

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(3), 240-245(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.3.240>

영상센서의 비균일 응답특성 보정을 위한 흑체 설계 및 성능검증과 보정오차 분석

신소민*

Black Body Design and Verification for Non-Uniformity Correction of Imaging Sensor and Uncertainty Analysis

Somin Shin*

Defence Space Technology Center

ABSTRACT

Each pixel of InfraRed(IR) sensor differently responds to IR light as time elapses or the sensor on/off operation is repeated. As a result, the quality of IR sensor image is deteriorated, and therefore NUC(Non-uniformity Correction) is periodically needed for IR sensor. In this paper, in order to perform NUC in the Satellite, on-board V-grooved blackbody is designed with a baffle so that the emissivity of black body is to be higher than 0.995 as well as the temperature deviation is less than 1°C in the range of the infrared wave length from 3.3 to 5.2μm. To check its performance, the emissivity and the surface temperature of the blackbody by TRT(Transfer Reference Thermometer) and IR Micrometer scanner are measured, respectively. From the results, black body design is verified and the uncertainty of NUC is estimated through the measurement results.

초 록

영상센서 중 적외선 센서는 시간경과 및 작동/비작동 반복에 따라 적외선 광원에 대한 응답특성이 조금씩 변화하며, 그 결과 영상품질이 저하된다. 그래서 인공위성에 탑재되는 적외선 센서의 경우 정상적인 임무수행을 위해 교정용 흑체로 주기적인 비균일 응답특성 보정을 실시할 수 있도록 해야 한다. 본 논문에서는 비균일 응답특성 보정을 위해, 적외선 센서의 파장대역 3.3~5.2μm에서 흑체 방사율이 0.995이상 평균온도차 1°C 이하가 되도록 V-그루브(groove) 타입의 흑체를 설계하였다. 성능검증을 위해 흑체의 방사율과 표면 온도를 측정하여 검증하였으며, 그 결과로부터 비균일 응답특성 보정오차를 산출하였다.

Key Words : Black Body(흑체), Emissivity(방사율), IR Sensor(적외선 센서), Non-Uniformity Correction(비균일 응답특성 보정)

1. 서 론

적외선 영상센서의 각 픽셀은 시간경과 및 작동/비작동 반복에 따라 적외선 광원에 대해 조

금씩 다르게 응답한다. 즉, 같은 광원에 대해 비균일한 응답을 출력하고 이로써 촬영된 적외선 영상품질의 저하를 유발한다. 이러한 비균일 응답특성이 적외선 영상품질에 미치는 영향에 대해

† Received: April 4, 2012 Accepted: February 29, 2013

* Corresponding author, E-mail : ssm@add.re.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

Dimmock은 시스템이 작동하는 주변환경의 광자 플럭스 밀도에 따른 노이즈 로그함수를 제시하고, 이 함수를 이용해 적외선 센서의 성능을 제한하는 비균일 응답특성을 설명하였다[1,2]. Mooney와 Shepherd는 적외선 영상센서의 시간 평균 및 공간에 관한 비균일 응답특성을 연구하였고, 공간에 대한 비균일성은 센서의 성능에 영향을 미치므로 보정을 해야 함을 지적하였다[3]. 비균일 응답특성 보정장비의 구성품인 흑체의 특성에 대해 연구한 Mazetta은 평판 타입보다 그루브 타입의 흑체가 측정과정에 따른 방사율의 변화가 없었고, 흑체 온도에 따른 균일도에 미치는 영향이 일정함을 지적하였다[4]. 이외에도 저온영역에서 고온영역까지 원하는 임무수행시점에서 적외선 영상센서를 보정할 수 있는 흑체의 형상에 관한 연구 등이 수행되었다[5]. 특히, 인공위성에 탑재되는 우주용 적외선 센서의 경우 지상교정이 불가능하므로 임무기간 동안 정상적인 임무수행을 위해 위성을 설계할 때 교정용 흑체 및 주기적인 교정을 위한 구동장치를 반영하는 것이 필수적이다[6,7]. 이러한 인공위성용 비균일 응답특성 교정에 관한 연구로는 1999년 발사된 Terra위성 기상탐재체 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrodiometer)의 사례가 대표적이다[8,9].

본 논문에서는 인공위성에 탑재되는 적외선 영상센서 비균일도 보정을 위해 고방사율의 흑체를 설계 및 제작하였고, 지상시험을 통해 흑체의 성능을 검증하였다. 또한 그 결과로부터 비균일 응답특성 보정오차를 산출하였다.

