운전 온도에 따른 열전발전 모듈의 전기적 내부 저항 변화에 대한 연구

김 윤 호, 김 명 기*, 김 서 영**†, 리 광 훈, 엄 석 기*
서울시립대학교 기계정보공학과, *한양대학교 기계공학부, **한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터

Study on the Variation of Electrical Internal Resistance for Thermoelectric Generator Module with Operating Temperature

Yun Ho Kim, Myungkee Kim*, Seo Young Kim**†, Gwang Hoon Rhee, Sukkee Um*
Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, 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 12, 2009; revision received November 1, 2009)

ABSTRACT: An analysis model considered the manufacturing factors and the pellet size has been developed in order to predict the performance characteristics of thermoelectric modules as generators. Since the electrical internal resistance has a significant role in the performance of thermoelectric modules, the variations of electrical internal resistance with operating temperature are experimentally measured. The modified electrical internal resistance calculated from an experimental correlation is applied to the analysis model. To verify the modified analysis model, the output voltage, output current and output power are compared with experimental results for the operating temperature conditions of T_h = 85 ℃ and ΔT = 40 ℃. The modified analysis shows a good agreement with the experimental results in terms of the output voltage, current, and power.

Key words: Thermoelectric generation(열전발전), Thermoelectric module(열전모듈), Internal resistance(내부저항), Operating temperature(작동온도)

기 호 설 명

A_c : 펠렛 (Pellet) 단면적 [m^2]
I : 출력전류 [A]
k : 펠렛 열전도도 [W/mK]
k_c : 열전모듈 내부 접촉 열저항 [W/mK]
l : 펠렛 길이 [m]
l_c : 세라믹과 구리 전극 판 두께의 합 [m]
m : 저항비, $m = R_L/R_I$
m_m : 저항비, $m = R_I/R_m$
n : 전기적 접촉 저항력비, $n = \rho_c/\rho$
N : 펠렛 개수
P : 출력전력 [W]
Q_h : 가열부 공급 열량 [W]
Q_c : 냉각부 제거 열량 [W]
r : 열적 접촉 저항비, $r = k_c/k$
R_I : 펠렛 내부 저항 [Ω]
R_L : 외부 저항 [Ω]
R_m : 수정된 펠렛 저항 [Ω]
T_c : 열전모듈 저온부 온도 [℃]
T_h : 열전모듈 고온부 온도 [℃]
T_m : 열전모듈 평균 온도, $T_m = (T_c+T_h)/2$, [℃]
V : 출력전압 [V]
V_{OCV} : 개방회로전압 [V]

† Corresponding author
Tel.: +82-2-958-5683; fax: +82-2-958-5689
E-mail address: seoykim@kist.re.kr

그리스 문자

a : 펠렛 지벡 계수 [V/K]
ρ : 펠렛 저항력 [Ωm]
ρ_c : 열전모듈 내부 전기적 접촉 저항 [Ω]
ρ_m : 수정된 펠렛 저항력 [Ωm]
ΔT : 열전모듈 양단 온도차, $\Delta T = T_h - T_c$, [℃]

1. 서 론

열전 효과(thermoelectric effect)란 열에너지와 전기에너지가 상호작용하는 효과를 총칭하는 개념으로서 일반적으로 제벡(Seebeck), 펠티어(Peltier), 톰슨(Thomson) 효과가 이에 해당한다. 이 중 제벡 효과는 서로 다른 금속이나 반도체를 접합하여 연결하고, 두 접점 사이에 온도차를 주면 기전력이 발생하여 전류가 흐르는 현상을 말한다. 이러한 제벡 효과를 이용하여 특정 열원으로부터 온도차를 만들어 전기를 생산하는 방법을 열전발전(thermoelectric generation)이라 하며, 열전모듈(TEM : thermoelectric module)이 사용된다. 일반적인 열전모듈은 Fig. 1과 같이 다수의 P와 N형 반도체를 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병렬로 연결시키고, 열전모듈의 한 면으로 열을 공급하고 반대 면에서는 온도차를 발생시키기 위해 열을 제거함으로써 제벡 효과에 의해 전기가 발생하는 구조이다.

열전모듈을 사용한 열전발전은 특별한 작동 부위가 필요치 않고, 높은 신뢰성을 바탕으로 폐열을 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다.[1] 특히 폐열을 이용한 열전발전은 친환경적인 발전장치로서 활용 가능하며, 현재의 저 탄소 녹색 성장의 정책과 맞물려 신재생 에너지의 한 분야로서 각광 받을 수 있는 가능성이 충분하다. 또한 현재 가동되고 있는 발전 시스템이나 기타 동력원에서 발생하는 폐열을 회수하여 직접적으로 전기를 생성할 수 있기 때문에 기존의 시스템에 열전발전장치를 추가함으로서 전체 시스템 효율을 향상시킬 수 있는 큰 이점을 갖고 있다.

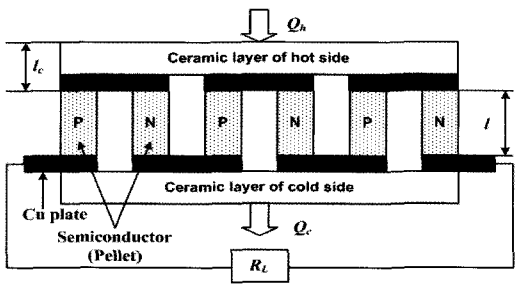


Fig. 1 Typical configuration of TEM.

열전발전에 대한 연구는 1900년대 초에 시작되었으며, 1940년대 당시 소련에서 가열식 열전발전 시스템을 실용화하였고, 1956년 미국 에너지성(DOE : department of energy)에서 인공 위성용 열전발전기 연구를 시작하면서 본격화되었다. 특히 방사성 동위원소의 핵분열 에너지를 이용한 열전 발전기(RTG : radioisotope thermoelectric generator) 연구는 현재까지도 러시아 및 미국에서 진행되고 있다.[2] 최근에는 자동차 배기가스의 폐열을 이용하여 자동차 전원 공급원으로서 열전발전을 활용하는 연구,[3-5] 인체의 체온을 이용한 휴대 가능한 열전발전 장치,[6] 그리고 전력 공급으로부터 소외되는 지역에서 난방이나 조리용 열원으로부터 전기를 생산하는 자가 주거용 열전발전 장치까지[7-9] 여러 분야에서 실질적으로 적용 가능한 연구가 진행되고 있다.

