

저온-진공 흑체시스템의 설계 및 성능 평가

Design and Performance Evaluation of Low-Temperature Vacuum Blackbody System

김기석*, 장기수*, 이상용*, 김건희*, 김동익*†

Ghiseok Kim*, Ki Soo Chang*, Sang-Yong Lee*, Geon-Hee Kim* and Dong-Ik Kim*†

초 록 본 논문에서는 저온-진공 흑체시스템의 설계 및 구성과 함께 흑체시스템의 수학 모델을 이용한 열 해석 평가 방법과 그 결과를 제시하였으며 적외선 카메라를 이용한 흑체시스템의 평가 방안 및 결과를 명시하였다. 개발된 흑체시스템은 기존의 시스템에 비해 상대적으로 규모가 소형이며 273 K이하의 저온에서 수증기가 응결될 수 있는 현상을 방지하기 위하여 흑체시스템 내부를 진공 (2.67×10^2 Pa) 상태로 유지되도록 제작되었다. 또한 흑체시스템 내부의 열손실로 인한 성능 저하를 막기 위하여 radiator가 설치되는 부위에는 heat sink, heat shield 및 cold shield를 설계하였다. 흑체시스템의 수학 모델에 대한 열 해석을 위해서 변형된 스테판-볼츠만의 정리를 이용하여 radiator의 성능을 검증하였고 실제 흑체시스템에서 방사되는 적외선 신호에 대해서는 적외선 카메라를 이용하여 신호전달함수 및 온도분해능을 측정, 분석하였다. 제안된 설계와 해석 및 실험 결과에 근거하여, 개발된 저온-진공 흑체시스템은 적용온도범위인 268~333 K 구간에서 적외선 측정장치의 캘리브레이션을 위한 기준장치로서 성능이 안정적이고 적용이 적합한 것으로 확인되었다.

주요용어: 저온-진공 흑체시스템, 열방사, 적외선 카메라, 신호전달함수, 온도분해능

Abstract In this paper, the design concept of a low-temperature vacuum blackbody was described, and thermophysical model of the blackbody was numerically evaluated. Also the working performance of low-temperature vacuum blackbody was evaluated using infrared camera system. The blackbody system was constructed to operate under high-vacuum conditions (2.67×10^2 Pa) to reduce temperature uncertainty, which is caused by vapor condensation at low temperatures usually below 273 K. In addition, both heat sink and heat shield including cold shield were installed around radiator to prevent heat loss from the blackbody. Simplified mathematical model of blackbody radiator was analyzed using modified Stefan-Boltzmann's rule. The infrared radiant performance of the blackbody was evaluated using infrared camera. Based on the results of measurements, and simulation, temperature stability of the low-temperature vacuum blackbody demonstrated that the blackbody system can serve as a highly stable reference source for the calibration of an infrared optical system.

Keywords: Low-Temperature Vacuum Blackbody, Thermal Radiation, Infrared Camera, Signal Transfer Function, Noise Equivalent Temperature Difference

1. 서 론

최근 들어 상업적 또는 연구의 목적으로 방사(복사) 온도계, 적외선 센서와 적외선 카메라의 수요가 증가하고 있는 추세이며 더불어 이러한

적외선 센서의 측정 정밀도를 분석하고 캘리브레이션을 위하여 흑체시스템(blackbody system)의 적용도 증가하고 있는 추세이다. 흑체시스템이란 이러한 광대역 적외선 방사열 측정 장치의 캘리브레이션에 이용되는 방사율이 1에 가까운 정밀

[접수일: 2013. 6. 13, 수정일: 2013. 8. 16, 게재확정일: 2013. 8. 22] *한국기초과학지원연구원 첨단장비개발사업단, †Corresponding Author: Center for Analytical Instrumentation Development, Korea Basic Science Institute, 169-148 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-806, Korea (E-mail: dikim@kbsi.re.kr)

