

유한요소 해석법을 이용한 저온 진공 흑체의 3차원 열전달 해석 및 최적 설계

Optimal Design and Three-Dimensional Thermal Analysis using Finite Element Analysis

*이상용¹, #이영신², 김기석¹, 김건희¹, 양순철³, 허명상¹, 이길재¹

*S. Y. Lee¹, #Y. S. Lee(leeys@cnu.ac.kr)², G. S. Kim¹, G. H. Kim¹, S. C. Yang³,

M. S. Huh¹, G. J. Lee¹

¹한국기초과학지원연구원 첨단장비개발사업단, ²충남대학교 기계설계공학과,

³오송첨단의료산업진흥재단 첨단의료기기개발지원센터

Key words : Low-temperature Vacuum Blackbody, Thermal Radiation, Emissivity

1. 서론

복사 온도계는 연구 목적 및 상업적으로 사용하는 빈도가 최근에 들어가는 추세에 있다. 일반적으로 적외선 복사 온도계의 온도를 교정하기 위해 주로 흑체가 사용된다. 일반적인 흑체는 장비가 크고 상온 이하에서는 수증기 결로 현상이 표면에 발생한다. 이로 인해 온도의 불확실성이 나타나 방사율에 악영향을 미친다^[1-3].

본 논문에서는 저온 진공 흑체에 대한 3 가지 모델을 설계했다. 이 모델에 Stefan-Boltzmann 방정식에 기반하는 열전달 해석을 이용해서 각각의 모델들에 대한 평가를 수행했다.

2. 작동 원리 및 설계

저온 진공 흑체의 개략도는 Fig. 1 (a) 에서 보여주고 있는 것과 같이 구성되어 있다: (A) Radiator, (B) Heating source, (C) Platinum resistance temperature detectors, (D) Window (Znse), (E) Heat shield, (F) Cold shield, (G) Heat-sink, (H) Electric connector, (I) Vacuum port, (J) Refrigerant port.

흑체의 외형은 $\varnothing 80 \times 10t$ mm의 평면으로 이루어져 있다. 표면은 초정밀 가공을 통해 nm 단위의 표면 형상 정밀도(PV : 348.45 nm)와 표면 거칠기(Ra : 46.75 nm)를 가지고 있다. 흑체 표면은 black paint(Aeroglaze Z306)가 도포된다.

흑체의 온도는 heating source(PED)로 268 K ~ 333 K 범위의 온도를 제어한다. 흑체의 온도

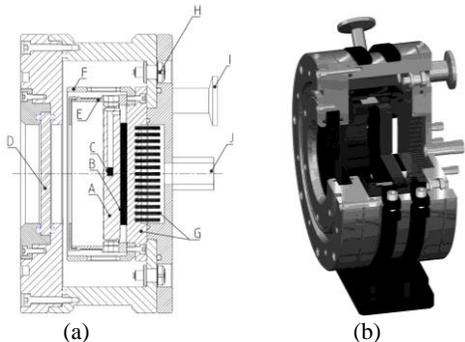


Fig. 1 Low-temperature vacuum blackbody; (a) Schematic design, (b) Cross-sectional structure

는 흑체 내부에 RTD(Resistance Temperature Detectors) 센서를 삽입해서 측정했다.

흑체의 온도가 외부의 영향으로 불안정해지는 것을 막기 위해 저온의 cold shield 가 둘러 싸고 있다. 저온의 cold shield 로 인한 온도 편차는 흑체와 cold shield 사이의 heat shield 로 불안정성을 차단하였다. 흑체에 대한 단면 모델은 Fig. 2 (b) 에서 보여주고 있다.

3. 흑체 모델의 열 해석

Fig. 2 에서 보여주고 있는 것과 같이 단순화된 3 가지의 3 차원 모델은 저온 진공 흑체의 열전달 해석을 통해 온도 안정성에 대한 평가를 수행하였다. 흑체의 온도 안정화와 분포는 ANSYS(ver. 14.0) 프로그램의 사용으로 평가되었다. 흑체의 열 전달에 대한

물리적 모델은 Stefan-Boltzmann 법칙의 방정식을 기반으로 열 전달 해석에 사용된 열 물성적 특성들은 Table 1 에서 보여주고 있다.

