

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(5), 455-462(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.5.455

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

MEMS 기반 흑체 시스템의 온도 균일도 및 추정 정확도의
수치 해석적 검토

채봉건**, 김태규**, 이종광***, 강석주****, 오현웅*

Numerical Investigation of Temperature Uniformity and Estimation
Accuracy for MEMS-based Black Body System

Bong-Geon Chae**, Tae-Gyu Kim**, Jong-Kwang Lee***, Suk-joo Kang**** and Hyun-Ung Oh*

Department of Aerospace Engineering, Chosun University* **

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University***

Hanwha Thales****

ABSTRACT

Output Characteristics of the spaceborn image sensor such as infrared(IR) sensor are varied according to time elapses and sensor repetition on/off operation. As a result, the quality of IR sensor image is decreased. Therefore, spaceborne image sensor require a periodic calibration using a black body system by correcting a non-uniformity of the sensor. In this paper, we proposed a MEMS-based black body system that can implement the high temperature uniformity at various standard temperatures ranging from low to high temperature and easily estimate the representative surface temperature. In addition, it has advantages lightweight, low-power and high accuracy. The feasibility of the proposed MEMS-based black body system was verified through the thermal analysis.

초 록

적외선 검출기와 같은 우주용 영상센서는 작동 유무 및 시간경과에 따라 센서의 응답 특성이 변하기 때문에 영상품질이 저하된다. 이러한 영상센서의 비균일 응답특성을 보정하기 위하여 궤도상에서 보정용 흑체시스템을 이용하여 주기적인 보정을 실시 할 수 있도록 해야 한다. 본 논문에서는 저온에서 고온에 이르는 다양한 기준온도에서의 높은 온도균일도 확보 및 흑체의 대표표면온도 추정이 용이하고, 초경량, 저전력, 고정밀도의 흑체 시스템을 구현하기 위해 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)기반의 흑체시스템을 제안하였으며, 열해석을 통해 성능을 입증하였다.

Key Words : IR Detector(적외선 검출기), MEMS(Micro Electro Mechanical Systems, 미세전자기계시스템), Non-uniformity(비균일도), Micro Heater(마이크로 히터)

† Received : February 26, 2016 Revised : April 19, 2016 Accepted : April 28, 2016

* Corresponding author, E-mail : ohu129@chosun.ac.kr

I. 서론

우주 궤도상에서 사용되고 있는 영상센서 중 적외선 검출기 등은 작동/비작동 및 시간경과에 따른 동일 광원에 대한 응답특성 및 정밀도의 비균일성이 존재하게 되며, 이로 인해 촬영된 적외선 영상 품질의 저하를 야기한다. 따라서 적외선 검출기의 정상적인 임무수행을 위해서는 검출기의 비균일 응답 특성을 고려하여 영상획득 임무수행 전 검출기 교정임무 수행이 반드시 선행되어야 하며, 이를 위해 일반적으로 탑재교정용 흑체가 적용되고 있다. 탑재교정용 흑체의 주된 목적은 흑체 표면에서의 온도균일화 및 온도센서로부터의 표면 온도 추정이 가능한 고정밀 대표표면온도 정보 제공에 있으며, 일반적으로 검출기 교정을 위해 고온 및 저온에서의 온도제공이 가능하도록 복수의 흑체를 탑재하고 있으나, 상기의 경우 센서로부터 적외선 검출기로의 지향성 확보를 위한 메커니즘 적용이 요구되는 등 시스템 복잡화가 수반된다. 대표적인 사례로 1999년 발사된 Terra 위성 기상탐재체인 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrodiometer)[1]와 Sapritsky et al.이 제안한 중·저온 온도정보 제공 및 표면에서의 비균일 온도 특성 최소화를 위한 센서 및 히터설계를 통해 고정밀 흑체를 비롯하여 적외선 검출기 교정용 흑체가 위성 시스템에 적용되고 있다[2-4]. 이외에도 국내에서 개발된 탑재 교정용 흑체의 경우 하나의 흑체로 저온에서 고온에 이르는 교정온도 및 비균일 응답 특성에 대한 교정이 가능하나 검출기의 비균일 출력 특성 교정에만 한정되어 있어 제공 가능한 기준 온도정보가 매우 제한적이다. 또한 흑체로부터 위성체 외부에 위치한 방열판으로의 열적 전도 경로를 확보해야하기 때문에 이로 인한 열적 손실 방지 및 고온 온도정보 제공을 위해 추가적인 히터의 적용이 요구되는 등 열설계의 복잡성을 야기하게 된다[5].