열전발전 시스템을 설계하는데 있어 고려되어야 할 가장 큰 요소는 열전모듈 자체 성능과 더불어 운전 온도 조건에 따른 열전모듈 거동 특성을 이해하는데 있다. 열전모듈의 성능은 제조 방법[10] 및 열전 반도체 소자의 자체 열적 성능인 ZT(Dimensionless Figure of Merit, $\alpha^2 T/\rho k$)값에 의해 정해지며, 현재 가장 일반적으로 상용화되어 있는 Bi-Te계의 ZT값은 약 0.8로서 동일한 소자를 사용할 시 제조사 별로 큰 차이를 보이고 있지 않다. 즉 동일한 열전모듈을 사용함에 있어 열전발전 시스템 성능은 특정 운전 조건에서 최적의 효율점을 어떻게 선정하느냐에 따라 정해진다. 이는 열전모듈 양단 온도차, 주변 및 고온부 온도 그리고 작동 유체의 유량 등 운전조건에 따른 열전모듈의 전반적인 발전 특성에 대한 연구부터,[1, 7-9, 11] 온도에 따른 소자의 특성 변화에 대한 연구,[12-14] 그리고 시스템 운전 알고리즘에 대한 연구까지,[15-16] 열전모듈의 여러 거동 특성을 충분히 이해하는데서 출발한다.

따라서 본 연구에서는 열전모듈의 발전 성능을 예측하기 위한 해석방법을 수립하고, 실험 결과와 비교하여 해석식의 타당성 검증 과정을 통해 운전 온도 변화에 따른 열전모듈의 발전 거동 특성을 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 해석

2.1 해석 방법

열전모듈의 한 면에 열을 공급하고 동시에 반대편에서 열을 제거함으로서 양단에 온도차를 만들어주면 열전모듈에서는 순순한 DC 전력이 발생하게 된다. 이 때 열전모듈 내부의 펠렛(pellet, thermo-element) 물성치인 제벡 계수(α), 열전도도(k) 그리고 전기적 저항력(ρ)이 온도 변화에 상관없이 항상 일정하고 톰슨 효과는 무시할 수 있다고 가정하면 공급되는 열량과 제거되는 열량은 다음과 같이 표현 된다.[9]

$$Q_h = \alpha I T_h + \frac{kA_c}{l}(T_h - T_c) - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho l}{A_c} \quad (1)$$

$$Q_c = \alpha I T_c + \frac{kA_c}{l}(T_h - T_c) + \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho l}{A_c} \quad (2)$$

여기서 α, k, ρ는 각각 펠렛의 제벡 계수, 열전도도 그리고 전기적 저항력을 l, A_c는 각각 펠렛의 길이와 단면적을, T_h, T_c는 고온부 및 저온부의 대표 온도를 나타낸다. 식(1)과 식(2)로부터 에너지 보존 법칙에 의해 열전모듈에서 생성되는 전력은 다음과 같다.

$$P = \alpha I(T_h - T_c) - I^2 \frac{\rho l}{A_c} \quad (3)$$

또한 개방회로전압은 다음과 같다.[9]

$$V_{OCV} = 2\alpha(T_h - T_c) \quad (4)$$

폐회로를 구성하고 N개의 펠렛으로 구성된 열전모듈에 흐르는 전류와 전압으로부터 다음과 같은 발생 전력이 얻어 진다.[9]

$$I = \frac{V_{OCV}}{R_I + R_L} = \frac{2\alpha A_c}{\rho l(1+m)}(T_h - T_c) \quad (5)$$

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

$$P = 4\frac{m}{\rho l(1+m)^2} \alpha^2 (T_h - T_c)^2 N A_c \quad (7)$$

여기서 m은 펠렛의 내부 저항 R_I와 외부 저항 R_L의 비를 나타낸다. 식(7)로부터 열전모듈에서 발생되는 전력은 고온부와 저온부 온도차의 제곱에 비례하며 $m = 1$, 즉 내부저항과 외부저항이 같을 때 최대 전력이 발생됨을 예측할 수 있다.[10, 17]

일반적으로 열전모듈은 Fig. 1과 같이 전기적인 직렬 구조를 만들어 주기 위해 얇은 구리 전극을 사용하여 납땜 방식을 적용하고, 전체 면을 절연체인 세라믹 판으로 접합시켜 열적인 병렬 구조를 만들어 준다. 따라서 모듈 제작 공정 중에 부차적인 전기적, 열적인 접촉 손실이 납땜 및 접합 공정에 의해 발생한다. 이러한 부차적인 손실을 고려하기 위해서 식(5)에 조립 공정 인자를 포함시켜 좀 더 정확한 해석 식으로 수정될 수 있다.[17]

$$I = \frac{2\alpha A_c}{\rho l_m(1+m)}(T_h - T_c) \quad (8)$$

$$P = 4\frac{m}{\rho l_m(1+m)^2} \alpha^2 (T_h - T_c)^2 N A_c \quad (9)$$

여기서,

$$l_m = (l+n)\left(1 + 2r\frac{l_c}{l}\right) \quad (10)$$

$$n = \frac{\rho_c}{\rho}, \quad r = \frac{k_c}{k} \quad (11)$$

여기서 l_c, ρ_c, k_c는 각각 열전모듈에서의 세라믹 판과 구리 전극판 두께의 합, 전기적 접촉 저항, 그리고 접촉 열저항을 나타낸다. 또한 l_m은 조립 공정 인자를 고려한 수정된 펠렛 길이로서 전기적 접촉 저항비인 n과 열적 접촉 저항비인 r을 포함한다. 식으로부터 n과 r이 클수록, 즉 열전모듈의 제작 공정이 나쁠수록 열전모듈에서 생성되는 전력량은 감소함을 예측할 수 있다.

