고해상도 광학영상장비 반사경 구조해석

권 우근† ·김 광로* ·이 영신**

Mirror Structure Analysis of High Resolution Optical Imaging Payload

Woo-Gun KWON† , Kwang-Ro KIM* and Young-Shin LEE**

Key Words: 반사경, 영상장비, 셀 형상, 경량화, 요구 강성도, 연마변형, 최적 장착점,진동수

Abstract

For the Space-borne optical imaging payload system design, light weighting and moderate stiffness of mirror and/or mirror fixation device is very important aspects. The front surface of mirror is regulated by optical performance requirement, but the shape of backplate of mirror is to be optimised while satisfing the required stiffness and weight. According to the results, the best shape of backplate cell is triangular. And also related geometric dimensions and the optimised mounting point of MFD(Mirror Fixation Device) is presented. Finally, natural frequencies and mode shapes of mirror structure are analysed.

기호설명

SiC ; Silcone Carbide,
MFD ; Mirror Fixation Device

1. 서 론

군사적 목적으로 적정을 감시하거나 정찰하여 영상정보를 수집하는 장비로는 광학적 방식에 의한 광학영상장비 혹은 레이다 영상방식에 의한 SAR(Synthetic Aperature Radar)영상장비가 주로 사용된다. 광학영상장비는 필름을 사용하는 종래의 방식과 광검출기를 사용하는 전자광학 영상장비가 있으며, 전자광학장비는 사용하는 광검출기의 감응파장에 따라 가시광 영상장비와 적외선 영상장비로 구분된다. 전자광학 영상장비는 최근 들어 감시위성이나 고공정찰기에 탑재되어 군사적으로 민감한 적정지역을 주기적으로 정찰하여 영상정보를 수집하여 실시간으로 지상으로 전송하게 된다. 이러한 광학영상장비는 점차 해상도가 높아지면서 수 백 km의 우주궤도에서 지상 수십 cm의 물체를 식별하는 수준으로 발전하고 있으며, 이에 따라 사용하는 광학 망원경이 대형화되고, 고정밀화 되고 있는 추세이다. 이러한 대구경 망원광학계는 렌즈대신에 주로 반사경을 사용하는 추세에 있으며, 반사광학계는 렌즈를 사용하는 굴절광학계에 비하여 광학적으로 매우 민감하기 때문에 구조적으로 매우 안정적이어야 하며 반사경 장착부는 기구적으로 응력이 발생하지 않아야 한다.

본 연구에서는 이러한 반사경의 장착부위에 대한 해석 연구를 통하여 고해상도 고공감시장비의 핵심분야인 망원광학계의 구조적 최적설계 방안을 제시하였다.

† 책임저자의 소속 : 국방과학연구소
E-mail : kwon@expoapt.net
TEL : (042)821-3651
* 저자 2의 소속 : 국방과학연구소
** 저자 3의 소속 : 충남대

2. 반사경 경량화 해석

2.1 반사경 기본형상

반사광학계 망원경에서 광학적으로 가장 중요하고, 구조적으로 가장 영향을 많이 미치는 부분이 1차 반사거울이다. 반사거울의 재질은 열변형 조건을 고려하여 구조재질과 동일한 탄화규소(SiC)를 사용하며, 반사경 장착부(MFD: Mirror Fixation Device)에 합금강을 사용하는 것을 제외하고는 망원경 구조재 및 반사거울 재질은 동일하다. Fig. 1은 반사경 해석시 고려한 1차 반사경 결합체의 설계 형상이다.

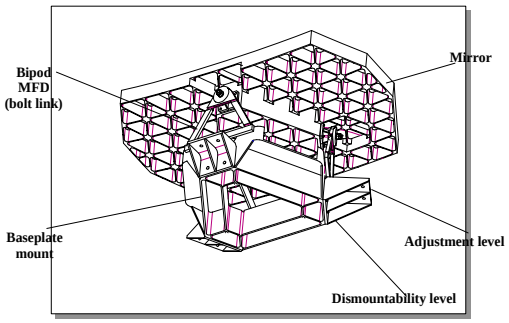


Fig.1. Configuration of Mirror Assembly

상기 그림에서, 반사경 자체는 경량이면서 최대한 강도(stiffness)를 유지하기 위하여 후면을 최적형상으로 설계하여 경량화 하여야하며, 반사경 결합구조부(MFD: Mirror Fixation Device)의 최적 결합위치를 해석하여 결정하여야 한다.

