《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 28, No. 4, August 2017, pp. 153-157
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2017.28.4.153
ISSN : 1225-6285(Print)
ISSN : 2287-321X(Online)

Analysis of Laser-beam Thermal Effects In an Infrared Camera and Laser Common-path Optical System

Sung-Jae Kim†

Agency for Defense Development, 160 488beon-gil bukyuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34060, Korea

(Received March 14, 2017; Revised manuscript May 12, 2017; Accepted June 12, 2017)

An infrared camera and laser common-path optical system is applied to DIRCM (directional infrared countermeasures), to increase boresighting accuracy and decrease weight. Thermal effects of a laser beam in a common-path optical system are analyzed and evaluated, to predict any degradation in image quality. A laser beam with high energy density is absorbed by and heats the optical components, and then the surface temperature of the optical components increases. The heated optical components of the common-path optical system decrease system transmittance, which can degrade image quality. For analysis, the assumed simulation condition is that the laser is incident for 10 seconds on the mirror (aluminum, silica glass, silicon) and lens (sapphire, zinc selenide, silicon, germanium) materials, and the surface temperature distribution of each material is calculated. The wavelength of the laser beam is 4 μm and its output power is 3 W. According to the results of the calculations, the surface temperature of silica glass for the mirror material and sapphire for the lens material is higher than for other materials; the main reason for the temperature increase is the absorption coefficient and thermal conductivity of the material. Consequently, materials for the optical components with high thermal conductivity and low absorption coefficient can reduce the image-quality degradation due to laser-beam thermal effects in an infrared camera and laser common-path optical system.

Keywords: Infrared camera, Laser beam, Thermal analysis, Common path optical system
OCIS codes: (110.3080) Infrared imaging; (110.4280) Noise in imaging systems

적외선 카메라-레이저 공통광학계의 레이저빔 열 영향성 분석

김성재†

국방과학연구소
㊞ 34060 대전광역시 유성구 북유성대로 488번길 160

(2017년 3월 14일 받음, 2017년 5월 12일 수정본 받음, 2017년 6월 12일 게재 확정)

지향성적외선방해장비의 정렬 정밀도를 높히고 중량을 감소시키기 위해 적용된 적외선 카메라-레이저 공통광학계 구조에서 영상 성능 저하를 야기시키는 레이저빔 열 영향성을 분석하였다. 높은 에너지 밀도를 가지는 레이저빔이 광부품에 흡수되면 열이 발생하고 온도가 상승한다. 공통광학계 광부품 표면에서 발생한 열은 시스템 투과율을 감소시켜 적외선 카메라의 영상 품질을 저하시킬 수 있다. 지향성적외선방해장비의 운용개념을 고려하여 파장 4 μm, 출력 3 W의 레이저빔이 10초간 미러(알루미늄, 실리카 글래스, 실리콘) 및 렌즈(사파이어, 셀레늄화아연, 실리콘, 게르마늄) 재료에 조사되는 상황을 가정하여 온도 분포를 계산하였다. 계산 결과, 미러 재료로는 실리카 글래스, 렌즈 재료로는 사파이어의 온도 상승이 상대적으로 컸고, 재료 온도 분포에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 재료의 레이저빔 흡수율과 열전도도임을 확인하였다. 결론적으로 적외선 카메라-레이저 공통광학계에 사용하는 광부품은 흡수율이 낮고 열전도도가 높은 특성을 갖도록 선정되어야 광부품 온도 상승에 의한 적외선 카메라의 영상 품질 저하를 방지할 수 있다.