한 방사열 발생장치를 칭하는 것으로서 기존의 흑체시스템은 주로 오일이나 물과 같은 액체를 냉매로서 이용하기 때문에 영하의 온도 또는 실험 환경과 온도 차이가 큰 환경에서 이용되는 경우에는 흑체시스템의 내부 수증기가 응결되는 결로현상으로 인해 측정 온도와 방사율(emissivity)을 정밀하게 제어 또는 발생하는데 있어서 작동 안정성 및 측정 정밀성에 문제가 발생하는 경우가 종종 있을 뿐만 아니라 기존의 흑체시스템은 대부분 그 규모가 중대형으로서 사용에 어려움이 있는 것으로 알려져 있다[1-3].

이로 인해 영하의 온도에서 수증기가 응결되는 현상들을 해결하기 위한 저온-진공 흑체시스템에 대한 연구는 해외의 몇몇 연구그룹에 의하여 수행되고 있으나 국내의 경우 이와 같은 흑체의 개발과 평가에 대한 연구는 많이 부족한 것이 현실이다[4-6].

본 연구에서는 기존의 흑체시스템들에 비해 상대적으로 소형으로 이동이 용이한 저온의 진공 흑체시스템을 설계, 제작하고 유한요소법을 이용한 열 해석을 수행하여 개발된 흑체시스템의 설계 모델을 평가하였으며 상업용 적외선 카메라를 이용하여 흑체시스템의 신호전달함수(signal transfer function, SiTF)와 온도분해능(noise equivalent temperature difference, NETD)을 분석하여 개발된 저온-진공 흑체시스템의 작동 성능을 평가하였다.

2. 시스템의 설계 및 구성

Fig. 1은 본 연구를 통해 개발된 저온-진공 흑체시스템의 설계 개략도를 보여주고 있는 것으로서 (1)~(9)까지 9가지의 주요 장치들로 구성되어 있다. (1) 무산소동 재료의 radiator, (2) 펠티어 소자를 이용한 가열장치, (3) 백금 저항형 온도계, (4) aperture window, (5) heat shield, (6) cold shield, (7) heat sink, (8) vacuum port (9) refrigerant port. 직경이 80 mm, 두께가 10 mm인 원판 형태의 radiator는 무산소동(oxygen free high thermal conductivity copper, OFHC)으로 제작되었으며 이 재료의 열전도계수는 391 W/mK이고 radiator의 방사율을 증가시키기 위해서 표면은 검은색 페인트로 도포되었다[7].

저온-진공 흑체시스템의 온도 제어 범위는 268~333 K이고 시스템을 구성하는 주요 장치들은 장

치의 내부에서 발생될 수 있는 수증기의 응결현상을 방지하기 위하여 진공 상태의 챔버 내부에 설치되었다. 흑체시스템의 냉각과 가열 방식으로는 radiator주위에 설치된 전기식 냉각 및 가열장치인 펠티어 소자를 이용하였으며 부가적으로 증류수를 이용하여 냉각 작동을 제어하게끔 설계되었다.

Radiator는 실험실 대기 또는 주변 온도에 의해 설정온도가 변하는 것을 방지하고 온도제어성을 향상하기 위하여 cold shield로 둘러싸여져 있으며 radiator와 cold shield 사이에는 heat shield가 설치되어 cold shield에 의해 받을 수 있는 온도변화의 영향을 최소화하도록 설계되었다. 또한 cold shield와 heat shield는 둘 사이의 간격을 최소화하여 열류량(heat flow)을 최소화하도록 설계되었으며 백금 저항 방식의 온도센서를 부착하여 연속적인 온도 측정 및 제어가 가능하도록 설계되었다. 진공 챔버의 전면부에는 3~12 μm 의 파장대역에 대해 98%의 투과율을 갖는 zinc selenide 재질의 window를 장착하였으며 흑체시스템에 이용된 온도제어장치의 온도분해능은 작동온도범위에 대해 10 mK이다. Fig. 2는 개발된 저온-진공 흑체시스템의 3차원 단면도를 보여주고 있다.

