

고에너지 레이저빔에 의해 유발된 광집속장치 반사경 광파면 왜곡

최종호[†] · 김연수

국방과학연구소 제3기술연구본부
☎ 305-600 대전시 유성우체국사서함 35-5

(2008년 2월 19일 받음, 2008년 3월 19일 수정본 받음)

대구경 레이저 광집속장치의 쿠데(Coude) 광경로를 구성하는 레이저 반사경들의 레이저 빔조사에 의한 열변형과 이에 따른 광파면 왜곡에 대한 연구를 수행하였다. 쿠데 광경로는 연결거울 3개와 고속조종거울 1개로 구성된다. 반사경은 레이저 빔 파장에 대하여 99.5%의 반사율을 갖고, 반사경 거울면에 조사된 레이저 에너지는 초당 500 W 정도가 흡수된다. 레이저 빔을 5초 동안 조사하면서 유발된 열하중에 의한 거울의 열 변형과 이에 따른 광파면 왜곡을 분석하였다. 광파면 왜곡은 연결거울의 경우 334 nm_PV, 98 nm rms로 나타났으며 고속조종거울은 11.5 μm_PV, 3 μm rms로 나타났다.

주제어: Finite element analysis, thermal distortion, wavefront error

I. 서 론

레이저 광집속장치(Laser Beam Director)^[1,2]는 레이저 빔을 원거리 표적에 집속시키는 시스템이다. 따라서 표적을 따라 방위각 및 고각 방향으로 자유로이 회전할 수 있어야 하므로, 광집속장치 광학계는 그림 1과 같이 쿠데 광경로를 갖는다. 쿠데 광경로는 레이저 빔의 주요 경로가 되며, 3개의 연결거울과 1개의 빔 방향 조정용 고속조종거울로 구성된다. 조사되는 레이저 빔의 에너지가 클 경우, 반사경들은 순간적인 열변형을 일으킬 수 있다. 이와 같은 열변형은 광집속장치의 집속 능력을 현저히 떨어뜨려 제기능을 발휘하지 못하게 할 수 있다. 따라서 레이저 광집속장치의 경우, 레이저 빔에 의한 반사경의 열변형 해석이 반드시 요구된다. 반사경의 열변형에 의한 광파면 왜곡을 알게 되면 광집속장치의 부경구동을 통하여 초점을 조정함으로써 집속 성능을 향상시킬 수 있다.

일반적으로 대구경 광학장비의 경우, 반사경등은 외부압력, 중력 및 열하중 등 다양한 외부 하중조건에 노출되어 변형을 가져올 수 있다. 이러한 광학 구성품의 변형은 광파면의 왜곡을 가져와 광학장비의 성능을 현저히 저하시킨다. 따라서 이와 같은 변형을 분석하고 해결하는 많은 연구가 진행되어 왔다. 한 예로 Anhu^[3] 등은 유한요소법(Finite element method)을 사용하여 열하중과 중력하중이 동시에 작용하는 환경하에서 400 mm의 직경을 갖는 8각형 프리즘에 대한 변형을 연구하였으며 중력 단독 환경 및 균일하게 변화는 열하중하에서의 변형 및 광파면 왜곡에 대해 연구를 진행하였다. B. Mack,^[4] B. C. Bigelow^[5] 등은 대구경을 갖는 천체 망원경의 주경(primary mirror)에 대해 변형 및 광파면 왜곡을 연구하였으며, M. K. Cho^[6] 또한 유한요소법을 이용하여 열하중 환

경 하에서 직경 3.5 m의 대구경 거울의 표면 변형에 대한 연구를 진행하였다. 대부분 연구는 전체적으로 균일한 온도변화에 대해 반사경이나 렌즈의 변형 및 이에 따른 광파면 왜곡에 대해 수행하였다. 반면에 레이저 광집속장치의 경우, 레이저 빔은 반사경의 온도를 순간적으로 상승시켜 열적 변형을 일으킨다.