Keywords: 적외선 카메라, 레이저빔, 열 영향성 분석, 공통광학계
OCIS codes: (110.3080) Infrared imaging; (110.4280) Noise in imaging systems

†E-mail: ksj16@add.re.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

지향성적외선방해장비(DIRCM, Directional Infrared Countermeasures)는 항공기 및 헬리콥터 등의 공중 플랫폼에 가장 큰 위협이 되는 휴대용적외선유도탄(MANPADS, Man-portable Air Defence System)에 대응하기 위하여 개발되었다. 지향성적외선방해장비는 휴대용적외선유도탄을 탐지, 추적하고 코드화된 레이저 빔을 조사하여 휴대용적외선유도탄의 탐색기를 기만하는 장비로, 공격해오는 휴대용적외선유도탄을 탐지, 추적하는 중적외선 대역 카메라와 레이저 빔을 조사하여 탐색기를 기만하는 레이저로 구성된다[1,2]. 다양한 위협에 대응하기 위하여 일반적으로 근적외선 대역과 중적외선 대역 두 종류의 레이저를 사용한다[3,4].

휴대용적외선유도탄의 눈에 해당하는 탐색기가 레이저빔의 중심에서 멀어지면 레이저빔 밀도가 낮아져 기만효율이 저하된다. 레이저빔 중심에 휴대용적외선유도탄을 위치시키기 위해서는 적외선 카메라의 추적 중심과 레이저빔의 중심이 일치해야 한다. 이를 위해 각각의 레이저와 적외선 카메라 사이 정렬 오차를 줄이는 것이 중요하다. 적외선 카메라와 레이저가 동일한 광 경로를 사용하는 공통광학계를 적용하면 정렬 정밀도를 높일 수 있고 부피와 중량도 감소시킬 수 있다. 하지만 공통광학계를 구현하기 위해선 레이저빔으로 인한 간섭 문제를 먼저 해결해야 한다. 먼저 사용하는 레이저 중 하나의 파장이 적외선 카메라의 파장대역(3.6~4.8 μm) 내에 위치하기 때문에 레이저빔 중 일부가 광학계 내에서 되반사 되어 적외선 카메라에 영향을 줄 수 있다. 이 문제는 적절한 밴드 패스 필터를 적용하거나 되반사를 피하는 광학설계를 통해 해결이 가능하다고 판단된다[5].

다음으로 레이저빔이 렌즈, 미러 등의 광부품을 투과, 반사하면서 일부 에너지가 광부품에 흡수되어 적외선 카메라의 영상 품질 저하 원인으로 작용한다. 레이저빔에 의해 온도가 올라간 광부품은 시스템 투과율을 감소시키고 이에 따라 잡음이 증가하여 영상 품질이 저하될 수 있다[6,7]. 복사된 빛은 넓은 스펙트럼 분포를 가지기 때문에 필터 설계로 차단이 어려우며 광축 상에 위치하기 때문에 베플 설계로도 차단이 제한된다. 또한 레이저 빔이 조사되는 시간에 따라 패턴이 변하기 때문에 불균일 보정 등의 방법으로도 보정이 쉽지 않다[8,9]. 따라서 레이저빔 흡수로 인한 적외선 카메라 광부품의 열 영향성을 분석하여 잡음을 최소화 할 수 있는 재료를 선정하는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 적외선 광학계의 광부품으로 많이 사용되는 재료를 대상으로 열해석을 수행하여 적외선 카메라-레이저 공통광학계에서 레이저빔에 의해 야기되는 열문제를 예측하고 그 영향을 최소화 할 수 있는 방안을 연구하였다.

II. 분석 모델

레이저빔의 흡수에 의한 시간적(temporal), 공간적(spatial) 열 분포를 계산하기 위해서는 레이저 빔이 재료에 조사될 때 발생하는 열적 거동을 살펴볼 필요가 있다. 그림 1과 같이 재료에 입사하는 레이저빔은 반사(산란 포함), 투과, 흡수되며 재료의 물리적, 광학적 특성과 레이저빔의 파장에 따라 반사, 투과, 흡수율이 결정된다. 재료 표면에 입사되는 레이저 빔의 에너지는 반사, 투과, 흡수되는 에너지의 합과 같다.

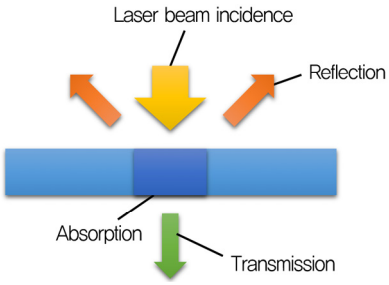

Fig. 1. Interaction between laser beam and material.

