

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.10.1020

영상센서의 비균일 출력특성 교정용 흑체의 열설계 및 궤도 열해석

오현웅*, 신소민*, 홍주성**, 이민규**

On-Board Black Body Thermal Design and On-Orbit Thermal Analysis for Non-Uniformity Correction of Space Imagers

Hyun-Ung Oh*, Somin Shin*, Ju-Sung Hong** and Min-Kyu Lee**

ABSTRACT

On-board black body is used for radiation temperature calibration of spaceborne radiometers and imaging systems. The thermal design of black body proposed in this study is basically composed of heaters to heat-up the black body from low to high temperature during the calibration, heat pipe to transfer residual heat on the black body just after calibration to radiator on the S/C and heaters on the radiator to keep the certain temperature range of the black body during non-calibration. In the present work, the effectiveness of thermal design of on-board black body has been investigated by on-orbit thermal analysis.

초 록

탑재 교정용 흑체는 우주용 영상센서의 시간경과 및 재 구동에 따른 센서의 특성변화 교정을 통한 영상품질향상을 위해 적용된다. 본 논문에서 제안한 영상센서의 비균일 특성 교정을 위한 흑체 열설계는 저온에서 고온에 이르는 흑체의 온도정보 제공을 위한 흑체가열용 히터, 흑체 가열 후 잔열 수송 및 심해우주로의 열 방출을 위한 히트파이프와 방열판 그리고 비교정임무 수행동안 흑체가 특정온도를 유지하며 원하는 시점에서 언제든지 교정임무 수행이 가능하도록 하는 방열판용 히터로 구성된다. 흑체 열설계에 대한 타당성을 궤도 열해석을 통해 입증하였다.

Key Words : Black Body(흑체), Emissivity(방사율), Non-Uniformity(비균일성)

1. 서 론

우주용 적외선 영상센서는 임무수행기간 중 우주환경에서의 시간경과 및 비작동/작동 반복에 따라 센서의 gain 또는 offset 특성변화를 비롯하여 출력특성의 비균일성이 존재한다. 영상품질향상을 위해서는 영상획득 전에 이러한 센서의

특성변화를 고려한 교정임무 수행이 필수 불가결하며, 적외선 센서의 특성변화 교정을 위해 일반적으로 탑재 교정용 흑체가 적용되고 있다.

Sapritsky et al. [1]은 적외선 영상센서의 교정을 위해 중·저온의 온도정보를 제공하며, 흑체가열 및 냉각에 따른 흑체 표면에서의 비균일 온도특성 최소화를 위한 센서 및 히터 설계를 통해 고정밀 교정용 흑체를 개발하였다. GIFTS (Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer) [2-3] 프로그램의 요구조건 충족을 위해 탑재 교정용 흑체가 개발되었으며, 흑체의 표면온도 추정을 위해 흑체에 내장된 온도센서의

† 2010년 8월 2일 접수 ~ 2010년 9월 15일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 영상정보체계개발단
교신저자, E-mail : ohlee314kr@yahoo.co.kr

대전시 유성구 유성우체국 35-5호

** 정회원, 삼성탈레스 기구설계그룹

하니스 와이어로부터의 열손실 최소화를 위한 온도센서를 개발하여 흑체의 성능을 향상시켰다. Xiong et al. [4]이 제안한 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrodiometer)를 비롯한 우주용 적외선 영상센서 교정용 흑체[5-7]가 우주 프로그램에 적용 되었다.

흑체 설계의 주된 목적은 영상센서의 교정을 위해 흑체 표면에서의 균일한 온도와 센서로부터 표면온도가 추정 가능한 정확한 대표 표면온도를 제공함에 있으며, 이를 위해 고신뢰도의 정확한 열설계가 요구된다. 일반적으로 영상센서의 교정을 위해 상이한 온도정보가 제공 가능 하도록 두 개의 흑체가 사용되고 있으나, 본 논문에서는 영상촬영 직전에 원하는 시점에서 교정업무 수행이 가능하고, 하나의 흑체로 저온에서 고온에 이르는 교정온도정보 제공이 가능하도록 하여 영상센서의 gain과 offset 특성을 비롯한 센서의 비균일 출력 특성에 대한 교정이 가능하도록 하는 흑체를 제안하였다. 상기의 흑체설계를 위해 고방사율을 갖는 V-groove 형상을 갖는 흑체, 흑체의 가열을 위한 히터, 가열 후 잔열 수송 및 심해우주환경으로의 방열을 위한 히트파이프와 방열판 그리고 영상촬영 직전에 원하는 시점에서 교정업무 수행이 가능하도록 흑체를 일정 저온 온도로 유지하는 방열판에 장착된 히터로 구성되는 흑체 열 설계를 제안하였다. 흑체 표면온도 구배 최소화 및 지상 성능검증 시험을 위한 히트파이프 장착 및 배치방안을 제안하였다. 또한 흑체의 열설계 성능 검증을 위한 worst Hot과 Cold 조건에서의 궤도 열 해석을 실시하여 흑체 열 설계의 타당성을 검증하였다.

