

고 분해능 반사경의 마운트 설계

김광로^{*,1)} · 이영신²⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제7기술연구본부

²⁾ 충남대학교 기계설계공학과

Mount Design for High-Resolution Mirrors

Kwang-Ro Kim^{*,1)} · Young Shin Lee²⁾

¹⁾ The 7th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Korea

(Received 20 September 2013 / Revised 19 December 2013 / Accepted 20 December 2013)

ABSTRACT

The mirror which is considered in designing a MFD is off-axis primary one and its dimension is wide 556mm height 345mm. The MFD(Mirror Fixation Device) load specification is generated for the high resolution mirror. The optical WFEs for unit loads are calculated from mirror sensitivity analysis and they are compared with allocated allowable optical WFE. The parasite load for the MFD is calculated from their comparison. The MFD compliant with the parasite load is designed.

Key Words : Wavefront Error(파면오차), MFD(반사경 고정기구), Flexure Mount(플렉서 마운트), Parasite Load(기생하중)

1. 서론

일반적으로 마운트의 기계적인 정밀도는 광학면의 정밀도보다 훨씬 낮다. 만일 광학요소가 마운트에 강체적으로 고정된다면 마운트의 정밀도 부족은 광학요소의 변형을 발생시키고 광학성능을 저하시킨다. 광학요소의 마운팅을 성공적으로 수행하기 위한 기준^[1,2]들은 다음과 같다. 첫째, 광학면의 변형을 최소화하기 위해 광학면에 가해지는 힘이 적도록 마운트를 설계한다. 둘째, 광학요소의 자세를 유지하기 위해 높은

강성을 갖도록 설계한다. 셋째, 온도변화에 따라 광학면의 형상과 광학요소의 위치가 변하지 않도록 열적변화를 흡수할 수 있는 마운트를 설계한다. 넷째, 광학요소가 시간이 지나도 위치를 유지하도록 재료의 안정성을 고려해야 한다.

일반적으로 마운트에 의해 발생하는 광학요소의 변형을 최소화하기 위해 kinematic 마운트가 사용된다. kinematic 개념에 따르면 공간에서의 강체는 6개의 자유도를 갖고 접촉점이 6개 이상의 자유도를 갖는 경우 강체는 과도하게 구속되고 이로 인해 변형이 발생한다.

하지만 kinematic 마운트는 접촉지점에서 높은 접촉응력을 발생시키는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복

* Corresponding author, E-mail: leeys@cnu.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

하기 위한 방법으로 유한한 접촉면적을 갖는 semi-kinematic 마운트가 사용된다. 이 방법에서 중요한 관심사항은 마운트 패드의 정확도이다. 즉, 마운트 패드들이 같은 평면상에 몇 μ 인치의 정확도로 위치되도록 요구된다. 많은 경우 이 요구조건은 너무 과도해서 실질적이지 않다. 이에 반하여, Flexure 마운트는 광학기구의 성능에 미치는 기계적 및 열적인 효과가 최소화되도록 함으로써 광학요소들을 지지구조 시스템의 영향으로부터 최소화시키는 탄성체 기계구조이다. 즉, 각 마운팅 패드에 회전 컴플라이언스를 도입함으로써 마운트 패드의 정확도 요구가 훨씬 완화된다.

본 논문에서는 대구경 반사경의 플렉서 마운트 지지 구조를 설계하기 위해 반사경의 민감도 해석을 통하여 하중들을 정의하고, 설계 요구조건을 만족하는 지지구조 형상을 도출하는 과정을 제시하고자 한다.

2. 마운트 설계과정

고분해능 반사경의 지지구조를 설계하기 위한 전체적인 해석/설계 흐름은 아래와 같다.

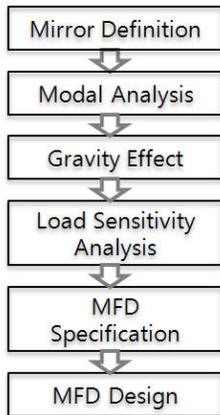


Fig. 1. Procedure for analysis and design of MFD

2.1 반사경 형상

해석을 위해 사용된 반사경은 반사경 표면의 연마 (polishing) 압력을 고려한 경량화 설계과정을 통해 아래와 같이 완성되었다.