2.2 해석 결과

본 연구에서는 앞서 설명한 해석식과 Table 1에 제시된 열전모듈 세부 사양을 바탕으로 해석을 수행하였다. Table 1에 제시된 모델에 대한 펠렛의 기하학적인 특성, 전기적 내부 저항, 그리고 그에 따른 전기적 저항력은 Beijing Huimao Cooling Equipment Co., LTd.[18]의 모델을 참고

Table 1 TEM specifications

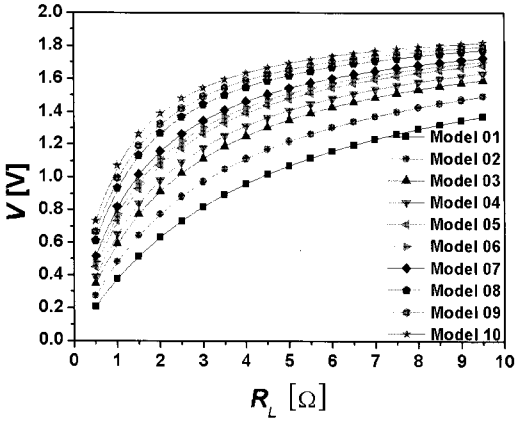
Model No.	Thermoelectric Properties of Pellet				Geometric Value			Manufacturing Factor		
	R_I	a	ρ	k	l_c	l	A_c	N	n	r
	[Ω]	[μV/K]	[μΩm]	[W/mK]	[mm]	[mm]	[mm^2]			
Model-01	4.26	190[9]	21.0	1.5[9]	1.2	3.0	1.88	127	0.05	0.1
Model-02	3.12		21.0			2.2	1.88			
Model-03	2.34		21.0			1.6	1.82			
Model-04	2.04		21.0			1.5	1.96			
Model-05	1.70		20.9			1.2	1.88			
Model-06	1.56		21.0			1.1	1.88			
Model-07	1.42		21.0			1.0	1.88			
Model-08	1.13		20.7			0.8	1.88			
Model-09	0.99		20.9			0.7	1.88			
Model-10	0.85		20.9			0.6	1.88			

하였으며, 접촉에 의한 전기적 저항과 열적 저항은 전체 펠렛의 내부 저항과 열전도도 대비 각각 5%와 10%의 비율로 정하였다.

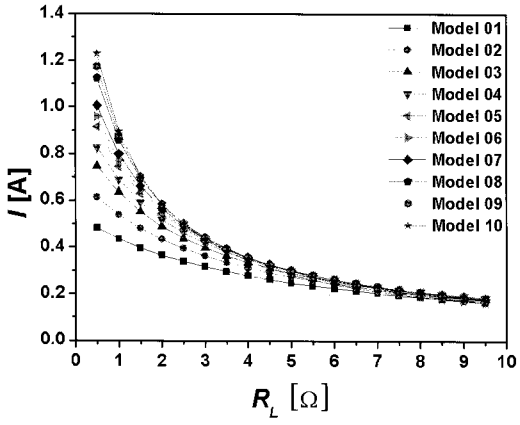
Fig. 2는 전 모델에 대해 열전모듈의 운전 온도 조건으로서 고온부 온도 T_h = 85 ℃, 양단 온도차 ΔT = 40 ℃로 설정한 해석 결과로서 각각 출력전압, 전류, 전력을 나타내고 있다. 그래프로부터 외부 부하가 증가할수록 출력전압은 서서히 증가하는 모습을 보이고 출력전류는 상대적으로 급히 감소하는 모습을 보이고 있다. 또한 이에 따른 출력전력은 초기에 급하게 증가하면서 최대점을 지나고 다시 서서히 감소하는 경향성을 보이고 있다. 본 해석에 사용된 열전모듈은 Table 1과 같이 펠렛의 전체 개수와 전기적 저항력은 동일 하지만 펠렛 사이즈, 특히 펠렛 길이가 모두 다르며 그에 따라 전기적 내부 저항도 다른 값을 보이고 있다. Fig. 2 로부터 전기적 내부 저항 R_I가 감소할수록 열전모듈의 출력전압, 전류, 전력은 모두 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 외부 부하 R_L이 작은 구간에서 이러한 경향성은 더욱 뚜렷하게 나타나며 외부 부하 R_L이 증가할수록 전기적 내부 저항 R_I에 따른 영향성은 점점 감소하게 된다. 특히 출력 전류는 전기적 내부 저항 R_I가 증가함에 따라 특정 외부 부하 이상의 영역에서는 그 효과가 없어지거나 오히려 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 최대 출력 전력점이 나타나는 외부 저항 값 R_L은 전기적 내부 저항 R_I가 감소할수록 같이 감소하는 경향성을 보이며 이는 앞서 설명한 식(7)로부터 예견된 결과이다. 즉 열전모듈에서의 출력전력은 내부저항 R_I와 외부 저항 R_L이 정확히 일치하는 점에서 최대 출력 값이 결정된다.

일반적으로 열전모듈의 제작 사양은 각 제조사별로 큰 차이를 보이지 않고 대부분 정형화된 시리즈를 제공하고 있다. 즉 각 모델별로 펠렛의 개수에 따라 개방회로전압이나 정격 전압을 고정시킨 후 펠렛의 사이즈, 특히 길이를 변화시켜 세부 모델 사양을 정하게 된다. 따라서 같은 종류의 펠렛을 사용하는 열전모듈에 대해서 각 펠렛 사이즈에 따른 발전 특성을 예측할 수 있는 상기의 해석 방법과 결과는 열전발전 시스템을 설계하는데 있어 상용되고 있는 열전모듈을 적절히 선정할 수 있는 기본적인 정보를 제공한다.

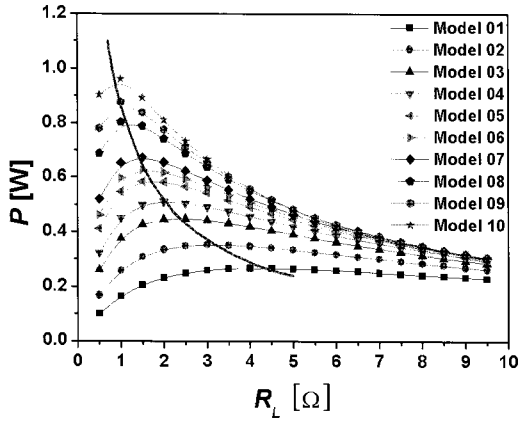
Fig. 3은 앞서 해석한 전체 모델 중 특정 모델(Model-05)을 선정하여 운전 온도 조건에 따른 발전 특성을 해석한 결과이다. 열전모듈의 고온부 온도는 T_h = 85 ℃로 유지하면서 양단 온도차를 20, 30, 40 ℃로 변화시켰다. 해석 결과 외부 저항 증가에 따라 출력 전류, 전압, 전력 모두 전형적인 성능 곡선 양상을 보여주고 있으며, 열전모듈의 양단 온도차가 증가할수록 발전성능 또한 증가하는 모습을 보이고 있다. 또한 최대 전력점이 나타나는 외부 저항 값 R_L은 각각 양단 온도차별로 모두 동일한 점에서 나타난다. 이는 같은 모델에서는 열전모듈의 전기적 내부 저항 R_I가 동일하기 때문이며 상기 해석 식에서 열전모듈의 펠렛 물성치가 온도 변화에 상관없이 항상 일정하다고 가정한 결과이기도 하다.