본 논문에서는 종래의 적외선 검출기 교정용 흑체시스템의 단점을 극복하기 위해 시스템 단순화 및 고기능 구현이 가능하고 초경량, 저 전력, 고정밀도 구현이 가능한 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)기술 기반의 마이크로 히터와 가열 후 잔열 수송 및 심우주로 열을 방출하여 저온구간에서의 온도정보를 제공하기 위한 방열판을 제안하였으며, 상기 제안된 흑체시스템에 대한 열해석을 수행하여 해석결과 분석 및 열설계에 대한 타당성을 입증하였다.

II. 본론

2.1 MEMS기반 흑체 시스템 설계

Figure 1은 본 논문에서 제안한 MEMS기반의 흑체시스템 형상을 나타낸다. 상기의 흑체는 MEMS공정에 널리 쓰이는 2.5mm두께의 실리콘 재질의 웨이퍼로 제작되었으며, 고온의 온도정보 제공 및 표면온도균일화를 위해 실리콘웨이퍼 뒷면에는 마이크로 히터가 대칭형으로 증착되어있다. 이와 같이 MEMS공정을 흑체시스템에 적용함으로써 초소형, 초경량, 저전력 구동이 가능하며, 흑체 표면 근접위치에 다수의 온도센서 및 히터의 집적화가 가능하여 흑체기능에 있어 대표 표면온도 추정과 온도균일화 확보에 매우 유리한 장점을 가진다. 이외에도 히터의 잔열 수송 및 심우주로 열을 방출하기 위해 열전도성이 우수한 Al-6063재질의 방열판을 적용하여 저온구간에서의 온도정보 제공이 가능하도록 하였다.

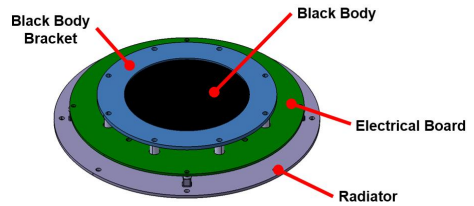


Fig. 1. MEMS-based Black Body Configuration

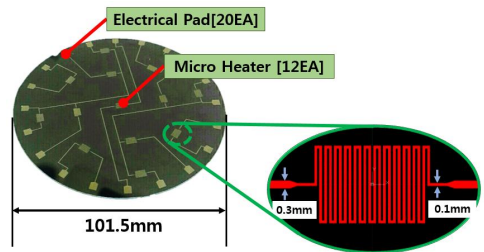


Fig. 2. Micro Heater Configuration

Table 1. MEMS-based Black Body Specification

Description	Specification
Total Mass	0.309kg
Number of Micro Heater	12EA
Heater Type	Serpentine
Heater Thickness	2200 Å
Heater Initial Resistance	1297 Ω

2.2 MEMS기반 흑체 시스템 열설계 및 해석조건

MEMS기반 흑체시스템의 열설계를 위한 주요 파라미터는 150초 이내에 0℃에서 40℃까지 마이크로 히터를 이용하여 흑체 표면 가열 후 고온 및 저온 온도정보제공이 가능하고 1K이하의 흑체표면온도의 온도구배가 이루어져야한다. 또한 영상획득 임무수행 전 한 궤도 내에 교정임무가 수행 되어야 한다.

