

열전 냉각기를 포함하는 볼로미터 패키지의 SPICE 등가 모델링

한창석¹ · 박승만¹ · 김남환² · 한승오^{3,+}

SPICE-Compatible Modeling of a Microbolometer Package Including Thermoelectric Cooler

Chang Suk Han¹, Seung Man Park¹, Nam-Hwan Kim², and Seungoh Han^{3,+}

Abstract

For a successful commercialization of microbolometer, it is required to develop a robust package including thermal stabilizing mechanism. In order to regulate the temperature within some operating range, thermoelectric cooler is generally used but it's not easy to model the whole package due to the coupled physics nature of thermoelectric cooler. In this paper, SPICE-compatible modeling methodology of a microbolometer package is presented, whose steady-state results matched well with FEM results at the maximum difference of 5.95%. Although the time constant difference was considerable as 15.7%, it can be offset by the quite short simulation time compared to FEM simulation. The developed model was also proven to be useful for designing the thermal stabilizer through parametric and transient analyses under the various working conditions.

Keywords : Microbolometer, Thermoelectric cooler, MEMS, package, SPICE

1. 서론

적외선 검출기는 주변광에 의존하지 않고 관측대상으로부터 방출되는 적외선을 사용하기 때문에 주변광이 없는 야간에도 활용이 가능하고 연무 또는 분진 속에서도 관측이 가능하다는 장점이 있어 군사용으로 많은 연구와 개발이 이루어졌다. 특히, 검출소자의 냉각이 필요 없는 비냉각식 적외선 검출기는 냉각식 검출기에 비해 성능은 다소 떨어지지만 냉각기 배제를 통한 소형화, 경량화, 저가화, 그

리고 우수한 가격 대비 성능 등의 이점들 때문에 최근 보안, 의료, 자동차, 소방 등의 다양한 분야로 그 응용이 확대되고 있다[1, 2].

대표적인 비냉각 검출기인 마이크로볼로미터는 입사 적외선 흡수에 따른 온도상승과 이에 의한 저항체의 저항변화를 통해 대상물체를 검출하는 소자이기 때문에 다른 요인들로 인해 저항체의 온도가 변화하지 않도록 유지하는 것이 매우 중요하다. 하지만 실제의 비냉각 검출기에서는 여러 가지 요인들에 의해 저항체의 온도변화가 발생할 수 있다. 먼저, 저항체의 저항값을 판단하기 위해 판독 집적회로(ROIC: Read-Out Integrated Circuit)로부터 인가되는 바이어스 전류는 주열 발열에 의해 검출소자의 온도를 상승시킬 수 있다. 또한 마이크로볼로미터 외부의 온도환경이 검출소자를 둘러싸고 있는 패키지를 통해 검출소자에 전달되어 온도변화를 발생시킬 수 있다.

이러한 기생 온도변화는 별도의 온도 센서를 장착하거나 적외선이 입사되지 않는 기준 검출소자를 장착하여 적외선 입사와 무관한 현재의 온도환경을 모니터링하고 이를 교정함으로써 일부 해결할 수 있다. 하지만, 이러한 방식에 의해 현재 온도를 기준으로 적외선 흡수에 따른 온도 변화량만을 고려하는 경우 부딪힐 수 있는 문제가 온도 차이에 의한 열 변형 문제이다. 즉, 열 영상 취득을 위해 배열 형태로 배치되는 마이크로볼로미터 초점면 배열(FPA: Focal

¹호서대학교 국방과학기술학과(Department of Defense Science Technology, Hoseo University)

Dept. DST, Hoseo University, 165 Sechul-Ri, Baebang-Eup, Asan-City, Chungnam 336-795, Korea

²국방과학연구소(Agency for Defense Development)

Yuseong PO Box 35-33, Daejeon 305-600, Korea

³호서대학교 로봇자동화공학(Department of Robotics Engineering, Hoseo University)

Dept. Robotics Eng., Hoseo University, 165 Sechul-Ri, Baebang-Eup, Asan-City, Chungnam 336-795, Korea