이 논문에서는 대구경 레이저 광집속장치의 쿠데 광경로를 구성하는 반사경들의 열변형과 이에 따른 광파면 왜곡에 대한 연구를 수행하였다. 고에너지 레이저 빔의 조사에 의한 거울면의 온도 분포와 중력하중, 그리고 온도 분포에 의한 구조적 변형 계산은 UNI-graphics사의 I-DEAS 11^[7] 모델링 소프트웨어와 NX-NASTRAN 유한요소해석 프로그램을 사용하였으며, 파면왜곡을 산출하기 위해서는 PCFRINGE^[8]의 광파면 분석 소프트웨어를 사용하였다.

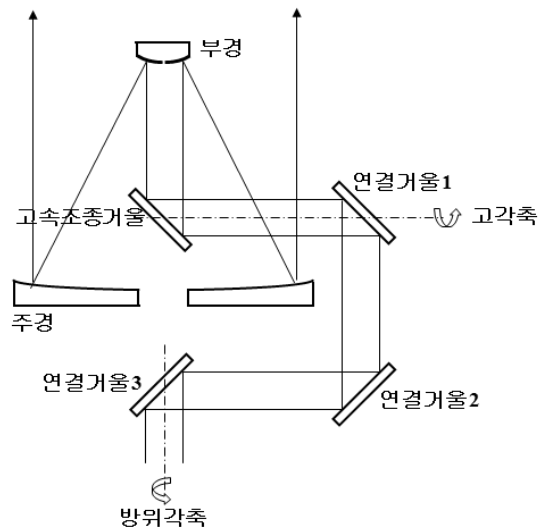


그림 1. Coude 광경로를 갖는 레이저 광집속장치.

[†]E-mail: fallssky@yahoo.co.kr

II. 이론적 배경

2.1. 열구조 변형이론

열하중 또는 압력, 중력 등 기계적 하중 하에서의 응력과 변형은 구조변형 이론에 의해 쉽게 접근할 수 있다. Timoshenko와 Goodier⁹⁾에 따르면 변형량 텐서(strain tensor)는 식 (1)에 제시된 것과 같이 구조 변형량(structural strain)과 열 변형량(thermal strain)의 합으로 표현된다.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^{(S)} + \epsilon_{ij}^{(T)} \quad (1)$$

특히 식 (1)의 두 번째 항, 열 변형량은 초기온도와 나중온도 사이의 온도 변화량과 열팽창계수와 함께 열 변형량으로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\epsilon_{ij}^{(T)} = \alpha(T_f - T_i)\delta_{ij} \quad (2)$$

여기서 T_i , T_f 는 초기 및 나중온도, α , $\epsilon_{ij}^{(T)}$, δ_{ij} 는 각각 열팽창계수, 열변형량 및 Kronecker Delta를 나타낸다. 또 열하중에 따른 열응력과 변형량의 관계를 나타내는 열구조 평형방정식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij}^{(T)} = \lambda\delta_{ij}\epsilon_{kk} + 2\mu\epsilon_{ij} - (3\lambda + 2\mu)\alpha\delta_{ij}(T_f - T_i) \quad (3)$$

여기서 $\sigma_{ij}^{(T)}$, λ , μ 는 코시응력텐서(Cauchy stress tensor), 라메(Lame)상수와 전단계수를 각각 나타낸다.