2.2 반사경 요구강성도 분석

반사거울의 요구 강성도는 위성체 요구 강성도로부터 단계적으로 동적인 커플링이 일어나지 않도록 환당하게 된다. 즉, 사용하려고 하는 로켓 발사체(Launcher)에서 발사시 인가되는 기본 고유진동수를 고려하여 요구강성도를 도출하게 되는데, 일반적으로 사용하는 중소형 발사체에 탑재되는 위성체는 수평방향 20 Hz이상, 수직방향 35 Hz이상의 고유진동수를 갖도록 강성을 설계해야 한다.

이로부터, 망원경 탑재체, 망원경 주구조물, 1차 거울 조립체 순으로 강성을 환당해 나간다. 환당하는 기본원칙은 적어도 $\sqrt{2}$배 이상의 고유진동수 차이가 나도록 환당하며, 별도로 안전계수를 1.25이상을 적용하는 것이 일반적이다. 특히, 반사거울의 미세한 변형도 광학적으로 엄청난 성능 저하를 유발하기 때문에 가능한 반사거울은 강성이 우수하여야 한다.

본 설계에서는 다음 그림에서와 같이 단계적 고유진동수 환당에 의해 1차 반사거울의 고유진동수는 700 Hz이상으로 목표성능을 환당하였다. 이 정도의 강성을 유지하면서, 무게를 최소화하기 위해서는 경량화 설계가 필수적이며, 이를 위해 거울 뒷면의 경량화 설계가 수행되었다.

Fig.2. Stiffness breakdown of 1st mirror

2.3 반사경 경량화 설계

반사경은 광학적 반사면인 전면형상과 구조적 강성과 관계되는 후면형상을 설계해야 하는데, 전면 광학반사면은 광학적 설계에 의해 비구면(aspheric surface; hyperbolic)이다. 후면형상은 구조적 요구조건에 의해 경량, 고강성을 나타내야 한다. 거울의 경량, 고강성을 위해 아래 그림과 같이 후면에 몇가지 셀(cell) 형상을 사용한다.

가장 효율적인 셀 형상 설계는 거울 반사면 연마시 적용되는 연마압력에 의한 변형효과(Quilting effect)를 분석하여 광학적 영향이 거의 무시할수 있는 수준에서 셀의 모양 및 셀의 크기 b를 설계한다.

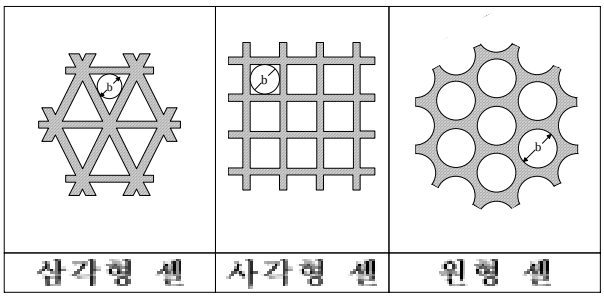


Fig. 3. Cell shape of mirror backplate

Fig. 4 에서와 같이 반사경의 후면 설계는 반사경을 광학표면으로 제작하기 위하여 연마공정을 거치게 되는데 이때 연마압력에 의한 변형효과(Quilting effect)를 최소화하는 구조강성을 유지해야 한다. 연마압력에 의해 발생하는 변형은 결국에는 반사경의 광학표면 형상의 변형으로 작용하여 광학적 성능저하 현상으로 영향을 미친다. 광학표면의 변형에 의한 광학성능 저하현상은 일반적으로 파면오차(WFE : Wave Font Error)로 표현되며, 연마압력에 의한 파면오차는 설계초기에 할당된 값이내에서 유지되는지를 해석하여야 한다. 연마압력에 의한 변형량은 다음 식에 의해 구해진다. 즉,