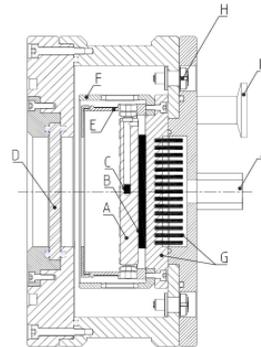


Fig. 1 Schematic design of the low-temperature vacuum blackbody



Fig. 2 Cross-sectional structure of the low-temperature vacuum blackbody

3. 저온-진공 흑체시스템의 열 해석

저온-진공 흑체시스템의 열 해석을 위해 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 radiator, heat shield와 cold shield로 둘러싸여있는 2차원으로 단순화된 단면 모델을 설계하였으며 열 해석을 위한 유한요소 프로그램으로는 상용 소프트웨어인 ANSYS (Ver.12, ANSYS Inc., USA)를 이용하였다. 유한요소 해석 과정은 일반적으로 모델링, 경계조건 정의, meshing 및 열 해석 조건의 정의에 대한 순서로 이루어진다. 본 연구에서는 ANSYS Design Modeler를 이용하여 기하학적 형상을 완성한 후, 각각의 요소에 대한 열전도계수 및 경계조건을 정의하였다. 경계조건에 대해서는 ‘No Separation’으로 결정되어있는 ANSYS 명령어를 적용하였는데 이는 접촉면의 분리가 이루어지지 않으며 아주 작은 량의 비마찰 미끄럼이 발생할 수 있는 조건이다. Meshing은 육면체 요소형상을 이용하여 만들어졌고 요소의 최대 크기는 2 mm로 제한되었다. 또한 열 해석 조건으로는 전도 및 방사조건을 적용하였으며 이때, 방사에너지는 모델의 radiator표면에서 발생하는 것으로 가정하였고 방사형상계수는 1.0으로 적용하였다.

도식화된 2차원 모델의 열 해석을 위해서 흑체의 각 부분들을 구성하는 N개의 구역들에 대한 열에너지 평형식을 유도하기 위해 확장된 Stefan-Boltzmann의 법칙을 이용하였으며 이는 식(1)과 같이 각 구역의 표면온도에 대한 열에너지의 손실과 관련된 식으로 표현될 수 있다. Table 1은 해석에 이용된 열적, 기계적 특성치들을 보여주고 있다[8,9].

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\epsilon_i} - F_{ji} \frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \sigma T_i^4 \quad (1)$$

식(1)에서 N은 방사표면의 수이고 δ_{ji} 는 Kronecker delta값이며 ϵ_i 는 i번째 표면의 유효방사율이고 F_{ji} 는 방사각 계수들이며 A_i 는 각각의 표면 면적, Q_i 는 i번째 표면의 에너지 손실량, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, T_i 는 표면의 절대온도를 나타내는 것이다.

Fig. 4는 radiator의 온도를 270 K로 설정하였을 경우, 흑체 내의 온도 분포를 해석한 결과영상으로서 radiator 전면부에는 설정온도와 동일하게

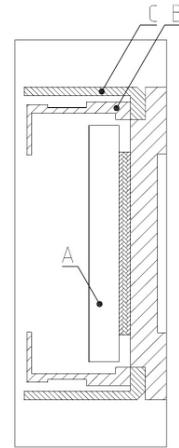


Fig. 3 Simplified design of a low-temperature vacuum blackbody system (A: radiator, B: heat shield, C: cold shield)

Table 1 Thermophysical parameters for the temperature analysis of blackbody system

Parameters	Values
Stefan-Boltzmann constants (W·m ⁻² K ⁴)	5.6740×10 ⁻⁸
Thermal conductivity of OFHC copper (W/m·K)	391
Thermal conductivity of Al6061-T6 (W/m·K)	167
Emissivity of radiator	0.97
Set point temperature of radiator (K)	270, 290, 310, 330
Set point pressure of vacuum chamber (Pa)	2.67×10 ⁻²

