

논문 2010-47SD-4-2

열전 모듈의 SPICE 모델링

(SPICE Modeling for Thermoelectric Modules)

박 순 서*, 조 성 규*, Nyambayar Baatar*, 김 시 호**

(Soonseo Park, Sungkyu Cho, Nyambayar Baatar, and Shiho Kim)

요 약

열전소자의 SPICE 모델을 유도하였고, Harman method를 이용하여 전기적인 측정과 열전 소자 양단면의 온도 측정값 만으로 모델 파라미터를 추출하기 위한 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시된 SPICE 모델 파라미터 추출방식은 열전도 측정 데이터를 사용하지 않고, 모델 파라미터를 추출할 수 있으며, 기존의 열전도 측정에 의한 값과 비교하였을 때 오차가 크지 않아서 실제로 열전 모듈을 제작하였을 때 유용하게 사용할 수 있는 방법이 될 수 있음을 보였다. 제시된 SPICE 모델은 열전모듈을 이용한 냉각 장치와 열전 발전 장치의 열적 시뮬레이션과 전기적인 시뮬레이션에 모두 적용이 가능하다.

Abstract

We have developed a SPICE compatible model of thermoelectric devices, and a parameter extracting technique only by electrical and temperature measurement by using Harman method was proposed. The proposed model and parameter extraction technique do not require experimental data from thermal conductivity measurements. The maximum error between extracted parameters extracted by proposed method and conventional method was about 14%, which is not a severe mismatch for real application. The proposed model is applicable to design of both for thermoelectric coolers and thermo electric generators.

Keywords : thermoelectric module, thermoelectric cooler, spice model

I. 서 론

최근 신재생 에너지의 중요성이 부각되면서 여러 가지 방법으로 친환경적인 에너지를 생성하는 방법들이 제안되고 있다. 최근 들어 제안되는 방법들 중 Seebeck 효과를 이용하여 반도체 양면의 온도차에 의하여 전력

이 발생하는 현상을 이용하는 열전소자가 각광을 받고 있다. 열전 소자는 Peltier 효과에 의하여 냉각, Seebeck 효과에 의하여 열전 발전의 기능을 하는 반도체 소자로써 여러 개의 p-type 과 n-type 의 열전 반도체 막대를 그림 1의 구조와 같이 전기적으로는 직렬, 열적으로는 병렬로 조합하여 연결한 것이다^[1~3].

이러한 열전 소자를 이용한 냉각장치 또는 열전 발전

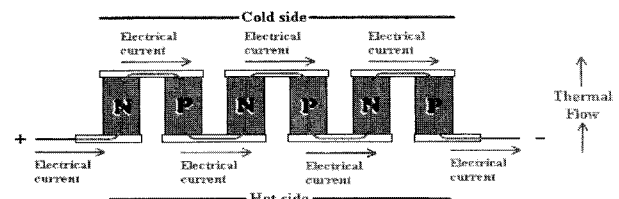


그림 1. 열전 모듈의 구조
Fig. 1. The schematic of a TEM module.

* 학생회원, 충북대학교 전기공학과 SCI 연구실
(Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University)

** 평생회원, 충북대학교 전기공학부,
컴퓨터정보통신연구소
(Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University)

※ 본 논문은 2009년도 충북대학교 교내연구비에 의하여 지원되었습니다. 본 연구에서는 IDEC이 지원하는 CAD tool을 사용하였습니다.

접수일자: 2009년12월3일, 수정완료일: 2010년3월9일

소자의 최적화된 설계를 위해서는 열전소자의 SPICE Model이 매우 중요하다. 열전 소자의 SPICE Model은 참고문헌^[1-2]에서 제시되었으나, 모델 파라미터의 추출을 위해서는 열전 모듈의 ΔT_{max} , V_{max} , I_{max} , Q_c 의 열전도 실험 데이터가 필요로 하였다^[2-4]. 일반적으로 정밀한 열전도 측정을 위해서는 열전소자에 온도를 정밀하게 인가하고 열적으로 절연시키면서 양면의 온도 차이와 전압을 측정하기 위한 고가의 실험 설비가 필요하다^[3-4]. 열전도 측정설비는 고가의 장비가 필요하며, 이를 갖추지 못한 일반 열전 소자의 사용자가 모델 파라미터를 추출하는 것은 매우 어렵다. 본 논문에서는 열전 반도체 소자의 SPICE Model을 유도 하였고 열전도 측정 데이터를 사용하지 않고도 Harman method^[4-5]에 의한 열전소자의 전기적 측정과 양면의 온도 측정만으로 SPICE 파라미터를 추출하는 방법을 제안 하였다.

