

위상최적설계법을 이용한 경량화 주반사경 설계 및 제작 Lightweight Mirror Design and Manufacturing using Topology Optimization Method

박강수, 조지현, 엄태경, 이완술, 윤성기, 이준호*, 류재명**

한국과학기술원 기계공학과, *한국과학기술원 인공위성연구센터, **서울광학산업 주식회사

pg500@kaist.ac.kr

인공위성 카메라는 발사 시 발생하는 하중조건(진동, 충격 등)과 우주 환경(무중력, 진공, 복사 등)하에서 카메라 내부의 각종 광학부품과 그를 지지하는 구조물의 변형으로 인해 광학적 성능 전반에 큰 영향을 받는다. 특히 높은 신뢰성이 요구되는 고해상도 지구관측용 광학카메라의 경우 광학적 현상과 기계적 현상을 동시에 체계적으로 고려하는 광기계 해석 및 설계(opto-mechanical analysis and design)가 필수적이다. 그 중에서도 목표로 하는 광학적 성능을 얻기 위한 위성용 카메라 주반사경의 설계기술이 가장 중요한 부분에 속한다. 즉 주반사경에 있어서의 상의 질적 저하인 상의 열화(image degradation)와 관련이 있는, 광학면의 변형을 최소화하여 상의 질을 높이기 위한 고강성 및 경량화 구조로의 설계를 신중히 고려하여야 한다.

이를 위해 일반적으로 주반사경 후판 형상을 벌집구조로 만드는 경우가 많으며, 여러 가지 반사경 형상에 따른 광학적 성능비교가 Valent와 Vukobratovich⁽¹⁾에 의해 시도되었다. Genberg 등⁽²⁾은 비선형계획법을 이용하여 주반사경 경량화를 위한 최적설계를 수행하였다. 기존의 연구들에서 주반사경의 경량화 및 강성화를 위해 제시된 방법들이 주로 제작 경험이나 숙련도에 따라 광학적인 성능의 차이가 큰 전통적인 방법에서 크게 벗어나지 못하였다. 이 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 위상 최적화기법을 이용한 주반사경의 경량화 및 강성화 설계방법을 제안하고자 한다.

주반사경에 후판의 위상최적화를 위해 수행되어야 할 연속체 구조물의 위상최적화는 Bendsoe와 Kikuchi⁽³⁾에 의해 이루어졌다. 이 논문에서 저자들은 무한히 반복되는 사각형 구멍을 가지는 미시구조를 도입하여 주어진 재료의 밀도와 탄성계수 사이의 관계를 구하는 균질화법을 도입하였으며, 이를 이용하여 주어진 경계조건과 하중 하에서 구조물의 강성을 최대화 하는 밀도분포를 구하였다.

본 논문에서는 주반사경의 경량화를 위한 위상최적설계를 다음의 수식화 과정을 통하여 구현하였다.

우선 목적함수로 주반사경의 광학적 성능과 관련된 지수로 광학면 변형의 제곱평균근호값(RMS Value)을 선정하였다. 광학면의 변형을 제르니케 다항식으로 분할하고 그 중 강제모드에 해당하는 저차항을 제거한 제곱평균근호값을 최소화하도록 하였다. 이의 수식화 과정은 다음과 같다.

$$f(X) = \sqrt{\frac{\int_{\Omega_d} \sigma_n^2 d\Omega}{\int_{\Omega_d} d\Omega}} = \sqrt{\frac{\sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_d} \sigma_n^2 d\Omega}{\sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_d} d\Omega}} \quad (1)$$

여기서 σ_n 은 광학면에 수직인 성분에서 강제모드를 뺀 변위, n_e 은 광학면에 위치한 평면 총 요소의 수, Ω_d 은 광학면을 나타낸다.

또한 일반적으로 발사체의 발사비용과 관련하여 경량화 조건으로서 주반사경의 전체 무게제한을 구속 조건으로 설정하였다. 이의 수식화과정은 다음과 같다. 본 논문에서 경량화율은 65%로 설정하였다.

$$h(X) = \int_{\Omega_d} \rho d\Omega - M_0 = \sum_{idv=1}^{ndv} \rho_0 x_{idv} \Omega_{idv} - M_0 \leq 0 \quad (2)$$

여기서 ρ : 밀도, ρ_0 : 재료밀도, Ω_d : 설계영역, Ω_{idv} : idv 번째 설계영역의 체적, M_0 : 재료 제한량, x_{idv} : idv 번째 설계변수값

주반사경에 작용하는 하중조건으로는 반사경 자중과 제작 시 발생하는 폴리싱 압력(0.21kPa≒0.3psi)을 고려하였다. 해석에 사용된 재료는 BK7이며 주반사경의 가장자리 3 부분을 고정하는 경계조건을 설정하였다.