⁺Corresponding author: sohan@hoseo.edu

(Received : Oct. 2, 2012, Revised : Nov. 29, 2012, Accepted : Dec. 9, 2012)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Plane Array)는 특정 온도조건(일반적으로 상온)을 기준으로 제작 되는데, 만일 외부의 온도환경에 의해 마이크로볼로미터 온도가 변화할 경우 이를 구성하는 소재들의 열팽창 계수(TCE: Temperature Coefficient of Expansion) 차이에 의한 구조적 변형이 발생하게 된다. 이러한 구조 변형은 초점면 배열에서의 불균일한 동작 특성으로 이어지게 된다. 또한 패키지에서의 열 변형은 적외선 창과 같이 저항체에 대한 적외선 입사특성을 좌우하는 부분에서도 발생할 수 있기 때문에 검출소자에서는 물론 패키지에서도 매우 중요한 문제가 된다. 따라서 기생 온도변화에 대한 근본적인 해결책은 이들 요인들에 의한 마이크로볼로미터 패키지의 온도변화를 최소화하는 것이다. 이를 위해서는 인가 바이어스에 의한 주열 발열을 최소화하고, 외부 온도환경과 단열되도록 패키지 구조를 구현하여야 한다. 하지만 저항값 판별을 위한 바이어스 조건은 필수적이고 완벽한 단열 패키지는 불가능하므로 어쩔 수 없이 발생하는 온도변화를 상쇄시키기 위해 열전 냉각기(TEC: Thermo-Electric Cooler) 소자를 패키지에 포함시켜 냉각 또는 발열시킴으로써 검출기를 향한 상태로 유지하여야 한다.

이를 위한 온도 안정기(temperature stabilizer)는 패키지의 열 특성과 열전 냉각기의 성능을 고려한 온도 제어회로로 제작되는데, 주열 발열, 제벡 효과, 그리고 펠티어 효과 등이 얽혀있는 배열 형태의 열전 냉각소자 성능분석과 복잡한 3차원적 형상의 패키지 열 특성 해석을 동일 환경에서 진행하는 것이 현실적으로 불가능하였기 때문에 그 설계 및 구현이 용이하지 않았었다[3]. 이에 본 논문에서는 패키지의 3차원적 형상에 따른 열 특성과 열전 냉각기에서의 복합장을 모두 고려할 수 있는 SPICE 환경의 단일 설계환경을 구현함으로써 효과적인 비냉각 적외선 검출기의 온도 안정기 개발이 가능하도록 하였다.

2. TEC 및 패키지의 SPICE 모델링

2.1 TEC의 SPICE 모델링

전술한 바와 같이 열전 냉각기는 주열 발열, 제벡 효과, 그리고 펠티어 효과가 모두 관계된 복합장 소자이다. 또한 상업화된 제품은 일반적으로 배열 형태로 제작되어 제공되기 때문에 단위소자 분석은 유한요소법(FEM: Finite Element Method)을 통해 해석[4, 5]되고 있으나 일반적으로 패키지에 포함된 배열은 과도한 절점수와 그에 따른 계산량의 증가, 그리고 복합장 계산으로 인한 낮은 수렴성 등으로 인해 그 거동을 직접 계산하지 않고 판매회사에서 제공하는 데이터시트에 기반하여 간접 계산하는 접근법[6]을 주로 사용하고 있다.

하지만 간접 계산법조차도 열-유동 방정식을 3차원 유한요소법으로 계산하여야 하기 때문에 다양한 설계조건들을 변경하면서 최적화된 온도 안정기를 설계해야 하는 초기 설계 단계에서는 큰 시간적 부

담으로 작용한다. 이에 본 논문에서는 상미분 방정식(ODE: Ordinary Differential Equation) 해석을 통해 매우 짧은 시간 내에 계산이 가능한 SPICE 환경에서 설계가 이루어지도록 하였다[7, 8].