거울표면 또는 내부 온도분포는 레이저와 같은 열원과 열대류 및 재질에 의한 열전도 값과 함께 유한요소법을 이용하여 해석할 수 있다. 결과적으로 열적 평형방정식은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T)\nabla T) + q \quad (4)$$

여기서 ρ , C_p , t , $k(T)$ 와 q 는 각각 거울의 밀도, 비열비(specific heat constant), 열전도계수(thermal conductivity) 그리고 단위 체적당 열원(heat source)을 나타낸다. 위의 열적 평형방정식은 다음의 경계조건에 의해 결정된다.

$$T = T_b, \text{ 경계 } \Gamma_b \quad (5)$$

$$k\nabla T \cdot \hat{n} = q_b, \text{ 경계 } \Gamma_q \quad (6)$$

$$k\nabla T \cdot \hat{n} = -h_c(T_\infty - T), \text{ 경계 } \Gamma_c \quad (7)$$

즉 Γ_b 의 경계에서 온도 경계조건을 갖는 경우 식 (5), Γ_q 의 경계에서 전도에 의해 열이 전달되는 전도경계조건인 경우 식 (6) 과, 대류와 경계, Γ_c 를 이루는 경우 식 (7)의 경계조건

을 갖게 된다. 여기서 T_b , \hat{n} , q_b , h_c 와 T_∞ 는 각각 경계 벽면(wall)에서의 온도, 경계표면과 이루는 수직 방향 단위벡터, 벽면 열유동률과 열대류 계수 그리고 대기온도를 나타낸다.

거울의 변형은 미분방정식 형태를 갖는 구조 평형방정식(structure equilibrium equation)에 의해 결정되며 아래와 같다.

$$\sigma_{i,j,j} + f_i = 0 \quad (8)$$

여기서 f_i 는 중력, 자기력 등과 같은 단위체적당의 힘을 나타낸다.

2.2. 광파면 분석

거울 또는 렌즈 등을 통과하는 빛이나 레이저 빔의 품질은 거울 또는 렌즈의 표면 형상에 의해 결정된다. 표면에 변형이 있는 평면거울의 경우 광파면의 왜곡이 나타난다. 이러한 광파면의 왜곡 정도는 다음과 같은 제니케(Zernike) 다항식^{3,8)}을 이용하여 표현할 수 있다.

$$z(r, \phi) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n C_{nm} D_n^{n-2m}(r) \begin{cases} \sin \\ \cos \end{cases} (n-2m)\phi \quad (9)$$

$$D_n^{n-2m}(r) = \sum_{q=0}^m (-1)^q \frac{(n-q)!}{q!(m-q)!(n-m-q)!} r^{n-2q} \quad (10)$$

여기서 C_{nm} 은 제니케 상수를, D_n^{n-2m} 은 일반화된 반경 r 에 대하여 반경방향에서의 다항식 계수를 나타낸다. 즉, 제니케 계수들을 분석함으로써 광파면 왜곡을 일으키는 주요 수차(aberration) 요인에 대한 분석이 가능하다.

III. 해석결과

3.1. 온도분포 및 변형

위에서 언급한 바와 같이 고에너지 레이저 빔 조사 상태에서 연결거울 및 고속조종거울의 변형을 통한 광파면 왜곡 정도를 분석하기 위해서 다음과 같은 해석과정을 수행하였다. 우선 고에너지 레이저 조사에 의한 거울면의 온도분포를 구하여 열하중을 산출하고, 이 열하중과 중력하중에 의한 거울면의 변형을 구한다. 그리고 광파면 해석을 통하여 거울변형에 의한 광파면의 왜곡을 분석한다. 거울면의 온도분포를 구하기 위하여 위에서 기술한 이론식 (4) 및 경계조건 (5)~(7)에 기초한 유한요소법을 적용하였다. 소프트웨어로는 상용 프로그램인 UNI-Graphics사의 NX-NASTRAN를 사용하였다. 세부적으로는 거울의 3차원 모델링과 격자생성, 경계값 입력과 해석을 통하여 해석결과를 얻었다.

