

Beer-Lambert 법칙을 적용한 레이저 열원 프로파일 모델링 및  
레이저무기용 반사경의 열변형 해석을 통한 구조-열-광학 성능 연구홍대기<sup>1,†</sup><sup>1</sup>국방과학연구소 지상기술연구원A Study on Structural-Thermal-Optical Performance through  
Laser Heat Source Profile Modeling Using Beer-Lambert's Law  
and Thermal Deformation Analysis of the Mirror for Laser Weapon SystemHong Dae Gi<sup>1,†</sup><sup>1</sup>Ground Technology Research Institute, Agency for Defense Development

## Abstract

In this paper, the structural-thermal-optical performance analysis of the mirror was performed by setting the laser heat source as the boundary condition of the thermal analysis. For the laser heat source model, the Beer-Lambert model considering semi-transparent optical material based on Gaussian beam was selected as the boundary condition, and the mechanical part was not considered, to analyze the performance of only the mirror. As a result of the thermal analysis, thermal stress and thermal deformation data due to temperature change on the surface of the mirror were obtained. The displacement data of the surface due to thermal deformation was fitted to a Zernike polynomial to calculate the optical performance, through which the performance of the mirror when a high-energy laser was incident on the mirror could be predicted.

## 초 록

본 논문에서는 열해석의 하중조건으로 레이저 열원을 설정하여 반사경의 구조-열-광학 성능 분석을 수행하였다. 레이저 열원 모델은 가우시안 빔을 바탕으로 반투명한 소재를 고려한 Beer-Lambert 법칙을 적용하여 하중조건으로 선정하였으며, 반사경만의 성능 분석을 위하여 기구부는 고려하지 않았다. 열변형해석을 수행하여 반사경 표면의 온도 변화로 인한 열응력과 열변형 데이터를 얻었다. 열변형에 의한 반사경 표면의 변위 데이터를 Zernike 다항식에 피팅하여 파면오차를 계산하였으며, 이를 통해 고에너지 레이저가 반사경으로 입사될 때 반사경의 광학 성능을 예측할 수 있었다.

**Key Words** : Laser Weapon System(레이저무기체계), Mirror(반사경), STOP Analysis(구조-열-광학 성능 해석), Air Defense Weapon(대공무기), UAV(무인기), Zernike Polynomial(제르니케 다항식), Adaptive Optics(적응광학), Laser Induced Damage Threshold(레이저유발손상한계), High Reflective Coating(고반사코팅)

## 1. 서 론

레이저 무기는 발진기를 통해 발생된 레이저 빔을 대상 표적에 집속하여 복사에 의한 열을 발생시켜 무력화시키는 무기체계다. 일반적으로 레이저무기의 경우 1 회당 발사 비용은 수 천 원 정도 수준으로, 기존

의 운동에너지를 이용한 무기 체계에 비하여 경제적인 장점을 가지고 있으며, 또한 소음이 없고 높은 명중률과 낙탄 또는 파편에 의한 민간 피해를 유발할 가능성이 적은 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 현재 소형무인기를 요격하기 위한 레이저무기체계를 세계 각국에서 개발 중이며, 우리나라의 경우 최근 북한 무인기의 영공 침범 사건으로 인해 미래형 방공 무기로서 더욱 각광을 받고 있다.

레이저 무기용 반사경은 일반적인 광학감시장치용 광학계에 적용되는 반사경과는 다르게 레이저 빔에 의

Received: Apr. 19, 2023 Revised: Aug. 04, 2023 Accepted: Aug. 17, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-42-821-2578, E-mail: Hongdg@add.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

한 복사열의 영향을 받는다. 레이저 빔에 의한 복사열은 반사경이나 기구부에 열변형을 유발시키며, 이로 인하여 광학 수차가 발생하거나 광학 부품을 손상시킬 수 있기 때문에 구조-열-광학 성능 해석으로 반사경의 열특성을 파악할 필요가 있다. 레이저 무기는 발생된 레이저 빔의 각종 오차를 정렬하기 위한 정렬광학계와 빔을 대상 표적에 집속하기 위한 집속광학계를 포함하며, 이들은 정밀하게 가공된 다수의 반사경과 광학부품으로 구성되어 있다.

레이저 빔이 입사된 반사경은 대부분의 에너지를 반사시키며, 반사되고 남은 에너지의 일부는 반사경체에 흡수되고 일부는 투과하여 기구부로 향한다. 따라서 고에너지 레이저 무기용 반사경의 소재는 고투과율을 갖는 소재나 열팽창계수가 작은 소재를 사용하여 광학수차를 감소시켜야하며, 단 0.1%의 반사율 손실로 인하여 광학 성능이 저하될 수 있기 때문에 다층 박막 유전체 코팅을 적용하여 특정 운용 파장에 대하여 100%에 가까운 고반사율을 갖도록 해야 한다[1].

본 논문에서는 가우시안 프로파일의 레이저 열원을 이용하여 각 재질을 적용한 열변형 해석을 수행하였고, 레이저무기에 적합한 소재와 부품 적용 가능성을 파악하고자 한다. 레이저 빔의 열원 모델을 선정하였으며, 이를 해석조건으로 적용하여 반사경의 재질과 형상, 그리고 반사율 별로 유한요소해석을 진행하였다. 반투명한 소재로 구성된 반사경의 해석에 적용하기 위한 열원의 모델로 가우시안 분포를 갖는 싱글모드 레이저 빔이 반사경의 두께 방향으로 투과할수록 감소(attenuation)되는 Beer-Lambert 법칙을 적용하였다. 반사경의 재질로 고투과율 소재인 Fused Silica 계열의 Corning® HPFS® 7980과 열팽창률이 극히 낮은 Zerodur, 변형거울에 주로 사용되는 SiC 소재를 적용하였다. 다중 가우시안 레이저 빔의 움직임을 표현하였으며, 이를 Fortran코드로 작성하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS의 DFLUX 서브루틴으로 적용하여 해석을 수행하였다.