레이저 빔이 재료 표면에 조사되면 깊이 방향으로 진행하며 흡수된다. 흡수율은 재료의 특성과 레이저 빔의 파장에 따라 달라지는데 흡수율이 높은 재료는 불투명 재료, 흡수율이 낮은 재료는 투명 재료라 한다. 흡수율(a)은 식 (1)과 같이 정의된다[10].

$$a = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad \text{where} \quad N = n + ik \tag{1}$$

여기서 감쇄계수 k는 복소 굴절률 N의 허수 값에 해당하며, λ는 파장, n은 복소 굴절률의 실수 값이다. 파장이 짧을수록, 감쇄계수가 클수록 흡수율은 증가하며 흡수율에 따라 흡수 깊이가 결정된다. 흡수 깊이는 레이저 빔의 밀도가 1/e이 되는 지점의 깊이로 정의된다. 흡수 깊이가 얕은 즉, 표면에서 급격히 흡수가 일어나는 재료는 흡수율이 큰 재료이다.

레이저 빔의 흡수율이 높으면 대부분의 레이저 빔이 재료의 표면에서 흡수되므로 레이저 빔에 의해 발생하는 열은 표면에 집중된다. 흡수되는 깊이가 레이저 빔의 크기(직경)와 재료의 두께에 비해 매우 작을 경우 이 깊이를 무시할 수 있다. 이 경우 레이저 빔 흡수로 발생하는 열은 표면열원(surface heat source)으로 모델링이 가능하다. 그리고 재료의 표면에서 공기 중으로 자연대류 형태로 방출되는 열은 재료 내부로 전도되는 열에 비해 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 대류 형태의 열전달은 고려하지 않는다.

광부품 중에서 미러는 표면에 고반사 코팅(high reflection coating)을 하기 때문에 반사율이 높다. 반사되고 남은 에너지는 대부분 표면에서 흡수된다. 따라서 미러에 레이저빔이 입사될 때는 레이저빔 흡수에 의한 발열을 표면 열원으로 모델링 하는 것이 타당하다. 이와 반대로 렌즈는 표면에 반사방지 코팅(anti-reflection coating)을 하기 때문에 투과율이 높다. 일부 투과되지 못한 레이저빔은 투과 경로를 따라 두께 전체에 걸쳐 흡수된다.

레이저빔이 미러, 렌즈의 광학면에 조사되었을 때 광학면이 받는 열량은 다음의 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다[11].

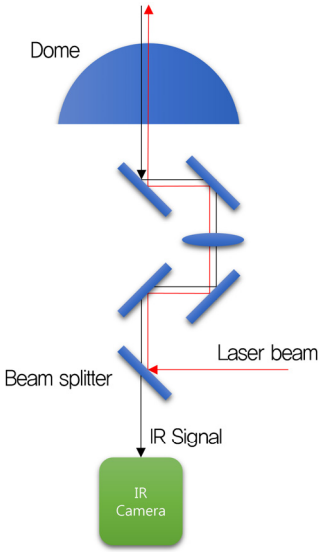

Fig. 2. Schematic diagram of infrared camera and laser common path optical system.

$$Q(x,\,y,\,z) = Q_0(1-R_c)\frac{A_c}{\pi\sigma_x\sigma_y}e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}+\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]}.\,e^{-A_c z} \tag{2}$$

Q_0는 레이저빔의 출력(output power), R_c는 조사되는 재료의 반사계수(reflection coefficient), A_c는 흡수계수(absorption coefficient), σ_x와 σ_y는 각각 가우시안 분포를 갖는 레이저빔의 x축, y축 빔 사이즈, x_0와 y_0는 각각 레이저빔 중심의 x, y 좌표를 나타낸다. 식 (2)에 따르면 레이저빔이 재료에 조사될 때 재료가 흡수하는 에너지는 레이저빔의 출력과 재료의 흡수계수에 비례하고 레이저빔 크기에 반비례한다.