흑체설계 시 고려되는 적외선 영상센서의 측정 파장은 $3.3\sim 5.2\mu\text{m}$ 대역이며, 방사율 및 온도 균일도가 높도록 배플을 장착한 V-그루브 타입의 흑체를 설계하였다. 온도 조절기능을 부여하여 상온 20°C 및 40°C 에서의 온도 측정값을 이용하여 비균일 응답특성이 보정되도록 설계하였다. 제작된 흑체의 성능분석을 위해 TRT와 IR 마이크로미터 스캐너를 이용하여, 방사율, 표면온도를 측정 및 면적오차를 계산하고 최종적으로 보정오차를 산출하였다. 이렇게 도출된 보정오차는 발사 후 영상 검보정을 실시할 때 기초자료로 활용된다.

II. 본 론

2.1 흑체 설계

Figure 1은 적외선 영상센서의 비균일도 보정

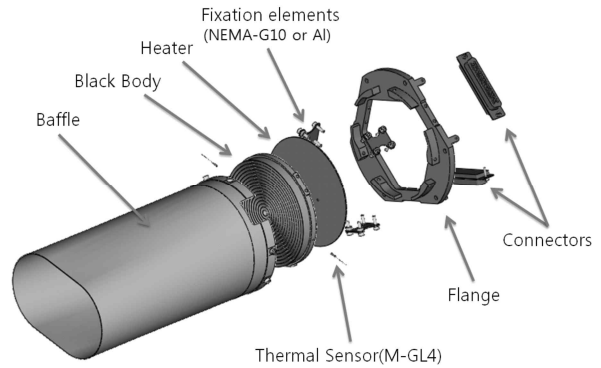


Fig. 1. Black Body Configuration

을 위한 흑체의 형상을 나타낸다. 이 흑체는 0.995이상의 방사율을 갖도록 STEEP3 프로그램을 이용하여 형상설계가 이루어졌다[11]. 흑체는 3mm 피치인 V-그루브로 구성되며, 전도성이 좋은 Al6063 재질로 제작되었다. 표면은 검은색 산화피막으로 처리하였다.

비균일도 응답특성 보정을 위한 흑체의 영상(Image)은 교정 반사경(Mirror) 구동장치를 이용하여 검출기 영상센서에 맺히게 된다[7]. 검출기에서 흑체까지의 광경로(Light path) 주변의 잡광이 검출기 영상에 영향을 미치지 않도록 배플을 고려하여 차단하였다. 배플의 내부표면은 0.85이상의 방사율을 갖도록 랩핑가공을 하여 배플이 흑체 복사에 미치는 영향을 최소화하였다. 또한 배플 외부에는 복사 열전달을 차단하기 위한 다층박막단열재가 적용되어, 흑체 주변구조물에 의한 온도 영향을 최소화하여 흑체의 온도 균일도를 높이도록 하였다. 40°C 까지 흑체 온도를 높이기 위해 흑체의 후면에 히터를 장착하였다. 이 히터는 캡톤 타입으로, 흑체의 표면온도를 균일하게 만들기 위해 저항선의 밀도가 높도록 설계하였다. 정확도 0.03K의 백금저항온도계(Pt100)를 장착하여 흑체의 대표온도를 측정하였다. 흑체를 인공위성에 장착할 때 히터로부터 균일하게 열전달이 되고, 외부로 열손실이 없도록 단열 와셔 및 티타늄으로 만든 단열 고정장치를 적용하였다. 히터 후면에도 다층박막단열재를 적용하여 외부 열영향을 최소화하였다.

우주환경에서 흑체의 표면온도 균일도를 확인하기 위해 상용 프로그램인 Thermal Desktop으로 흑체 및 적외선 탐재체의 형상을 구축하고, SINDA/FLUINT와 RAD CAD를 이용하여 전도와 복사를 고려한 열해석을 실시하였다[12]. 해석 조건은 실제 작동환경처럼 탐재체 장착부위를 상온 10°C 로 유지시키고 히터를 발열시켜 흑체의 온도를 40°C 부근으로 상승시켰다. Fig. 2는 이때

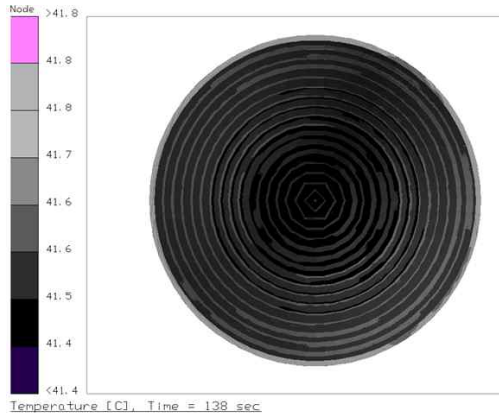


Fig. 2. Temperature Distribution on the BB surface

의 온도분포를 나타낸다. 흑체표면의 최대 온도는 0.40°C 로 요구조건인 평균온도차 1.0°C 이하 조건을 충분히 만족함을 확인하였다.

