

## 경량화 반사경의 최적설계에 관한 연구

박강수<sup>†</sup> · 박현철 · 조지현 · 윤성기\*

한국과학기술원 기계공학과

Ⓣ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

이준호

\*한국과학기술원 인공위성 연구센터

Ⓣ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(2003년 2월 5일 받음, 2003년 6월 16일 수정본 받음)

인공위성 카메라에 장착되는 반사경의 경량화 설계를 위해 최적설계법을 적용하였다. 최적설계 과정에서 목적함수로는 카메라가 탑재된 인공위성의 발사비용을 줄이기 위해 반사경의 무게를 최소화하는 것으로 설정하였다. 반사경의 자중에 의한 변형(피크-밸리값) 및 고유진동수의 크기를 제한조건으로 두었다. 최적화 프로그램은 DOT(Design Optimization Tools)를 이용하여 유한차분법으로 설계변수에 따른 목적함수와 제한조건의 민감도를 구하였고 구성된 최적설계 프로그램의 검증에 의해 검증예제를 다루었다. 또한 최적설계로 부터 얻은 결과값으로부터 반사경의 유한요소모델을 구성하고 유한요소해석 및 광학적 물성치 해석프로그램을 연계한 통합프로그램을 통하여 최적설계 결과 검증을 수행하였다. 최종적으로 위의 최적설계 프로그램을 이용하여 유효직경이 600mm인 반사경을 설계하였다.

주제어 : lightweight mirror, optimal design, P-V value, RMS value.

### I. 서 론

인공위성 카메라 반사경의 경우 광학적 상에 영향을 미치는 자체 변형의 영향을 최소화하기 위해 경량화와 함께 고 강성이 유지되어야 한다.

이를 위해 일반적으로 반사경 뒷면 형상을 벌집구조로 만드는 경우가 많다. 그림 1은 벌집 형태의 경량화 구조를 갖는 반사경의 형상을 보여준다.

반사경 경량화를 위한 연구로서 여러 가지 하판 형상에 따른 성능 비교가 Valente와 Vukobratovich<sup>[1]</sup>에 의해 시도되었다.

Cho와 Richard 그리고 Vukobratovich<sup>[2]</sup>는 반사경 광학면의 파면오차를 최소화하고 동시에 제작비용을 줄이며, 반사경을 지지하기 위한 최적의 지지점의 위치를 설계기준으로 설정하여 자중이 작용하는 경우 경량화 반사경의 설계를 위한 절차와 방법을 제시하였다.

또한 Anderson, Parks, Hansen, 그리고 Melugin<sup>[3]</sup>은 경량화된 2가지 해석용 반사경 모델을 설정하고 자중이 작용하는 경우에 있어서의 변형을 해석하였다.

그리고 해석결과로부터 광학면의 오차를 제니케(Zernike) 다항식으로 분할하고 그 결과를 실제 광학시험으로 얻은 광학면의 파면오차와 비교하였다.

Genberg와 Cormany<sup>[4]</sup>는 비선형계획법을 이용하여 반사경 경량화를 위한 최적설계를 수행하였다. 이 논문에서 저자들은 반사경의 구조와 연관된 설계변수와 함께 제작성도 고려하였다.

이러한 기존의 연구는 주로 경험에 의존하는 방법으로 시간과 비용이 큰 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 반사경의 설계방식에서 탈피하여 최적설계 방법에 근거한 경량화 반사경 설계를 수행하였다.

이와 동시에 위의 최적설계를 통해 얻은 해석결과를 바탕으로 자중에 의한 정적하중이 가해지는 경우 반사경의 구조적 변형이 광학성능에 미치는 영향을 분석하였다.

또한 최적화 방법을 통하여 얻은 결과들에 수차이론을 적용하여 광학적 성능을 분석하고 그 타당성을 검증하였다. 전체적인 해석절차에 관한 흐름도는 그림 2와 같다.

### II. 경량화 반사경의 최적설계 수식화

일반적으로 고성능 지구 관측용 위성에 사용되는 카메라와 지상에서 우주 관측에 사용되는 대형 망원경의 반사경은 적절한 강성을 가져야 함과 동시에 정적·동적 하중 하에서 응력과 변위의 크기가 작아야 한다.