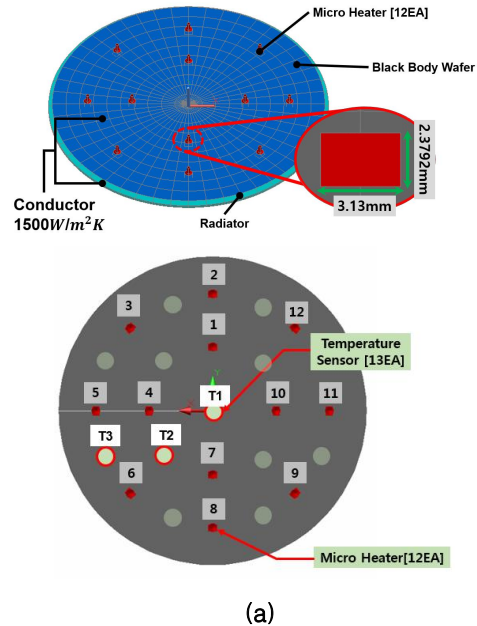
열설계 및 해석을 위해 상용 소프트웨어인 Thermal Desktop와 RadCAD[6]로 MEMS 기반 흑체시스템의 열설계 검증을 위한 열모델(TMM: Thermal Mathematical Model)을 Fig. 3과 같이 구축하였으며, 온도분포 해석을 위한 열해석 소프트웨어는 SINDA/FLUENT를 사용하였다.

SINDA/FLUENT는 일반적으로 식 (1)과 같은 노드에 대한 열에너지 평형식을 통해 열분포와 온도 변화를 계산하게 된다.

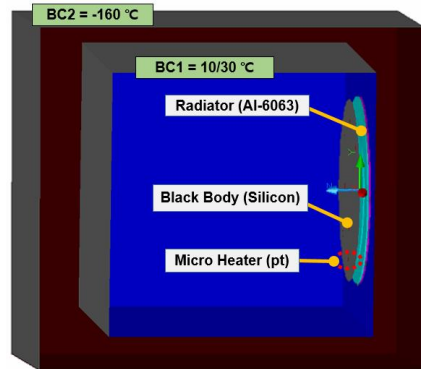
$$\frac{2C_i}{\Delta t}(T_i^{m+1} - T_i^m) = 2Q_i + \sum_{j=1}^N [G_{ji}(T_j^m - T_i^m) + \hat{G}_{ji}(T_j^m)^4 - (T_i^m)^4] + \sum_{j=1}^N [G_{ji}(T_j^{m+1} - T_i^{m+1}) + \hat{G}_{ji}(T_j^{m+1})^4 - (T_i^{m+1})^4] \quad (1)$$

여기서, T_j 는 현재시간 t 의 노드온도, T_j^{m+1} 는 현재시간부터 Δt 이후의 노드온도를 나타내며, C_i 는 노드 i 의 열용량, Q_i 는 열원을 의미한다. 또한 디퓨전 노드 j 와 i 의 선형 커넥터로 연결한 값은 G_{ji} , 복사 컨덕터는 \hat{G}_{ji} 를 의미한다.

온도분포 해석을 위한 TMM은 흑체시스템을 노드로 나누어 모델링한 후 열전달 지배방정식을 간단히 하여 유한차분법을 통한 수치해석 프로그램으로 상기의 방법은 간단하면서도 노드의 크기가 작을수록 해석 값과 유사한 값을 나타내어 열해석 연구에 널리 활용되고 있다[7]. 열설계의 구성은 Fig. 1과 같으며, 마이크로 히터는 흑체 후면부에 MEMS공정을 통해 증착되게 되고 웨이퍼 기판 및 외기로의 열손실을 최소화하기 위해[8] Fig. 2와 같이 미로형태로 증착되었다. 열설계 수행 시 마이크로 히터의 형상이 미로형태임으로 이에 따른 유효면적을 고려하여 열설계를 수행하였으며, 마이크로 히터가 증착되어있는 실리콘 웨이퍼의 앞면에는 고방사율의 특성을 가지는 흑체 물성치를, 뒷면에는 흑색 페인트를 적용하였고 심우주로의 방열을 높이기 위해 방열판 상부는 흑체와 접촉하였으며, 방열판 하부 바닥면에



(a)



(b)

Fig. 3. TMM of MEMS-based Black Body

는 SSM(Second Surface Mirror)을 적용하였다.