2.2 적외선 영상센서 비균일 응답특성 보정 원리

적외선 영상센서의 응답을 보정을 위한 방법으로는 일점교정(One Point Calibration), 이점교정(Two Point Calibration) 및 다점 교정(Multi Point Calibration) 등 다양한 방법이 있으나, 두 온도지점의 센서 응답으로부터 보정계수를 추출하는 이점교정법이 정확도 및 효율이 좋아 널리 사용된다[9-10,13]. 교정된 영상의 응답 값은 디지털 수(Digital Number, DN)로 나타나는데, 이 값은 복사량에 대해 선형적인 특성이 있으며, 보정 기울기(Gain)와 보정상수항(Offset)를 이용해 다음 식(1)과 같이 표현된다[10].

$$DN_i(\phi) = G_i\phi + O_i \quad (1)$$

여기서 DN_i 는 i 픽셀에서 디지털 수, G_i 는 i 픽셀에서 보정기울기, O_i 는 i 픽셀의 보정상수, 그리고 ϕ 는 입력복사량을 가리킨다. $\overline{DN}(\phi_1)$, $\overline{DN}(\phi_2)$ 는 두 개의 교정온도에서 촬영된 디지털 수의 평균값을 나타낸다. 각 픽셀에서 보정기울기와 보정상수항은 식(2)와 같이 구해진다.

$$G_i = \frac{\overline{DN}(\phi_2) - \overline{DN}(\phi_1)}{DN_i(\phi_2) - DN_i(\phi_1)} \quad (2)$$

$$O_i = DN_i(\phi_1) - G_i \times DN_i(\phi_1)$$

ϕ_1 과 ϕ_2 는 비균일 응답특성 보정을 실시하는 두 가지 온도에서의 복사량을 의미한다. 식(1)의

정확도는 복사량의 정확도와 비례하며, 복사량의 오차는 비균일 응답특성의 보정오차라 할 수 있다. 본 논문에서 비균일 응답특성 보정을 위한 계수의 추출은 상온 20°C 와 40°C 에서 실시한다.

2.3 비균일 응답특성 보정오차분석

2.2절에서 언급하였듯이, 복사량의 오차는 비균일 응답특성 보정오차와 비례하며, 이는 식(3)의 복사에너지 식에 의하여 보정용 흑체의 방사율, 표면온도 균일도, 적외선센서 측정면적오차에 영향을 받는다. 각각의 픽셀에서의 복사량의 보정오차는 식(4)에서 오차의 고차항을 무시하고 식(5)와 같이 방사율, 온도 균일도, 관측면적의 오차를 합산하여 산정한다.

$$\phi_i = \sigma\epsilon_i A_i T_i^4 \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\phi_i}{\phi_i} = \frac{\sigma(\epsilon_i + \Delta\epsilon_i)(A_i + \Delta A_i)(T_i + \Delta T_i)^4 - \sigma\epsilon_i A_i T_i^4}{\sigma\epsilon_i A_i T_i^4} \quad (4)$$

$$\cong \frac{\Delta\epsilon_i}{\epsilon_i} + \frac{\Delta A_i}{A_i} + \frac{4\Delta T_i}{T_i} \quad (5)$$

여기서, σ 는 슈테판-볼츠만 상수, ϵ_i , A_i , T_i , ϕ_i 는 각각 i 픽셀에서 측정된 흑체의 방사율, 면적, 온도 및 복사에너지이며, $\Delta\epsilon_i$, ΔA_i , ΔT_i , $\Delta\phi_i$ 는 각각의 오차이다.

2.3.1 관측면적오차 분석

Figure 3은 인공위성에 탑재되는 적외선 영상센서의 도식으로 영상센서는 두 개의 검출기 모듈로 구성이 되며, 각 모듈은 1208×8 픽셀로 구성된다. 전체 길이는 cross-track방향(x-축)으로 48mm , along-track방향(y-축)으로 1.12mm 이다. 각 픽셀이 위치한 지점에서 바라보는 교정용 흑체의 면적 및 면적오차를 계산함으로써 관측면적 오차를 도출한다.