열변형 해석 결과를 통하여 레이저 빔에 의한 반사경의 열변형, 열분포, 열응력을 확인하였다. 열변형에 의한 반사경의 표면 변위 데이터를 추출하고, 이를 Zernike 방정식에 피팅하여 반사경의 광학 성능인 파면오차를 확인하였다.

## 2. 구조-열-광학 성능 해석 이론

레이저 열원을 이용한 재료 가공은 금속과 비금속 모두에 적용가능하며, 절단, 용접, 열처리, 미소 영역가공, 정밀가공 등 넓은 분야에 적용되어 왔다. 레이저 빔은 광학계의 초점을 조절하여 국소영역에 큰 복사 에너지를 집속시키며 기존의 재료가공에서 구현하지 못한 복잡한 형상의 가공이나 열특성이 우수한 가공이 가능하다. 이러한 레이저 가공의 특징을 이용하여 표적을 파괴하는 레이저 무기체계에도 적용할 수 있다. 레이저 열원을 열유속의 형태로 재료의 표면에 복사열을 전달하며 표적을 파괴하거나 무기체계 내부 광학계의 센서를 무력화하는 등 영향을 미칠 수 있다.

본 논문에서는 레이저 열원이 광학계 표면을 따라 움직이면서 발생하는 열특성과 그에 따른 광학성능을 확인하였다.

### 2.1 레이저 열원 이론

레이저무기는 레이저 용접과 작동 방식이 유사하며, 고밀도 레이저 복사열원을 이용하여 표적을 파괴한다. Y.-N. Liu는 레이저 용접에서 고밀도 레이저 열원을 가우시안 분포를 기반으로 한 프로파일 모델링을 제시하였다[2].

본 연구에서는 연속발전형 레이저를 사용하였고, 이를 유한요소해석의 조건으로 적용하기 위하여 가우시안 분포를 갖는 열유속의 형태로 모델링하였다. Fig. 1은  $z$ 축을 따라 전파되는 가우시안 빔을 보여준다.

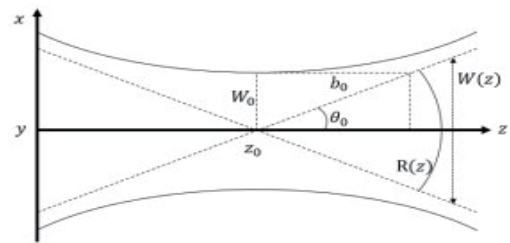


Fig. 1 Gaussian Beam Propagation Diagram

$z$ 축을 따라 전파되는 가우시안 빔의 진폭 함수  $\psi_G$ 는 식 (1)과 같다[3].

$$\psi_G(r, t) = \frac{C}{z - z_0 - ib_0} \cdot \exp\left[ik \frac{x^2 + y^2}{2(z - z_0 - ib_0)} + ikz - i\omega t\right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

$z_0$ 는 초점의 좌표,  $b_0$ 는 레일리 영역,  $n$ 은 매질의 굴절률,  $\lambda_0$ 는 진공에서 광의 파장일 때  $b_0$ 는 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$b_0 = \frac{n\pi W_0^2}{\lambda_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

복소수  $\frac{1}{z - z_0 - ib_0}$ 를 실수부와 허수부의 합으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{1}{z - z_0 - ib_0} = \frac{1}{R(z)} + \frac{2i}{kW^2(z)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

이를 식(1)에 대입하여 정리하고, 가우시안 빔의 세기  $I_G$ 는 진폭 함수  $\psi_G$ 의 제곱에 비례하므로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_G(x, y, z) = I(z) \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{W^2(z)}\right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

가우시안 빔의 출력은 광의 세기의 횡단면에 대하여 적분한 값이며, 식 (5)와 같다.

$$P = I(z) \left[ \frac{\pi W(z)^2}{2} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하여 소거하면 식 (6)과 같다.

$$I_G(x, y, z) = \frac{2P}{\pi W^2(z)} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{W^2(z)}\right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

식 (6)과 같이 가우시안 분포의 열원 모델은 표면에서의 열유속 만을 보여주며, 흡수율이 낮은 증기층 (vapor column)이나 투과율이 높은 소재에 대한 체적 열원 모델로 적합하지 않다. 따라서 소재의 흡수율, 투과특성과 같은 소재에 따른 열원의 특성에 맞도록 식(6)을 기반으로 열원 모델을 제시하고자 한다.

Beer-Lambert 법칙은 매질의 성질과 빛의 감쇠에 대한 법칙이다. 분석화학 분야에서도 흔히 사용되며, 레이저 열원에 대하여 적용이 가능하다. 고체나 액체 상태의 물질은 밀도도 높으며, 이에 따라 레이저의 흡수(absorption)도 굉장히 높아 감쇠가 일어나는 구간이 수 미크론 단위로 굉장히 짧다. 반면에 소재에 상 변화가 일어나 증기층이 발생하게 된다면 그 층은 흡수율이 낮아지게 된다. 동일한 원리로 투과율이 높은 소재에도 적용할 수 있다. Benoît Cosson은 반투명한 폴리머 소재의 레이저 용접 가공 과정을 모사하기 위하여 레이저 열원에 Beer-Lambert 법칙을 선택하였다[4].