II. 본 론

2.1 탑재 교정용 흑체설계 요구조건

탑재 교정용 흑체 열설계를 위한 주요 인자는 140초 이내에 0°C에서 40°C까지 흑체 온도상승이 가능하고, 상기 온도상승 구간에서 1K 이하의 흑체 표면에서의 온도구배가 얻어져야 하며, 영상획득 전 궤도당 반드시 한번의 교정업무 수행이 가능하여야 함이다.

2.2 탑재 교정용 흑체 열설계 구성

Fig. 1은 상기의 흑체 열설계 요구조건을 충족시키기 위한 흑체 열설계의 구성을 나타낸다. 흑체 열설계는 0°C에서 40°C까지 흑체 온도상승을 위한 히터(Black Body Heater 1,2), 흑체 가열 후

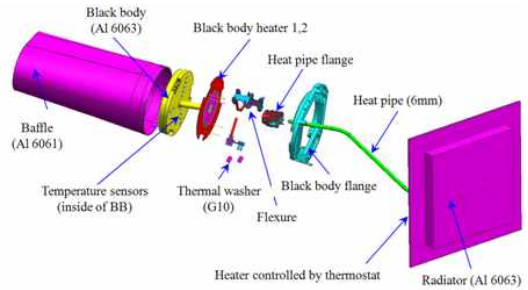


Fig. 1. Black Body Thermal Design Configuration

의 잔열을 위성체 외부로 수송하는 직경 6mm 히트파이프와 방열판으로 구성된다. 방열판에는 흑체 비운용시 흑체를 0°C 부근의 일정온도로 유지하여 필요에 따라 언제든지 교정업무수행이 가능하도록 하는 방열판용 히터가 장착되며 시스템의 편이성을 위해 써모스탯을 이용하여 온도제어를 실시한다. 흑체를 위성체 본체에 장착하기 위한 장착용 플렌지(Black body flange)와 흑체 사이에는 절연용 와셔(G10)를 적용하여 열전도적 단열을 실시하고, 방열판과 위성본체와의 열복사적 단열을 위하여 히트파이프를 포함한 방열판의 내부면에는 다층박막단열재(MLI: Multi Layer Insulator)[8]가 적용된다.

흑체 전면부에는 외부로 부터의 열원차단 및 흑체의 온도정보를 손실없이 효율적으로 전달하기 위하여 내부표면에서 0.85이상의 반사율을 갖는 baffle을 장착하였다. 흑체 내부에는 흑체 표면온도 추정을 위한 온도센서를 내장하였다. 히트파이프는 지상시험 형상을 고려하여 지상과 수평이 유지 가능하도록 배치하였으며, 흑체내부에 장착된 온도센서로 부터 가중치 적용을 통한 흑체 표면온도 추정이 용이함과 동시에 표면온도구배가 최소화 되도록 히트파이프를 흑체 후면부에서 수직으로 장착할 수 있도록 설계하였다. 또한 발사환경에서 히트파이프를 통한 흑체로의 하중 전달 및 궤도 환경하에서 히트파이프의 열변형으로 인한 흑체의 정렬 흐트러짐 방지를 위하여 히트파이프에는 충분한 벤딩을 적용하였다.

Fig. 2는 흑체 후면부에 장착된 히터형상을 나타낸다. 방열판과 연결된 히트파이프를 통한 흑체의 온도구배 발생을 보상하기 위하여 흑체 후면부에는 각각 52W (Heater 1)와 33W (Heater 2)의 용량을 갖는 두 개의 히터를 적용하였다. 히터용량과 방열판 크기(0.16m×0.16m)는 상기의 표면온도 구배 및 한 궤도에서 한번의 교정업무수행이 가능한 요구조건을 충족하도록 최적화 설계되었다.