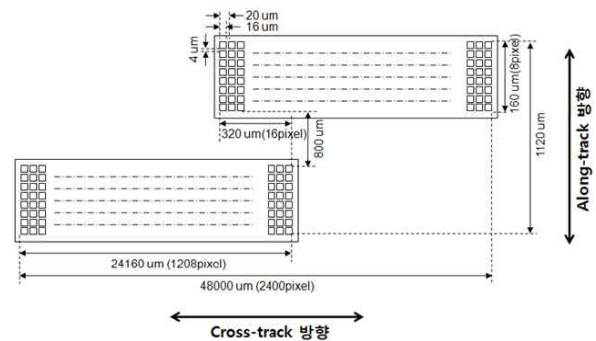


Fig. 3. Dimension of IR Detector

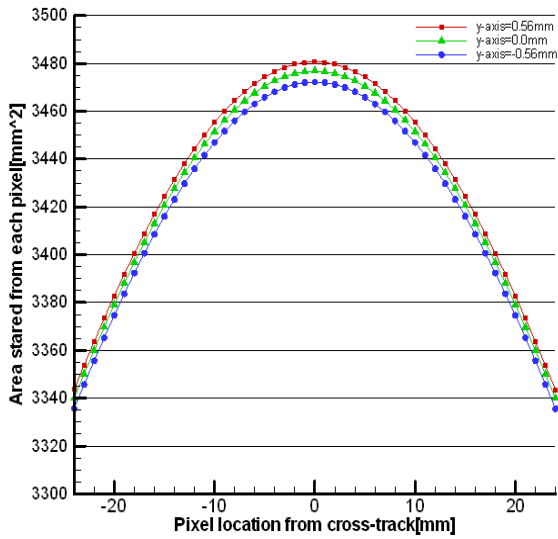


Fig. 4. Stared Area Deviation of Each Pixel Group

계산의 편의를 위하여 Fig. 4와 같이 검출기 픽셀을 가로 50개 x 세로 14개의 픽셀을 한 그룹으로 묶어, x-축방향으로 1mm 간격 및 Y-축방향으로 0.56mm 간격에 대해서 면적 오차를 계산한다. 중심 픽셀이 보는 흑체의 면적은 3477mm²이고 최대 면적 오차는 3.9%이고 그 표준편차는 1.3%이다.

2.3.2 방사율과 표면온도 측정 및 오차분석

본 연구에서 흑체의 성능은 크게 방사율과 40°C의 표면온도 균일도로 구분하여 측정한다. 우선 방사율 측정은 흑체 히터에 각각 2, 4, 6, 8V의 전압을 인가 후 흑체온도가 안정화된 상태에서의 흑체 표면온도를 TRT로 측정하고 동시에 흑체에 내장된 온도센서의 출력 $V_e(T)$ 값과 식(6)의 Sakuma-Hattori 식을 이용해서 식(7)과 같이 방사율을 계산하였다[13].

$$S(T) = \frac{a_1}{\exp\left(\frac{c_2}{a_2 T + a_3}\right) - 1} \quad (6)$$

$$\epsilon = \frac{V_e(T)}{S(T)} \quad (7)$$

여기에서, $V_e(T)$ 는 TRT로 부터의 출력값, T는 흑체표면온도(단위 Kelvin), c_2 는 2차 방사상수(=0.014388mK), a_1, a_2, a_3 는 Sakuma-Hattori 계수($a_1=1.44100 \times 10^7$, $a_2=9.690548 \times 10^{-6}$, $a_3=2.521098 \times 10^{-4}$)이다.