II. 본 론

1. 열전 소자의 모델 방정식

단위 구조에서 열전소자 열전도 모델 방정식을 유도해 보면 양단의 온도차가 일정한 상태일 때 Seebeck 효과, Peltier 효과, 톰슨 효과, 주울 효과 등으로 인하여, 단위면적을 갖고 길이가 Δx 인 체적 내부에서 발생된 열과 단위 면적으로 들러온 열, 흘러나간 열의 합은 0이 되므로 다음과 같이 미분 방정식(1)으로 나타 낼 수 있다.

$$\frac{\{q(x+\Delta x)-q(x)\}}{\Delta x} + \tau J \frac{\{T(x+\Delta x)-T(x)\}}{\Delta x} + JT \frac{\{\alpha(x+\Delta x)-\alpha(x)\}}{\Delta x} - \rho J^2 = 0 \quad (1)$$

$\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$ 으로 하면, 식 (1)은 식 (2)의 미분 방정식으로 된다.

$$\frac{dq}{dx} - \rho J^2 + \tau J \frac{dT}{dx} + TJ \frac{d\alpha}{dx} = 0 \quad (2)$$

여기서, T =절대 온도, ρ =저항율, J =전류밀도, α = 제백 계수, k =열전도도, τ =톰슨 계수를 나타낸다.

톰슨 효과는 열전 반도체 소자에서는 매우 미미하므로 무시할 수 있고 열전소자의 제백 계수가 일정하다고 가정하면,

$$\frac{dq}{dx} - \rho J^2 = 0 \quad (3)$$

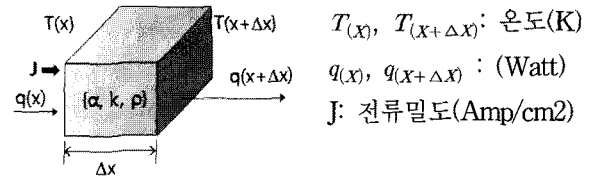


그림 2. 단위 면적을 갖는 열전소자에서 온도, 열과 전류 밀도의 관계도

Fig. 2. Definition of current and heat flows in a unit area of TEM module.

이때 $q = -k \frac{dT}{dx}$ 이므로, 다음과 같은 열평형 방정식(4)을 유도할 수 있다.

$$k \frac{d^2 T}{dx^2} + \rho J^2 = 0 \quad (4)$$

여기서 ρJ^2 는 단위 체적에서 발생하는 주울 열이고 $k \frac{d^2 T}{dx^2}$ 는 열의 변화량이다.

그림 1의 실제 열전소자에 대해서 식(4)의 미분방정식의 해를 구하기 위해 단면적A, 길이L, 경계조건이 $x=0$ 에서 T_c 이고 $x=L$ 에서 T_h 인 열전 모듈의 열전달 미분 방정식을 적용하면, 방정식(4)에서 열전모듈의 전기저항 R_m 과 전류 밀도 J 는, $R_m = \frac{\rho L}{A}$, $J = \frac{I}{A}$ 이므로 방정식(5)로 정리 된다.

$$k \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{R_m I^2}{AL} = 0 \quad (5)$$