파장 4 μm, 출력 3 W의 연속파 레이저(continuous Wave Laser)가 가로, 세로 각 20 mm, 두께 2 mm의 정사각형 미러와 렌즈에 입사되는 상황을 모사했다. 미러의 반사율과 렌즈의 투과율은 각각 97%로 보수적으로 설정하였으며, 열해석은 유한요소해석(Finite Element Method) 방법을 적용했고 대류에 의한 영향성은 제외했다. 또한 지향성적외선방해장비와 휴대용적외선유도탄의 교전시간을 고려하여 레이저가 10초 동안 조사되는 상황을 가정하여 분석을 수행하였다.

그림 2는 적외선 카메라-레이저 시스템의 개략도이다. 레이저빔은 광속분리기를 통해 송광부로 전달되어 광학창 밖으로 조사되며, 광학창을 통해 입사된 중적외선 신호는 광속분리기를 통해 적외선 카메라로 전달된다. 적외선카메라 검출기의 잡음등가온도차(Net Equivalent Temperature Difference)는 24 mk이며, 시스템 총 투과율은 50%로 시스템 잡음등가온도차는 48 mK이다.

III. 미러 분석결과

적외선 카메라의 미러 재료로 보편적으로 사용되는 알루미늄, 실리카 글래스, 실리콘 세 가지 재료를 후보 군으로 하여 열해석을 수행하였다. 세 물질의 열전도도, 비열, 밀도 특성은 표 1과 같다[12].

세 가지 재료의 열해석 결과는 그림 2~4와 같다.

그림 3은 레이저빔 조사 시간에 따른 레이저빔 중심의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 실리콘과 알루미늄에 비해 실리카 글래스의 온도 증가가 큰 것을 알 수 있다. 이는 실리카 글래스의 열전도도가 상대적으로 낮기 때문에 레이저빔 흡수로 인해 발생한 열이 주변으로 퍼지지 못하고 중심에 집중되어 나타난 결과로 보인다. 레이저빔이 조사됨에 따라 재료의 온도가 상승하면 반사율이 저하된다. 온도 변화가 가장 큰 실리카 글래스의 경우 10초간 레이저빔 조사시 온도가 약 2.5 K 상승하며 이에 따라 투과율이 미러 한 매당 약 1.86% 감소한다[6]. 그림 2의 적외선 카메라-레이저 공통광학계에 적용할 경우 미러가 다섯 매 사용되어 총 투과율이 약 4.37% 감소한다. 전체 시스템의 투과율이 저하되면 시스템 잡음등가온도차가 상승한다. 위의 경우, 시스템 잡음등가온도차가 50.19 mK로 약 4.56% 증가한다. 레이저빔 조사시간이 길어지면 전체 시스템의 잡음 또한 높아진다.

그림 4와 5는 각각 레이저빔을 10초간 조사한 시점의 재료별 수평방향, 수직방향 온도분포를 나타낸 그래프이다. 실리카 글래스의 경우 수평방향으로 중심과 주변부 온도차이가 상대적으로 크며, 나머지 두 재료는 온도 분포가 균일하다. 이는 위에서 설명한 바와 같이 실리카 글래스의 열전도도가 낮아 열이 주변으로 퍼지지 못하고 중심에 모여 있기 때문에 발생한 결과로 보인다. 적외선 카메라와 레이저를 공통광학계로 설계할 경우, 실리콘, 알루미늄과 같이 열전도도가 높

Table 1. Material properties of mirror materials

	Aluminum	Silica glass	Silicon
Thermal conductivity	237 [W/m·K]	1.38 [W/m·K]	130 [W/m·K]
Specific heat	904 [J/kg·K]	703 [J/kg·K]	700 [J/kg·K]
Density	2700 [kg/m^3]	2203 [kg/m^3]	2329 [kg/m^3]