자중과 폴리싱 압력 하중에 대해 위상최적설계로부터 얻은 주반사경의 최적형상을 그림 1에 나타내었다. 결과에서 3점지지 하는 부분에 재료(밀도)가 모여 있음을 확인할 수 있다. 최적형상의 성능 검증을 위해 그림 2와 같이 유한요소해석 모델을 구성하였다. 광축방향과 나란히 중력이 작용하는 경우 유한요소해석을 통해 얻은 광학면의 변형형상을 그림 3에 나타내었다.

그림 4는 광학 해석결과를 바탕으로 직경이 300mm인 경량화 주반사경을 제작한 형상이다. 현재 광학 성능 검증을 위한 시험을 수행 중에 있다.

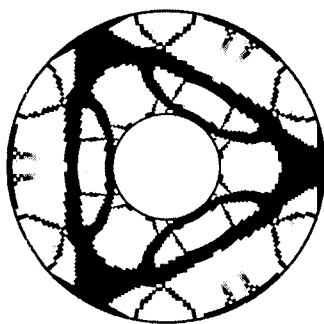


Fig 1. Optimum topology for self-weight and polishing pressure loading.

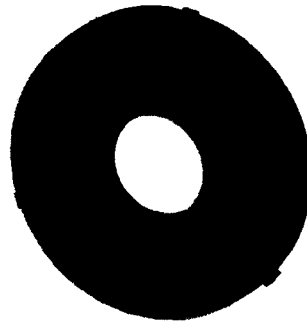
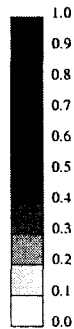


Fig. 2 Analysis model.

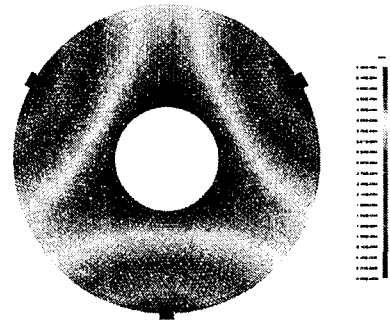


Fig 3. Analysis results: optical surface deformation for self-weight loading.

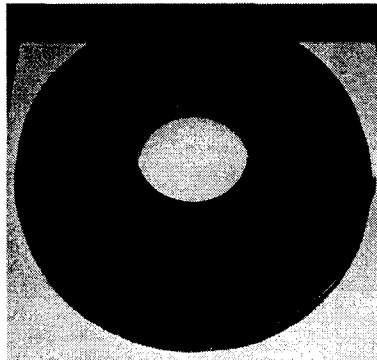
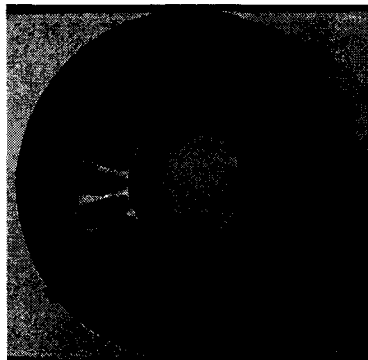


Fig. 4 Real Product (Prototype)

참고문헌

1. C. M. Valente and D. Vukobratovich, "A comparison of the merits of open-back, symmetric sandwich, and contoured back mirror as light-weighted optics", Proc. of SPIE Vol. 1167 Precision Engineering and Optomechanics, 20-36 (1989).
2. D. Anderson, R. E. Parks, Q. M. Hansen and R. Melugin, "Gravity deflection of lightweight mirrors", Proc. of SPIE Vol. 0332 Advanced Technology Optical Telescopes I, 424-435 (1982).
3. M. P. Bendsoe and N. Kikuchi, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", Comp. Meth. Appl. Mech. Engng. 71, 187-224 (1988).