식 (5)를 변수 x 에 대해서 적분하여 $T(x)$ 를 구하면,

$$\frac{dT}{dx} = \int_0^x -\frac{R_m I^2}{kAL} dx + C_1 = -\frac{R_m I^2}{kAL} x + C_1 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T(x) &= \int_0^x -\frac{R_m I^2}{kAL} x dx + \int_0^x C_1 dx + C_2 = \\ &= -\frac{R_m I^2}{2kAL} x^2 + C_1 x + C_2 \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서 경계조건으로부터 적분상수를 구하면,

$$T(x)|_{x=0} = C_2 = T_c \quad (8)$$

$$T(x)|_{x=L} = -\frac{R_m I^2}{2kAL} L^2 + C_1 L + T_c = T_h \quad (9)$$

$$(T_h - T_c) = -\frac{R_m L I^2}{2kA} + C_1 L = -\frac{R_m \Theta_m I^2}{2} + C_1 L \quad (10)$$

여기서 Θ_m 은 열전 모듈의 열저항($\Theta_m = \frac{L}{kA}$)이며, 열저항은 온도 전달의 저항값을 나타내며, 절대온도가 K일 때, 단위는 K/Watt이다. 적분 상수 C_1 은

$$C_1 = \left[\frac{(T_h - T_c)}{L} + \frac{R_m I^2 \Theta_m}{2L} \right] \text{이 된다. 즉,}$$

$$T(x) = -\frac{R_m I^2}{2kAL} x^2 + \left[\frac{(T_h - T_c)}{L} + \frac{R_m I^2 \Theta_m}{2L} \right] x + T_c \quad (11)$$

이때 양면의 온도가 $x=0$ 에서 T_c 이고 $x=L$ 에서 T_h 인 열전모듈의 Heat flow를 구해 보면 각기 식(12)와 식(13)의 방정식으로 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} q_{(x=0)} &= -kA \frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=0} + \alpha_m T_c I \\ &= -\frac{kA(T_h - T_c)}{L} - \frac{kAR_m I^2 \Theta_m}{2L} + \alpha_m T_c I \quad (12) \\ &= -\frac{(T_h - T_c)}{\Theta_m} - \frac{R_m I^2}{2} + \alpha_m T_c I \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{(x=L)} &= -kA \frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=L} + \alpha_m T_h I \\ &= R_m I^2 - \frac{(T_h - T_c)}{\Theta_m} - \frac{R_m I^2}{2} + \alpha_m T_h I \quad (13) \\ &= -\frac{(T_h - T_c)}{\Theta_m} + \frac{R_m I^2}{2} + \alpha_m T_h I \end{aligned}$$

식(12) 식(13)은 각각 Cold side와 Hot side에서 열 관계식을 나타내고, 이는 전기적으로 키르히호프의 전

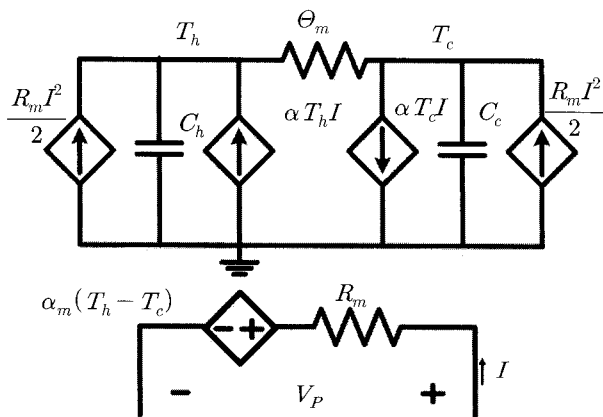


그림 3. 열전소자의 SPICE 등가회로
Fig. 3. SPICE equivalent circuit for Thermoelectric module.

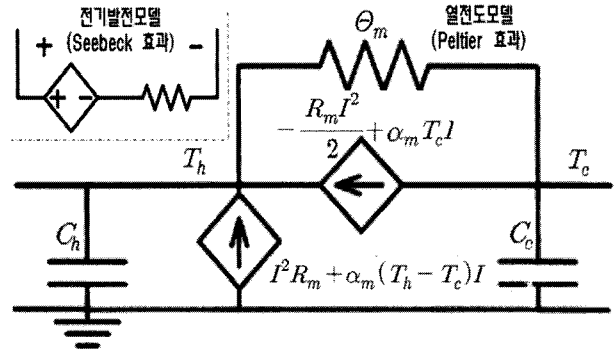


그림 4. 간략화된 열전소자의 SPICE Model
Fig. 4. Simplified SPICE Model for Thermoelectric module.