MEMS기반 흑체시스템의 열해석 모델은 Fig. 3 (a)와 같이 마이크로 히터가 증착되는 흑체 웨이퍼와 방열 유효면적을 고려한 마이크로히터와 잔열을 심우주로 방열하기 위해 0.028m²의 방열면적을 가지는 방열판으로 간략화 하였으며, 방열판과 흑체웨이퍼 간 열전도도는 1500W/m²K를 적용하였다[9-11]. 흑체웨이퍼의 재료는 실리콘 웨이퍼의 물성치를 적용하였고, 마이크로 히터는 백금, 방열판은 열전도율이 높은 Al-6063물성치를 적용하였다. 또한, 흑체 면을 제외한 전자보드와 방열판에는 열적 단열을 위해 MLI(Multi Layer Insulation)를 적용하였다. Table 2는 열해

Table 2. Boundary Condition Temperature for Thermal Analysis

Case	BC1(°C)	BC2(°C)
Cold Case	10	-160
Hot Case	30	-160

Table 3. Material and Optical Properties

Material Property	Value	
MEMS Black Body (Silicon)	$k = 149\text{W/mK}$	
	$\rho = 2300\text{kg/m}^3$	
	$C_p = 900\text{J/kgK}$	
Radiator (Al-6063)	$k = 200\text{W/mK}$	
	$\rho = 2700\text{kg/m}^3$	
	$C_p = 900\text{J/kgK}$	
Optical Property	Solar [α]	IR [ε]
Black Body	0.967	0.967
Black Paint	0.960	0.880
Al-6063	0.15	0.82
SSM	0.150	0.817

석 환경 온도조건으로 worst Cold와 worst Hot 조건에서 해석을 수행하였다. MEMS기반 흑체 시스템의 내부경계조건온도(BC1)는 10°C/30°C를 적용하였으며, 외부 경계조건온도(BC2)는 지상에서 열진공 챔버를 통해 검증시험이 우선적으로 이루어지기 때문에, 심우주 환경을 모사 가능한 경계조건온도인 -160°C를 적용하였다. 열해석 모델에 적용된 주요 재료 및 열물성치 정보는 Table 3에 나타내었다.

2.3 MEMS기반 흑체시스템 열해석 결과

Figure 4는 worst Cold와 Hot조건에서의 열해석 결과로 흑체 웨이퍼의 상부 온도 프로파일을

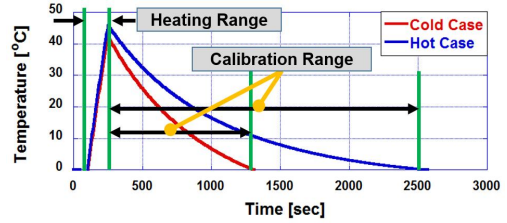


Fig. 4. Temperature Profiles of MEMS-based Black Body Thermal Analysis

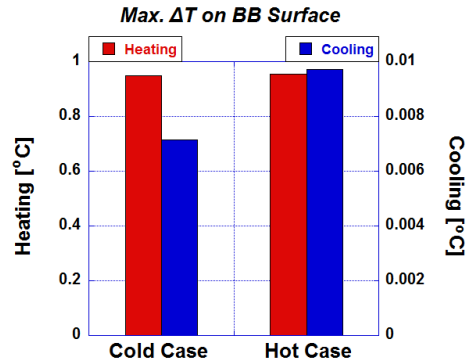


Fig. 5. Avg. ΔT on MEMS-based Black Body Surface at Heating and Cooling Range (ΔT : Temperature Gradient on the BB Surface)