$$\delta y = K \times \frac{p_s b^4}{E_s t^3} \quad \text{.....(1) 이다.}$$

여기서, p ; 거울 연마압력(=5,000 N/m²)

b ; 셀 내접원 직경

E ; 영 계수(4.2E+11 N/m²)

t ; 반사거울면 두께

K ; 셀 형상계수

1)삼각형 셀 = 0.00165

2)사각형 셀 = 0.0138

3)원형 셀 = 0.01172

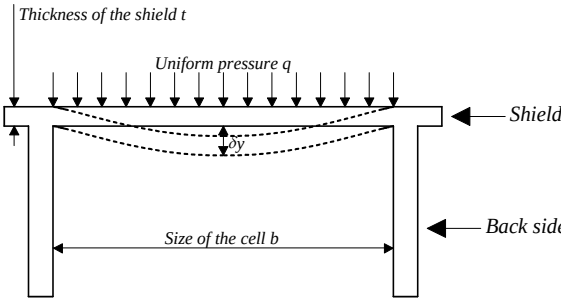


Fig. 4. Deflection due to polishing pressure

다음 표는 셀 형상, 셀의 내접원 크기 및 반사거울면 두께에 따른 연마 변형량 계산결과를 나타낸다.

Table 1. The deflections of various cell configurations

(단위; nanometer)

구 분		셀 내접원 크기(b)		
		30 mm	35 mm	40 mm
삼각형 셀	t=2 mm	28.13	52.11	88.90
	t=3 mm	8.33	15.44	26.34
	t=4 mm	3.52	6.51	11.11
사각형 셀	t=2 mm	23.52	43.58	74.35
	t=3 mm	6.97	12.91	22.03
	t=4 mm	2.94	5.45	9.29
원형셀	t=2 mm	20.0	37.01	63.14
	t=3 mm	5.92	10.97	18.71
	t=4 mm	2.50	4.63	7.89

Fig. 5.는 연마 변형에 의한 광학성능, 즉 WFE값의 변화를 셀의 기하적 형상과 두께, 내접원의 크기 등을 변화시켜 분석한 결과이다. 이 결과를 통하여 광학장비의 시스템 요구성능 및 연마시

요구되는 WFE 요구성능을 고려하여 최적의 형상과 구조 치수를 선택한다.

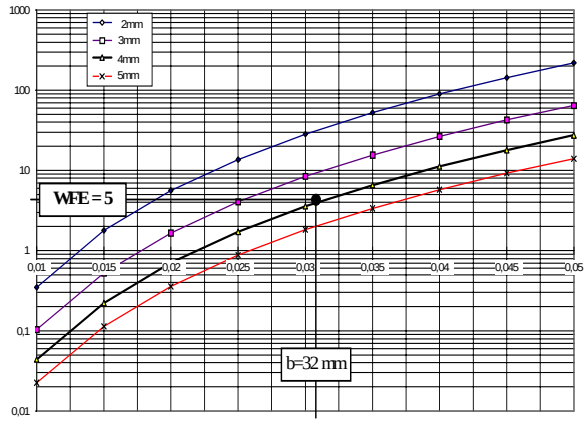


Fig. 5. WFE due to cell configurations

위 결과에서 보는 바와같이 원형 셀이 가장 변형이 작고, 사각형과 삼각형은 비슷한 것으로 나타났으나, 내접원의 직경에 대한 경량화율 측면에서 삼각형이 가장 유리하다.(Fig 6. 참조)

즉, 셀 모양에 따른 경량화 량을 W라 하면, 다음 식과 같다.

$$W_{삼각} = \frac{3}{4}\sqrt{3} \times b^2 \times h \times \rho \text{.....}(2)$$

$$W_{사각} = b^2 \times h \times \rho \text{.....}(3)$$

$$W_{원} = \frac{\pi}{4} \times b^2 \times h \times \rho \text{.....}(4)$$

여기서, b는 셀 내접원의 지름, h는 셀의 깊이, ρ는 재질의 밀도를 나타낸다. 윗 식에서, 삼각형 셀에 대한 사각형 셀의 경량화 비율은 77%, 원형 셀의 경량화 비율은 60% 정도이기 때문에 삼각형 셀이 경량화 면에서 가장 유리하다. 반면에, 연마압력에 의한 변형은 b=30 mm인 경우에, 삼각형 셀에 비하여 사각형 셀이 83.5%, 원형셀이 71%정도이기 때문에 삼각형 셀이 최적 형상임을 알수 있다.