류식과 유사 하므로 그림 3의 열전도 등가 회로 모델로 표현 가능하다.

이때 제벡 효과에 의한 열전 발전특성은 내부 저항 R_m 인 전압원으로 표현 가능하다^[1-3].

$$P = IR_m + \alpha_m (T_h - T_c) \quad (14)$$

식(12)~ 식(14)로부터 열전소자의 전기적인 발전 모델로 열전도 특성을 고려한 SPICE 등가회로를 나타낼 수 있다^[1-2]. 그림 3의 SPICE 등가회로에서 C_h, C_c 는 열적 용량(Thermal Capacity)을 나타내며, 단위는 Joule/K가 된다.

열전 소자의 SPICE 열적 등가회로 온도 변수는 전기적으로는 전압에 해당되고 열은 전류에 해당된다. 그림 3에서 키르히호프의 전류법칙을 적용하여 전류원 4개로 표시된 등가회로를 전류원 2개로 등가변환 할 수 있다. 전류원 2개로 표현된 간략화된 등가회로로 변환하면 그림 4와 같은 열전소자의 SPICE Model을 얻게 된다.

2. 모델 Parameters의 추출

열전 SPICE 모델에서는 측정 결과로부터 R_m, Θ_m, α_m 3개의 모델 파라미터가 필요로 한다. 종래의 모델 방법에서는 $\Delta T_{max}, V_{max}, I_{max}, Q_c$ 의 열전도 실험 데이터가 필요로 하였다^[2]. 하지만 본 논문은 Harman method^[4-5]를 이용한 열전소자의 전기적으로 간단한 실험을 통하여 구하는 방법을 제시 하였다.

열전소자에 전류를 흐르게 하면 펠티에 효과에 의해 Cold side의 온도는 내려가고 Hot side의 온도는 올라가게 된다. 이때 열전소자의 Cold side와 Hot side에 동일한 열저항과 열 용량을 갖도록 하면 외부로부터 흡수한 열과 방출한 열량이 동일하므로 $q_c + q_h = 0$ 가 된다.

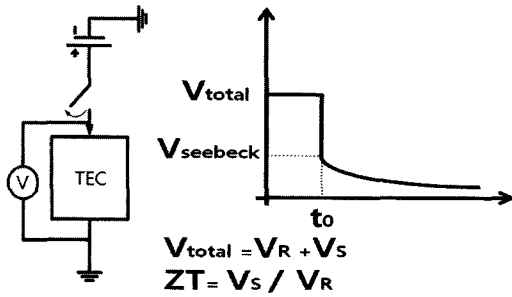


그림 5. Harman method를 이용한 제벡 전압과 ZT의 측정 방법^[4-5]

Fig. 5. Harman method to measure Seebeck voltage and ZT.

즉, Heat flow 방정식(12) 식(13)을 서로 더하면,

$$q_c + q_h = -\frac{2(T_h - T_c)}{\theta_m} + \alpha_m(T_c + T_h)I = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\alpha_m(T_c + T_h)I}{2} = -\frac{(T_h - T_c)}{\theta_m} \quad (16)$$

이때, 열전도 저항을 구하면,

$$\theta_m = \frac{T_h - T_c}{\alpha_m I(T_h + T_c)/2} = \frac{\Delta T}{\alpha_m T_{avg} I} \quad (17)$$

여기서 Tavg는 평균온도로서, 온도 차이가 크지 않은 경우에는 실험실의 온도가 된다. Harman method 이론은 펠티에 효과에 의한 외부기온 대비 동일한 온도 차이 환경에서 흐르던 전류를 순간적으로 끊어 resistive voltage drop(VR) 및 Seebeck voltage drop(Vs)을 측정하여 열전소자의 성능계수 ZT를 구하는 방법이다.