과거에는 반사경의 설계 시 사용되는 환경을 미리 설정하고 그 안에서 여러 가지 영향 인자를 변화시켜 가면서 성능을 확인하였다. 하지만 최적설계 기법의 적용을 통하여 보다 일반적인 경량화된 반사경의 형상설계를 수행할 수 있게 되었다.

일반적인 최적설계 문제는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{최소화 } F(\mathbf{X}) \\ & \text{제한조건 } g_i \leq 0 \quad i = 1, \dots, M \\ & XL_j \leq X_j \leq XU_j \quad j = 1, \dots, N \end{aligned} \tag{1}$$

<sup>†</sup>E-mail: pg500@kaist.ac.kr

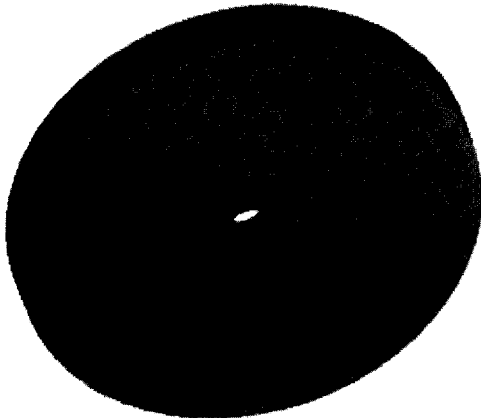


그림 1. 경량화 벌집구조 반사경(오픈 백 형상).

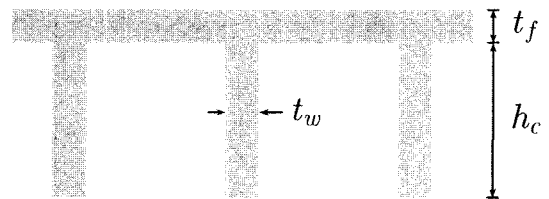
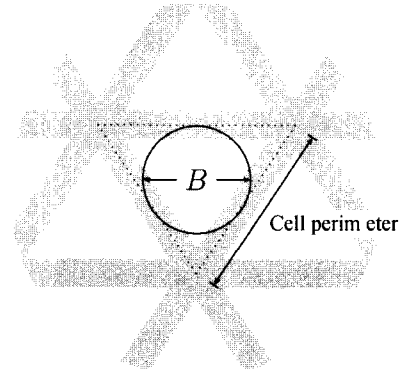


그림 3. 경량화 반사경의 설계변수.

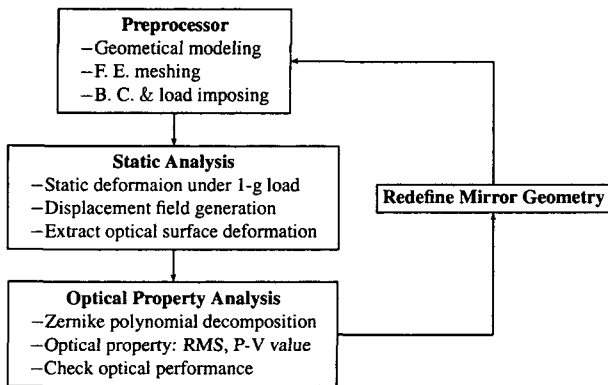


그림 2. 경량화 반사경의 설계를 위한 통합 해석프로그램의 흐름도.

여기서  $F$ 는 목적함수,  $g$ 는 부등식 제한조건,  $X$ 는 설계변수 벡터,  $XL$ 과  $XU$ 는 각각 설계변수의 하·상한값이다.

대부분의 경우 식 (1)의 목적함수와 제한조건식은 설계변수  $X$ 의 비선형 함수 형태를 지니며 이러한 함수의 형태에 대하여 효과적으로 목적함수를 증가 혹은 감소시키기 위해 비선형 계획법을 이용한 최적화 방법이 널리 쓰이고 있다.<sup>[8]</sup>

대다수의 경우 반사경의 직경과 곡률은 광학적 요구조건으로 주어진다. 그리고 경량화 반사경은 광학면의 상·하판이 모두 존재하는 샌드위치 반사경과 하판이 존재하지 않는 오픈 백 경량화 반사경이 있다. 이 논문에서는 반사경의 상판이 광학면으로 존재하는 경우를 고려하였다. 이는 샌드위치 경량화 구조와 비교하였을 때 제작 및 가공상의 용이점으로 인해 많이 사용되고 있는 경량화 형상이기 때문이다.