연결거울은 직경 190 mm, 두께가 20 mm인 원형 평면거울이다. 연결거울 반사경의 밀면은 z-축 방향으로 고정되어 있고, 밀면 고정위치와 동일한 반사경 윗면은 스프링 상수 64.8107 mN/mm를 갖는 스프링으로 눌러 주도록 되어 있으며 중력

방향에 대해 45도로 기울어져 있다. 고속조종거울의 경우 단 반경 130 mm, 장반경 170 mm를 갖고 뒷면에 홈을 내어 경량화 시킨 구조를 지니고 있다. 거울 외곽에 마운팅을 한 형태가 아니고 반사경 중앙부 홈을 이용하여 본딩된 구조를 갖고 있다. 이들 거울의 재료는 표 1과 같이 열팽창이 작아 레이저 거울에 자주 사용되는 Zerodur 재질이다.

연결거울 및 고속조종거울의 거울면에 작용하는 열하중을 얻기 위해 우선 각 거울의 온도분포를 관련식 (4) 및 경계조건 (5)~(7)를 사용하여 얻게 된다. 연결거울과 고속조종거울의 형상은 다르나 레이저 조사조건 및 거울면에서의 대류와 거울 내부 전도조건은 동일하게 설정하였다. 각 거울면에 조사된 레이저 에너지는 초당 500 W 정도가 흡수되며 5초 동

안 조사되도록 하였다. 5초 후 거울면의 온도분포를 얻기 위해 경계조건 (6)을 적용하였으며, 경계조건 (7)에 요구되는 대기온도, T_{∞} 는 초기 온도조건 300 K와 동일한 값을 갖는 것으로 가정하였다. 이때 열대류 계수는 $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 일정한 값을 갖는 것으로 하였다. 온도분포 및 거울면 변형을 유한요소법을 이용하여 구하기 위해서 대칭구조를 갖는 반 원형 유한요소 모델을 설정하였다. 이때 유한요소모델은 3 mm의 격자길이를 갖는 Parabolic tetrahedron 격자구조를 사용하였다. 레이저 빔의 경우 4각형 모양의 속이 빈 형태로서 거울에 조사되며 바깥치수는 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 이고 안쪽 치수는 $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 이다. 해석을 위해 Pentium-IV 3.4 GHz 성능의 컴퓨터를 사용하였으며 해석프로그램으로서 UNI-graphics사의 NX-NASTRAN을 사용하였다. 그림 2는 레이저 빔 조사시 시간에 따라 연결거울 및 고속조종거울 표면의 최고온도 변화를 나타낸 것이다. 레이저가 직접 조사된 부분에서 연결거울의 경우 최대 157도, 조종거울의 경우 143도까지 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 그림 3은 레이저 조사 5초 후 온도분포에 대한 해석결과이며, 레이저 조사에 의한 거울면의 열이 모든 방향으로 고르게 퍼져나가는 것을 볼 수 있다.

위에서 구한 온도분포 및 거울면에 45도로 기울어져 작용한 중력조건에서 각각 경계조건에 따른 거울면 변형을 구하기 위하여 역시 유한요소법을 사용하였다. 연결거울의 경우 반경방향으로 각 120도 방향으로 거울 끝단 부근에 반경 방향 및 회전방향에 대해서는 자유(free) 구속조건을 z축 방향으로는 고정(fixed) 구속조건을 설정하였으며 거울면 윗면에는 밑면과 동일한 120도 방향으로 끝단에 스프링 상수 64.8107 mN/mm 를 갖는 별도의 스프링 요소를 이용하여 구속하였다. 고속조종거울의 경우는 거울 밑면의 중앙부 홈이 고속조종거울 조정대와 본딩된 구조를 갖고 있어, 이 접촉부분이 고정(Fixed) 구속조건으로 작용하도록 설정하였다.