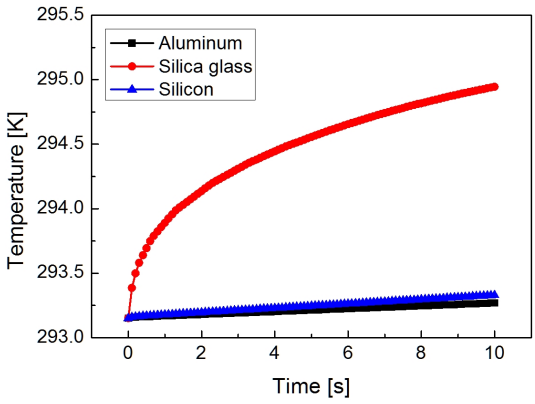

Fig. 3. Temperature variation for center of mirror materials according to incidence time of laser beam.

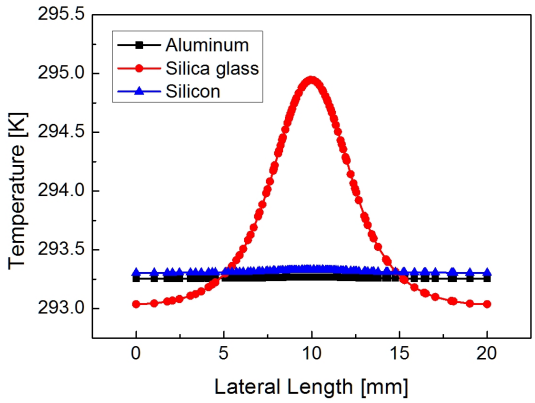

Fig. 4. Lateral temperature distribution of mirror material after laser beam incidence.

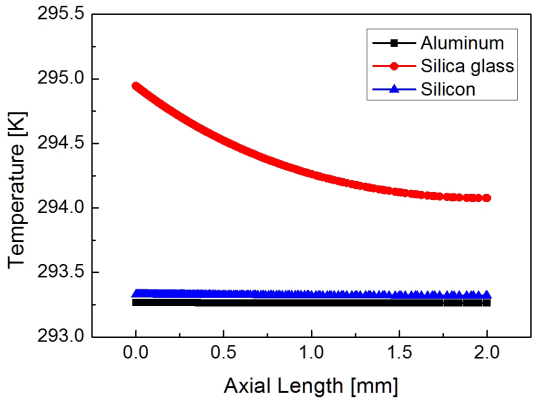

Fig. 5. Axial temperature distribution of mirror material after laser beam incidence.

은 재료를 미러 재료로 사용하는 것이 레이저빔 흡수로 인한 영향을 최소화 하여 영상 품질을 유지하는데 유리하다.

IV. 렌즈 분석결과

적외선 카메라 렌즈 재료로 많이 사용되는 실리콘, 게르마늄, 셀레늄화아연, 사파이어 네 가지 재료를 후보군으로 하여 레이저빔이 투과하는 조건에서 열해석을 수행하였다. 미러의 경우 반사 후 남은 에너지는 표면에서 모두 흡수되는 것으로 가정했지만 렌즈는 투과 과정에서 재료에 따라 흡수계수가 다르므로 흡수되는 양상도 일정하지 않다. 레이저빔 파장과 재료의 광학적, 열적 특성에 따라 레이저빔이 진행하는 두께 방향으로 열적 거동이 달라진다. 후보 재료의 열전

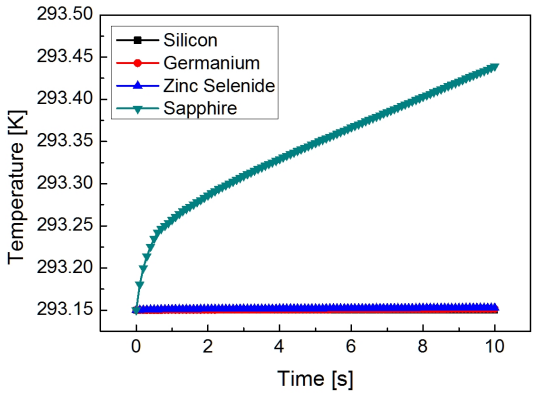

Fig. 6. Temperature variation for center of lens materials according to incidence time of laser beam.