열전 냉각기 소자와 관련된 지배방정식은 식 (1)의 열 전달 방정식으로부터 시작된다[9].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = g \tag{1}$$

이때, ρ 는 밀도, c 는 비열, T 는 절대온도, t 는 시간, q 는 열 선속, 그리고 g 는 단위 체적당 발열율을 의미한다. 식 (1)에 주열 발열, 제벡 효과, 그리고 펠티어 효과를 반영하면 식 (2)가 된다[10].

$$-\nabla(\sigma\alpha^2T + \lambda)\nabla T - \nabla(\sigma\alpha T\nabla V) = \sigma(\nabla V)^2 + \alpha\nabla T\nabla V \tag{2}$$

여기서, σ 는 전기 전도도, α 는 제벡 계수, λ 는 열 전도도이며 V 는 인가되는 전압을 나타낸다.

식 (1)과 (2)를 토대로 열-전기 유사성을 이용하여 열전 냉각기에 대한 SPICE 등가모델을 구축하면 Fig. 1과 같으며, 모델링에 사용된 변수들은 Table 1에 정리하였다.

Table 1. SPICE modeling parameters for TEC

Parameters	Meaning
I_supp	Current supplied from the temperature controller
Alpha	Seebeck coefficient
Rm	Electric resistance
k_TEC	Thermal conductivity

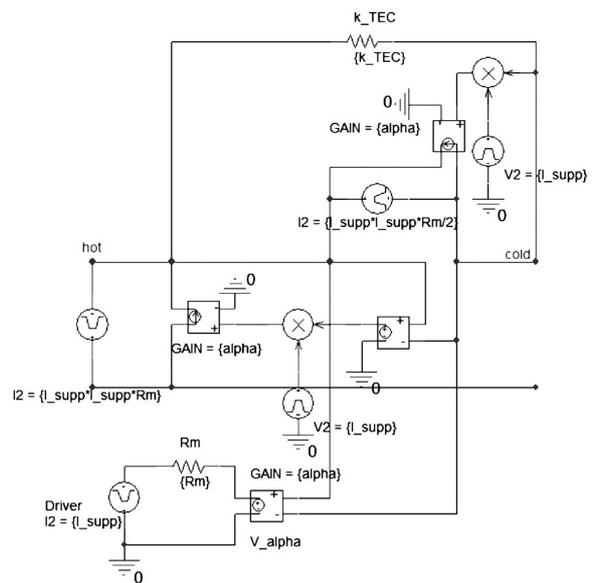


Fig. 1. SPICE equivalent model for TEC [8].

2.2 패키지의 SPICE 모델링

비냉각 적외선 검출기의 패키지 구조는 Fig. 2와 같이 매우 복잡한 형태로 구성된다. 때문에 종래의 연구[3]에서와 같이 패키지 구성요소들을 집중변수 모델(lumped parameter model)로 단순화하는 것은 모델의 정확도를 저하시킬 수 있기 때문에 본 논문에서는 Fig. 3에 제시된 절차에 따라 패키지를 구성하는 각 요소들에 대한 유한요소법 해석과, 이에 대한 Fig. 4와 같은 변수 추출을 통해 R(열 저항)-C(열 용량) 등가모델을 개별적으로 수행하였다.

Fig. 3에 제시된 기법은 패키지를 구성하는 각 요소들을 R(열 저항)-C(열 용량) 집중변수 모델로 등가화하는 것에 기초하고 있다. 먼저 열 저항 R은 식 (3)과 같이 계산되며 열 용량 C는 식 (4)를 통해 얻어진다.

$$R = \frac{L}{\sigma A} \tag{3}$$

$$C = c\rho v \tag{4}$$

여기서, L 과 A 는 각각 직육면체 요소의 길이와 단면적을 나타내며 v 는 체적을 의미한다.