시준된 레이저 빔이 조사되어 반사경에 조사되었을 때의 표면에서의 빔의 반경이  $r_0$ 이면, 레이저 열원이 반사경의 표면( $X - Y$ 평면)을 따라 움직이며 열을 가하는 열원은 식(7)과 같이 표현할 수 있다. 레이저 열원의 속도 성분을  $v_x$ 와  $v_y$ 로 표현하고, 소재의 흡수율과 빔의 강도가 감소되는 것을 Beer-Lambert 법칙에 따라 감쇠계수 항을 넣어 표현하였다[5].

$$I_G(x, y, z) = \frac{2\alpha P}{\pi r_0^2} \exp\left[-2 \frac{(x - v_x t)^2 + (y - v_y t)^2}{r_0^2} - \alpha z\right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

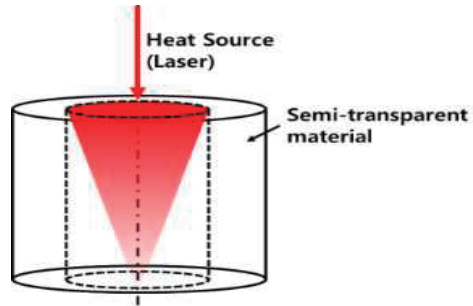


Fig. 2 Beer-Lambert's Law Heat Source

## 2.2 반사경에서 반사, 흡수, 투과

반투명한 재질(Semi-transparent material)은 복사 에너지를 표면에서 반사, 재질 내부에서 흡수, 밖으로 투과시키는 재질을 의미한다. 대부분의 광학 소재는 반투명한 재질로 정의할 수 있으며, 이 때 재질의 반사율, 흡수율, 그리고 투과율의 특성은 아래 식 (8)과 같이 정의할 수 있다[6].

$$R + \alpha + \tau = 1 \dots\dots\dots (8)$$

레이저무기에서는 반사경의 반사율이 중요한 성능 지표이다. 반사코팅의 반사율이 낮을수록 식 (8)에 따라 흡수율은 증가하며 레이저 유발 손상을 야기할 수 있다. 따라서 레이저무기의 반사경은 특정 파장을 대상으로 HR(High Reflectivity) 코팅을 수행하여야 한다. 본 논문에서는 HR 코팅의 반사율을 99.85%와 99.95%로 가정하였다[7]. 소재마다 투과율은 1060 ~ 1100 nm 파장을 기준으로 선정하였으며, 반사경체에 흡수되는 에너지는 식 (8)에 따라 반사된 에너지와 투과된 에너지를 제외한 값으로 가정하였다.

아래 Table 1는 반사경 코팅에 사용되는 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> SiO<sub>2</sub>의 물성이며, Table 2은 반사경의 소재로 사용되는 Corning® HPFS® 계열의 7980, Zerodur 그리고 SiC의 물성이다.

## 2.3 Zernike 다항식

레이저 열원이나 중력 등에 의한 외력을 하중조건으로 하여 유한요소해석을 수행하고, 해석 결과로 얻은 반사경 표면의 변위 데이터는 Zernike 다항식을 통하여 어느 수차가 얼마나 발생하였는지, 그리고 발생한 파면 오차의 평균을 계산할 수 있다[8]. Zernike 다항식은 일반적으로 단위원으로 정의할 수 있으며, 원주 방향의 함수와 반경 반향의 함수로 표현 할 수 있다. 정규화(normalized)된 반경  $\rho(\rho = r/R, R$ 은 입사동의 반경)에 대하여 원주 방향의 함수를  $\Theta_n^m(\theta)$ , 반경 방향의 함수를  $R_n^m(\rho)$ 로 표현하면 Zernike 다항식은 다음 식(9)와 같이 정의할 수 있다[9].

**Table 1** Coating Material Properties

Property	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>
Thermal conductivity [W/(m • K)]	33(bulk) 0.3 to 0.6(thin film)	1.38(bulk) 0.2 to 0.5(thin film)
Heat capacity [J/(kg • K)]	306	746
Young's Modulus [GPa]	140	72
Poisson's ratio	0.23	0.17
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	6850	2200
CTE [10 <sup>-6</sup> /K]	3.6	0.51

**Table 2** Mirror Material Properties

Property (@ 20 °C)	Zerodur	Corning 7980	SiC
Thermal conductivity [W/(m • K)]	1.46	1.38	118
Emissivity [10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	0.72	0.75	1.7e2
Heat capacity [J/(kg • K)]	821	770	672
Young's Modulus [GPa]	90.3	73	414
Poisson's ratio	0.24	0.16	0.14
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2530	2200	3200
Internal transmittance (@ 1060 nm, Zerodur)	0.99615	0.99987	0.13584
	(@ 1 mm thickness)		
Internal transmittance (@ 1100 nm, Corning 7980)	0.962	0.9987	2.14E-9
	(@ 10 mm thickness)		
CTE* [10 <sup>-6</sup> /K]	0.08	0.52	3.7

\*Coefficient of Thermal Expansion

$$\begin{cases} Z_{even j} = \sqrt{n+1} R_n^m(\rho) \sqrt{2} \cos m\theta, m \neq 0 \\ Z_{odd j} = \sqrt{n+1} R_n^m(\rho) \sqrt{2} \sin m\theta, m \neq 0 \\ Z_j = \sqrt{n+1} R_n^0(\rho), m = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 n은 반경 방향의 지수(Radial degree)이며, m은 방위각의 지수(Azimuthal degree)다. 두 지수는 식 (10)의 조건을 만족해야하며 반경 방향 함수는 다음 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} m \leq n \\ n - |m| = even \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{n-m/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [\frac{n+m}{2} - s]! [\frac{n-m}{2} - s]!} \rho^{n-2s} \dots\dots\dots (11)$$

Noll 직교화 방법을 사용하여 Zernike 다항식의 각 항이 서로 직교하면서 독립인 함수로 표현 가능하며, 파면오차  $W(\rho, \theta)$ 는 다음 식(12)와 같이 Zernike 다항식의 극좌표계 형태로 표현할 수 있다[6].

$$W(\rho, \theta) = \sum_{i=0}^n C_i Z_i(\rho, \theta) \dots\dots\dots (12)$$

여기서  $C_i$ 는 Zernike 다항식의 계수이다. 식 (12)를  $C_i$ 에 대하여 정리하면 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W(\rho, \theta) Z_i(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \dots (13)$$