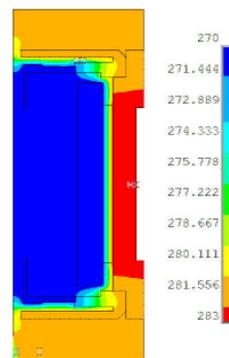


Fig. 4 Thermophysical image of simplified blackbody model which analyzed at 270 K

Table 2 Analysis results of simplified blackbody model at four different target temperatures

Set temperature (K)	270	290	310	330
Average (K)	270.002	290.000	309.993	329.988
Standard deviation (K)	0.0036	0.0017	0.0059	0.0090

온도가 분포되는 것을 도식적으로 확인할 수 있었다. Table 2는 4가지 조건의 설정온도(270 K, 290 K, 310 K, 330 K)에 대해 radiator의 앞쪽 공간 즉, 진공압이 작용되고 방사열이 발생하는 영역에서 해석된 온도 분포를 분석한 결과로서 분석된 온도편차는 10 mK을 넘지 않았으며 330 K의 설정온도에서 최대 9 mK의 온도편차가 발생하는 것으로 해석되었다.

4. 적외선 센서를 이용한 흑체의 성능 평가

저온-진공 흑체시스템의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 5에서와 같이 적외선 카메라(VarioCAM, InfraTec., Germany)를 이용하여 신호 전달 함수(signal transfer function, SiTF)와 온도 분해능(noise equivalent temperature difference, NETD)을 측정, 분석하였다. 실험에 사용된 적외선 카메라의 검출 센서는 마이크로 볼로미터로서 검출 파장 대역은 7.5~14 μm , 픽셀 해상도는 640x480이며 온도분해능은 25 $^{\circ}\text{C}$ 에서 30 mK이다.

신호전달함수(SiTF)는 흑체시스템에 설정한 작동 온도에 대하여 적외선 카메라가 측정된 열영상상의 디지털값(digital level)에 대한 기울기를 수식적으로 계산하는 것으로서 일반적으로 검출 센서의 이득값(gain), 선형성(linearity), 동적사용범위(dynamic range)와 포화도(saturation)에 대한 정보를 제공할 뿐만 아니라 온도분해능(NETD)의 계산에 이용된다. 본 실험에서는 신호전달함수와 온도분해능이 정밀하게 측정되어있는 적외선 카메라를 이용하여 본 연구에서 개발된 저온-진공 흑체시스템의 신호전달함수와 온도분해능을 측정함으로써 개발된 흑체시스템의 성능을 역으로 평가해 보았다.

온도분해능(NETD)은 흑체에서 설정한 일정한 온도 조건 또는 실험을 수행하는 대기의 일정한 온도 조건에서 측정되는 열영상 신호의 신호대 잡음비(S/N ratio)에서 분석될 수 있는 가장 작은 열영상 신호를 계측할 수 있는 온도편차를 의미하는 것으로서 적외선 카메라가 측정할 수 있는 가장 작은 온도로 이해될 수 있다. 이러한 온도분해능은 temporal NETD와 spatial NETD의 두 가지 성분으로 분석될 수 있으며 본 실험에서 분석된 temporal NETD는 실험실 온도 조건인 22 $^{\circ}\text{C}$ 에서 50 Hz의 frame rate로 150x150 픽셀 정보를

100 프레임 측정한 후 각각의 픽셀 데이터에 대한 RMS 정보를 이용하여 계산되었으며 spatial NETD의 경우에는 temporal NETD와 동일한 실험 조건으로 100 프레임을 저장한 후, 각 픽셀에 대한 평균을 구하고 전체영역에 대한 RMS 정보를 이용하여 분석되었다.