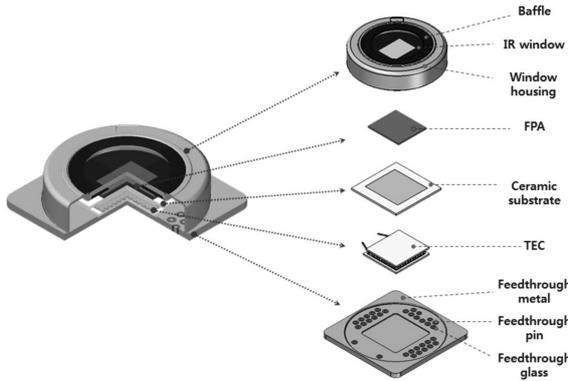


Fig. 2. General packaging of a microbolometer.

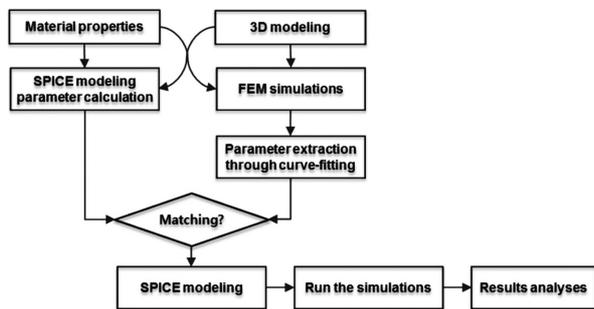


Fig. 3. SPICE equivalent modeling work flow.

이들은 모두 그 기하학적 형태가 직육면체 구조라는 점을 가정하고 있으므로 이러한 가정에서 벗어나는 요소들에 대해서는 유한요소법 해석을 통해 Fig. 4와 같은 시간응답 특성을 구하고 그 결과에 대해 식 (5)의 열 전달 방정식에 기반한 곡선맞춤을 수행하여 열 저항과 열 용량을 추출하였다.

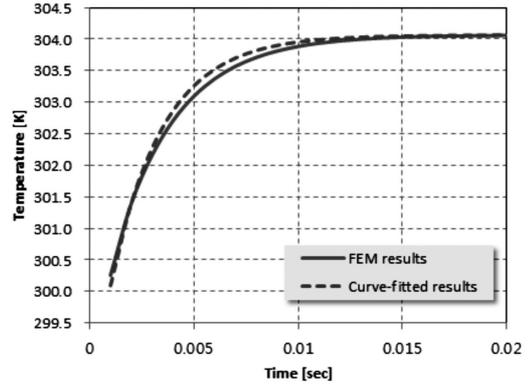


Fig. 4. Thermal parameter extraction of FPA.

$$T(t) = T_{initial} + QR(1 - e^{-t/RC}) \tag{5}$$

여기서 $T_{initial}$ 은 패키지 요소의 초기 온도이고 Q 는 패키지 요소에 단위시간당 인가되는 열 에너지이다.

직육면체 형태를 갖춰 수식에 의해 R 과 C 의 계산이 가능한 요소들은 그 결과를 유한요소법 해석결과를 통해 얻어진 결과와 비교함으로써 집중변수 모델링의 신뢰도를 높이도록 하였다. 유한요소법 해석결과로부터의 추출법은 모델링 과정을 다소 복잡하게 만들고 이로 인한 모델링 시간의 증가로 인해 빠른 해석이라는 SPICE 등가 모델링의 장점을 저하시킬 수 있다. 하지만 다양한 구성요소들과 복잡한 3차원적 형상을 갖는 패키지 특성을 고려할 때, 수식적 접근만으로는 정확한 모델링 파라미터 추출이 불가능하므로 모델링 과정이 다소 복잡해지더라도 실제 패키지의 정확한 모델링을 위해 유한요소법 해석결과에 기반한 모델링 파라미터 추출법을 적용하였다.