(a) Output voltage

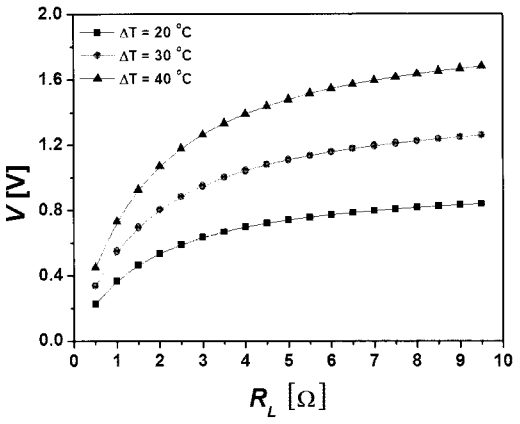


(b) Output current

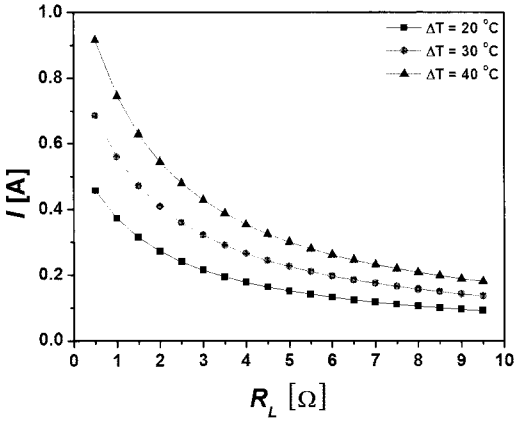


(c) Output power

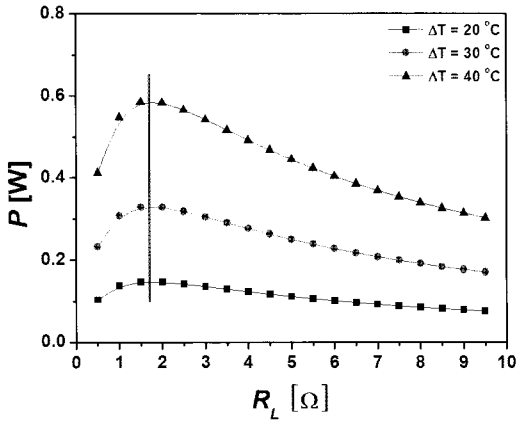
Fig. 2 Analysis results of TEM performance according to the pellet size and internal resistance at T_h = 85 ℃ and ΔT = 40 ℃.



(a) Output voltage



(b) Output current



(c) Output power

Fig. 3 Analysis results of TEM performance according to the ΔT at T_h = 85 ℃ for model-05.

3. 실험

3.1 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 해석식의 타당성 검증 및 운전온도에 따른 열전모듈의 발전 특성을 좀 더 자세히 분석하기 위해 해석 식에 사용된 모델 중 특정 모델을 선정하여 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 본 연구에 사용된 실험장치 개략도로서 고온부와 저온부의 온도를 제어할 수 있도록 설계되었다. 즉 고온부는 열전모듈의 접촉 면적과 같은 크기로 카트리지 히터(20 V-40 W)를 장착하여 고온부 온도를 제어하였으며, 저온부에 대해서는 일정한 온도로 유지시키기 위해서 열전모듈을 방열판 및 팬과 함께 열전냉각 방식으로 운전하였다. 또한 외부로의 열손실을 막기 위해 방열판과 팬을 제외한 모든 부위를 단열 처리하였다. 카트리지 히터, 냉각팬, 열전모듈의 전원은 DC 전원 공급 장치(Agilent E3232A, E3648A)를 사용하여 개별적으로 전력을 공급하였으며, 전기부하기(KIKUSUI PLZ334W)를 사용하여 외부 부하를 변화시키면서 열전모듈의 발전량을 측정하였다. 열전모듈의 고온부와 저온부 온도를 측정하기 위해 양단에 알루미늄 블록을 위치시켜 중앙에 열전대(T-type)를 삽입하여 온도를 측정하였으며, 온도값은 데이터 수집 장치(Yokogawa DA100)를 사용하여 기록하였다. 또한 각각의 알루미늄 블록과 열전모듈 사이에 접촉 열저항을 최소화시키기 위해 TIM(thermal interface material)인 써멀 그리스(MOMENTIVE YG6111)를 사용하였다.

고온부 온도와 양단 온도차에 따른 열전모듈의 발전 성능을 측정하기 위해 각 조건에서의 초기 개방회로 전압을 측정한 후 전기부하기의 외부 저항, 즉 발전전류를 순차적으로 증가시키면서 각각의 출력전압을 측정하였다. 이 때 발전전류가 증가함에 따라 열전모듈의 흡열량 및 발전량이 변하기 때문에 고온부와 저온부 온도가 변하게 된다. 따라서 각각의 발전전류 조건마다 카트리지 히터와 냉각용 열전모듈의 인가전압을 조절하여 항상 동일한 설정 온도를 유지하였으며, 그 때의 온도 오차를 설정온도의 ±0.1 ℃로 제어하였다.

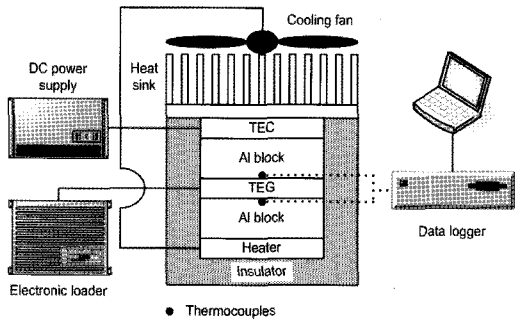
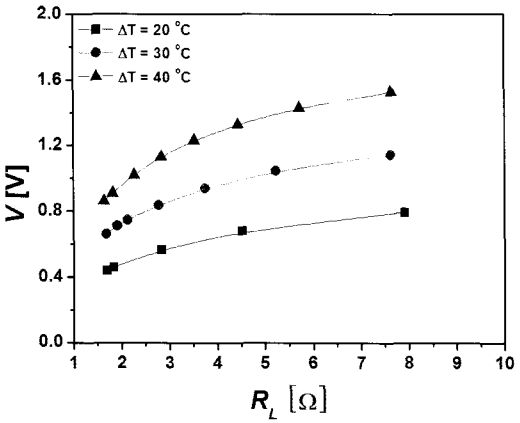


Fig. 4 Schematic diagram of TEM experiment.