따라서 경량화 반사경의 설계에서 고려하여야 하는 설계변수는 반사경 광학면의 두께( $t_f$ )와 코어의 살 두께( $t_w$ ), 셀에 내접하는 원의 직경( $B$ )과 코어의 높이( $h_c$ )이다.<sup>[5]</sup>

경량화 반사경의 설계변수들에 관해서는 그림 3에 나타내었다. 반사경의 광학적 성능을 만족시키면서 동시에 무게가 가장 가벼운 형상을 도출하기 위한 구체적인 반사경의 경량화 설계의 과정을 다음의 설계식으로 구성하였다.

설계변수  $X = \{t_f, t_w, B, h_c\}$   
 최소화  $W =$  반사경 전체 무게

제한조건  $d_{pv} <$  피크-밸리 상한값  
 $f_n >$  고유진동수 하한값

제한조건으로 설정한 피크-밸리값은 반사경의 광학적 성능에 큰 영향을 미치는 광학면의 변형을 설정된 설계기준값보다 작게 하여 광학적 성능을 유지하도록 하기 위함이다. 동시에 피크-밸리값은 광학면 오차의 제곱평균근호값(RMS value)과 일반적으로 비례관계에 있어 제곱평균근호값이 감소하면 피크-밸리값도 감소하게 된다. 이 논문에서는 광학면의 제곱평균근호 오차값을 대신하여 피크-밸리값을 통해 광학적 성능을 검증하였다. 설계변수는 반사경 코어의 두께, 반사경 광학면의 두께, 전체 높이와 셀의 크기로 하였고 모두 최적화 과정에 고려되었다. 사용된 구체적인 목적함수 및 제한조건식들을 정리하면 다음과 같다.

· 목적함수 : 경량화 반사경의 전체 무게( $W$ )  
 최소화  $W = \rho AV_0 = \rho A (t_f + \eta h_c)$

여기서  $\rho$ 는 반사경 재료의 밀도값,  $A$ 는 반사면 면적,  $V_0$ 는 단위체적인자(=  $t_f + \eta h_c$ ),  $\eta$ 는 셀의 솔리디티 비(=  $(2B + t_w)t_w / (B + t_w)^2$ )를 나타낸다. 특별히 셀의 솔리디티비는 경량화 반사경의 셀 패턴이 가지는 단면적량을 표시하기 위해 정의되는 대표값이다.<sup>[11]</sup>

· 제한조건 :

1. 피크-밸리값 제한<sup>[7]</sup>

$$d_{pv} = \frac{\beta \rho (1 - \nu^2) V_0 D^4}{EI_0} < d_{pv, limit}$$

여기서  $\beta$ 는 반사경 지지조건에 의해 결정되는 상수,  $E$ 는 영계수,  $\nu$ 는 포와송 비,  $I_0$ 는 단위 너비당 면적 관성모멘트(=  $1/12[(1 - \eta/2)(t_f^4 - 0.5h_c^4) + 0.5(t_f + h_c)^4 \eta] / [t_f + 0.5\eta h_c]$ )를

나타낸다.

2. 고유진동수값 제한

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{d_{pv}}} > f_{n, limit}$$

여기서  $g$ 는 중력 가속도이다.

3. 설계변수 간의 상관 관계

$$4(t_f + 0.5\eta h_c)[0.5(1 - \eta)(t_f^3 + 0.5h_c^3) + 0.5(\eta - 1)(t_f + h_c)^3] - 0.5[(1 - 0.5\eta)(t_f - 0.5\eta h_c^4) + 0.25\eta(t_f + h_c)^4] = 0$$

설계변수의 상관 관계식은 Mehta의 식으로 부터 광학면의 살 두께와 셀의 살 두께간의 최적 재료분포를 표현해 준다.<sup>[1,6]</sup> 위의 수식들을 이용하여 및 가지 검증 예제를 다루어 보았다. 최적설계 프로그램을 이용하여 얻은 설계변수들을 바탕으로 반사경의 변형을 유한요소해석을 통해 해석하고 그 변형으로부터 광학면의 파면오차를 계산하였다.