3. TEC를 포함한 패키지 전체의 SPICE 모델

전술한 과정을 거친 열전 냉각기에 대한 SPICE 등가모델과 패키지에 대한 SPICE 등가모델을 통합하면 Fig. 5와 같다. 좌측의 전류원은 초점면 배열을 열원으로 모델링한 것이며 이후의 R-C 네트워크는 초점면 배열에 순차적으로 연결되는 패키지 요소들 각각에 대한 집중변수 모델이다. 중앙에는 Fig. 1의 열전 냉각기 모델이 배치되었으며 그 뒤로 열전 냉각기 하부에 놓이는 패키지 요소들이 역시 R-C 집중변수 모델로 등가화되어 있다.

구축된 모델의 타당성을 검증하기 위해 동일 패키지에 대한 유한

요소법 해석결과와 SPICE 모델로부터 얻어진 열 특성 결과를 비교하였다. Table 2에 정리된 다양한 동작조건에서의 정상상태 온도 결과에 의하면 SPICE 등가모델은 유한요소법 결과와 단 0.75K의 차이만을 보이는데, 이는 초점면 배열 소자의 발열에 의한 온도변화량인 12.K의 5.95%에 해당하는 매우 작은 차이이다. 정상상태 결과에 덧붙여 Fig. 6에는 과도응답 특성이 제시되어 있다. 과도응답 특성을 결정하는 시상수를 유한요소법 결과와 비교하면 15.7%의 차이를 보인다. 이는 작지 않은 차이이지만 SPICE 모델이 유한요소법 해석에 비해 매우 짧은 시간 내에 결과를 얻을 수 있음을 감안하면 용인할 수 있는 수준이다.

Table 2. Model verification: Steady-state results

FPA heating	Ambient Temp.	Modeling method	Steady-state Temp. [K]		
			FPA surface	TEC top	TEC bottom
0.1W	25°C	FEM	300.61	300.59	299.40
		SPICE	300.64	300.62	299.34
	60°C	FEM	335.61	335.58	334.40
		SPICE	335.62	335.59	334.34
1W	25°C	FEM	322.84	322.58	310.75
		SPICE	323.09	322.86	310.00
	60°C	FEM	357.84	357.58	345.57
		SPICE	357.82	357.59	345.00

이상의 검토는 Fig. 5의 SPICE 모델이 패키지의 열 전달 특성을 타당하게 모델링한 것인지를 확인한 것으로써 열전 냉각기 소자의 동작에 따라 패키지의 온도조절이 가능한지 확인하기 위하여 Fig. 7의 해석을 수행하였다. 볼로미터 패키지의 주변온도가 60°C로 상

승하면 이에 따라 패키지의 온도 또한 Fig. 7의 0-100 sec 구간에 서와 같이 주변온도에 따라 상승한다. 이에 덧붙여 초점면 배열 소자의 동작에 따른 주열 발열로 인해 열전 냉각기 소자의 상부온도 (Fig. 7의 V(hot) 신호)와 하부온도(Fig. 7의 V(cold) 신호) 사이에는 온도 차이가 존재한다. 100 sec 시점에서 열전 냉각기에 11.1 mA의 구동전류를 인가하면 온도가 높았던 열전 냉각기 상부가 냉각되면서 열전 냉각기 상부와 하부가 같은 온도를 유지한다. 이후 200 sec 시점에서 열전 냉각기 소자의 구동전류를 제거하면 열전 냉각기 소자의 상하부는 다시 온도 차이를 유지한다.

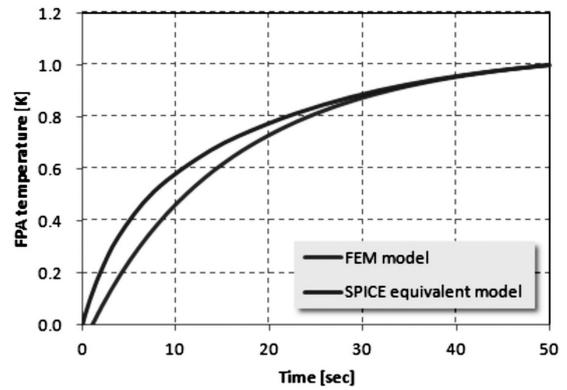


Fig. 6. Model verification: transient response.