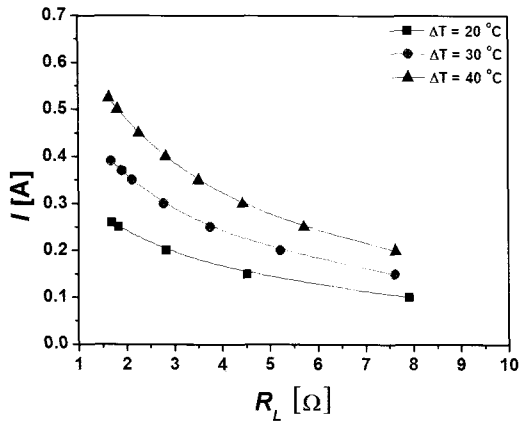
3.2 실험 결과

본 연구에서는 해석 모델 중 Model-05를 선정하여 실험을 수행하였다. 실험은 고온부 온도를 일정하게 유지한 후 양단 온도차를 변화시키면서 진행하였다. Fig. 5는 Model-05에 대해서 고온부 온도 T_h = 85 ℃로 유지하면서 양단 온도차를 20, 30, 40 ℃로 변화시켰을 때의 발전 특성 결과이다. 그래프로부터 외부 저항 변화에 따라 전체적인 출력 전압, 전류, 전력은 앞선 해석 결과와 거의 일치하는 경향성을 보임을 알 수 있다. 즉 외부저항이 증가함에 따라 출력 전압은 증가하고 출력 전류는 감소하며 출력 발전은 최대점이 존재하는 발전 특성 및 열전모듈의 양단 온도차가 증 가할수록 출력 전압, 전류, 전력이 모두 상승하는 경향성을 뚜렷이 보이고 있다.

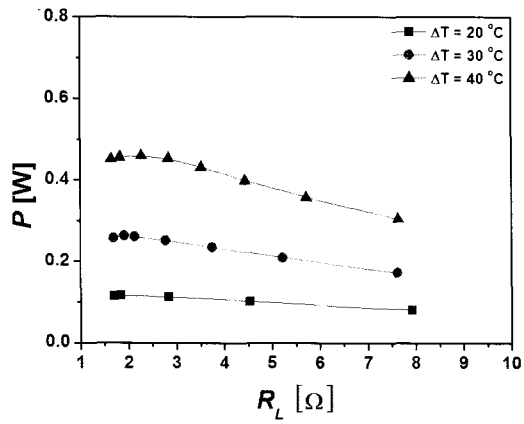
좀 더 다양한 운전 온도 조건에서의 발전 특성을 알아보기 위해 본 실험에서는 고온부 온도T_h = 70 ℃와 T_h = 100 ℃에 대해 동일한 양단 온도차 20, 30, 40 ℃를 적용하였고 그에 대한 출력 전압과 전류에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그래프로부터 모든 실험 조건에 대해 외부 저항이 증가할수록 출력 전압은 증가하고, 출력 전류는 감소함을 확인할 수 있으며 양단 온도차가 증가할수록 출력 전압의 증가량 및 출력 전류의 감소량이 더욱 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 고온부 온도가 70 ℃와 100 ℃일 때 양단 온도차가 증가함에 따라 열전모듈의 출력 전압과 전류는 마찬가지로 상승하였다. 그러나 열전모듈의 양단 온도차가 동일한 조건에서 고온부 온도가 상승하게 되면 열전모듈의 발전 성능은 감소하는 경향성을 공통적으로 보이고 있다. 즉 출력 전압 및 출력 전류를 나타내는 그래프에서 모두 열전모듈의 양단 온도차가 동일한 조건에서 비슷한 성능을 보이는 그룹을 형성하고 있으며, 같은 그룹에서 고온부 온



(a) Output voltage

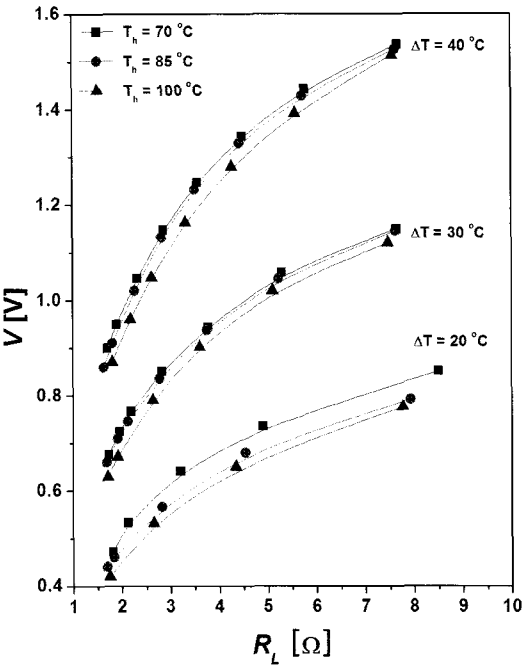


(b) Output current

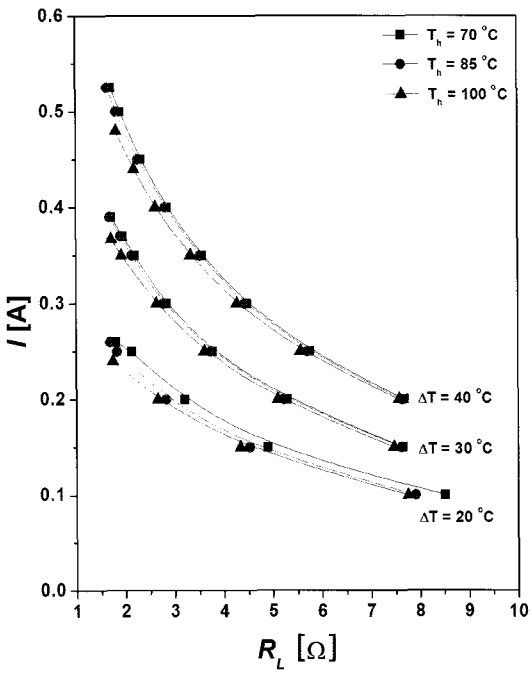


(c) Output power

Fig. 5 Experimental results of TEM performance according to the ΔT at Th = 85 ℃ for model-05.



