로 도출한 열전모듈의 발전효율을 실험결과로부터 구한 발전효율과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 실험결과 대비 상대오차는 15% 이하로 나타났고 전류에 따른 최대 발전효율점이 존재하며 열전모듈 양단의 온도차가 높아질수록 발전효율이 증대되는 모습을 보인다. 또한 발전전력의 결과와 마찬가지로 동일한 양단 온도차일 경우 발전효율에 미치는 고온부 온도의 영향은 양단 온도차의 영향에 비해 매우 작음을 알 수 있다.

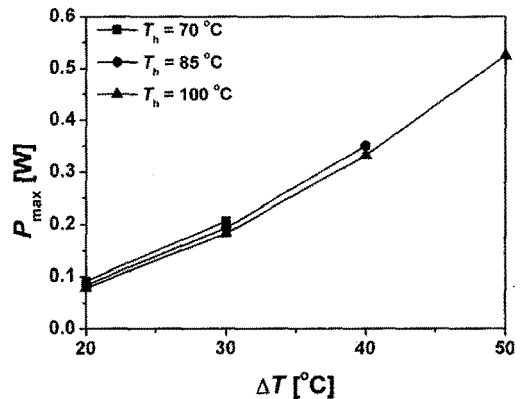
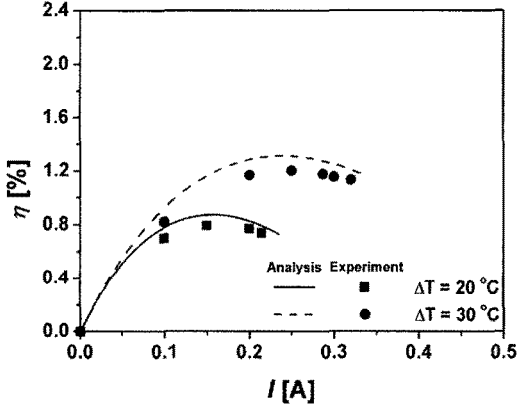
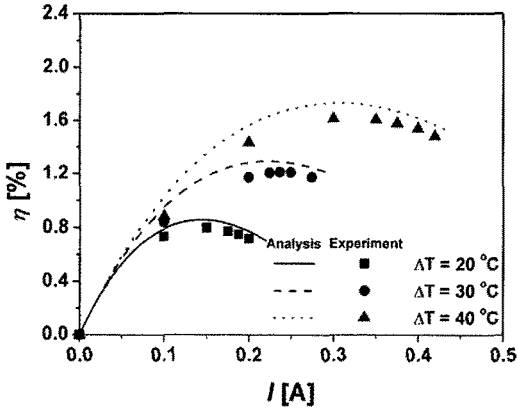


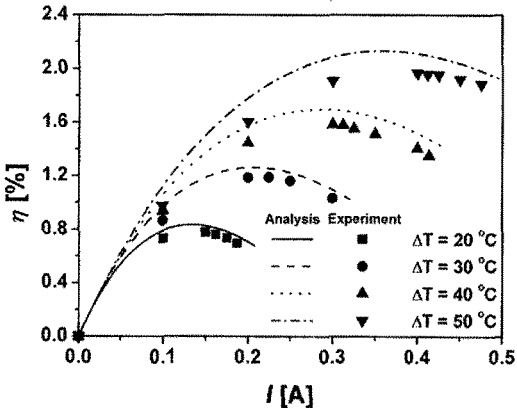
Fig. 5 Maximum power generated according to ΔT .



(a) $T_h = 70\text{ }^\circ\text{C}$



(b) $T_h = 85\text{ }^\circ\text{C}$



(c) $T_h = 100\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 6 Conversion efficiency according to ΔT .

발전효율이 최대가 되는 전류(I_{opt})는 $d\eta/dI=0$ 으로부터 식(6)과 같이 나타낼 수 있고 이때 최대 발전효율(η_{max})은 식(7)과 같이 표현된다.⁽¹⁾

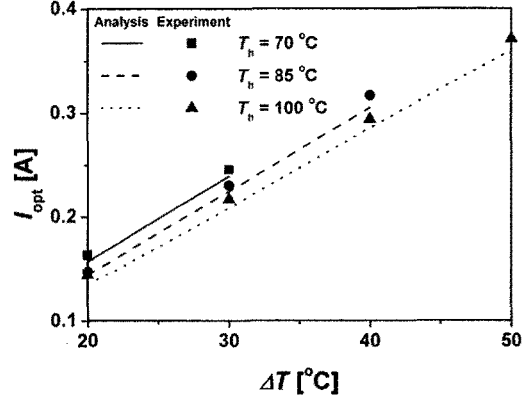


Fig. 7 Optimum current giving the maximum conversion efficiency according to ΔT .