III. 경량화 반사경 최적설계 검증예제

II절에서 제시한 수식들을 바탕으로 반사경의 경량화 설계에로의 적용에 관한 타당성을 검증하였다. 우선 간단한 예제를 통하여 최적설계 프로그램을 검증하고 실제의 반사경의 설계에 이를 적용하였다. 최적화 과정에서 이용된 프로그램은 상용프로그램인 DOT<sup>[8]</sup>이며 일반적으로 최적해를 구하기 위한 방법으로 널리 쓰이고 있는 수정가용방향 방법(Modified Feasible Direction Method, MFD Method)과 순차적 선형계획법(Sequential Linear Programming method, SLP method)의 알고리즘을 적용하였다.<sup>[8,9]</sup> 예제로 유효직경이 500 mm인 제로더 삼각형 코어형상의 경량화 반사경의 최적화를 수행하였다. 설계에서 사용된 제한조건의 상·하한 값 및 재료의 물성치를 표 1에 나타내었다. 피크-밸리 상한값은 광학면의 제곱평균근 오차값이 기준파장이 632.8 nm에 대해서 약  $\lambda/20$ 인 설계기준을 만족해야 함을 고려하여  $\lambda/4$ 로 설정하였고 고유진동수 하한값은 반사경 전체 시스템의 고유진동수를 고려하여 150 Hz로 두었다. 경계조건으로 반사경을 3점지지 하였으며 하중은 광축과 나란하게 작용하는 자중을 고려하였다.

유효직경 500mm의 반사경에 대한 최적화 결과로 설계변수와 목적함수의 수렴경향을 그림 4와 그림 5를 통하여 확인하였다.

위의 결과들로부터 최적화 프로그램이 주어진 여러 가지 제한조건 하에서 목적함수가 최소가 되는 방향으로 적절히 작동되고 있음을 확인할 수 있었다. 다음으로 최적의 설계변수를 바탕으로 유한요소모델을 구성하고 변형해석을 수행하여 보고이로부터 얻은 광학면의 변형을 이용하여 광학면의 파면오차를 계산하였다. 이 과정에서 최적설계로부터 얻은 최적의 설계변수에 대한 검증을 수행하기 위해 전술한 바 있는 통합해

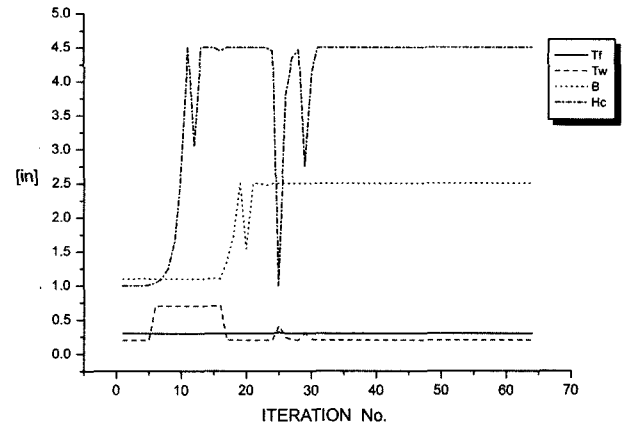


그림 4. 유효직경 500 mm 삼각형 셀 반사경의 경우 축차수에 따른 설계변수값의 변화.

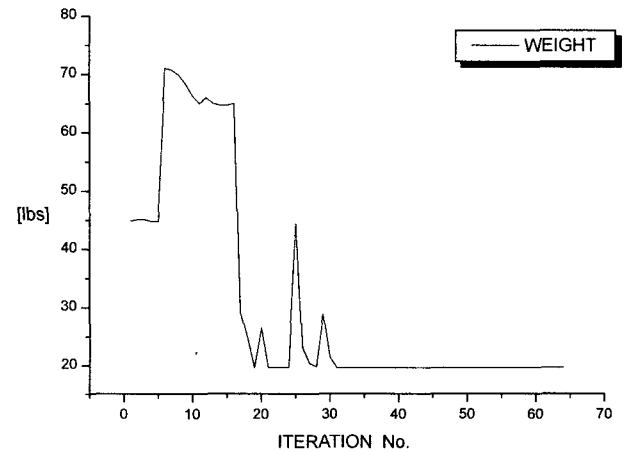


그림 5. 유효직경 500 mm 삼각형 셀 반사경의 경우 축차수에 따른 목적함수값의 변화.

석프로그램을 이용하였다.

최적설계의 해석결과와 통합 해석프로그램을 통한 결과의 비교는 피크-밸리값을 통하여 이루어 졌으며 이를 위해 육각형 셀 형상의 반사경을 검증예제로 다루었다. 반사경의 유효직경을 600 mm 하였고 자중의 방향을 광축과 나란하게 설정하였다. 해석을 위해 사용된 모델은 그림 6과 같다. 자중에 의한 경량화 반사경의 변형에 관한 유한요소해석결과는 그림 7에 나타내었다.