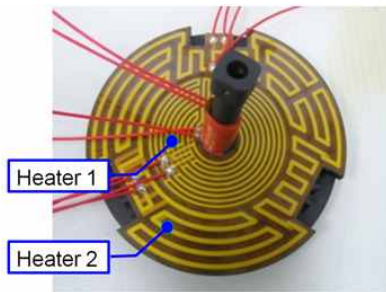


Fig. 2. Heater Configuration of Black Body Back Side

2.3 탑재 교정용 흑체 방사율 측정

Fig. 3은 V-grooves를 갖는 흑체 표면 형상을 나타낸다. 흑체에 요구된 방사율은 0.99 이상으로 이를 만족하기 위하여 흑체 표면에 V-grooves와 EoL (End of Life)에서 방사율 0.96의 특성을 갖는 Nextel-Velvet-811-21 코팅을 적용하였다. 일반적으로 V-grooves가 아닌 보통면은 완전한 반구 방향으로 에너지를 발산하지만, Fig. 3과 같은 형태를 갖는 흑체의 경우, V-grooves에 의하여 특정방향으로 에너지를 모아주게 되는 효과로 에너지 양이 증가하게 되고 방사율이 높아지게 된다.

Fig. 4는 상기와 같이 제작된 흑체의 방사율 측정을 위한 시험 구성을 나타낸다. 흑체 히터에 각각 2, 4, 6, 8V를 인가 후 흑체온도가 saturation된 steady state 상태에서의 흑체 표면

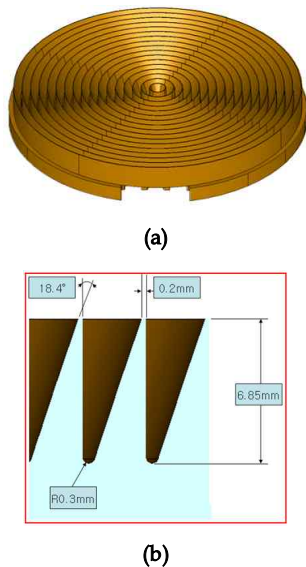


Fig. 3. 3D View of Black Body Front Side (a) and Dimension of V-Grooves (b)

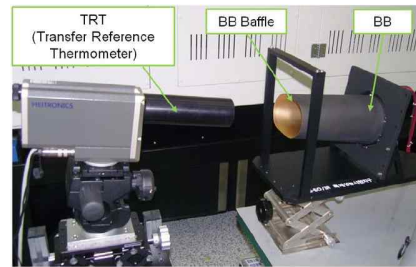


Fig. 4. Test Set-Up for Measuring Emissivity

Table 1. Black Body Emissivity Measurement

Input voltage (V)		2	4	6	8
Saturated Temp. (°C)	Sensor (BB)	22.679	26.860	34.276	42.374
	TRT	22.475	26.625	33.996	42.201
Emissivity		0.9968	0.9964	0.9959	0.9950

온도를 TRT (Transfer Reference Thermometer)로 측정하고 동시에 흑체에 내장된 센서의 출력치로 부터 다음의 Sakuma-Hattori[9]식을 이용하여 방사율(ϵ)을 계산하였다.

$$\epsilon = V_{\epsilon}(T) / [a_1 / \exp(\frac{c_2}{a_2 T + a_3}) - 1] \quad (1)$$

여기에서, c_2 는 2차방사상수(=0.014388mK), a_1, a_2, a_3 는 fit 계수 ($a_1=1.44100e+7, a_2=9.690548e-6, a_3=2.521098e-4$), $V_{\epsilon}(T)$ 는 TRT로 부터의 출력치 그리고 T 는 흑체온도센서로 부터의 출력치를 나타낸다. Table 1은 상기식으로부터 도출된 방사율(ϵ)을 나타내며 V-grooves와 상기의 코팅을 적용하였을 경우의 흑체 방사율은 0.995이상임을 알 수 있다.

2.4 탑재 교정용 흑체 궤도 열해석 결과

Fig. 1과 같이 구성된 흑체 열설계의 타당성을 검증하기 위하여 worst Hot과 Cold 조건에서의 궤도 열해석을 실시하였다. 궤도 열해석에 적용된 흑체의 경계 온도조건으로 Hot과 Cold 조건에 대하여 각각 9°C와 33°C를 적용하였으며 궤도 운용프로파일을 고려하여 열해석을 실시하였다.