(a) Output voltage



(b) Output current

Fig. 6 Experimental results of TEM performance according to the ΔT and Th for model-05.

도가 높아질수록 출력 전압과 전류는 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 앞선 해석 식에서는 관찰되지 않는 현상으로서 열전모듈의 운전 온도 조건 변화에 따른 펠렛의 물성치에 변화가 생겼음을 의미한다. 다시 말해 해석 식에서는 같은 온도차 조건이면 고온부 온도에 상관없이 같은 출력 전압과 전류가 나타나지만 실험 결과에서는 발전 성능 저감이 관찰된 것이다. 따라서 이를 규명하기 위해 해석과 실험 결과의 비교 분석을 통해 좀 더 자세히 살펴보았다.

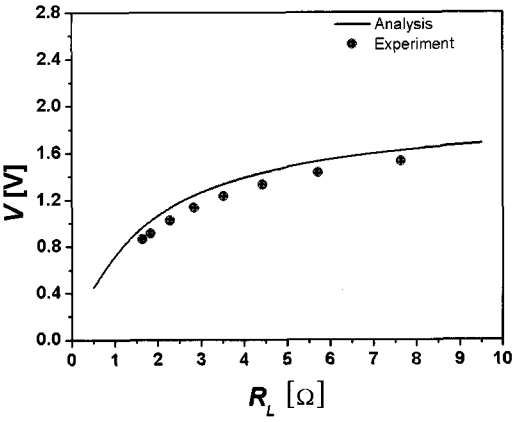
4. 해석결과 타당성 검증

Fig. 7은 해석 및 실험에 공통으로 적용된 Model-05에 대해 T_h = 85 ℃, ΔT = 40 ℃에서의 온도 조건에서 출력 전압, 전류, 전력을 비교한 결과이다. 그래프로부터 외부 저항 증가에 따라 해석 및 실험 결과의 출력 전압, 전류, 전력의 경향성은 비슷하지만 각 외부 저항에서의 해당 값은 일정한 차이를 보이고 있다. 이러한 주요인은 앞선 해석 과정에서 펠렛의 물성치인 제벡계수, 열전도도 그리고 전기적 내부 저항을 온도에 무관한 상수라고 가정 하에 해석 식을 전개하였기 때문이다. 하지만 실질적으로 열전모듈 펠렛의 물성치는 온도의 함수로 알려져 있다. 일반적으로 제벡계수는 고온과 저온부의 평균값을 사용하고, 열전도도는 일반적인 온도 변화 범위에서 그 값이 변화량이 매우 작기 때문에 해석 식을 전개하는 과정에서 상수로 간주하여도 큰 무리가 없다. 그러나 펠렛의 전기적 내부 저항은 온도 변화 매우 민감하게 변화하는 특성을 보인다.[13] 따라서 앞선 해석 식의 전개 과정과 같이 펠렛의 전기적 내부 저항을 상수로 가정하여 해석하는 것은 열전모듈에서의 운전 온도 조건에 따른 발전 특성을 예측하는데 해석의 정확도에 많은 오차를 포함시키게 된다.

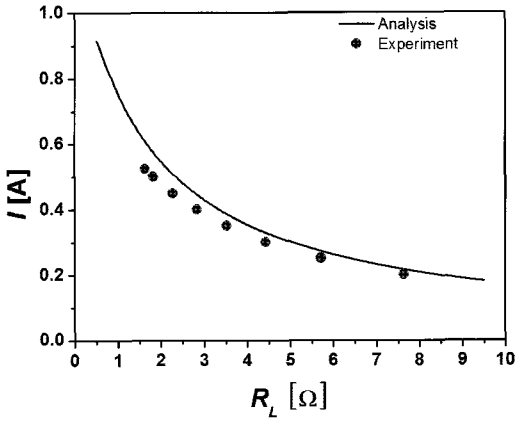
운전 온도 변화에 따른 열전모듈 펠렛의 전기적 내부 저항 변화를 분석하기 위해 각 온도 조건에서의 실험 결과와 다음과 같은 식으로부터 새로운 전기적 내부 저항을 산정할 수 있다.

$$R_I = \frac{V_{OCV}}{I} - R_L \tag{12}$$

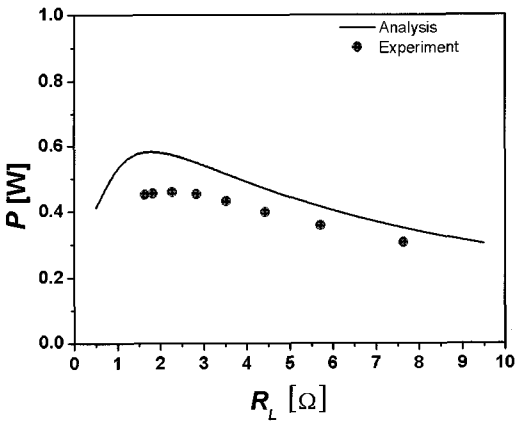
식(12)로부터 구한 전기적 내부 저항을 운전 온



(a) Output voltage



(b) Output current



(c) Output power

Fig. 7 Comparison of analysis and experimental results for model-05 at T_h = 85 ℃ and ΔT = 40 ℃.

도 조건인 고온부 온도와 양단 온도차에 대해 나타내면 Fig. 8과 같다. 그래프로부터 열전모듈의 전기적 내부 저항 값은 양단 온도차가 동일한 조건에서는 고온부 온도가 상승하면 함께 증가하고, 고온부 온도가 동일한 조건에서는 양단 온도차가 증가할수록 오히려 감소하는 경향성을 보이고 있다. 이러한 운전 온도 조건에 대한 열전모듈의 전기적 내부 저항의 변화 양상을 열전모듈의 양단 온도차를 평균한 T_m값으로 변환하여 살펴보면 Fig. 9와 같다. 그래프로부터 열전모듈의 평균

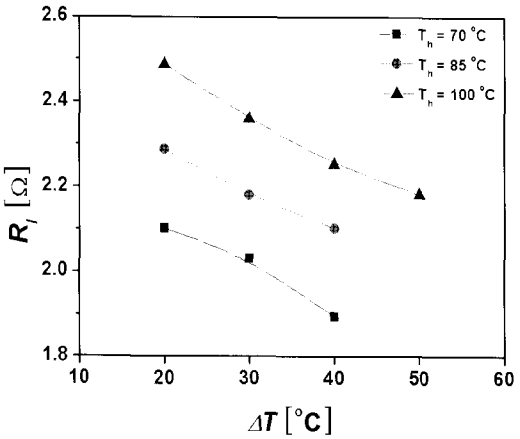


Fig. 8 Variation of electrical internal resistance of TEM according to the operating temperature.