여기서 resistive voltage drop(VR)은 전류를 끊었을 때 열전소자 내부저항에 의한 전압 강하이고 Seebeck voltage drop(Vs)은 온도차이 발생에 의한 Seebeck effect에 따른 전압으로 양단면의 온도차가 줄어들면서 Seebeck effect에 의한 전압 역시 줄어드는 것을 알 수 있다. 열전소자의 성능을 가늠하는 지표(figure of merit)인 ZT를 위에서 도출되어진 θ_m 을 이용해 나타내면 식(18)과 같이 나타낼 수 있다^[4-5].

$$ZT = \frac{\alpha^2 \theta_m T_{avg}}{R} = \frac{\alpha \Delta T}{RI} = \frac{V_S}{V_R} \quad (18)$$

그림 6. 의 측정결과를 바탕으로 모델 식으로부터 관계식을 추출하면 다음과 같은 Rm, am, θ_m 를 구할 수 있다. 각 파라미터의 측정 방법을 살펴보면,

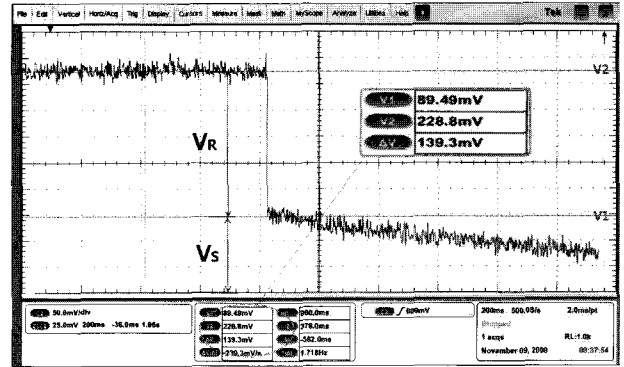


그림 6. Harman method에 의한 열전소자의 측정
Fig. 6. Measurement of thermoelectric device by using Harman method.

1) Rm : V_R 은 열전 소자 내부저항에 의한 Voltage drop 이므로 $R_m = \frac{V_R}{I}$ 이 된다.

2) am: V_S 는 $\alpha_m \Delta T$ 이므로 $\alpha_m = \frac{V_S}{\Delta T}$ 의 수식으로 구할 수 있다.

3) θ_m : 열전달 결과 식에 의해 유도된 $\theta_m = \frac{\Delta T}{\alpha T_{avg} I}$ 의 식을 통해 구할 수 있다. 이를 정리하여 나타내 보면 표.1 과 같이 나타낼 수 있다.

본 논문에서 추출한 파라미터 값의 타당성과 정확도를 검증하기 위해서 참고문헌^[2]에서 제시한 열전도 실험 데이터 $\Delta T_{max}, V_{max}, I_{max}, Q_c$ 를 사용하는 파라미터 추출 방법과 추출된 파라미터 값을 비교하였다. 측정예

표 1. Harman method에 의한 열전 소자 파라미터 측정

Table 1. Experimental data by Harman method.

Bias condition	voltage	0.228V
	current	0.13A
Measured Temp & Voltage	T_c / T_h	25.75°C / 27.45°C
	V_R	0.1393 V
	V_S	0.08949 V
Extracted Parameters	α_m	0.05264 V/K
	R_m	1.0715 Ohm
	θ_m	0.8295 K/W

표 2. 열전모듈(TEC1-12712T125)의 data sheet 값
Table 2. Data sheet of TE module (TEC1-12712T125).