그림 4는 레이저빔 조사 5초 후의 열하중 및 중력하중에 의해 변형된 거울을 보여주고 있다. 연결거울 및 고속조종거울 모두 레이저가 조사된 면이 볼록하게 위로 변형되어 나타나며 최대 변형량의 경우 연결거울에서는 $0.026 \mu\text{m}$, 고속조

표 1. Zerodur 물성값

밀도 (kg/m^3)	강성계수 (Gpa)	포아송비	열팽창계수 ($1/\text{C}$)	열전도 계수 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
2,530	91.0	0.243	$5.0\text{e-}8$	1.46

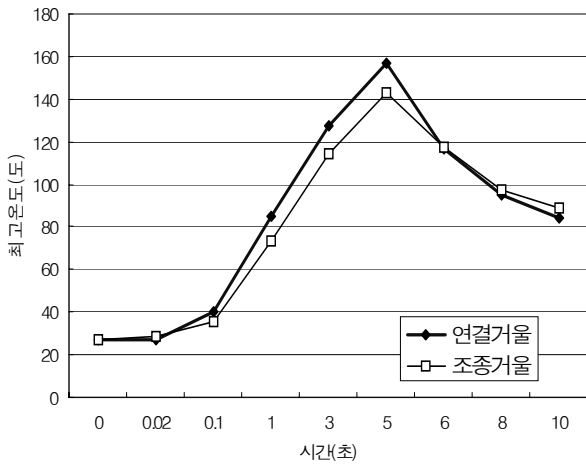
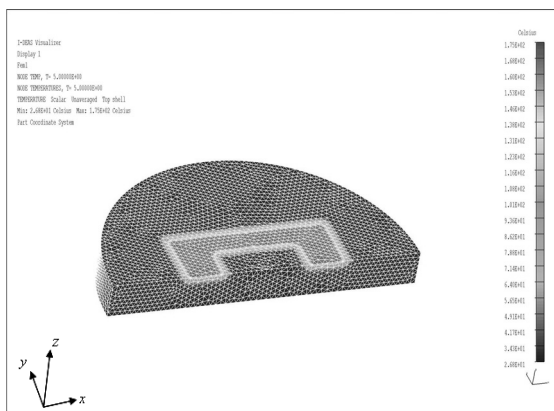
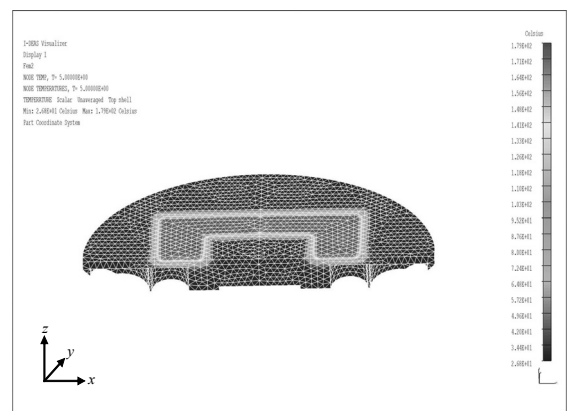


그림 2. 연결거울 및 고속조종거울 표면의 시간에 따른 최고온도 변화.