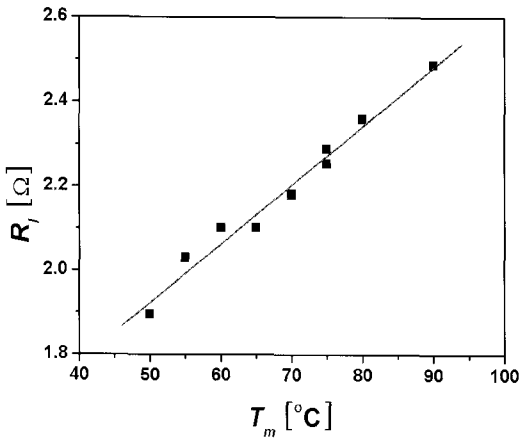
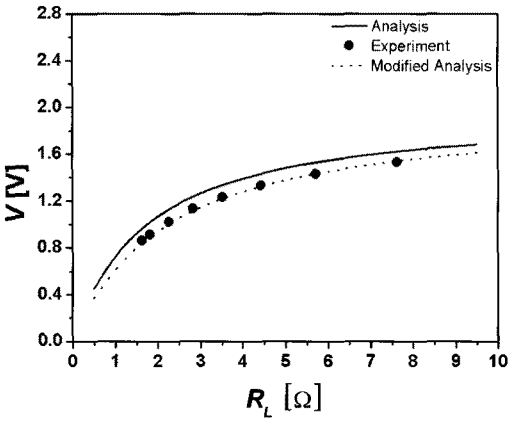


Fig. 9 Variation of electrical internal resistance of TEM according to the average temperature.

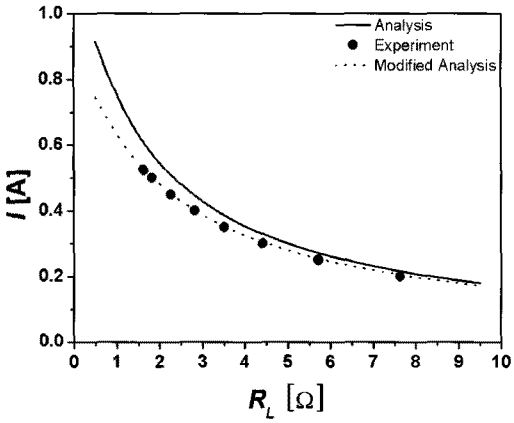
온도가 증가할수록 펠렛의 전기적 내부 저항은 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 본 실험에 사용된 열전모듈 Model-05에 대해서 제조사에서 제공하는 전기적 내부 저항 값은 1.7 Ω이다. 실질적으로 이 값은 T_h = 27 ℃, ΔT = 0 ℃ 조건에서의 값으로서 현장 설계에서의 초기 입력 값으로 채택하기에는 무리가 따른다. 즉 Fig. 9에서 나타난 것과 같이, 본 연구에서 변화된 운전 온도 조건 중 최소 평균 온도인 50°C 값과 비교하더라도 제조사 제공 저항 값과 약 10%, 최대 평균 온도인 90 ℃ 값과 비교하면 약 45%의 차이를 보인다. 따라서 본 연구에서의 실험 운전 온도 조건에서만 보더라도 온도에 따른 전기적 내부 저항의 변화량이 매우 크기 때문에, 운전 온도 조건에 따라 변화하는 펠렛의 전기적 내부 저항은 결코 간과해서는 안 되는 중요한 변수임을 확인할 수 있다. 더욱이 열전모듈을 열전발전에 사용할 때의 일반적인 온도 조건은 상대적으로 높은 고온부 온도와 큰 온도차 경우가 대부분이므로 열전모듈의 평균 온도에 따른 전기적 내부 저항 감소는 반드시 고려되어야 한다.

앞선 실험 결과에서 열전모듈의 온도차가 동일한 조건에서 고온부 온도가 상승할수록 열전모듈의 출력 전압과 전류가 감소하는 현상이 관찰되었다. 이는 바로 열전모듈의 전기적 내부 저항이 증가한 이유로서 설명될 수 있다. 즉 동일한 양단 온도차에서 고온부 온도가 증가하게 되면 결과적으로 열전모듈 전체의 평균온도인 T_m이 상승하게 되고 Fig. 9에서 알 수 있듯이 전기적 내부 저항이 그만큼 증가하여 결과적으로 열전모듈의 발전 성능이 저감된 것이다. 또한 해석 결과인 Fig. 3(c)에서의 출력 전압을 보면 열전모듈의 평균 온도 변화에 상관없이 최대 전력점이 동일한 외부 저항 값에서 나타났다. 그러나 실험 결과인 Fig. 5(c)의 결과를 보면 각 온도 조건에서의 최대 출력 전력점이 동일한 외부 저항 값에서 나타나지 않고 약간의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 모두 운전 온도, 즉 열전모듈의 평균 온도 변화에 따른 펠렛의 전기적 내부 저항 값의 변화에 따른 것이다.

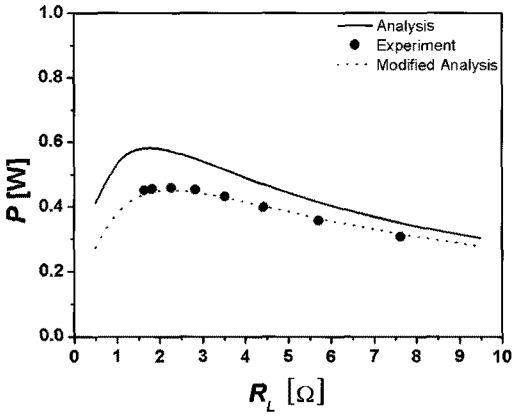
본 연구에서는 운전 온도에 따른 펠렛의 전기적 내부 저항의 변화를 해석 식에 반영하기 위해 다음과 같은 수정된 저항력 ρ_m을 적용한다.