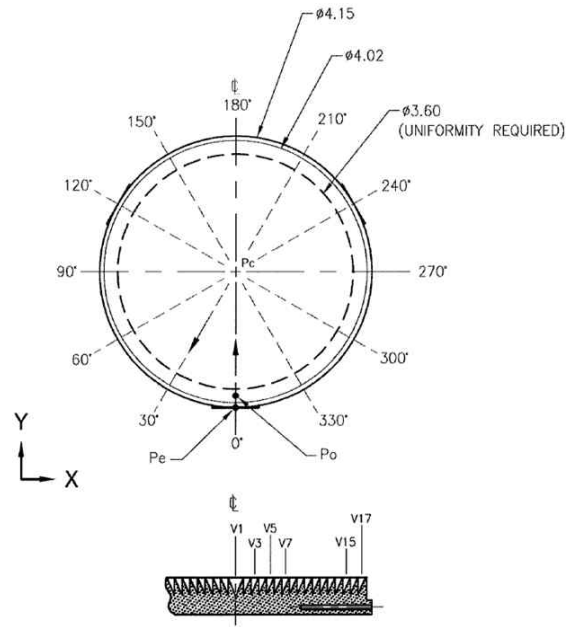


Fig. 5. Temperature Measurement using IR Micro-scanner

Table 1. Black Body Emissivity Measurement

Input voltage (V)		2	4	6	8
Temperature (°C)	Sensor (Pt100)	22.679	26.860	34.276	40.09
	TRT	22.475	26.625	33.996	39.83
Emissivity		0.9968	0.9964	0.9959	0.9962

Table 1은 식(7)로부터 도출된 방사율을 나타낸다. 흑체 방사율의 평균값은 0.996으로 요구조건 0.995이상을 만족하며, 방사율 측정오차는 0.3%이다.

흑체의 표면온도를 측정하기 위해 IR 마이크로미터 스캐너는 초당 1.02mm으로 흑체 위를 이동하면서 연속적으로 측정을 수행한다. Fig. 5에 나타나듯이 30° 간격으로 총 12번을 측정하였다.

Figure 6은 흑체 표면온도를 측정하기 위한 온도 제어방법을 도식화하였다. 흑체내부의 백금저항

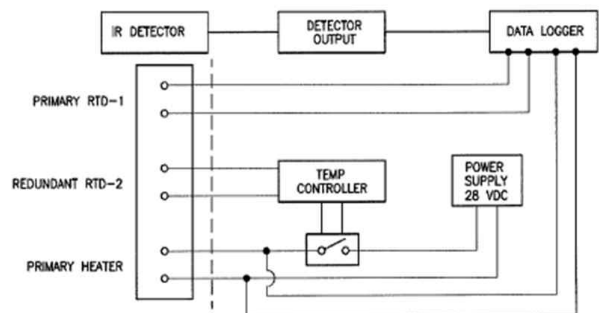


Fig. 6. Uniformity Measurement Set-up

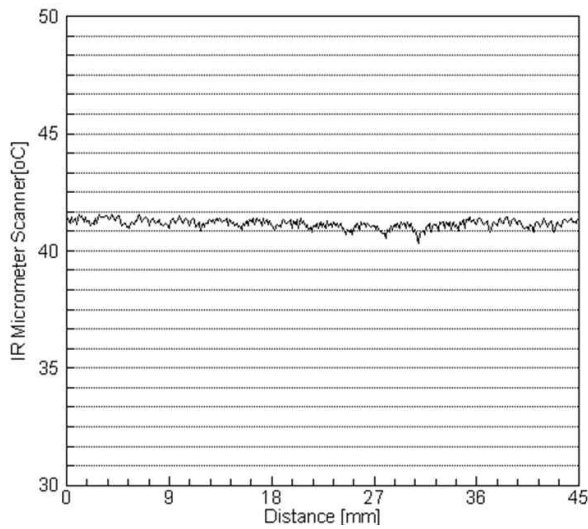


Fig. 7. Surface Temperature Distribution

온도계가 온도제어기에 연결되어 히터의 전압을 인가한다. 이 온도제어기의 제어정밀도는 0.25°C 이다. Fig. 7은 흑체 표면온도 측정 결과 중 가장 큰 구배를 보인 180° 지점에서의 표면온도 분포도를 나타내었다. 흑체의 V-그루브 형상에 맞춰 3mm 간격으로 산과 골 형태로 온도분포가 나타남을 확인할 수 있다. 나머지 11개의 방향에서 측정한 표면온도 분포도 역시 산과 골 형태로 나타났으며, 각 방향에서 최대온도차는 $0.88\sim 1.16^{\circ}\text{C}$ 수준이었다. 180° 인 경우에 최대 온도차는 1.26°C , 평균온도차는 0.42°C 로 요구조건인 평균 온도차 1.0°C 이하를 만족함을 확인하였다. 이는 온도 제어정밀도를 포함하여 식(5)에 정의된 오차식으로 환산하면 약 0.5%가 된다. 지상시험에서 필수적으로 존재하는 대류의 영향 등을 고려하면, 실제 진공의 우주환경에서는 표면온도균일도가 더 균일할 것으로 예측된다.

최종적으로 비균일도 식(5)로 부터 면적오차 1.3%, 방사율 오차 0.3%, 온도구배오차 0.5%를 합산하여 2.1%의 비균일도 보정오차가 도출된다.