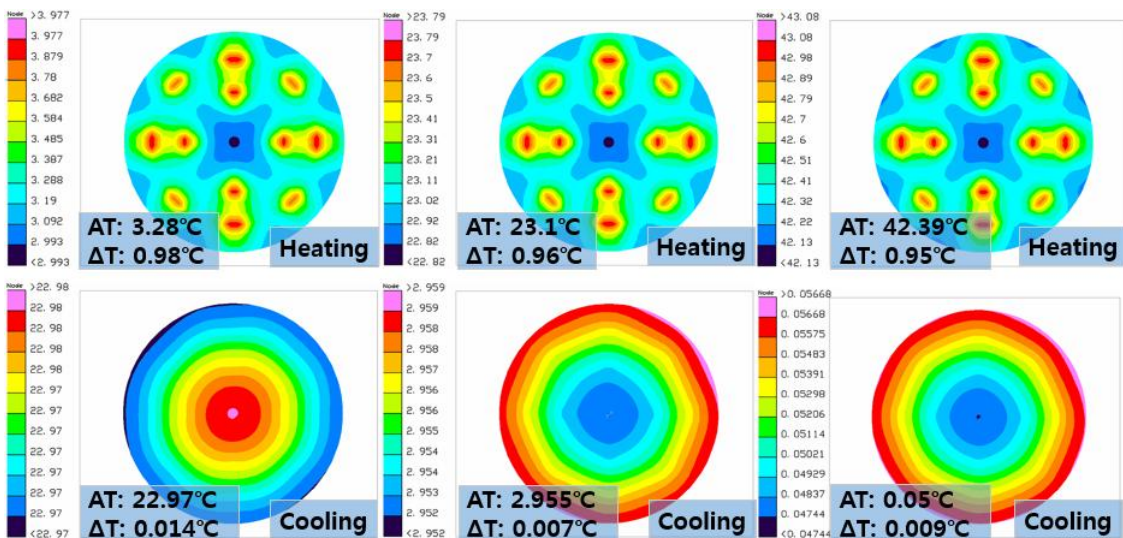


Fig. 6. Temperature Contour Maps on the MEMS-based Black Body Surface at Cold Case (AT: Average Temperature)

Table 4. Thermal Analysis Results Summary

Items	Cold Case	Hot Case
Heater Power[W]	2	
Heating Time[s]	150	
T_{max} [°C]	43.29	46.62
Cooling Time[s]	1305	2290
Heating Range ΔT Max.[°C]	0.95	0.96
Cooling Range ΔT Max.[°C]	0.02	0.01

나타내며, 초기온도 0°C에서 150초 동안 마이크로 히터를 구동하였을 때 Cold/Hot 각각 최대 43°C, 47°C까지 온도상승이 가능하며, 두 조건 모두 한 궤도 내에 교정임무 수행이 가능하다. 먼저 Fig. 5에서 Cold조건 가열구간과 냉각구간의 온도구배는 각각 0.95K, 0.007K이며, Hot조건은 0.96K, 0.0098K으로 Cold/Hot조건 가열 및 냉각 구간에서 모두 1K미만의 온도구배를 지나 가열 구간보다 냉각구간에서 흑체표면온도 균일도가 높은 것을 알 수 있으며, Fig. 6은 Cold조건에서 흑체 표면 평균온도가 가열구간에서 3°C, 23°C, 42°C, 냉각구간에서 23°C, 3°C, 0°C일 때의 온도구배를 나타내며, 이와 같이 원형 대칭형태의 온도분포를 보임으로서 마이크로 온도센서로부터 가중치 적용에 따른 대표표면온도 추정이 용이하다. Table 4는 MEMS기반 흑체 시스템의 열해석 결과로 히터파워, 0°C에서 40°C까지 가열 시간, 40°C에서 0°C까지의 냉각시간, 흑체 표면

최대온도, 가열구간 및 냉각구간에서의 온도구배에 대해 나타내었다.

2.3.1 MEMS기반 흑체시스템 대표표면온도 추정

영상센서의 교정을 위해서는 온도센서를 통해 흑체 표면의 대표표면온도를 추정을 수행해야한다. 흑체의 표면온도를 최대한 정밀하게 추정하기 위해서는 표면과 근접한 위치에 온도센서를 배치해야한다. 상기에서 제안한 흑체시스템의 온도센서는 마이크로 히터와 동일한 공정으로 제작되며, RTD 마이크로 온도센서를 적용하였다. 흑체 웨이퍼에 증착되는 마이크로 온도센서의 위치를 Fig. 3(a)에 도식화하였다.

대표표면온도 추정은 흑체표면 가열 후 교정 임무를 수행하는 하강구간에서 흑체 표면온도(T_s)와 온도센서(T_1, T_2, T_3)간 차이로 계산되며, 흑체에 내장된 온도센서의 출력 값은 온도센서가 배치되는 노드 점에 대한 온도 값을 통해 Cold/Hot조건에서 흑체 대표표면온도 추정을 수행하였다. Fig. 7은 냉각구간에서의 대표표면온도 추정 해석결과 그래프로 Cold조건과 Hot조건에서의 흑체 대표표면온도와 센서 간의 온도차이 추이는 거의 동일하다. 상기와 같이 온도센서를 배치했을 경우 대표표면온도 추정이 용이함을 알 수 있으며, 온도센서의 대표표면온도 추정 정확도는 일차 방정식인 식(2)를 통하여 도출가능하다[12,13].