도도, 비열, 밀도, 흡수계수 특성은 표 2와 같다[12].

렌즈 재료의 열해석 결과는 그림 6~8과 같다.

그림 6은 레이저빔 조사 시간에 따른 표면 중심 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 실리콘, 셀레늄화아연, 게르마늄에 비해 사파이어는 온도 변화량이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 열전도도만 놓고 보면 사파이어가 셀레늄화아연에 비해 약 2배 정도 높지만 사파이어의 흡수계수가 높아 흡수되는 열량이 크기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 미러 분석에서 언급한 것과 같이 레이저빔이 조사됨에 따라 재료의 온도가 상승하면 반사율이 저하된다. 온도 변화가 가장 큰 사파이어의 경우, 10초간 레이저빔 조사시 온도가 약 0.3 K 상승하며, 이에 따라 렌즈 한 매당 투과율이 약 0.005% 감소한다[7]. 그림 2의 적외선 카메라-레이저 공통광학계에 적용할 경우 렌즈가 2매 사용되어 총 투과율이 약 0.01% 감소한다. 이로 인해 시스템 잡음등가온도차가 48.005 mK로 약 0.01% 증가한다. 미러에 비해 렌즈의 잡음 증가는 무시할 수 있을 만큼 작은 수준이지만 렌즈 매수가 많아지거나 레이저빔 조사 시간이 길어질 경우 전체 시스템의 잡음 증가량이 무시할 수 없는 수준이 될 수 있다.

그림 7과 8은 각각 레이저 빔을 10초간 조사한 후의 재료의 수평방향, 수직방향의 온도분포를 나타낸 그래프이다. 적외선 카메라와 레이저를 공통광학계로 설계할 경우, 실리콘, 게르마늄과 같이 열전도도가 높고 사용하는 레이저 빔의 파장대역에서 흡수계수가 낮은 재료를 렌즈 재료로 사용하는 것이 레이저빔 흡수로 인한 영향을 최소화하여 영상 품질을 유지하는데 유리하다.

Table 2. Material properties of lens materials

	Silicon	Germanium	Zinc selenide	Sapphire
Absorption coefficient	5×10^{-4} [m^{-1}] at 4 μm	50.0 [m^{-1}] at 4 μm	4.0×10^{-2} [m^{-1}] at 4 μm	70 [m^{-1}] at 4 μm
Thermal conductivity	130 [W/m·K]	587 [W/m·K]	18 [W/m·K]	35 [W/m·K]
Specific heat	700 [J/kg·K]	310 [J/kg·K]	339 [J/kg·K]	730 [J/kg·K]
Density	2329 [kg/m^3]	5323 [kg/m^3]	5270 [kg/m^3]	3965 [kg/m^3]

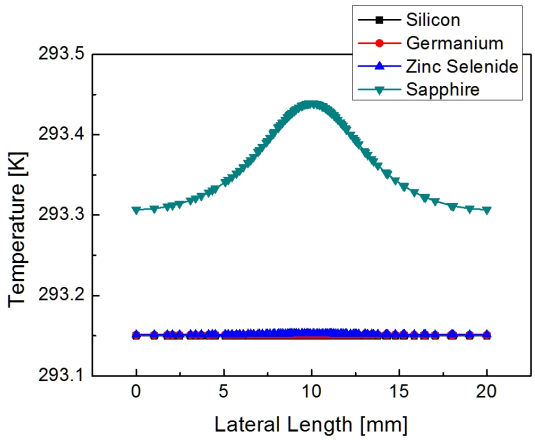

Fig. 7. Lateral temperature distribution of lens material after laser beam incidence.