- 경량화 율 75%
- 삼각형 셀 사용, 셀 내경 \varnothing 32mm

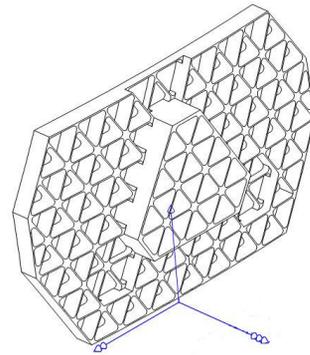


Fig. 2. The configuration of the mirror

- 광학면의 두께는 4mm
- 지지점은 반경 125mm에 위치하고, 원주 방향으로 120° 등 간격으로 배열
- 반사경의 재질은 SiC
- 할당된 광학적 파면오차 허용값은 11nm RMS
- 미러조립체와 주구조물과의 불연성(decoupling)을 구현하기 위한 반사경 조립체의 강성은 700Hz 이상
- 반사경의 곡률 반경 3049mm(오목형)

설계에 중요한 제한조건으로 작용하는 광학면 파면 오차의 허용값은 많은 설계경험을 통하여 산출된 값을 사용하는 것이 바람직하지만 그렇지 못한 상황이어서 유사시스템에서 사용되는 허용값을 사용하여 초기설계를 수행하였다.

Fig. 3는 광학면에 강성을 주는 보강재의 두께와 높이 값이다.

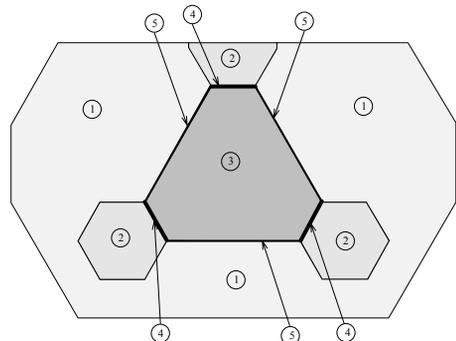


Fig. 3. Different types of reinforcement of the mirror

- ① 두께=2mm, 높이=30mm
- ② 두께=2mm, 높이=15mm
- ③ 두께=2mm, 높이=50mm
- ④ 두께=5mm, 높이=50mm
- ⑤ 두께=4mm, 높이=50mm

2.2 반사경 유한요소모델

경량화 된 반사경을 아래와 같이 쉘 요소를 사용하여 유한요소모델링(Fig. 4)하였다.

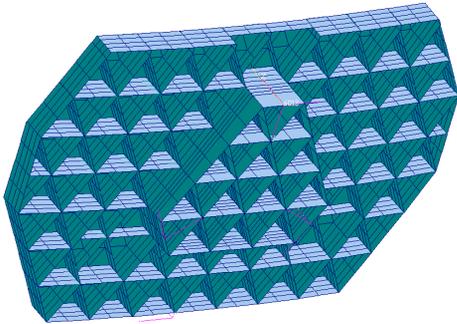


Fig. 4. View of the finite element model

2.2.1 매개변수 d의 정의

MFD(Mirror Fixation Device) 부착위치는 광학성능에 큰 영향을 준다. 따라서 Fig. 5과 같이 이 부착위치 값을 매개변수(d)로 정의하고 모든 하중조건에 대한 최적의 지지위치를 결정하고자 한다. Fig. 3에서 보강재의 높이는 50mm이다. 따라서 d의 값은 0에서 50mm 범위의 값을 갖는다. 모든 해석에 대해 지지 점에서의 경계조건은 이상적인 kinematic조건이다. 즉, 반사경 면에 수직한 방향과 원주방향으로의 이동 자유도만 고정되고 나머지 자유도들은 모두 풀어준다.

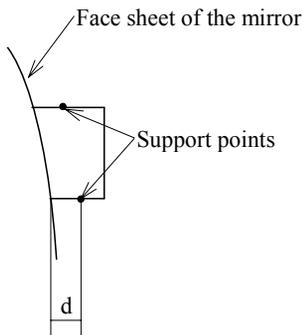


Fig. 5. Definition of the parameter, d

2.2.2 유한요소모델의 유효성검토

해석은 MSC-NASTRAN^[3,4]으로 수행하였다. 유한요소 모델링의 정확도에 대해 검토결과, Table 1과 같이 전체질량은 5.2kg이고, Max. Ratio와 Epsilon은 NASTRAN에서 요구하는 기준을 충분히 만족한다. 스트레인 에

너지 값은 10^{-2} 이하의 값을 갖는 것이 바람직한데 A-set의 일부에서 1을 넘는 값을 갖는다. 이것은 반사경의 광학면이 곡률을 이루기 위해 광학면의 질점들이 같은 평면상에 위치하지 못하고 이로 인해 스트레인 에너지가 발생하기 때문이다.