반사경의 경량화 최적설계로부터 얻어진 광학면의 오차인 피크-밸리값과 최적설계 변수에 근거한 모델의 통합해석 프로그램을 통한 피크-밸리값의 비교결과를 표 2에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 두 결과간의 오차가 약 7% 정도로 그 차이가 미미함을 알 수 있다. 최종적으로 반사경의 경량화 최적설계 프로그램에서 얻은 결과를 신뢰하고 실제로 경량화 반사경 설계에 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

IV. 유효직경 600 mm 제로더 삼각형 셀 경량화 반사경 설계

앞에서 검증된 경량화 반사경의 최적화 프로그램을 실제 설

표 1. 최적설계에 사용된 반사경의 재료 물성치 및 제한조건값

제로더의 물성치	$E = 90.6 \text{ GPa}, \nu = 0.24, \rho = 2.53 \text{ g/cm}^3$
피크-밸리 변위 상한값	158.2 nm (= $\lambda/4 @ \lambda = 632.8 \text{ nm}$ )
고유진동수 하한값	150 Hz

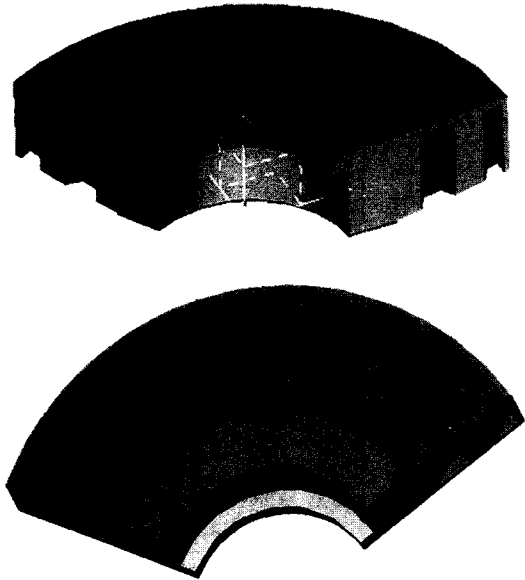


그림 6. 육각형 셀 형상을 갖는 반사경의 모델.

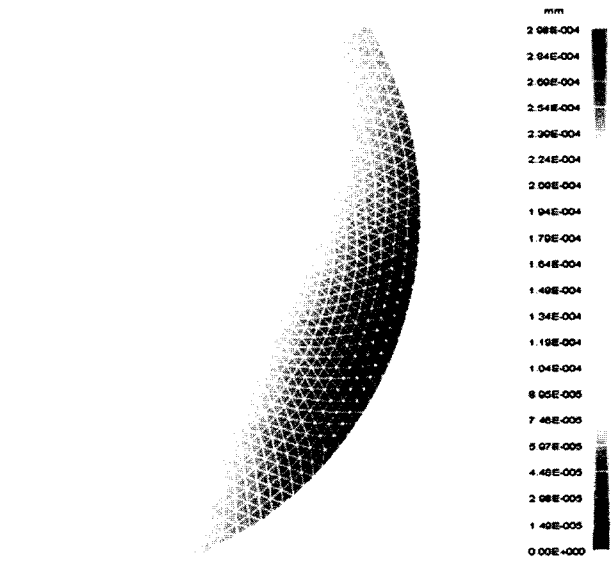


그림 7. 육각형 셀 형상을 갖는 반사경의 자중에 대한 변형형상.

표 2. 최적설계와 통합해석 프로그램의 피크-밸리값 비교(육각형 셀의 경우)

해석 방법	피크-밸리값 [nm]
최적설계	142.44
통합해석 프로그램	153.10

계에 적용하였다. 이 논문에서는 비교적 설계 및 제작이 용이한 삼각형 경량화 셀을 갖는 반사경을 모델로 설정하였다. 최적화 프로그램에서 얻은 결과를 이용하여 유한요소모델을 설정하고 자중에 의한 변형해석을 통하여 광학면의 파면오차를 계산하였다. 삼각형 셀을 갖는 경량화 반사경의 형상에 대해

가공성의 한계를 고려하여 광학면의 두께와 코어의 살 두께, 그리고 셀의 한 변 길이에 따라 3가지의 최적해를 얻었다. 이를 바탕으로 각각의 경우에 대해 유한요소모델을 설정하였다.