따라서, 본 설계에서는 삼각형 셀을 선정하였으며, 반사면의 두께, t=4 mm 및 내접원 직경, b= 32 mm를 선정하였다. 이 경우 반사거울의 총 경량화율은 75%정도(반사거울 중량은 약 5.2 Kg 임)로 나타났다. 경량화 설계된 1차 반사거울의 형상은 Fig. 6과 같다.

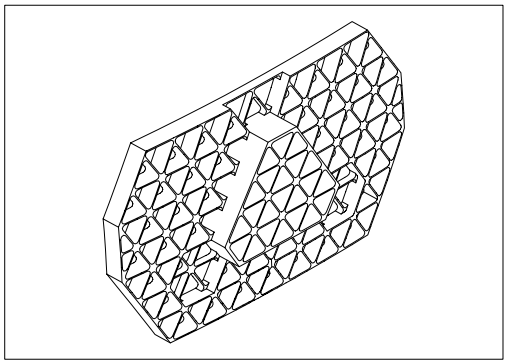


Fig. 6. Light weighted 1st mirror

3. 반사경 진동해석

3.1 최적 장착점

Fig 7에서와 같이 반사경 구조를 개념적으로 표현하였을 때, 장착점 위치, d는 설계시 매우 중요한 요소이다.

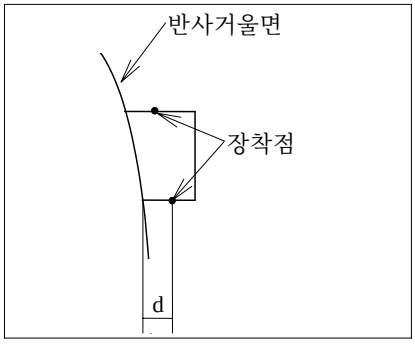


Fig.7. Mounting Point

설계된 모델을 중심으로, 장착점,d를 변화하면서 반사경 결합체의 고유진동수를 비교함으로서, 최적의 장착점을 해석하였다. Fig 8은 장착점 위치변화에 따른 1차 및 2차 고유진동수의 변화를 해석한 결과이다.

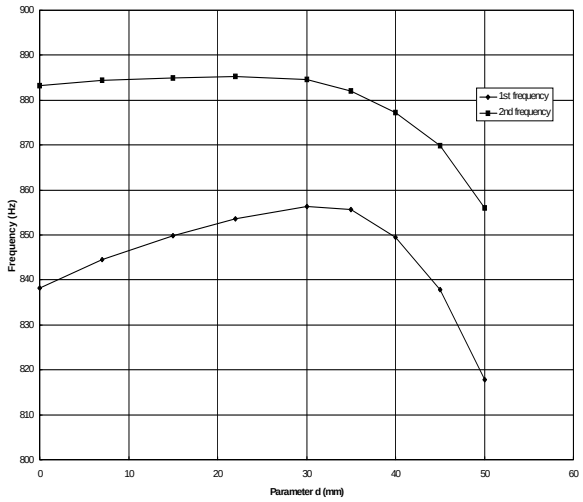


Fig.8. 1st and 2nd Frequency vs Mounting Point, d

Fig. 8.의 결과에 의하면, 1차 고유진동수는 장착점거리 d=30 mm에서 최대값을 나타내었으며, 2차 고유진동수는 d=22 ~ 30 mm 근처까지 비슷한 값을 나타내었다.