Fig. 6은 신호전달함수(SiTF)를 구하기 위하여 흑체의 온도설정부위와 배경부위간의 온도차를 -10 $^{\circ}\text{C}$ 에서 2 $^{\circ}\text{C}$ 간격으로 10 $^{\circ}\text{C}$ 까지 총 11단계의 온도를 설정해가면서 측정된 디지털 레벨의 차이를 보여주는 것으로서 분석된 신호전달함수의 결과값은 86.033이었다. Fig. 7은 150x150 픽셀 영역에 대한 temporal NETD를 히스토그램으로 표현한 것으로서 그림에서 보는 바와 같이 분석된 temporal NETD는 24~67 mK의 범위에 대해 가우시안 분포를 보여주고 있으며 그 평균값은 34 mK이었고 Spatial NETD는 40 mK으로 분석되었다. Fig. 8은 실험실 온도 조건인 22 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정된 저온-진공 흑체시스템에 대한 NETD를 분석하

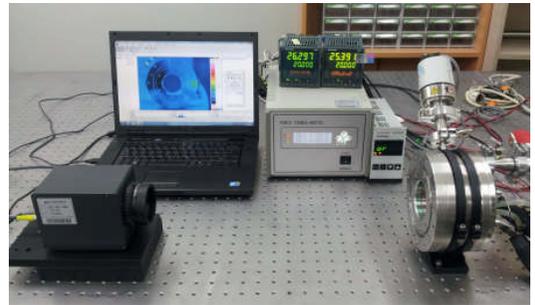


Fig. 5 Performance evaluation of blackbody system using infrared camera

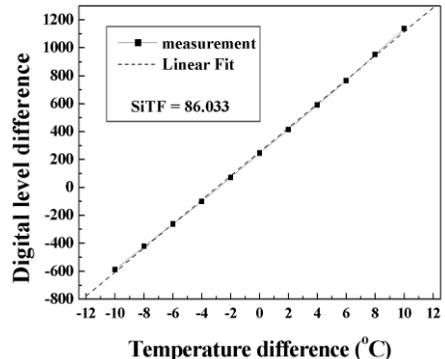


Fig. 6 Signal transfer function curve of low-vacuum temperature blackbody system

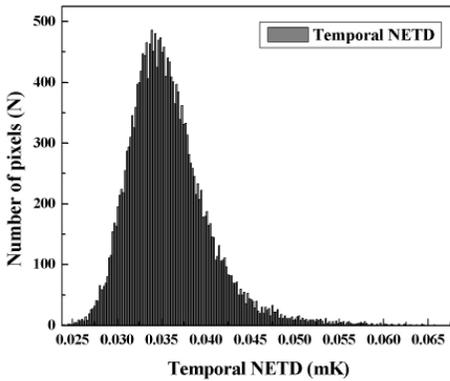


Fig. 7 Histogram of temporal NETD for the ROI of blackbody radiator using infrared thermal image

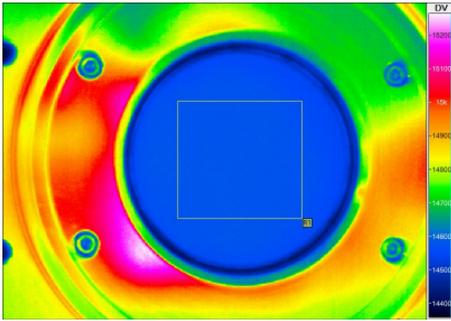


Fig. 8 Infrared thermal image of blackbody radiator for the analysis of NETD

기 위해 100 프레임을 측정된 열영상 이미지와 분석영역(ROI)을 보여주는 것이다.