해석모델은 그림 8에 나타내었다. 해석에 사용된 반사경의 재료는 제로더이고 광축에 수직인 방향으로 중력이 작용하는 경우를 고려하였다. 그리고 경계조건으로 반사경 아래면의 가장 안쪽 부분을 링지지하였다. 이는 반사경을 지지하기 위한 지지부를 원형의 띠 형상을 갖는 중심지지(central support)로 고려하였기 때문이다.

각 경우에 대한 광학적 물성치 해석결과 및 경량화율을 표 3에 나타내었다. 표 3에서 경량화율은 경량화 전 반사경의 무

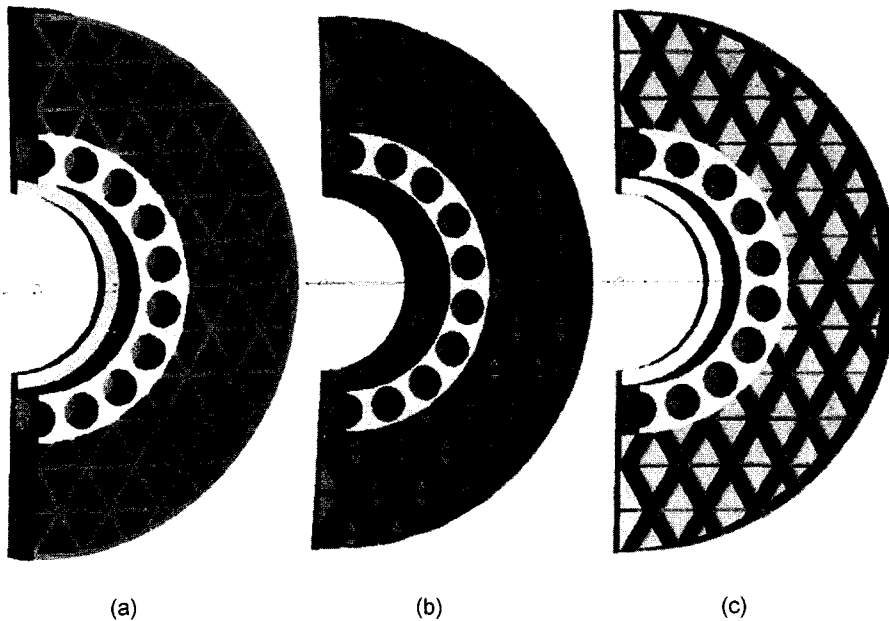


그림 8. 직경 610 mm 삼각형 셀 경량화 반사경 모델; (a) 모델 1, (b) 모델 2, (c) 모델 3.

표 3. 직경 610mm 삼각형 셀 반사경의 최적의 설계변수값

광학면 두께/코어 두께/ 셀 페리미터 [mm]	모델 1	모델 2	모델 3
제공평균근호값(RMS) [nm]	32.1	38.7	44.7
피크-밸리값(P-V) [nm]	58.96	73.88	81.10
경량화율 [%]	45.0	50.0	58.0

계와 경량화를 위해 제거된 무게의 비로 정의된다.

해석결과에서 모델 1에서 광학면의 제공평균근호 오차값이 32.1 nm로 가장 작게 나왔으며 기준 파장이  $\lambda = 632.8$  nm에 대하여 약  $\lambda/20$ 을 만족하는 수치이다.

이는 광학면의 두께와 코어의 살 두께가 크고 셀의 크기가 다른 모델에 비하여 상대적으로 작기 때문이라고 볼 수 있다. 대신 경량화 비율이 45%(경량화 후 질량은 약 34 kg)로 나머지 모델에 비하여 낮게 나왔다. 하지만 설계영역만을 고려하였을 경우 약 56%의 경량화 비율을 나타내었다. 모델 3의 경우 가공성 문제를 제외한다면 경량화 비율이 58%로 가장 큰 값을 보이나 상대적으로 제공평균근호 오차값이 44.7 nm로 큰 값을 나타내고 있다. 모델 3에서 얇은 코어의 살 두께와 비교적 큰 셀의 크기 때문에 발생하는 큰 광학적 오차는 이들의 치수를 키우거나 줄임으로서 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