$$T_{ET} = AT_{avg} + B \tag{2}$$

여기에서, T_{ET} 와 T_{avg} 는 각각 대표표면온도와

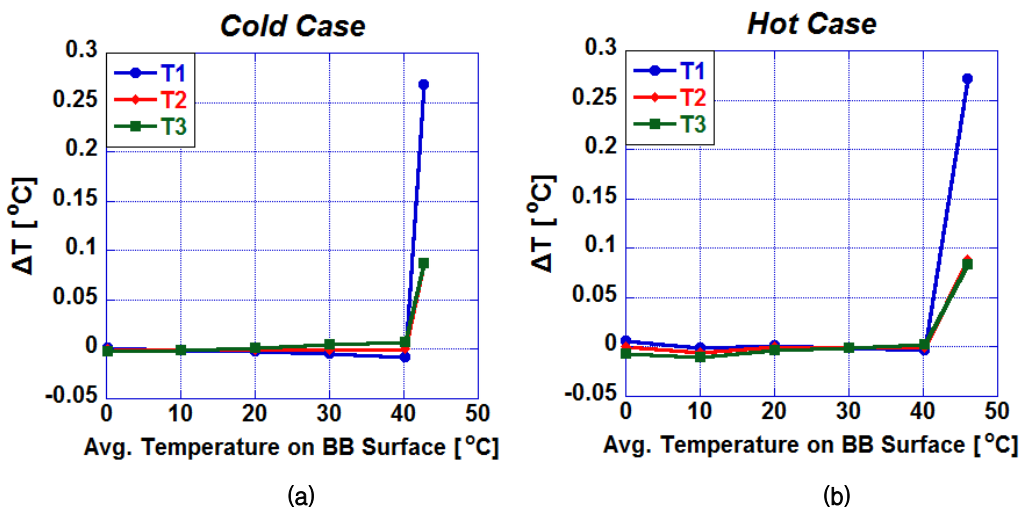


Fig. 7. Temperature Difference between Representative Surface Temperature and each Temperature Sensors for MEMS-based Black Body((a): Cold Case, (b): Hot Case)

마이크로 온도센서(T_1, T_2, T_3)의 평균 온도를 의미하며, A 와 B 는 수치 해석적 수식인 식(3)을 통해 2차 지수를 최소화한다.

$$J(A, B) \equiv \sum_{i=1}^{n_s} (T_{si} - T_{ESi})^2 \quad (3)$$

여기에서, n_s 는 추정하기 위한 표면온도 평균값의 전체 개수이다. 대표표면온도 정밀도는 정밀도 값이 작을수록 흑체 표면의 온도를 정확하게 추정이 가능하다. Fig. 8은 교정임무를 수행하는 냉각구간에서의 Cold/Hot조건에 대한 대표표면온도 추정 정밀도 해석 결과로서 하강구간의 대표표면온도 추정 정밀도는 0.0001°C미만의 정밀도를 보임으로써 흑체표면 온도를 높은 정밀도

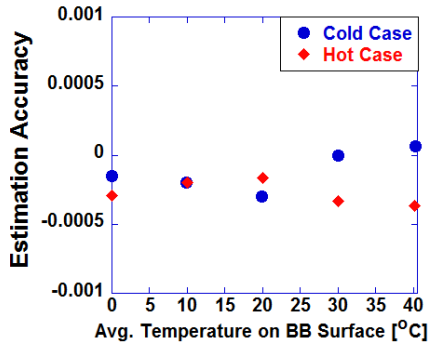


Fig. 8. Estimation Accuracy for MEMS-based Black Body at Cold and Hot Cases

로 추정 가능함을 알 수 있다.