파면오차의 RMS값은 파면오차의 평균( $\overline{W(\rho, \theta)}$ )를 이용하여 다음 식 (14)와 같이 정리할 수 있다[10].

$$WFE_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1} (C_i^2 - C_1^2)} = \sqrt{\sum_{i=2} C_i^2} \dots\dots\dots (14)$$

### 3. 반사경 해석 모델 및 결과

#### 3.1 열변형 해석 모델

본 논문에서는 고에너지 레이저가 반사경에 미치는 영향을 알아보기로자 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여  $\Phi 120$ 의 두께 7.0 mm인 원판형상의 반사경과  $\Phi 120$ 의 두께 1.0 mm 변형거울을 분석하였다. 반사경 소재는 Corning 7980, Zerodur 그리고 SiC를 적용하였다. 코팅층의 두께는 수 마이크로 수준이기 때문에 Skin 기능을 이용하여 반사경 표면부 코팅을 맴브레인 모델로 모사하였다. 표면부 코팅 모델의 소재는  $Ta_2O_5$ 를 적용하였다.

열변형해석은 ABAQUS/Explicit을 사용하여 진행하였다. 반사경만의 성능 분석을 위해 기구부를 고려하지 않았으며, 접촉제는 광학 소재에 비하여 탄성계수가 수백분의 1 수준으로 낮기 때문에 열변형 해석을 위한 경계조건을 Free-Free로 가정하였다. 노드는 총 10,913개이며, 해석에 사용된 요소는 C3D8T(반사경) 7,668개, C3D6T(반사경 중심부) 1,836개, M3D4R(코팅층) 2,052개, M3D3(코팅층 중심부) 108개로 해석 모델을 구성하였다. 계산의 step time은 고정으로 0.1 초씩, 60초간 총 600 프레임의 변화량을 보고자 transient 해석을 수행하였다. 계산 시간은 스텝 당 3 초 수준으로 계산에 소요된 시간은 약 30분이 소요되었다. Fig. 3은 열변형 해석 모델의 다이어그램으로, 불투명한 재질인 반사경체에 레이저 빔이 입사될 때 반사되는 레이저 빔, 흡수되는 에너지, 그리고 투과되는 레이저 빔의 관계를 나타낸다. Fig. 4와 5는 열변형 해석에 사용된 반사경 메쉬 형상이다.

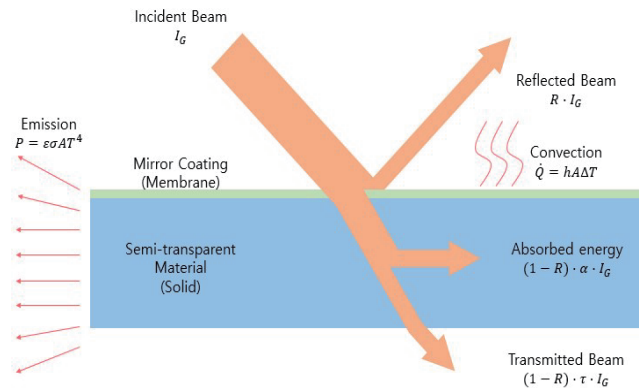


Fig. 3 Thermal Analysis Diagram





Fig. 4 Mirror FEA Model(side)

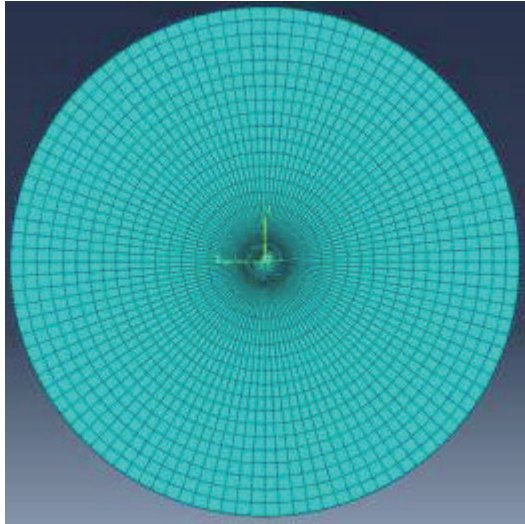


Fig. 5 Mirror FEA Model(front)

계산에 필요한 Stefan-Boltzmann 상수, 절대영도, 반사경 표면에서의 열전달상수를 추가적으로 입력하였다. 반사경 표면에서 대류 열전달에 의해 냉각되는 현상을 정의하기 위하여 열전달 계수를 고려하였다. 온도 변화가 크지 않아 단순하게 상수로 고려하였으며, 반사경이 설치된 광학계 내부에서 유동이 미미하다고 가정하여  $5 \text{ W/m}^2$ 로 설정하였다. 해석에 적용된 레이저 열원 모델은 식(7)을 적용하여 모델링을 수행하였다. 레이저 열원은 x축에 대하여  $45^\circ$ 로 입사되어 반사경에 정사영되어 반사경 표면에서 타원 형상을 갖는다. 반사경의 투과율은 두께에 따라 변한다. 반사경이 두꺼울수록 내부에서 흡수되는 에너지가 많아져 투과율은 낮아지며, 본 연구에서 투과율은 두께에 따라 선형으로 변화한다고 가정하였으며, 변형거울의 경우 Table 1의 투과율을 적용하였다. 반사율은 99.85%와 99.95%으로 설정하였으며, 출력에 반사율과 투과율을 고려하여 경계조건으로 해석을 진행하였다.

레이저 열원을 모사할 수 있는 유한요소해석 프로그램은 다양하지만, 본 연구에서는 ABAQUS 2021 버전을 사용하여 해석을 진행하였다. 해석은 움직이는 비균일분포 열원을 모사하기 위하여 ABAQUS에서 지원하는 user subroutine 중 DFLUX를 사용하였다.