V_{max}	15.2V
I_{max}	12A
ΔT_{max}	67°C
hot side temperature	27°C
Size	40mm * 40mm * 3.2mm

사용된 열전모듈(TEC1-12712T125) Data sheet의 값을 이용해서 참고문헌^[2]에서 제시한 방식으로 모델 파라미터 값을 다음과 같이 계산하였다.

$$R_m = \frac{V_{max}}{I_{max}} \frac{(T_h - \Delta T_{max})}{T_h} [\Omega] = 0.984 \text{ Ohm}$$

$$\theta_m = \frac{\Delta T_{max}}{I_{max} V_{max}} \frac{2T_h}{(T_h - \Delta T_{max})} [K/W] = 0.946 \text{ K/W}$$

$$\alpha_m = \frac{V_{max}}{T_h} [V/K] = 0.0507 \text{ V/K}$$

여기서 R_m 및 α_m 의 경우는 Harman method 이론에 의해 측정된 값과 오차가 각각 8.2%와 3.7%로써 거의 일치하였으나, θ_m 의 경우는 본 논문의 실험의 결과와 Data sheet에서 추출된 값과 약 14%의 오차가 발생하였다. θ_m 의 오차가 큰 이유는 식(17)에서 α_m 과 ΔT 값이 사용되므로 측정의 오차가 모두 θ_m 에 반영되기 때문으로 판단된다. 식(18)으로부터 계산된 ZT값은 0.64로써 실험에 사용된 Bi2Te3 열전 모듈의 ZT값과 일치된다.

3. SPICE 모델을 이용한 시뮬레이션과 실험

모델의 동작을 검증하기 위해서 주어진 열전 데이터 값 및 Harman method 이론에 의하여 추출된 파라미터 값을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 실제 측정 값과 비교하여 본 논문에서 제안하는 파라미터 추출의 타당성을 검증하였다. 그림 7은 SPICE 모델을 적용하여 모델한 열전 냉각소자이다. 모델의 정확성을 높이기 위하여 열전 소자 양면에 부가적인 heat sink를 추가하지 않고 열전 소자 자체가 대기간의 공기의 열 방사 저항(thermal resistance) 값만을 고려하였다.

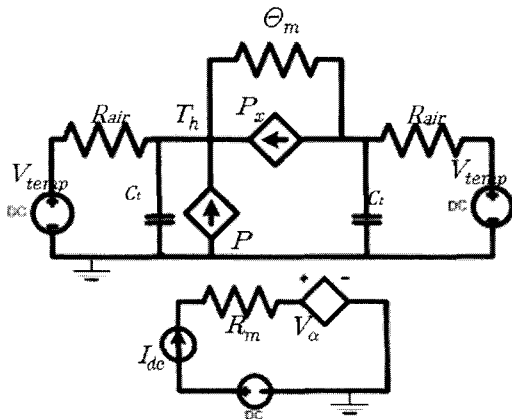


그림 7. 실험을 위한 열전소자의 SPICE Model
Fig. 7. Experimental SPICE Model for Thermoelectric device.

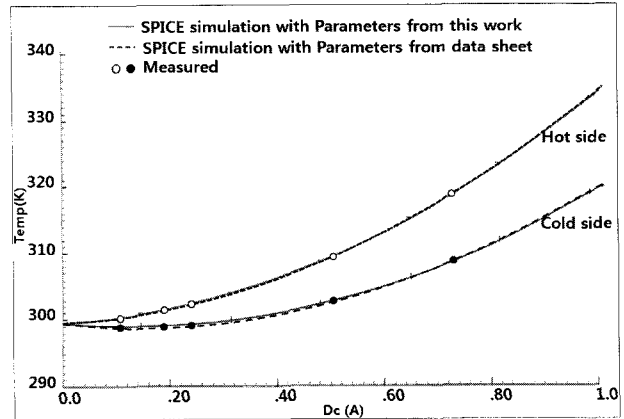


그림 8. 열전소자 SPICE 시뮬레이션 결과
Fig. 8. SPICE simulation results of thermoelectric device.

실험시 외부 온도는 26.5°C 이며(즉, $V_{temp} = 299.5V$) 공기의 열 방사저항 R_{air} 는 30 Ohm으로 모델하였다. 그림 8의 시뮬레이션과 측정결과를 비교하여보면, 본 실험에서 추출한 모델 파라미터를 사용한 경우와 참고문헌^[2]에서 제시한 열전도 시험 데이터를 사용한 경우 모두 측정값과 잘 일치함을 알 수 있다.

시뮬레이션 간의 오차는 최대 0.4°C 였고 실제 측정과 Harman method 이론에 의하여 추출된 파라미터 값의 오차는 최대 0.3°C 미만 이었다.