열전 냉각기 동작에 의한 패키지 온도조절을 확인하는 Fig. 7의 결과는 단지 0.02 sec의 계산시간만을 필요로 하였다. 이는 본 논문에서 제시된 SPICE 모델링 접근법이 온도 안정기의 설계와 같이 다양한 해석을 필요로 하는 시점에서 장 시간의 해석시간이 필요한 유한요소법 접근에 비해 매우 유용하게 활용될 수 있음을 의미한다.

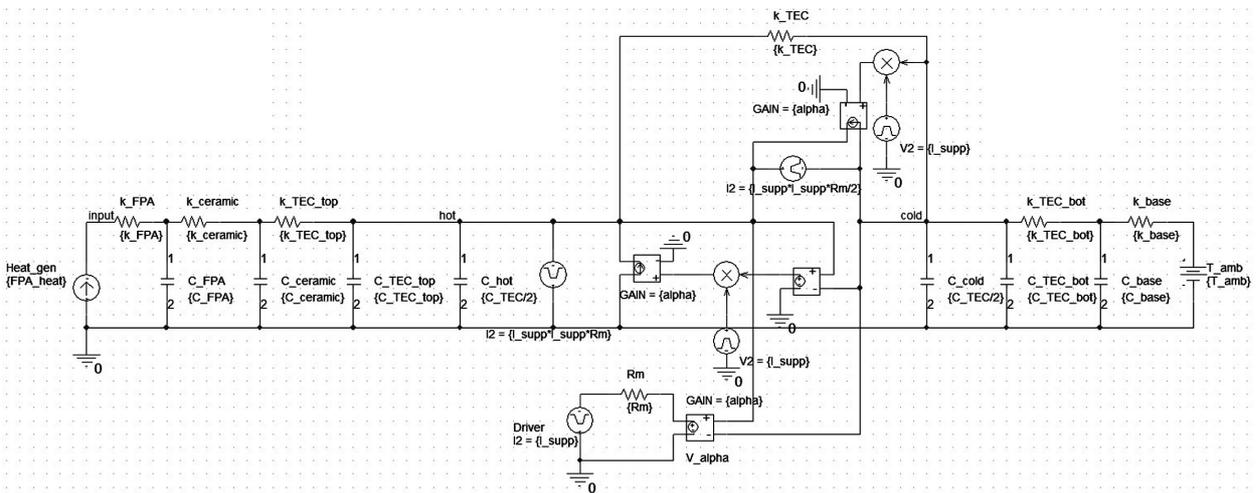


Fig. 5. SPICE equivalent model for the microbolometer package including TEC.

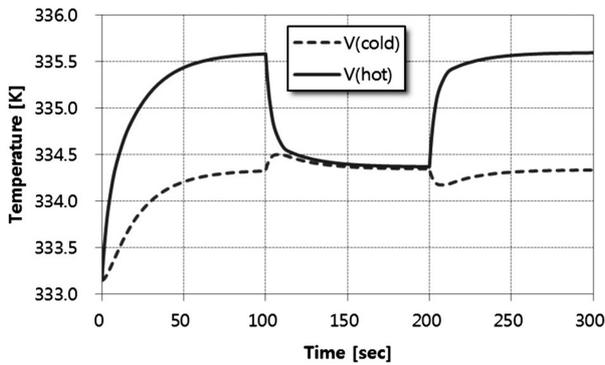


Fig. 7. Control the package temperature with TEC.

4. 결론

본 논문에서는 마이크로볼로미터 패키지에 포함되는 열전 냉각기 소자를 포함한, 패키지 전체에 대한 SPICE 모델링 기법을 제시하고 그 타당성과 유용성을 확인하였다.