DFLUX는 비선형, 비균일 분포 복사 열원에 대하여 정의할 때 사용한다. 속도성분인 식 (7)의  $v_x$ 와  $v_y$ 는 무기체계에서 냉각에 의해 발생한 지터의 영향을 받는다고 가정하였으며, 이를 조화함수로 표현하여 레이저 열원의 움직임을 모사하였다.

### 3.2 반사경 해석 결과

구조-열해석은  $\Phi 120$ 의 두께 7.0 mm인 원판 형상과 두께 1.0 mm의 변형 반사경을 기준으로 진행하였다. 해석에 사용된 열원으로 000 kW 3중첩 레이저빔과 000 kW 2중첩 레이저빔을 적용하여 수행했으며, 반사경의 소재를 Zerodur와 Corning 7980, SiC으로 설정하였고, 반사경 코팅의 반사율은 99.85%와 99.95%로 설정하여 총 24가지 조건에 대한 해석을 진행하였다. 구조-열해석의 결과로 온도 분포와 열변형 형상, 그리고 열응력 분포를 확인하였다. 24가지 경우 중 Corning 7980과 Zerodur는 온도분포와 응력 분포 형상이 서로 유사하였으며, SiC의 경우 열전도율과 흡수율이 높아 다른 형상을 띈다. Fig. 6은 Corning 7980, Fig. 7은 Zerodur의 해석 결과이며, Fig. 8은 SiC의 해석 결과이다.

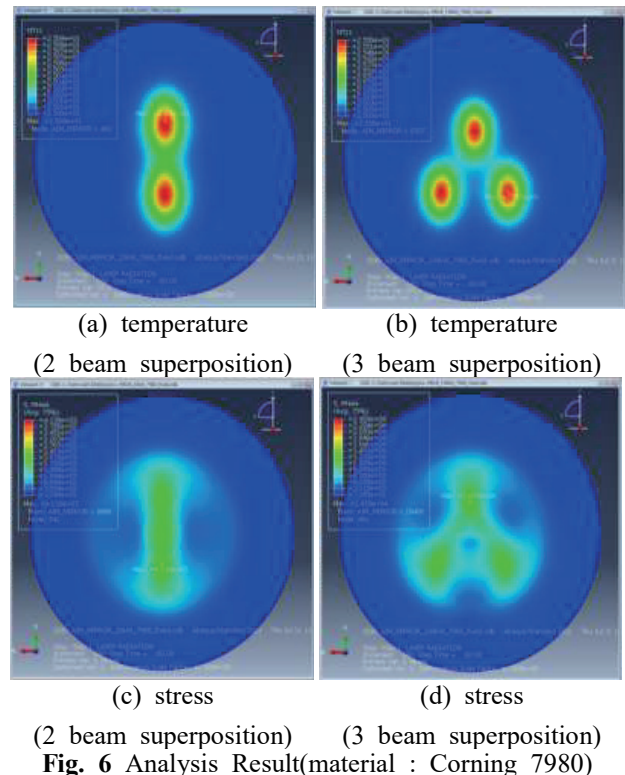
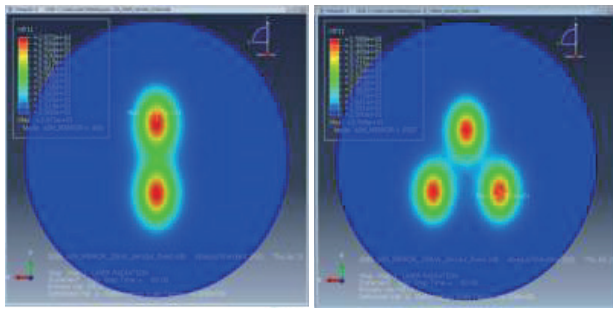
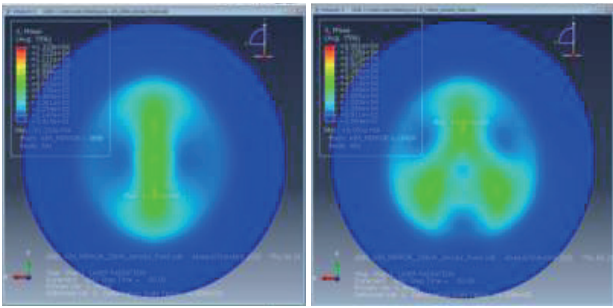


Fig. 6 Analysis Result(material : Corning 7980)

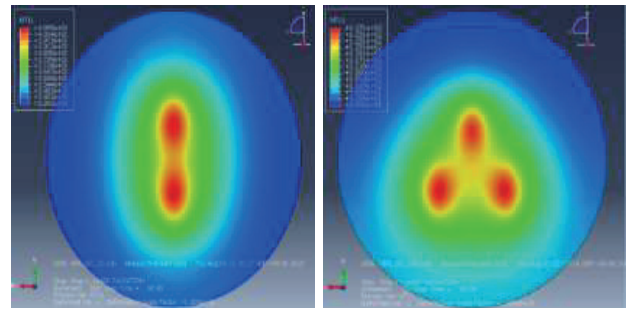


(a) temperature (2 beam superposition)      (b) temperature (3 beam superposition)

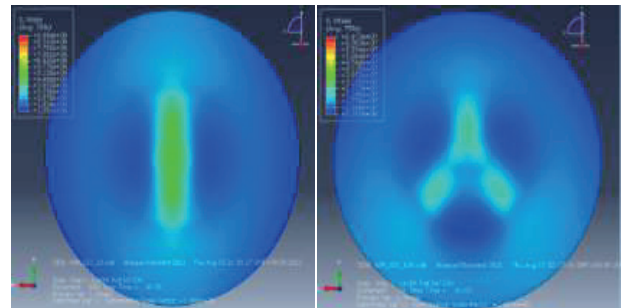


(c) stress (2 beam superposition)      (d) stress (3 beam superposition)