2.3.2 히터 결함 시 기능검증

총래의 흑체시스템의 경우 흑체표면을 가열하기 위한 히터에 결함이 발생했을 때 보조 히터를 사용하여 교정임무를 수행하나 높은 온도 균일도 확보 및 대표표면온도 추정에 어려움이 존재하게 된다. 상기와 같이 히터의 결함이 발생했을 때 MEMS기반 흑체표면의 온도구배를 확인하기 위해 Fig. 3(a)에서 마이크로 히터가 1번, 2번, 4번, 5번 순서대로 결함이 발생했다고 가정하여 열해석을 수행하였다. 해석결과 Table 5와 같이 결함 개수가 증가할수록 가열 목표온도인 40°C를 만족하지 못하는 것을 알 수 있었다. Fig. 9는 결함개

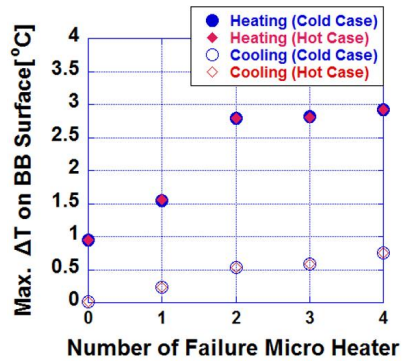


Fig. 10. Max. ΔT on MEMS-based Black Body Surface for Heating and Cooling at Cold and Hot Cases

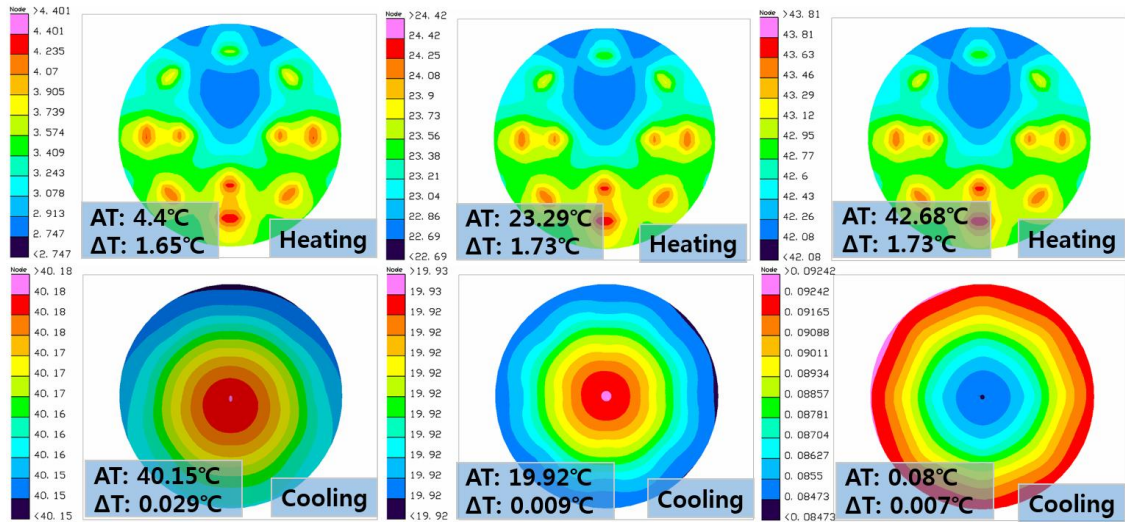


Fig. 9. Temperature Contour Maps on the MEMS-based Black Body Surface at Cold Case (AT: Average Temperature, Number of Failure Micro Heater: 1EA)

Table 5. Thermal Analysis Results for Number of Failure Micro Heaters at Cold and Hot Cases

Items	Cold Case		Hot Case	
Power	2W			
Heating Time	150s			
Failure Heater	T _{max}	Cooling Time	T _{max}	Cooling Time
0EA	42.61℃	1075s	45.94℃	2290s
1EA	38.73℃	1025s	42.07℃	2230s
2EA	33.45℃	965s	38.23℃	2160s
3EA	29.68℃	900s	34.34℃	2080s
4EA	25.92℃	830s	30.48℃	1995s

수에 따른 온도분포로 열모델에서 1번 마이크로 히터가 결함이 발생했을 경우 흑체 가열구간 및 냉각구간에서의 온도구배를 나타내며, Fig. 10과 같이 결함이 없을 경우 냉각 구간에서의 온도구배는 0.007K로 높은 표면온도 균일도를 보이나, 히터결함 개수 증가에 따라 흑체표면의 온도차이가 증가하게 되어 일정 개수 이상 결함이 발생할 경우 요구조건을 만족 못 할 것으로 예측된다.