III. 결 론

본 연구에서는 열전소자의 SPICE 모델을 유도하였고, 모델파라미터를 추출하기 위한 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시된 SPICE 모델 파라미터 추출방식은 열전도 측정 데이터를 사용하지 않고, Harman method에 의한 전기적인 측정과 열전 소자 양단면의 온도 측정값만으로 모델파라미터를 추출할 수 있으며, 기존의 열전도 측정에 의한 값과 비교하였을 때 오차가 크지 않아서 실제로 열전 모듈을 제작하였을 때 유용하게 사용할 수 있는 방법이 될 수 있음을 보였다. 본 연구에서 제시한 열전 모듈의 SPICE 모델은 열전모듈을 이용한 냉각 장치와 열전 발전 장치의 열적 시뮬레이션과 전기적인 시뮬레이션에 모두 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] J. A. Chavez, J. A. Ortega, J. Salazar, A. Twb, M. J. Garcia, "SPICE Model of Thermoelectric

Elements Including Thermal Effects,” IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, vol. 2, pp. 1019-1023, May 2000.

[2] Simon Lineykin, et.al “Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules,” IEEE Transaction on industry applications, vol. 43, no.2 March/april 2007.

[3] Daniel Mitrani, Jose Antonio Tome, Jordi Salazar, Antoni Turo, Miguel Jesus Garcia, and Juan Antonio Chavez, “Methodology for Extracting Thermoelectric Module Parameters”, IEEE TR. on Instrumentation and measurement, Vol. 54, No. 4, pp 1548-1552, August 2005.

[4] D. M. Rowe, “Electrical and thermal transport Measurement Techniques for Evaluation”, Thermoelectrics Handbook:Macro to nano, pp 23-1~23-17, 2006, CRC press

[5] T. C. Harman, J. H. Cahn, and M. J. Logan, “Measurement of Thermal Conductivity by Utilization of the Peltier Effect”, J. Appl. Phys. Vol 30, pp 1351. 1958.

저 자 소 개



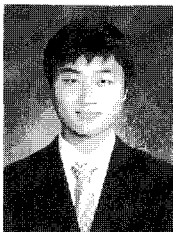
박 순 서(학생회원)
 2009년 충북대학교 전기공학과
 학사 졸업.
 2010년 현재 충북대학교
 전기공학과 석사 재학중.
 <주관심분야 : 친환경 에너지 전
 력변환 시스템 및 아날로그 회로

설계, BMS >



Nyambayar Baatar(학생회원)
 2006년 몽골 과학기술대학교
 전기공학과 학사 졸업
 2009년 충북대학교 전기공학과
 석사 졸업.
 2010년 현재 충북대학교 전기
 공학과 박사과정 재학중.

<주관심분야 : SoC 설계>



조 성 규(학생회원)
 2009년 충북대학교 전기공학과
 학사 졸업.
 2010년 현재 충북대학교
 전기공학과 석사 재학중.
 <주관심분야 : Analog Circuit
 Design, 열전 에너지 회생기술>



김 시 호(평생회원)-교신저자
 1986년 연세대학교 전자공학과
 학사졸업
 1988년 KAIST 전기 및 전자
 공학과 석사졸업
 1991년~1995년 KAIST 전기 및
 전자공학과 박사졸업

1988년~1991년 LG반도체 중앙연구소 주임연구원
 1995년~1996년 LG반도체 중앙연구소 책임연구원
 1997년~2005년 원광대학교 전임, 조교수, 부교수
 2000년~2001년 2월 IMEC 연구소(KU Leuven)
 초빙 교수
 2005년~현재 충북대학교 전기전자공학부 교수
 2009년~현재 하이브리드자동차 에너지회생기술
 연구센터 (ITRC) 센터장, System Chip
 Integration (SCI)연구실 운영

<주관심분야 : System on Chip Design, 하이브
 리드 자동차 에너지 회생기술, 3DIC 냉각 기술,
 NAND Flash Memory 신뢰성>