**Fig. 7** Analysis Result(material : Zerodur)

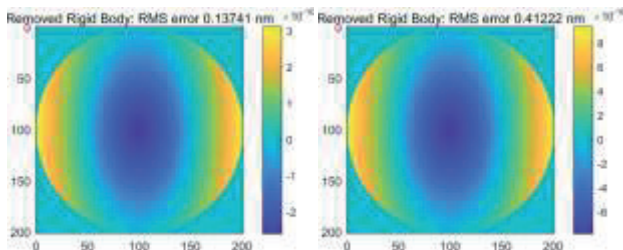


(a) temperature (2 beam superposition)      (b) temperature (3 beam superposition)

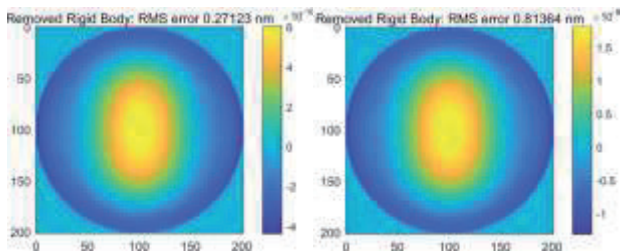


(c) stress (2 beam superposition)      (d) stress (3 beam superposition)

**Fig. 8** Analysis Result(material : SiC)

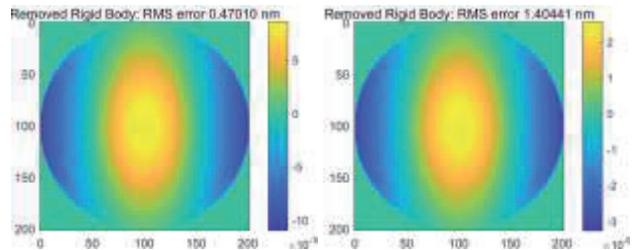


(a) 1t - 99.95%      (b) 1t - 99.85%

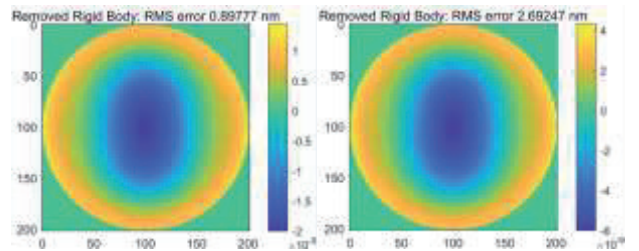


(c) 7t - 99.95%      (d) 7t - 99.85%

**Fig. 9** WFE Analysis Result(material : 7980) (2 beam superposition)



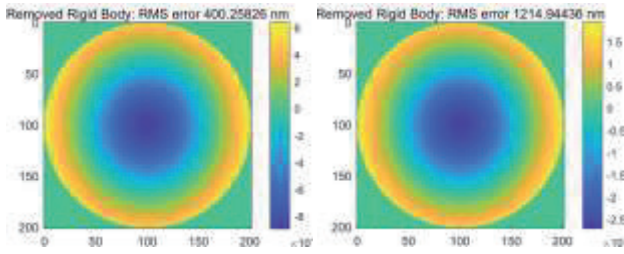
(a) 1t - 99.95%      (b) 1t - 99.85%



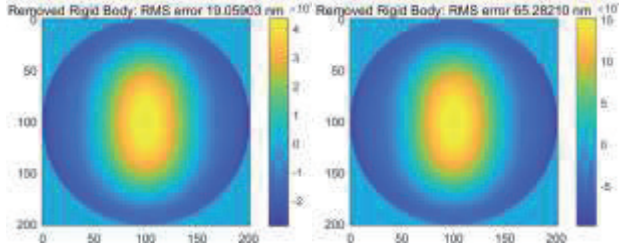
(c) 7t - 99.95%      (d) 7t - 99.85%

**Fig. 10** WFE Analysis Result(material : zerodur) (2 beam superposition)



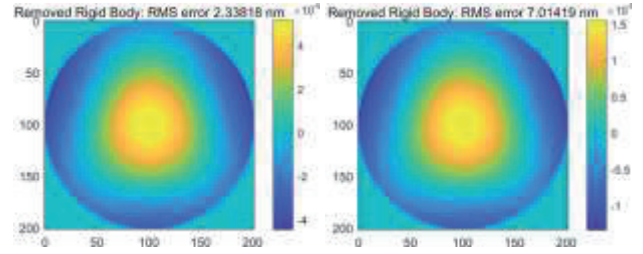


(a) 1t - 99.95%                      (b) 1t - 99.85%

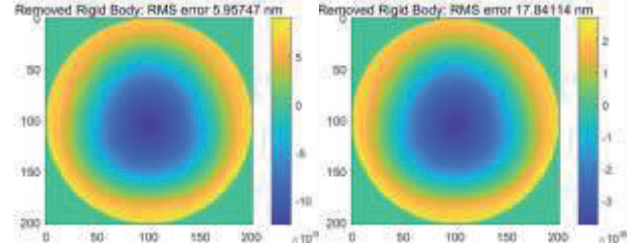


(c) 7t - 99.95%                      (d) 7t - 99.85%

**Fig. 11** WFE Analysis Result(model : SiC)  
(2 beam superposition)

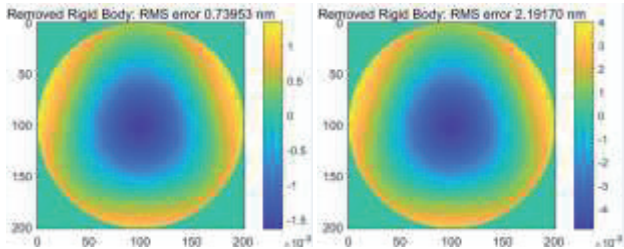


(a) 1t - 99.95%                      (b) 1t - 99.85%

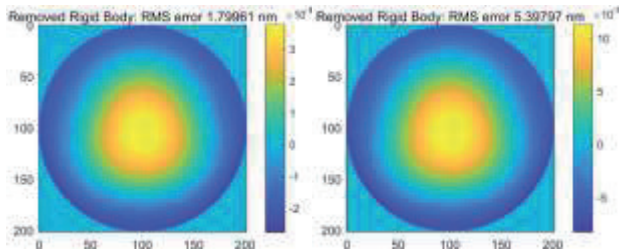


(c) 7t - 99.95%                      (d) 7t - 99.85%

**Fig. 12** WFE Analysis Result(material : zerodur)  
(3 beam superposition)

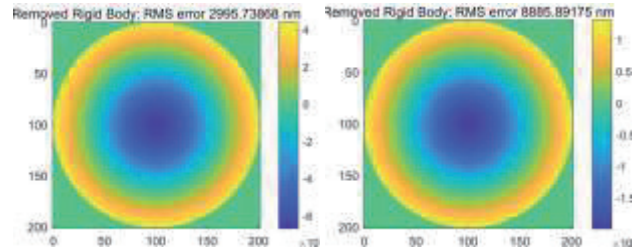


(a) 1t - 99.95%                      (b) 1t - 99.85%

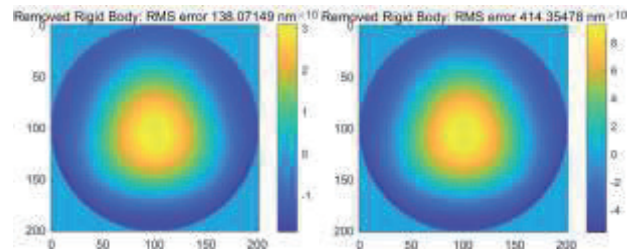


(c) 7t - 99.95%                      (d) 7t - 99.85%

**Fig. 13** WFE Analysis Result(material : 7980)  
(3 beam superposition)



(a) 1t - 99.95%                      (b) 1t - 99.85%



(c) 7t - 99.95%                      (d) 7t - 99.85%

**Fig. 14** WFE Analysis Result(material : SiC)  
(3 beam superposition)