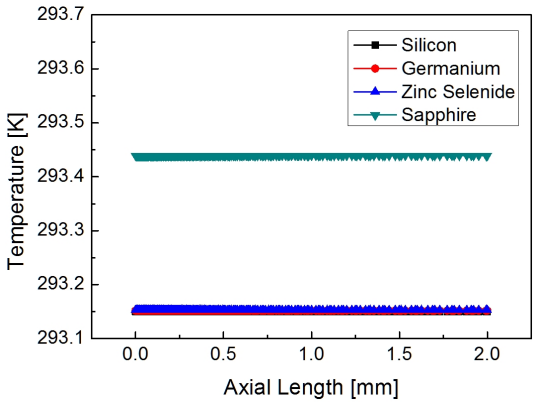

Fig. 8. Axial temperature distribution of lens material after laser beam incidence.

V. 결 론

적외선 카메라-레이저 공통광학계 구조에서 광부품 재료에 따른 열 영향성을 분석하였다. 미러와 렌즈에 레이저빔이 조사되는 상황을 모델링 하여 시간적, 공간적 온도 분포를 계산하였다. 온도 분포 특성에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 재료의 흡수율과 열전도도임을 확인하였다. 흡수율이 높고 열전도도가 낮으면 좁은 영역에 더 많은 레이저빔이 흡수되기 때문에 상대적으로 온도가 더 높아진다. 따라서 적외선 카메라-레이저 공통광학계에 사용하는 광부품은 레이저빔 파장을 고려하여 흡수율이 낮고 열전도도가 높은 특성을 갖도록 선정되어야 광부품 온도 상승에 의한 적외선 카메라의 영상 성능 저하를 방지할 수 있다.

References

1. C. Willers and M. Willers, “Simulating the DIRCM engagement: component and system level performance,” Proc. SPIE **8543**, 85430M (2012).
2. D. Maltese, J. Robineau, J. Audren, J. Aragones, and C. Sailliot, “Countering MANPADS: study of new concepts and applications,” Proc. SPIE **6203**, 62030G (2006).
3. A. Godard, M. Raybaut, T. Schmid, M. Lefebvre, A. Michel, C. Oudart, S. Teixeira, and M. Pealat, “Development of a compact frequency conversion module for airborne counter-measures,” Proc. SPIE **7836**, 78360G (2010).
4. H. Bekman, J. Heuvel, F. Putten, and H. Schleijpen, “Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques,” Proc. SPIE **5615**, 27-38 (2004).
5. A. Swat, “Minimising back reflections from the common path objective in a fundus camera,” Proc. SPIE **10151**, 101510K (2016).
6. S. T. Yang, M. J. Matthews, S. Elhadj, D. Cooke, G. M. Guss, V. G. Draggoo, and P. J Wegner, “Comparing the use of mid-infrared versus far-infrared lasers for mitigating damage growth on fused silica,” Appl. Opt. **49**, 2606-2616 (2010).
7. M. E. Thomas, R. I. Joseph, and W. J. Tropf, “Infrared transmission properties of sapphire, spinel, yttria, and ALON as a function of temperature and frequency,” Appl. Opt. **27**, 239-245 (1988).
8. O. Riou, S. Berrebi, and P. Bremond, “Non uniformity correction and thermal drift compensation of thermal infrared camera,” Proc. SPIE **5405**, 294-302 (2004).
9. J. K. Ji, J. R. Yoon, and K. Cho, “Nonuniformity correction scheme for an infrared camera including the background effect due to camera temperature variation,” Opt. Eng. **39**, 936-940 (2000).
10. X. Ma, J. Q. Lu, R. S. Brock, K. M. Jacobs, P. Yang, and X. Hu, “Determination of complex refractive index of polystyrene microspheres from 370 to 1610 nm,” Phys. Med. Biol. **48**, 4165-4172 (2003).
11. S. T. Yang, M. J. Matthews, S. Elhadj, D. Cooke, G. M. Guss, V. G. Draggoo, and P. J. Wegner, “Comparing the use of mid-infrared versus far-onfrared lasers for mitigating damage growth on fused silica,” Appl. Opt. **49**, 2606-2616 (2010).
12. “Material library,” http://www.comsol.com