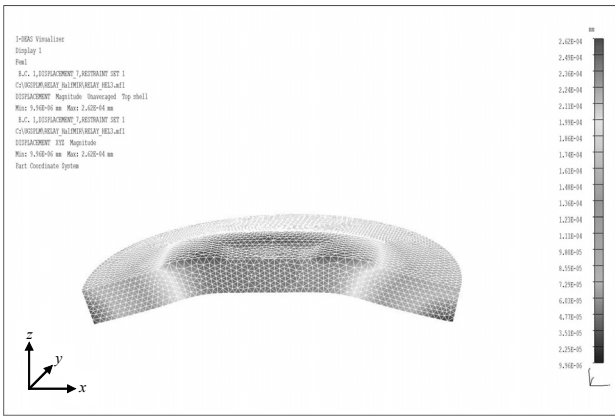


(a) 연결거울

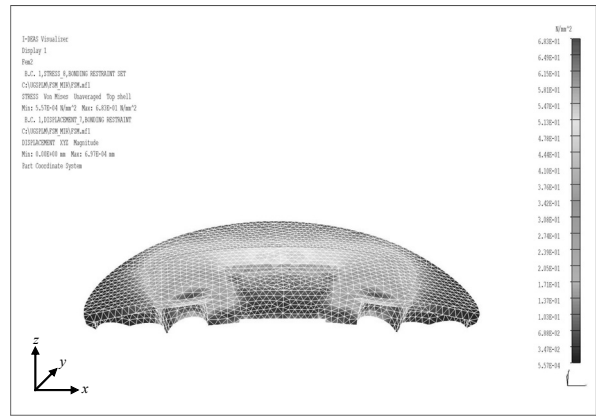


(b) 고속조종거울

그림 3. 연결거울 및 고속조종거울에 대한 레이저 빔 조사 5 초 후의 온도분포.

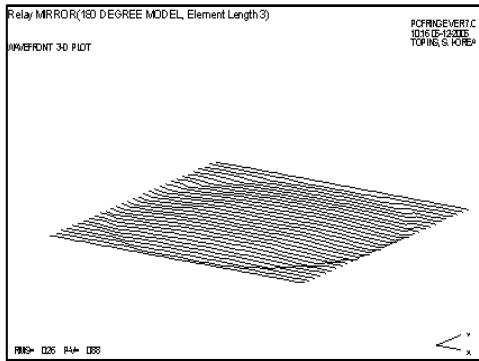


(a) 연결거울

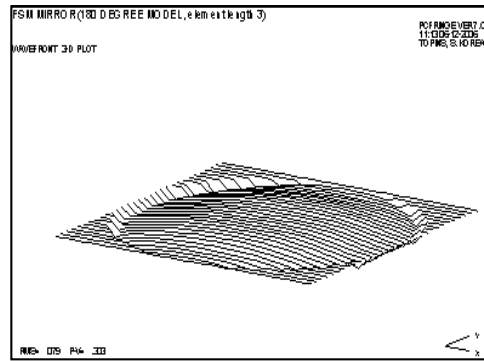


(b) 고속조종거울

그림 4. 레이저 빔 조사 5 초 후의 열온도 분포 및 중력하중에 의한 반사경 변경.



(a) 연결거울



(b) 고속조종거울

그림 5. 레이저 빔에 의한 연결거울 및 고속조종거울의 광파면 왜곡.

종거울의 경우 $0.070 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 이러한 거울의 변형은 평행광으로 입사한 광파면을 왜곡시키게 된다.

3.2. 광파면 분석

광파면 왜곡 정도를 분석하기 위하여 3.1절에서 구한 거울면의 기계적 변형량을 이용하여 파면 광학적 성능해석을 실시하였다. 광학면의 변위를 제니케 함수로 표현 가능한 PCFRINGE 광학 소프트웨어를 이용하여 거울면들의 광학성능을 분석하였다. 그림 5는 연결거울 및 고속조종거울의 광파면 왜곡 현상에 대한 분석결과이다. $3.8 \mu\text{m}$ 의 파장을 갖는 레이저 빔이 Zerodur 재질을 갖는 각 거울면에 조사된 5초 후, 거울면 변형에 의한 광파면 왜곡은 표 2에 제시된 바와 같이 연결거울의 경우 $0.088 \lambda_{PV}$ 와 $0.026 \lambda_{RMS}$ 값을 갖는 것으로 나타났으며 고속조종거울의 경우 $0.303 \lambda_{PV}$ 및 $0.079 \lambda_{RMS}$ 값을 갖는 것으로 나타났다.