**Table 3** Analysis Result by Condition - 1t

출력 [kW]	반사율 [%]	재질	온도상승 [Δ℃]	파면오차 [nm]	응력 [Pa]
000 3중첩 빔	99.95	7980	0.28	0.739	1.53e4
		Zerodur	7.43	2.34	6.61e4
		SiC	233.7	2995.74	1.38e8
	99.85	7980	0.84	2.19	4.59e4
		Zerodur	22.29	7.01	1.98e5
		SiC	700.9	8885.89	4.14e8
000 2중첩 빔	99.95	7980	0.05	0.14	2.69e3
		Zerodur	1.28	0.47	1.17e4
		SiC	33.1	400.26	1.89e7
	99.85	7980	0.15	0.41	8.07e3
		Zerodur	3.84	1.40	3.49e4
		SiC	99.3	1214.94	5.68e7

**Table 4** Analysis Result by Condition - 7t

출력 [kW]	반사율 [%]	재질	온도상승 [Δ℃]	파면오차 [nm]	응력 [Pa]
000 3중첩 빔	99.95	7980	0.81	1.78	4.27e4
		Zerodur	7.51	5.96	1.36e5
		SiC	43.49	138.07	2.51e7
	99.85	7980	2.44	5.40	1.28e5
		Zerodur	15.87	17.84	4.08e5
		SiC	129.9	414.35	7.50e7
000 2중첩 빔	99.95	7980	0.13	0.27	7.01e3
		Zerodur	2.52	0.90	2.22e4
		SiC	6.16	19.06	3.47e6
	99.85	7980	0.39	0.81	2.10e4
		Zerodur	7.56	2.69	6.67e4
		SiC	18.46	65.28	1.04e7

열-구조해석 24가지 케이스 중에서 다른 재질에 비하여 SiC 재질의 반사경이 큰 파면오차가 발생하였다. SiC 재질은 높은 열전도율과 내열 특성이 우수하지만, 낮은 투과율로 인하여 복사열을 흡수해 큰 온도변화와 열응력이 발생하였다. 나머지 Zerodur와 Corning 7980의 경우 투과율이 높은 소재이기 때문에 해석 결과 유의미한 변화는 없었다. 24가지 케이스 전부 레이저 열원에 의한 국부적인 가열로 인하여 발생된 파면오차 중 Zernike 다항식의 강제모드(1~3번째)를 제외하면 Defocus(4번째)항이 대부분의 성분임을 확인할 수 있었다. 아래의 Table 3, 4는 각 해석 조건별 파면오차량과 온도 상승량, 열응력을 정리한 표다.

### 4. 결 론

본 논문은 레이저 열원의 프로파일 모델링과 레이저 무기용 반사경에 대하여 구조-열-광학-성능 분석을 수행한 결과를 제시하였다. 레이저 빔이 반사경에 입사되었을 때의 열에 의한 형상 변형과 온도 분포를 확인하였고 이에 따라 발생한 반사경의 열응력과 표면의 파면오차를 계산하였다.

반사경의 유한요소해석에 앞서, 경계조건으로 부여하기 위한 적절한 레이저 열원 모델을 선정하였다. 레이저 열원은 가우시안 분포를 갖는 레이저로 가정하였다. ABAQUS의 복사열원 기본 옵션은 Top-Hat 형태의 균일분포 옵션만을 제공하기 때문에, 복사열에 의한 반사경의 열적 거동을 정확하게 모사하기 위하여 가우시안 분포 기반의 해석적 모델링을 제시하였다. Top-Hat 형태의 균일분포 열원으로 구현할 수 있는 빔의 형태는 매우 제한적이며 레이저무기에서 사용되는 다중 레이저 중첩 빔을 구현할 수 없다. 또한, 이를 열원으로 열변형 해석을 수행한다면 발생하는 defocus 등 광학 수차 또한 실제 현상과 매우 다를 것으로 판단된다.