열전 냉각기 소자의 SPICE 모델링은 열 전달 방정식으로부터 출발하여 주열 발열, 재벽 효과, 그리고 펠티에 효과를 포함한 지배방정식에 기반함으로써 열전 냉각기 소자와 관련된 복잡장 해석이 가능하였다. 그리고 마이크로볼로미터 패키지는 각 구성요소들에 대한 열 전달 특성을 유한요소법 해석으로 분석하고 그 결과에 대한 곡선 맞춤을 수행하여 SPICE 모델을 추출하였다. 이러한 과정을 통해 얻어진 모델은 정상상태 그리고 과도응답에서 유한요소법 해석과 비교할 때 우수한 정확성을 나타내었다. 마지막으로 열전 냉각기 소자의 구동에 따라 패키지의 온도가 변화함을 확인함으로써 본 논문에서 제시한, 열전 냉각기 소자를 포함한 패키지 전체의 SPICE 모델의 타당성을 확인하였다.

개발된 열전 냉각기-패키지 SPICE 모델은 마이크로 볼로미터에 대한 SPICE 모델[1] 그리고 온도 안정기 모델[3]과 연계하여 실제 사용환경에서 마이크로볼로미터 개별소자부터 패키지의 특성에 이르기까지 다양한 수준에서의 정보들을 하나의 모델로 통합하여 분석하는데 기여할 것이며 이를 통해 보다 효과적인 마이크로볼로미터 개발에 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] J. Kim, M. Park, H. Noh, S. Lee, J. Lee, S. W. Moon, and H. Song, "Design and analysis of a signal readout integrated circuit for the bolometer type infrared detect sensors", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 16, No. 6, pp. 475-483, 2007.
- [2] K. M. Kim, B. I. Kim, H. Y. Kim, W. S. Jang, T. H. Kim, and T. Y. Kang, "Fabrication and characterization of fine pitch IR image sensor using a-Si", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 19, No. 2, pp. 130-136, 2010.
- [3] J. Choi, J. Yamaguchi, S. Morales, R. Horowitz, Y. Zhao, and A. Majumdar, "Design and control of a thermal stabilizing system for a MEMS optomechanical uncooled infrared imaging camera", *Sens. Actuators*, Vol. A104, pp. 132-142, 2003.
- [4] N. Wang, C.-H. Wang, J.-X. Lei, and D.-S. Zhu, "Numerical study on thermal management of LED packaging by using thermoelectric cooling", *Proc. of ICEPT-HDP*, pp. 433-437, Beijing, China, 2009.
- [5] G. Baldazzi, E. Foschi, G. Laurenti, G. Levi, C. Guandalini, N. Lanconelli, L. Quandrani, P. Rossi, C. Sbarra, and M. Zuffa, "Thermoregulation of silicon photomultipliers for space", *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, Vol. A610, pp. 384-386, 2009.
- [6] C. S. Premachandran, N. Khan, X. Zhang, C. S. Choong, and T. C. Chai, "Design & development of a new thermally stable high vacuum IR bolometer package", *Proc. of IEEE ECTC*, pp. 392-396, New Orleans, USA, 2003.
- [7] S. Lineykin and S. Ben-Yaakov, "Modeling and analysis of thermoelectric modules", *IEEE Trans. Ind. App.*, Vol. 43, No. 2, pp. 505-512, 2007.
- [8] J. A. Chávez, J. A. Ortega, J. Salazar, A. Turó, and M. J. Garcia, "SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects", *Proc. of IEEE IMTC*, pp. 1019-1013, Baltimore, USA, 2000.
- [9] E. E. Antonova and D. C. Looman, "Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS", *Proc. of IEEE Conf. on Thermoelectrics*, pp. 200-203, Clemson, USA, 2005.
- [10] M. Jaegle, "Multiphysics simulation of thermoelectric systems-modeling of Peltier-cooling and thermoelectric generation", *Proc. COMSOL Conf.*, Hannover, Germany, 2008.
- [11] S. Han, C.-H. Chun, C.-S. Han, and S.-M. Park, "Coupled physics analyses of VOx-based, three-level microbolometer", *Elec. Mat. Lett.*, Vol. 5, No. 2, pp. 63-65, 2009.