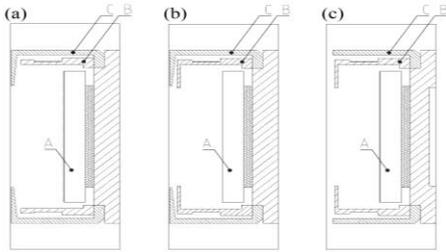


Fig. 2 Three different simplified designs (a), (b) and (c) for a low-temperature vacuum blackbody; A: radiator, B: heat shield, C: cold shield

Table 1 Comparison of measured roughness data

Parameters	Values
Stefan-Boltzmann constants($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)	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	1
Set point temperature of radiator (K)	270, 290, 310, 330
Set point temperature of heat shield (K)	270, 290, 310, 330
Set point temperature of heat-sink (K)	283
Set point pressure of vacuum chamber (Pa)	2.67×10^{-2}

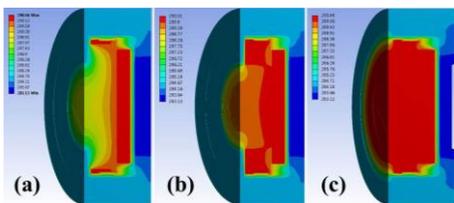


Fig. 3 Thermophysical analysis of three different simplified design models (a), (b) and (c) at 290 K

Table 2 Comparison of measured roughness data (Standard deviation for each mean)

Set temperature (K)	270	290	310	330
Model I	272.888 (1.6507)	288.676 (0.8889)	304.464 (3.4283)	320.252 (5.9678)
Model II	271.019 (0.4628)	289.682 (0.2492)	308.346 (0.9611)	327.010 (1.6731)
Model III	270.159 (0.0052)	290.143 (0.0048)	310.129 (0.0105)	330.113 (0.0176)

Fig. 3 과 Table 2 에서 보면 모델 I 과 II 에서 표준 편차와 온도 차이는 설정 온도에서 크게 증가하는 것을 보여주고 있다. 그리고 상온에서 멀어질수록 온도의 표준 편차는 커지고 있다. 모델 III 는 안정적인 온도를 열 전달 해석 결과로써 보여주고 있다. 그리고 모델 III 의 관심 영역에서 측정된 온도 차이는 흑체 시스템의 전체 작동 온도 범위에 대해 20 mK 을 초과하지 않는다. 290 K 의 온도에서 4.8 mK 의 최소치와 330 K 의 온도에서 17 mK 의 최대치를 가지는 온도 분포는 모델 III 에서 관찰되었다. 그러므로 열 전달 해석에서 제안된 모델 III 가 흑체에 대한 최적 열 물리 변수들을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

흑체에 대한 최적 설계는 Stefan-Boltzmann 법칙을 기반으로 하는 ANSYS 프로그램이 사용되었다. 흑체 구성요소의 열 해석에 대한 수치적인 평가는 3 가지의 3 차원 모델로 결정되었다. 흑체의 구성 요소에 대한 작동 원리와 설계 개념은 앞 절에서 설명되었다. 수치 해석 결과 모델 III 의 290 K 에서 4.8 mK 으로 최대 온도 안정성의 결과를 얻었다. 그리고 최대 불안정한 온도는 모델 I 의 330 K 에서 5.9678 K 이 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 흑체 시스템의 최적 모델은 모델 III 에서 가장 안정적인 온도의 특성을 가지고 있다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- Morozova, S. P., Parfentiev, N. A., Lisiansky, B. E., Melenevsky, U. A., Gutschwager, B., Monte, C. and Hollandt, J., "Vacuum Variable Medium Temperature Blackbody," Int. J. Thermophys., Vol. 31, No. 8-9, pp. 1809-1820, 2010.
- Brian, C., and Graham, M., "A low-temperature blackbody reference source to - 40 °C," Meas. Sci. Technol., 10, 1-6, 1999.
- Siegal, R. and Howell, J. R., "Thermal Radiation Heat Transfer," 2nd Edition, Hemisphere Publishing Corporation, 1981.