반사경은 반투명한 소재이므로 열원은 가우시안 분포를 기반으로 Beer-Lambert 법칙을 적용한 모델을 사용하였으며, 이를 유한요소해석 툴인 ABAQUS에서 DFLUX 서브루틴을 통하여 구현하였다. 그리고 수 마이크로 단위의 얇은 코팅면을 단순화하기 위하여 단층의 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>로 가정하였다. 실제 반사경의 코팅면은 공정

방법과 환경에 따라 반사율과 파면오차가 변화할 수 있으며, 실제 고에너지 레이저 시험 시 본 논문의 결과보다 파면오차량이 더 발생할 수도 있다.

해석 모델은 7t 반사경과 1t 반사경 두 가지 경우가 있다. 7t 반사경은 레이저무기를 구성하는 광학부품으로 사용되며, 1t 반사경은 추후 연구가 진행될 적응광학용 변형 거울에 사용된다. 재질은 레이저무기에 적합한 소재의 특성을 파악하고자 고투과율 소재인 Corning HPFS 7980, 열팽창 계수가 극히 낮은 Zerodur, 내열성 소재이며 열전도율이 높은 SiC를 선정하였다. 레이저무기용 광학소재의 파면오차 허용량을  $\lambda/8$ (@ 1070 nm)정도 할당하며, 레이저 유발 손상 한계(LIDT)는 반사경의 온도 변화량을  $1.5^{\circ}\text{C}$  이상 변화하면 문제가 있다고 판단한다. 열변형 해석과 파면오차 분석 결과, Corning HPFS 7980 소재의 반사경은 해당 조건에서 광학 성능이나 기계적인 문제는 보이지 않았다. Zerodur 소재의 반사경은 레이저 빔 출력 20 kW, 반사율 99.95%의 경우를 제외하고 파면오차 변화량은 기준을 충족하나, LIDT 성능을 만족하지 못하는 것을 확인하였다. Zerodur 소재의 반사경은 주경과 같은 큰 면적을 갖고 입사되는 열유속량이 작은 부품에 적합하다. SiC 소재의 반사경은 큰 파면오차와 열이 발생하였다. 해석 결과에 따르면 SiC 소재의 반사경은 7t와 1t에서 모두 파면오차 허용량인 133 nm를 초과하였다. 이 결과를 통해 반사율이 특정 수치 이하 또는 흡수율이 높은 소재로 제작된 반사경에서 상당한 열이 발생함을 알 수 있었으며, 실제 반사경과 기구부의 본딩 부위에서 열에 의한 특성변화나 고열에 의한 반사경 코팅 소재의 손상 등 위험한 문제가 발생할 수도 있음을 파악하였다.

고투과율 소재의 반사경은 뒤편으로 투과되는 에너지가 기구부와 접착제가 도포된 부분을 가열시킬 수 있다. 입사된 레이저로 인하여 기구부는 열변형을 유발할 수 있으며, 접착제는 특성에 따라 가열된 반사경과 같은 고열에 노출되면 탄성계수가 낮아지거나 열화되어 강도가 떨어질 수 있다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해 코팅의 반사율을 높이거나, 반사경을 투과한 레이저 열원이 기구부에 입사되지 않거나 최소화하는 구조 설계, 또는 반사경에 대한 직접적인 냉각 설계가 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 2023년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과입니다.

## References

- [1] J. H. Choi and Y. S. Kim, "Wavefront Distortion Caused by High Energy Laser Beam in the Relay Mirrors of the Laser Beam Director," *Korean Journal of Optics and Photonics*, vol. 19, No. 2, pp. 144-149, Apr. 2008.
- [2] Y.-N. Liu, E. Kannatey-Asibu Jr., "Laser Beam Welding with Simultaneous Gaussian Laser Preheating," *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, No. 1, pp. 34-41, Feb 1993.
- [3] S. Chang, "Degradation in the M2 Factor of a Laser Beam by a Spherically Aberrated Optical Surface," *New Physics:Sae Mulli(The Korean Physical Society)*, Vol. 60, No. 11, pp. 1216-1219, Nov. 2010.
- [4] Benoît Cosson, André C. A. Asséko, Mylène Lagardère, M. Dauphin, "3D Modeling of Thermoplastic Composites Laser Welding Process - A Ray Tracing Method Coupled with Finite Element Method," *Optics&Laser Technology*, Vol. 119, No. 10:5585, pp. 1-8, Nov 2019.
- [5] O. Fuad, W. Katrin, L. Tobias, S. Michael, D. Dietmar, K. Carolin, "Modeling of Laser Beam Absorption in a Polymer Powder Bed," *Polymers*, Vol. 10, No. 7:784, Jul 2018.
- [6] H. O. McMahon, "Thermal Radiation from Partially Transparent Reflecting Bodies," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 40, No. 6, pp 376-380, Feb 1950.
- [7] Paul Klocek, *Handbook of Infrared Optical Materials*, 1st Ed., CRC Press, pp. 483-586, 2019.
- [8] D. G. Hong, J. H. Hwang, "Design of 3-Axis Focus Mechanism Using Piezoelectric Actuators for a Small Satellite Camera," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol.12, No.3, pp. 9-17, Aug 2018.
- [9] Robert J. Noll, "Zernike Polynomials and Atmospheric Turbulence," *Journal of Optical Society of America*, Vol. 66, No. 3, pp. 207-211, Oct 1976.
- [10] V. N. Mahajan, "Zernike Circle Polynomials and Optical Aberrations of Systems with Circular Pupils," *Applied Optics*, Vol. 33, No. 34, pp. 8121-8124, Dec 1994.