Fig. 5는 흑체 궤도 열해석을 위한 열모델을 나타내며 정확한 흑체의 표면온도 분석을 위해 총1975개의 노드로 구성하였다. Table 2에는 해석에 적용된 열물성치를 나타낸다.



Fig. 5. Black Body Thermal Model

흑체의 열해석을 위해 궤도 열해석 상용 S/W 를 이용하였으며, GMM(Geometric Mathematical Model)은 Thermal Desktop [10]으로 구축하였고, 궤도 열해석에는 SINDA/FLUINT와 RADCAD [11]를 적용하였다.

Fig. 6은 Cold 조건에서의 열해석 결과로 흑체와 방열판의 온도프로파일을 나타낸다. 흑체가 비운용시에는 방열판에 장착된 히터의 열제어에 의해 효율적으로 0°C 부근을 유지하며 교정업무 수행과 동시에 흑체의 온도는 140초 이내에 0°C

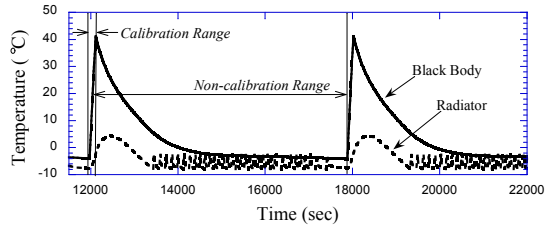


Fig. 6. Temperature Profiles of Black Body and Radiator Obtained from On-Orbit Thermal Analysis Results (Cold Case)

에서 40°C까지 상승 가능함을 알 수 있다. 또한 해석결과는 설계가 의도한대로 궤도당 한번의 교정업무 수행이 가능함을 나타낸다. Table 3은 Hot과 Cold 조건에서의 흑체의 궤도 열해석 결과로 각각 히터 파워, 히터 듀티, 흑체가열 소요 시간 및 표면온도구배를 나타낸다.

Fig. 7은 0°C에서 40°C까지 흑체 온도 상승 중, 흑체의 평균온도가 3°C, 13°C, 26°C 그리고 39°C에 도달시 흑체 표면의 온도구배를 나타낸

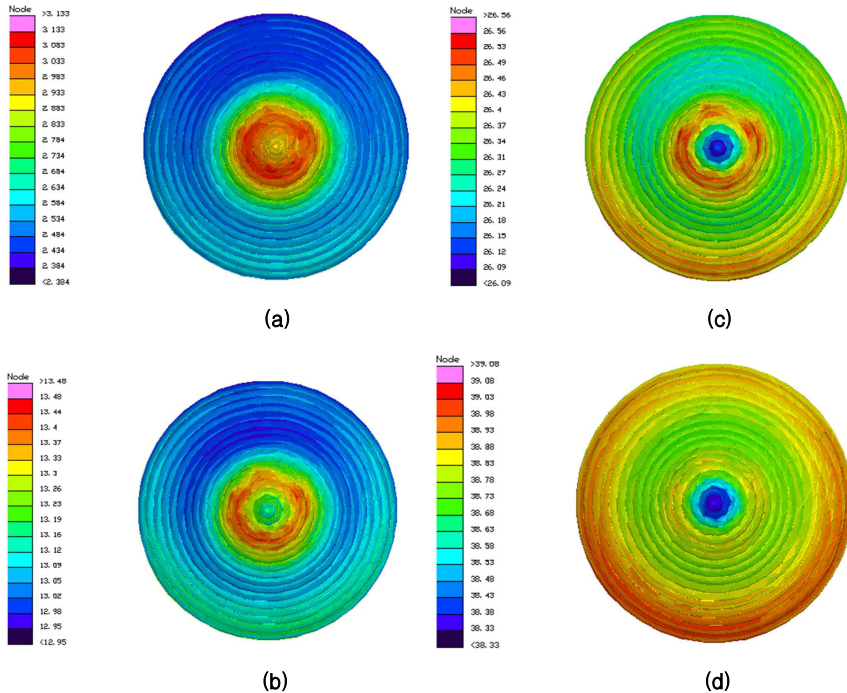


Fig. 7. Temperature contour maps on the BB surface at cold case (a) Ave. T=3°C, DT=0.75°C; (b) Ave. T=13°C, DT=0.53°C; (c) Ave. T=26°C, DT=0.47°C; (d) Ave. T=39°C, DT=0.75°C [Ave. T: BB average temperature during heat-up, DT: Temperature gradient on the BB surface]