III. 결 론

적외선센서 등과 같은 영상센서는 궤도운동에 따른 비균일 응답 특성에 대한 보정을 위해 흑체 시스템을 통한 보정을 수행하게 된다. 기존의 흑체시스템의 경우 저온에서 고온에 이르는 흑체기 준온도 제공을 위해 흑체로부터 외부에 위치한 방열판으로의 열적 전도 경로를 확보해야하는 등 시스템의 복잡화가 수반된다. 본 논문에서는 종래의 흑체시스템의 단점에 기인하여 MEMS기반의 흑체시스템을 제안하였다. 이를 통해 시스템 단순화 및 초경량, 저전력, 고정밀도의 구현이 가능하며, 흑체표면 근접위치에 히터와 온도센서의 고정밀화 배치가 가능하여 온도균일화 및 대표표면온도를 추정이 용이하다. MEMS기반 흑체시스템의 열설계는 150초 동안 흑체 표면을 가열하기 위한 마이크로 히터 및 잔열 수송 및 저온구간 온도정보를 제공하기 위한 방열판으로 구성되며, 열해석을 통해 교정임무수행 구간인 온도 하강구간에서 1K이하의 고온 및 저온의 온도정보 제공이 가능하고, 원형 대칭형태의 온도분포를 보임으로써 흑체의 대표표면온도 추정이 용이함을 확인하였으며, 마이크로 히터의 결함으로 인한 열해석을 수행하여 설계 타당성을 검증하였다. 향후 상기의 공정을 기반으로 MEMS기반 EM

(Engineering Model) 흑체를 설계 및 제작하여 표면온도 균일도, 대표표면온도 추정등의 기본 성능 및 기능 측정시험을 통해 설계 유효성을 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업(NRF-2014M1A3A3A02034813)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Reference

- 1) Xiong, X., Chiang, K., Esposito, J., Guenther, B., and Barnes, B. "MODIS on-orbit calibration and characterization", *Metrologia*, 40, S89-S92, 2003.
- 2) Walton, C. C., Sullivan, J. T., Rao, C. R. N. and Weinreb, D. C. "Correction for Detector Nonlinearities and Calibration Inconsistencies of the Infrared Channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. C2, pp. 3323-3337, February 15, 1998.
- 3) Bremer, J. C. "Alternative Blackbody Configurations for Infrared Calibration of Future GOES Imagers and Sounders", *Proceedings of the SPIE*, Vol. 4814, 2002..
- 4) Ono. A. and Sakuma. F. "Preflight and In-Flight Calibration Plan for ASTER", *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, Vol.13, April, 1996.
- 5) H. U. Oh., S. M. Shin., J. S. Hong., M. K., Lee. "On-Board Black Body Thermal Design and On-Orbit Thermal Analysis for Non-Uniformity Correction of Space Imagers", *Journal of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No. 10, October 2010, pp.1020-1025.
- 6) Thermal Desktop User's Guide, Ver. 5.0, Network Analysis Associates, Tempe, AZ, 2006.
- 7) SINDA/FLUINT User's Guide, Ver. 5.0, Network Analysis Associates, Tempe, AZ, 2006.
- 8) Baroncini. M., et al., "Characterization of an embedded microheater for gas sensors application", *Conference on Hsinchu*, April 2001, pp.164-167.

9) V.V. Vlassov, F. L. Sousa, A. P. C. Cuco, A. J. S. Nelo, "New Concept of Space Radiator with Variable Emittance", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 32, No. 4, 2010, pp400-408

10) J. S. Kang, Y. H. Jung, S. W. Yang, E. E. Kim, "Design Verification of Thermal Control Performance of Electronics for Small Electro-Optics", *Conference of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2009.4, pp734-737

11) M. H. Lee, D. W. Kim, K. L. Hwang and Y. K. Chang, "Space Simulation Test and

Thermal Verification of HAUSAT-2 STM by Using Surface Heaters", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 33, Nov. 2005, 11, pp.106-114.

12) S. T. Lee, S. H. Lee, Y. J. Choi, J. H. Lew, "Development of Attitude Control Thruster for KOMPSAT", *Journal of The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 1, Feb., 1997, pp.67-73

13) H. U. Oh, S. M. Shin, "Numerical study on the thermal design of on-board blackbody", *Journal of Aerospace Science and Technology*, 18, Mar., 2011, pp25-34.