또한 왜곡 정도를 나타내는 척도로 사용되는 제니케 계수를 분석한 결과 연결거울 및 고속조종거울 모두 비초점(afocal aberration) 계수 및 비점수차(astigmatism aberration) 계수가 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 위 결과로부터 연결거울 한 개의 광파면 왜곡 정도는 적은 수준이나 여러 개(여기서는 4개)의 연결거울이 사용되는 경우 레이저 빔의 광파면은

표 2. 열하중에 의한 거울면의 변형($\lambda = 3.8 \mu\text{m}$)

	최대변형량 (mm)	최소변형량 (mm)	P_V	RMS
연결거울	$2.62e-4$	$9.96e-6$	$0.088 \lambda_{PV}$	$0.026 \lambda_{RMS}$
고속조종거울	$6.97e-4$	0	$0.303 \lambda_{PV}$	$0.079 \lambda_{PV}$

상당히 왜곡 되는 것으로 나타났다. 위에서 얻어진 Zernike 계수를 이용하여 4개의 연결거울이 결합되었을 때 나타날 수 있는 최대의 광파면 형상 및 변조전달함수(Modulation transfer function)는 그림 6 및 그림 7에 제시하였다. 변조전달함수로부터 특히 x-축에 성능이 약간 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 고속 조종거울의 경우 표 2와 그림 5(b)에서와 같이 연결거울에 비해 상대적으로 광파면 왜곡 정도가 크게 나타났으며 이는 중앙부 거울 고정방식에 기인한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

고에너지를 갖는 레이저 빔이 서로 다른 형상을 갖는 연결 렌즈 및 고속조정거울에 조사되어 초당 500 W로 5초 동안 흡수될 때 이 레이저 빔에 의한 거울면의 열온도 분포를 구하였다.

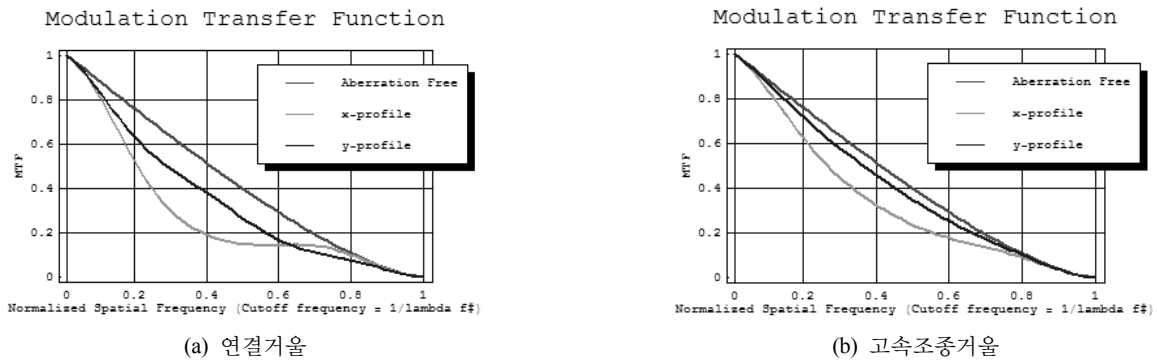


그림 6. 4개의 연결거울 조합에 의한 변조전달함수.

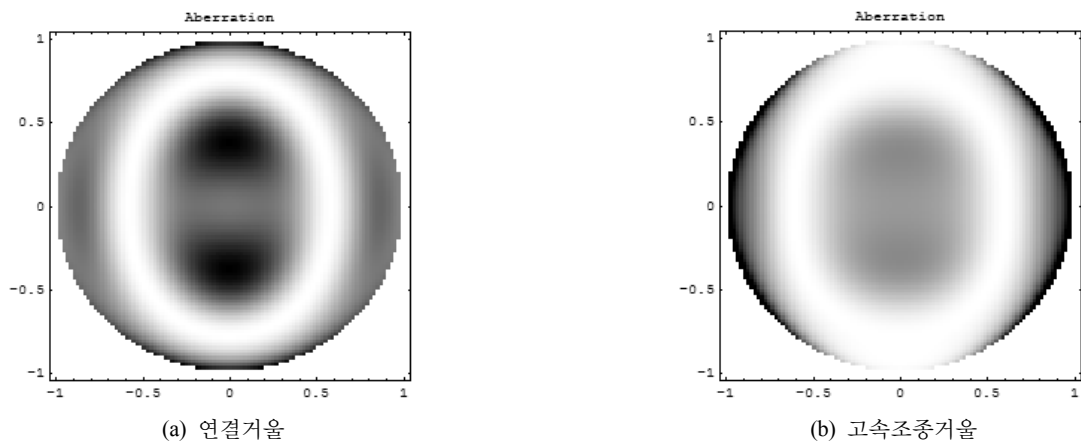


그림 7. 4 개의 연결거울 조합에 의한 광파면 왜곡 현상.