III. 결 론

본 논문에서는 인공위성에 탑재되는 적외선 센서의 주기적인 비균일 응답특성 보정을 위하여 교정용 흑체를 설계하였으며, 흑체의 설계요구조건 만족여부 및 그 성능을 지상시험을 통해 검증하였다. 또한 측정결과에서 주기적인 교정 수행 시 발생하는 비균일도 보정오차를 구하여 영상검보정시 기초자료로 활용이 가능하도록 하였다.

설계된 흑체는 $3.3\sim 5.2\mu\text{m}$ 파장대역에서 흑체 방사율이 0.995이상 및 평균온도차가 1° 도 이하가 되도록 피치 3mm 인 V-그루브 형상으로 설계되었고, 주변에 대한 열영향을 최소화하도록 배플 및 다층박막단열재를 장착하였다.

성능검증을 위해 방사율 및 표면온도의 균일도를 측정하였다. 방사율은 흑체온도가 안정화된 상태에서 TRT로 측정하였고 평균 0.996으로 요구조건 0.995이상을 만족하였다. 흑체 표면온도는 클린룸에서 IR 마이크로미터 스캐너를 이용하여 측정하였으며, 측정된 표면온도는 그루브 형상에 따라 3mm 간격으로 산과 골 형상으로 나타남을 확인하였다. 흑체의 표면온도의 최대 차는 1.26°C 및 평균온도차 0.42°C 로 요구조건 1.0°C 이하를 만족함을 확인하였다. 설계단계에서 수행한 열해석 결과의 최대온도차 0.40°C 에 비해 시험결과와 최대온도차(1.26°C)가 크지만, 지상시험에서 필수적으로 존재하는 대류의 영향 등을 고려하면, 실제 진공의 우주환경에서는 표면온도가 더 균일할 것으로 예측된다.

최종적으로 흑체 성능으로부터 발생하는 영상 센서의 비균일도 보정오차를 면적오차, 방사율 오차, 온도구배오차를 합산해서 구하였으며 최대 2.1%가 됨을 확인하였다.

References

- 1) Dimmock, J. O., "Capabilities and limitations of infrared imaging systems", Proceedings of the SPIE, Vol. 32, 1972, pp.9~23.
- 2) Dimmock, J. O., "Capabilities and limitations of infrared vidicons vs. infrared scanning systems", Lincoln Laboratory Technical Report, TR 1971-49, 1971.
- 3) Mooney, J. M., and Shepherd, F. D., "Characterizing IR FPA nonuniformity and IR camera spatial noise", Infrared Physics & Technology 37, 1996, pp.595~606.
- 4) Mazzetta, J. A., Medina, M. A., Scopatz, S. D., Sgheiza, J. E., "Blackbody Source Technology Trends", Proceedings of the SPIE, Vol. 8014, August 2011, pp. 1~11.
- 5) James C. B., "Alternative Blackbody Configurations for Infrared Calibration of Future GOES Imagers and Sounders", Proceedings of the SPIE, Vol. 4814, 2002, pp. 183~193.

- 6) Oh, H. U., Shin S., Hong, J. S., Lee, M. K. "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.
- 7) Lee, K. M., Oh, H. U., "Calibration Mirror Mechanism with Fail-safe Function", Journal of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 39, No. 7, July 2011, pp. 682~687.
- 8) Xiong, X., Chiang, K., Esposito, J., Guenther, B., and Barnes, B., "MODIS on-orbit calibration and characterization", Metrologia, Vol. 40, Issue 1, February 2003, S89-S92.
- 9) 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, February 1998, pp. 3323-3337.
- 10) Miao, L. F., Xu, Q., Zhang, M. T., Sun, D. X., and Liu, Y. N., "Real-time implementation of multi-point nonuniformity correction for IRFPA based on FPGA", Proceedings of the SPIE, Vol. 7383, June 2009, pp. 1~8.
- 11) <http://www.virial.com/>
- 12) Thermal Desktop User's Manual, A CAD Based System for Thermal Analysis and Design, Version 5.0, C & R Technologies.
- 13) Trishchenko, A.P. and Li Z. "A method for the correction of AVHRR onboard IR calibration in the event of short-term radiative contamination", International Journal of Remote Sensing, Vol. 22, No. 17, 2001, pp. 3619 - 3624.
- 14) Sakuma, F. and Hattori, S., "Temperature: Its measurement and control in science and industry", J. F. Schooley, AIP, New York, 1982, pp. 421~427.