Table 2. Thermophysical and Optical Properties

Items	Material	External ($\alpha_{Solar}/\epsilon_{IR}$)	Internal ($\alpha_{Solar}/\epsilon_{IR}$)
BB	Al6063	0.967/0.967	-
BB Baffle	Al6061	-	0.05/0.2
BB Radiator	Al6063	0.11/0.8(BoL) 0.24/0.8(EoL) [OSR]	0.39/0.64 [MLI]

Table 3. Thermal Analysis Results Summary

Items	Hot Case	Cold Case
Heater power [W]	Heater-1: 52 Heater-2: 33 Radiator Heater: 15	
Time for Heat-Up [s]	115	135
DTmax [°C]	0.77	0.79
Duty for BB [%]	1.9	2.2
Duty for Radiator Heater [%]	13.6	20.0

다. 흑체 표면에서의 최고/최저지점 온도구배는 0.75°C로 표면온도구배 요구조건인 1K이하를 만족하고 있음을 알 수 있다. 해석결과와 같은 원형대칭 형태의 온도분포는 흑체 내부에 장착된 온도센서로부터 가중치 적용에 따른 흑체 표면대 표면온도 추정이 용이하며, 흑체에 장착되는 히트파이프 체결구조는 대표표면온도 추정을 위해 타당함을 나타낸다.

III. 결 론

우주용 적외선 영상센서의 gain과 offset 특성을 비롯한 센서의 비균일 출력 특성 교정을 위한 흑체설계를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 흑체는 방사율이 0.99이상으로 저온에서 고온에 이르는 온도정보 제공이 가능하며 흑체 표면에서의 온도구배가 1K이하로 궤도당 한번의 교정업무 수행이 가능하도록 설계되었다. 흑체 열설계는 기본적으로 히터, 히트파이프, 방열판 그리고 방열판용 히터로 구성된다. 흑체 열설계의 타당성을 궤도 열해석용 상용 S/W를 활용한 궤도 열해석을 통해 입증하였다. 흑체 후면부에 수직으로 장착되는 히트파이프 체결방법은 가중치 적용을 통한 흑체 대표 표면온도 추정에 용이한 원형대칭의 온도분포 획득이 가능하며, 흑체 방사율 측정시험을 통해 본 논문에서 적용한 V-grooves 형태의 흑체 방사율은 0.99이상임을 확인하였다.

참고문헌

- 1) Sapritsky, V. I., Mekhontsev, S. N., Prokhorov, A. V., Sudarev, K. A., Khromtchenko, V. B., and Samoilov, M. L.: Precision large area low and medium temperature blackbody sources, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 3437, 1998.
- 2) Fred, A. B., Henry, E. R., Robert O. K., David, C. T., Scott D. E., Mark W. W., Douglas, P. A., Raymond, K. G., Joseph, K. T., Nick, N. C., William, L. S., Gali, E. B., John, D. W., and Derson, K. S.: The Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer. (GIFTS) On-board Blackbody Calibration System, *Proceedings of the SPIE, Fourth International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Symposium*, 8 November 2004.
- 3) Fred, A. B., Revercomb, H. E., Bingham, G. E., Knuteson, R. O., Tbin, D. C., Laporte, D. D., and Smith, W. L.: Calibration of the Geostationary Imaging Fourier Transform Spectrometer (GIFTS), *Proceedings of the SPIE*, Vol. 4151, 2001.
- 4) Xiong, X., Chiang, K., Esposito, J., Guenther, B., and Barnes, B.: MODIS on-orbit calibration and characterization, *Metrologia*, 40, S89-S92, 2003.
- 5) 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.
- 6) Bremer, J. C.: Alternative Blackbody Configurations for Infrared Calibration of Future GOES Imagers and Sounders, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 4814, 2002.
- 7) Ono, A. and Sakuma, F.: Preflight and In-Flight Calibration Plan for ASTER, *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, Vol.13, April, 1996.
- 8) Gilmore, David G.: Spacecraft thermal control handbook, Vol 1: Fundamental Technologies 2nd edition, Aerospace Corporation, 2002.

9) Sakuma, F. and Hattori, S.: Temperature: Its measurement and Control in Science and Industry, J.F. Schooley, AIP, New York, 5, 421-427, 1982.

10) Thermal Desktop User's Guide, Ver. 5.0, Network Analysis Associates, Tempe, AZ, 2006.

11) SINDA/FLUINT User's Guide, Ver. 5.0, Network Analysis Associates, Tempe, AZ, 2006.