열분포 해석 결과 레이저 조사 후 거울면 온도가 급격히 상승하며 거울에 열변형을 가져오는 것을 알 수 있었으며, 광파면 왜곡은 연결거울의 경우 $0.088 \lambda_{PV}$ 와 $0.026 \lambda_{rms}$, 고속조종거울의 경우 $0.303 \lambda_{PV}$ 및 $0.079 \lambda_{rms}$ 정도 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 상대적으로 고속조종거울이 연결거울에 비해 큰 변형과 광파면의 왜곡을 가져오는 것으로 분석되었다. 연결거울 및 고속조종거울의 경우, 거울 한 개를 통한 광파면 왜곡은 미미한 수준이나 여러 개의 연결거울로 구성된 광집속장치 광학계의 특성상 거울면의 변형을 최소화 하도록 설계하는 것이 매우 중요한 것임을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] Y. S. Kim, H. S. Kim, and H. K. Kim, "Use of null optics for monitoring the optical alignment of a beam director," *Appl. Opt.*, vol. 44, pp. 4239-4243, 2005.

[2] Y. S. Kim et al., "Laser Beam Director System monitoring the alignment state with a null reflector," *Proc. SPIE*, vol. 6569, pp. 656909-656917, 2007.

[3] Anhu Li, Liren Liu, Jianfeng Sun, Yongjian Zhu, and Qiande Shen, "Finite element analysis on a circular wedge prism with 400 mm diameter," *Optik*, vol. 118, pp. 589-593, 2007.

[4] B. Mack, "Deflection and stress analysis of a 4.2-m diameter primary mirror of an altazimuth-mounted telescope," *Appl. Opt.*, vol. 19, pp. 1000-1010, 1980.

[5] B. C. Bigelow, "Finite element analysis of large lenses for the Keck Telescope high resolution echelle spectrograph," *Proc. SPIE*, vol. 1532, pp. 15-26, 1991.

[6] M. K. Cho and G. Poczulp, "Surface distortions of a 3.5-m mirror subjected to thermal variations," *Proc. SPIE*, vol. 1532, pp. 137-145, 1991.

[7] *I-DEAS.11 user's manual*.

[8] M. K. Cho and R. M. Richard, *PCFRINGE user's manual*, 1992.

[9] S. Timoshenko and J. Goodire, *Theory of Elasticity*, (McGraw-Hill, New York), 1970.

Wavefront Distortion caused by High Energy Laser Beam in the Relay Mirrors of the Laser Beam Director

Jongho Choi[†] and Yeonsoo Kim

305-600 Agency for Defense Development, taejon 305-600, Korea

[†]*E-mail: fallsky@yahoo.co.kr*

(Received February 19, 2008, Revised manuscript March 19, 2008)

Thermal distortion of the laser mirrors which are the Coude mirrors of the laser beam director and the wavefront error caused by the thermal distortion are studied. Coude mirrors consist of three relay mirrors and one fast steering mirror. The mirrors have reflectivity of 99.5% with respect to the laser wavelength of 3.8 μm , and absorption of 500 W per second. Thermal distortion and its related wavefront errors are studied with laser beam irradiation for 5 seconds. For the relay mirror, the wavefront error is 334 nm_PV, 98 nm rms and for fast steering mirror, 11.5 μm _PV, 3 μm rms.

OCIS code: 220.4880, 120.6810, 140.6810.