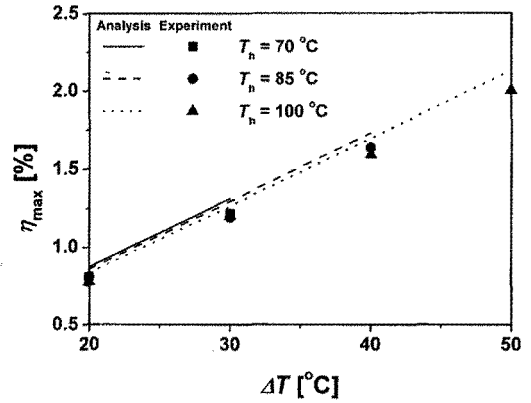


Fig. 8 Maximum conversion efficiency according to ΔT .

$$I_{opt} = \frac{\alpha \Delta T (\sqrt{1 + ZT_{avg}} - 1)}{RZT_{avg}} \quad (6)$$

$$\eta_{max} = \frac{\Delta T}{T_h} \frac{\sqrt{1 + ZT_{avg}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{avg} + T_c/T_h}} \quad (7)$$

식(6)의 해석적인 최적전류와 Fig. 6의 실험결과를 2차 다항식으로 근사했을 때 발전효율이 최대가 되는 최적전류를 Fig. 7에 도시하였다. 해석적으로 구한 최적전류와 실험결과와의 상대오차는 7.2% 이하이며 실험결과는 열전모듈 양단 온도차에 따라 선형적으로 증가하고 동일한 온도차의 경우 열전모듈 평균온도가 증가함에 따라 다소

감소하는 최적전류의 특징을 잘 나타낸다.

Fig. 8은 식(7)로부터 구한 해석적인 최대효율과 실험결과를 2차 다항식으로 근사했을 경우 최대발전효율을 보여준다. 최대효율이 열전모듈 양단 온도차에 따라 선형적으로 증가하고 고온부 온도에 따라 다소 감소한다. 해석해와 실험결과는 상대오차 8% 이하로 잘 일치한다.

4. 결론

본 연구에서는 열전모듈의 열적조건이 열전발전 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 다양한 열전모듈 양단 온도차와 고온부 온도에서 실험을 수행하였고 실험적으로 구한 열전모듈 지백계수, 전기저항, 열저항, 성능지수를 이용하여 열전발전 거동을 이론적으로 분석하고 실험결과와 비교하였다.

(1) 열전모듈 양단의 온도차가 증가함에 따라 발전성능이 크게 향상되었지만 양단 온도차가 동일한 경우 열전모듈 고온부 온도의 변화는 발전 성능에 거의 영향을 미치지 않았다. 이로부터 열전발전 성능을 결정하는 주요인자는 고온부와 저온부 사이의 온도차임을 알 수 있었다.

(2) 열전모듈 고온부의 흡열량과 출력전력의 비로 정의된 발전효율을 측정된 열전모듈 물성치를 이용하여 해석적으로 도출하였다. 해석결과는 전류에 따른 최대효율점이 존재하고 열전모듈 양단 온도차에 따라 증가하는 발전효율의 특징을 실험값과 상대오차 15% 이하로 잘 나타냄을 확인하였다.

(3) 발전효율의 실험값을 2차 다항식으로 근사하여 발전효율이 최대가 되는 최적전류와 최대발전효율을 이론적인 값과 비교하였다. 실험결과

양단 온도차에 따라 선형적으로 증가하고 고온부 온도가 증가함에 따라 다소 줄어드는 이론해의 특징을 잘 표현하였다.

참고문헌

1. Rowe, D. M., 2007, *Thermoelectric Handbook Macro to Nano*, Taylor and Francis Group Press, Wales.
2. Bass, J. C., Elsner, N. B. and Leavitt, F. A., 1994, Performance of the 1kW thermoelectric generator for diesel engines, *Proceedings of the 13th International Conference on Thermoelectrics*, pp. 295-298.
3. Wu, C., 1996, Analysis of waste-heat thermoelectric power generators, *Applied Thermal Eng.*, Vol. 16, No. 1, pp. 63-69.
4. Furue, T., Hayashida, T., Imaizumi, Y., Inoue, T., Nagao, K., Fujii, I. and Sakurai, T., 1998, Case study on thermoelectric generation system utilizing the exhaust gas of internal-combustion power plant, *Proceedings of the 17th International Conference on Thermoelectrics*, pp. 473-478.
5. Rowe, D. M. and Min, G., 1998, Evaluation of thermoelectric modules for power generation, *J. Power Sources*, Vol. 73, pp. 193-198.
6. Huang, B. J. Chin, C. J., and Duang, C. L., 2000, A design method of thermoelectric cooler, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 23, pp. 208-218.