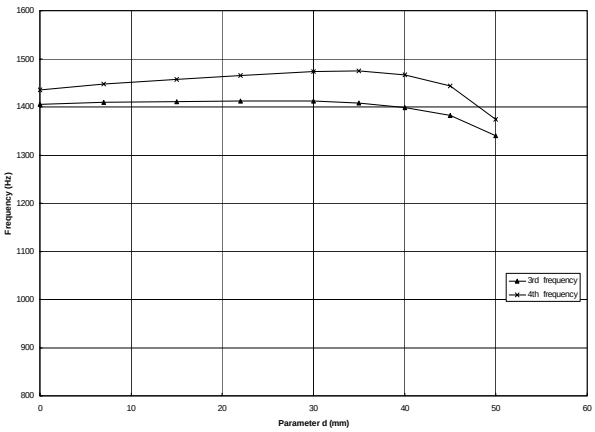


Fig. 9. 3rd and 4th Frequency vs Mounting Point, d

Fig. 9에서는 3차, 4차 고유진동수는 d=30~40 mm까지 고유진동수의 변화가 거의 없으나, 40mm이상에서는 다소 감소하는 현상을 보이고 있다.

3.2 반사경 고유진동수 및 진동모우드

해석결과에 의하면, 장착점 거리 d=22 mm에서의 1차 기본 고유진동수는 853.6 Hz 로서, 초기 설계 목표치(700Hz)를 여유있게 상회하였다. Table 2.는 d=22 mm인 경우에 10차까지의 고유진동수 결과이다.

Table 2. Natural frequency of 1st mirror

진동 모우드 수	고유진동수(Hz)
1	853.6
2	885.2
3	1,412.5
4	1,465.4
5	2,120.0
6	2,413.1
7	2,689.4
8	2,817.7
9	2,854.3
10	3,487.0

Fig. 10은 1차에서 4차 까지의 진동모우드를 해석한 결과로서, 1차 및 2차 모우드는 800 hz 정도로 상호 비슷한 진동수를 나타내는 모우드이고, 3차, 4차도 진동수는 비슷하나 1400 hz이상으로 나타났다.

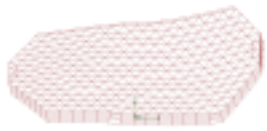
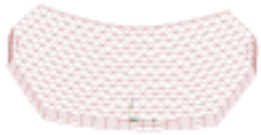
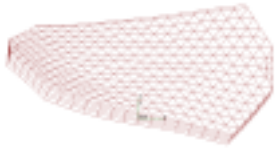
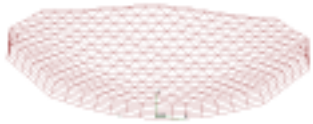
Mode	Mode Shape
1	
2	
3	
4	

Fig. 10. Mode shape of 1st mirror

4. 결 론

이상에서 우주용 고해상도 광학 영상장비에 사용되는 주 반사경인 1차 반사경의 경량화 및 진동해석을 통하여 최적설계 기법을 제시하였다. 우주용 광학 영상 탑재장비의 요구 특성상, 경량화 설계가 매우 중요할 뿐만 아니라 매우 높은 정밀도를 요구하기 때문에 반사경의 경량화 설계 및 진동특성 해석은 매우 중요하다.

광학 반사경의 경량화를 위한 반사경 후면의 최적 형상은 삼각형 셀로 판명되었다. 또한 반사경 결합체의 진동특성을 해석하여 요구하는 기본 진동수를 만족하는 셀의 설계 치수를 제시하였으며, 장착 지지점의 최적값이 도출되었다.

후 기

본 연구에 이어서 반사경의 외부 하중에 의한 각 자유도별로 감응도 해석 및 중력에 의한 변형을 해석하여 광학적 성능 영향분석 등은 추후 연구과제이다.

참고문헌

(1) Paul, R. Yoder,JR, "Opto-Mechanical System Design" , Marcel Deckker, INC., New York, 1993.
(2) Anees Ahmad., " Handbook of Optomechanical Engineering" , Boca Raton, New York, 1996
(3) Francis S. Tse et al, " Mechanical Vibrations", Allyn and Bacon, INC, New York, 1978
(4) Leonard Meirovitch, " Analytical Method in Vibration", Collier-Macmillan LTD, London, 1967
(5) Gary Waldman & John Wootton, " Electro-Optical Performance Modeling", Artech House, Boston , 1993