(a) Output voltage



(b) Output current



(c) Output power

Fig. 10 Comparison of modified analysis and experimental results for model-05 at Th = 85 ℃ and ΔT = 40 ℃.

$$V = 2\left(\frac{m_m}{1+m_m}\right)N\alpha(T_h - T_c) \tag{13}$$

$$I = \frac{2\alpha A_c}{\rho_m l_m(1+m_m)}(T_h - T_c) \tag{14}$$

$$P = 4\frac{m_m}{\rho_m l_m(1+m_m)^2}\alpha^2(T_h - T_c)^2 N A_c \tag{15}$$

여기서

$$m_m = \frac{R_m}{R_L} \tag{16}$$

$$\rho_m = R_m\frac{l}{A_c} \tag{17}$$

$$R_m = 1.223 + 0.014\,T_m \tag{18}$$

식(16)에서의 R_m은 열전모듈의 평균 온도 변화에 따른 수정된 펠렛의 내부 저항을 나타내는 값으로서 Fig. 9에서의 실험에 의한 저항 값을 평균 온도의 함수로 1차 선형화시킨 값이다.

본 연구에서 해석과 실험 결과를 비교한 운전 조건인 Th = 85 ℃, ΔT = 40 ℃에 대해서는 Tm = 65 ℃이며, 이때의 전기적 내부 저항을 식(18)로부터 산정하여 해석된 결과들에 대해 다시 실험값과 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 그래프로부터 외부 저항 증가에 따라 열전모듈의 출력 전압, 전류, 전력의 실험값과 해석 값은 경향성 뿐 아니라 각각의 외부 저항 값에 대해서도 매우 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 즉 운전 온도 조건에 다른 전기적 내부 저항이 고려된 해석 값은 최대 출력 전력에 대해 실험값 대비 약 1.5%의 차이의 정확도를 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 열전발전에 사용되는 열전모듈에 대해 일반적인 상용 모델의 성능을 예측할 수 있는 해석 식을 수립하였고, 실험을 통한 검증과정을 거쳐 해석식의 정확도를 높일 수 있는 방법을 제시하였다.

(1) 열전모듈은 외부 저항이 증가함에 따라 출력 전압은 증가하고 출력 전류는 감소하는 경향을 보이며 출력 전력은 증가하다가 감소하면서 최대점이 존재하는 특성을 보였다.

(2) 열전모듈의 펠렛 길이가 감소함에 따라, 즉

내부 저항이 감소함에 따라 발전 성능은 증가함을 보였고, 동일한 열전모듈에서는 열전모듈의 양단 온도차가 증가할수록 발전 성능이 증가하였다.

(3) 운전 온도 조건에 따른 펠렛의 전기적 내부 저항의 변화를 고려하지 않았을 경우 해석 및 실험 결과의 비교에서 두 결과의 경향성은 일치하였으나 각 외부 저항에서의 전압, 전류, 전력 값은 차이를 보였다.

(4) 실험으로부터 열전모듈의 운전 온도 조건에 따른 펠렛의 전기적 내부 저항의 변화를 1차 다항식으로 근사하였고, 수정된 펠렛의 전기적 내부 저항 값을 해석 식에 적용한 결과 실험 결과와 잘 일치하였다.

(5) 열전모듈의 운전 온도, 즉 열전모듈 평균 온도 변화에 따른 펠렛의 전기적 내부 저항의 변화는 열전 발전 시스템을 설계하는데 있어 반드시 고려되어야 할 중요한 변수이다.

참고문헌

1. Niu, X., Yu, J., Wang, S., 2009, Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator, Journal of Power Sources, Vol. 188, pp. 621-626.
2. O'Brien, R. C., Ambrosi, R. M., Bannister, N. P., Howe, S. D., Atkinson, H. V., 2008, Safe radioisotope thermoelectric generators and heat sources for space applications, Journal of Nuclear Materials, Vol. 377, pp. 506-521.
3. 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.
4. Vazaquez, J., Miguel, A., Sanz-Bobi., Rafael, P., Antonio, A., 2002, State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles, Proceedings of 7th European Workshop on Thermoelectrics, Pamplona, Spain.
5. LaGrandeur J., 2006, Automotive waste heat conversion to electric power using skutterudites, TAGS, PbTe and Bi_2Te_3, 2006 DEER Conference, Detroit MI.
6. Wang, Z., Leonov, V., Fiorini, P., Van Hoof, C., 2009, Realization of a wearable miniaturized thermoelectric generator for human body applications, Sensors and Actuators A : Physical, In Press.
7. Qiu, K., Hayden, A. C. S., 2008, Develops of thermoelectric self-powered residential heating system, Journal of Power Sources, Vol. 180, pp. 884-889.
8. Champier, D., Bedecarrats, J. P., Rivaletto, M., Strub, F., 2009, Thermoelectric power generation from biomass cook stoves, Energy, In Press.
9. Nuwayhid, R. Y., Shihadeh, A., Ghaddar, B., 2005, Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling, Energy Convertsion and Management, Vol. 46, pp. 1631-1643.
10. Rowe, D. M., Min, G., 1998, Evaluation of thermoelectric modules for power generation, Journal of Power Souces, Vol. 73, pp. 193-198.
11. Rodriguez, A., Vian, J. G., Astrain, D., Martinez, A., 2009, Study of thermoelectric systems applied to electric power generation, Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 1236-1243.
12. Yamashita, O., 2009, Effect of linear and non-linear components in the temperature dependences of thermoelectric properties on the cooling performance, Applied Energy, Vol. 86, pp. 1746-1756.
13. Yamashita, O., 2008, Effect of temperature dependence of electrical resistivity on the cooling performance of a single thermoelectric element, Applied Energy, Vol. 85, pp.1002-1014.
14. Min, G., Rowe, D. M., Kontostavlakis, K., 2004, Thermoelectric figure-of-merit under large temperature differences, Journal of Physics D : Applied Physics, Vol. 37, pp. 1301-1304.
15. Eakburanawat, J., Boonyaroonate, I., 2006, Development of a thermoelectric battery-char-

ger with microcontroller-based maximum power point tracking technique, Applied Energy, Vol. 83, pp. 687-704.
16. Yu, C., Chau, K. T., 2009, Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking, Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 1506-1512.
17. Min, G., Rowe, D. M., in : Rowe, D. M. (Ed.), 1995, CRC Handbook of Thermoelectrics, CRC Press, London.
18. http://www.huimao.com/series1.htm.