### V. 결 론

본 논문에서는 최적설계를 통하여 구한 경량화 반사경의 최적설계변수를 이용하여 유한요소모델을 구성하고, 광학적 물성치를 해석할 수 있는 프로그램과 연계하여 자중에 의한 변형으로 인해 발생하는 반사경의 광학성능 변화를 분석하였다. 또한 최적설계 프로그램의 검증은 위하여 몇가지 예제 모델을 수립하고 피크-밸리값을 유한요소해석을 통하여 얻은 결과와 비교하여 최적설계 프로그램의 적절성을 확인하였다. 이렇게 구성된 경량화 반사경 최적설계 프로그램을 유효직경 600mm 인 삼각형 셀을 가지는 경량화 반사경의 설계에 적용하여 보고 이로부터 얻은 최적의 설계변수값을 바탕으로 구성된 설계모델의 광학면 파면오차를 통합 해석프로그램을 통하여 구

하였다.

이러한 결과를 바탕으로 기존의 경량화 벌집구조를 갖는 반사경 설계에 최적설계방법을 적용함으로써 설계비용의 절감은 물론 설계시간 단축이라는 두가지 장점을 동시에 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 앞으로 반사경의 제작 시 포함되어야 할 제한조건들(퀵팅 제한, 등)을 고려하는 최적설계를 수행하고자 한다.

### 참고문헌

- [1] T. M. Valente and D. Vukobratovich, "A comparison of the merits of open-back, symmetric sandwich, and contoured back mirror as light-weighted optics," *Precision Engineering and Optomechanics, Proc. of SPIE*, vol. 1167, pp. 20-36, 1989.
- [2] M. K. Cho, R. M. Richard and D. Vukobratovich, "Optimum mirror shapes and supports for light weight mirrors subjected to self-weight," *Precision Engineering and Optomechanics, Proc. of SPIE*, vol. 1167, pp. 2-19, 1989.
- [3] D. Anderson, R. E. Parks, Q. M. Hansen and R. Melugin, "Gravity deflection of lightweight mirrors," *Advanced Technology Optical Telescopes I, Proc. of SPIE*, vol. 0332, pp. 424-435, 1982.
- [4] V. Genberg and N. Cormany, "Optimum design of a light-weight telescope," *Optomechanical Design, Proc. of SPIE*, vol. 1998, pp. 60-71, 1993.
- [5] V. Genberg, "Optical surface evaluation," *Structural Mechanics of Optical Systems I, Proc. of SPIE*, vol. 0450, pp. 81-87, 1993.
- [6] P. K. Mehta, "Flexural rigidity characteristics of light-weighted mirrors," *Structural Mechanics of Optical Systems II, Proc. of SPIE*, vol. 0748, pp. 158-171, 1987.
- [7] G. E. Seibert, *Lecture notes of Design of lightweight mirrors (Danbery optical systems)*.
- [8] G. N. Vanderplatts, *DOT User's Manual (VMA Engineering, Goleta, CA, 1992)*.
- [9] A. D. Belegundu and T. R. Chandrupatla, *Optimization concepts and applications in engineering (Prentice Hall, 1999)*.

### **A study on optimum design of a lightweight mirror**

Kang-Soo Park<sup>†</sup>, Hyun-Cheol Park, Ji-Hyun Cho, and Sung-Kie Youn\*

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, KOREA*

*<sup>†</sup>E-mail: pg500@kaist.ac.kr*

Jun-Ho Lee\*

*\*Satellite Technology Research Center, KAIST, Daejeon 305-701, KOREA*

(Received February 5, 2003, Revised manuscript June 16, 2003)

A study on optimum design of the lightweight mirror of a satellite camera is presented. An optical surface deformation of the lightweight mirror, which is a principal component of the camera system, is an important factor affecting the optical performance of the whole camera system. In this study, optimum design of the lightweight mirror is presented. Total weight of the mirror to reduce the optical surface deformation and the launching cost is used as an objective function. Peak-to-valley value and natural frequency of the mirror are given as constraints to the optimization problem. The sensitivities of the objective function and constraint are calculated by a finite difference method. The optimization procedure is carried out by the commercial optimizer, DOT. As a verification of the optimum design of the mirror, two design examples are treated. In the real application example, the lightweight mirror with 600mm effective diameter is treated. The optimized results with various design variables, which are obtained by considering thickness limitations, are analyzed.

OCSI Code : 220.4880.