위와 같은 방법으로 분석된 신호전달함수(SiTF), temporal NETD와 spatial NETD를 이용하여 식(2)와 같이 최종적인 온도분해능을 계산할 수 있으며 개발된 저온-진공 흑체시스템에 대한 적외선 카메라의 온도분해능은 52 mK인 것으로 확인되었다. 측정된 열영상 신호의 데이터 분석은 상용 프로그램인 매트랩 (Ver. R2009b, MathWorks Inc., USA)을 이용하였다.

$$NETD = \sqrt{(\text{Temporal NETD})^2 + (\text{Spatial NETD})^2} \quad (2)$$

5. 결론

본 연구에서 설명되고 있는 흑체시스템은 영하의 저온에서 사용할 경우 발생될 수 있는 측정 정밀성의 저하를 방지하기 위하여 측정 환경과

설정온도간의 온도 차이에서 또는 저온 환경에서 수증기가 응결되지 않도록 흑체 내부를 진공으로 설계하였고 또한 기존의 대형 흑체시스템과는 차별성을 갖도록 이동이 가능한 상대적으로 소형의 크기로 설계, 제작되었다. 뿐만 아니라 흑체시스템의 단순화된 2차원 단면모델을 확장된 Stefan-Boltzmann 법칙에 적용하여 상용 프로그램인 ANSYS을 이용한 radiator 영역에서의 열 해석을 수행하였으며 해석 결과, 흑체시스템이 적용되는 270~330 K의 온도 구간에서 최대 온도 편차가 9 mK으로서 열 분포 특성이 우수한 것으로 해석되어 개발에 적용된 설계가 합당한 것으로 확인되었다.

또한 상용 적외선 카메라를 이용하여 흑체시스템에서 방사되는 열영상 신호를 측정하여 신호전달함수와 온도분해능을 분석하였으며 최종적인 온도분해능(NETD)은 52 mK인 것으로 분석되었다. 개발된 흑체시스템을 이용한 열적 특성의 수학적 해석 결과와 열영상 측정 실험 결과들을 근거로 할 경우, 본 논문에서 언급된 저온-진공의 흑체시스템은 268 ~ 333 K의 적용 온도 구간에 대해 적외선 센서 또는 검출장치의 캘리브레이션용 기준 소스장치로서 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

It was partially supported by the Korea Basic Science Institute Grant (D33200) and the R&D program of ISTK [Development of an image-based, real-time inspection and isolation system for hyperfine faults].

참고문헌

- [1] S. P. Morozova, N. A. Parfentiev, B. E. Lisiansky, U. A. Melenevsky, B. Gutschwager, C. Monte and J. Hollandt, "Vacuum variable medium temperature blackbody," *Int. J. Thermophys.*, Vol. 31, No. 8-9, pp. 1809-1820 (2010)
- [2] C. Brian and M. Graham, "A low-temperature blackbody reference source to - 40 °C," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 10, pp. 1-6 (1999)

- [3] B. F. Joel, "A third generation water bath based blackbody source," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, Vol. 100, No. 5, pp. 591-599 (1995)
- [4] E. Theocharous, N. P. Fox, V. I. Saprisky, S. N. Mekhontsev and S. P. Morozova, "Absolute measurements of black-body emitted radiance," *Metrologia* 35, pp. 549-554 (1998)
- [5] V. S. Ivanov, B. E. Lisiansky S. P. Morozova, V. I. Saprisky, U. A. Melenevsky, L. Y. Xi and L. Pei, "Medium-background radiometric facility for calibration of sources or sensors," *Metrologia* 37, pp. 599-602 (2000)
- [6] S. A. Ogarev, M. L. Samoylov, N. A. Parfentyev and V. I. Saprisky, "Low-temperature blackbodies for IR calibrations in a medium-background Environment," *Int. J. Thermophys.*, Vol. 30, No. 1, pp. 77-97 (2009)
- [7] J. F. Shackelford and W. Alexander, "Materials Science and Engineering Handbook," 3rd Edition, CRC Press LLC, (2001)
- [8] R. Siegal and J. R. Howell, "Thermal Radiation Heat Transfer," 2nd Edition, Hemisphere Publishing Corporation, (1981)
- [9] A. J. Chapman, "Heat Transfer," 4th Edition, Macmillan Publishing Company, (1984)