Table 1. FE model validation results

Mass (kg)	Position of CG w.r.t. Basic Coord.			Max. Ratio
5.2	0.	0.	-8.76×10^{-2}	1.0×10^5
Epsilon	Max. of Strain Energy			
	support	G-set	N-set	A-set
9.072×10^{-15}	1.922×10^{-4}	1.4×10^{-4}	1.4×10^{-4}	1.1×10^0

모델의 강체 모드를 확인하기 위해 구속 경계조건이 없는 상태에서 고유진동 해석을 수행하였고, 첫 번째부터 여섯 번째까지의 모드가 0.01Hz 보다 작은 강체진동 모드를 가짐을 확인할 수 있었다.

2.3 고유진동해석

앞에서 묘사된 모델이 진동해석을 위해 사용되고 경계조건은 이상적인 kinematic 경계조건이 적용된다. 부착위치(d)를 변화시키면서 진동모드의 변화추이(Fig. 6)를 살펴보면, 모든 매개변수 d값에 대해 반사경의 첫 번째 진동수 요구강성(700Hz)이 만족됨을 볼 수 있다. 모드형태는 d값의 변화에 따라 거의 일정하다. Fig. 7는 d = 22mm일 때의 고유진동 모드를 보여준다.

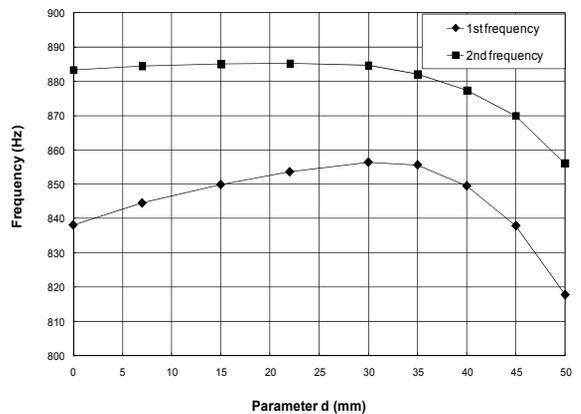


Fig. 6. 1st & 2nd natural frequency of the mirror

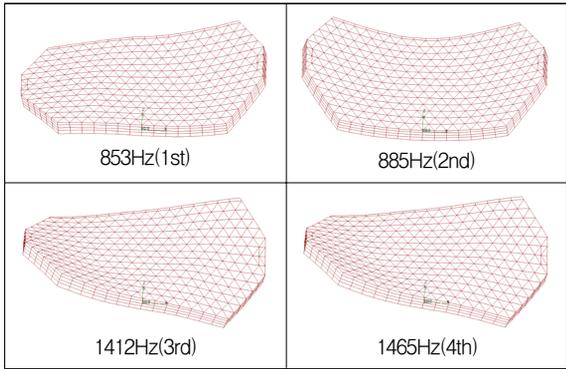


Fig. 7. The first four modes of the mirror

2.4 정적해석

2.4.1 중력효과

이상적인 kinematic 조건을 적용하여 중력에 의한 광학 성능 저하를 평가하였다. 이를 위해, Fig. 8과 같이 중력 가속도(1g)가 반사경에 작용한다.

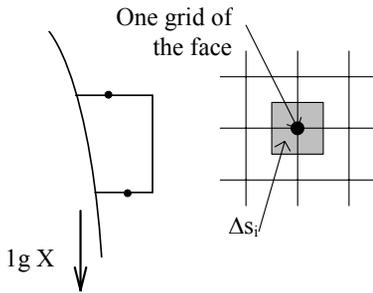


Fig. 8. Gravity direction and a grid of the face

구조해석을 통해 계산된 광학면의 각 노드의 수직 변위는

- Peak to valley_{Mechanical} = $\frac{1}{2}(\delta n_{\max} - \delta n_{\min})$
- Arithmetic mean_{Mechanical} = $\frac{1}{n_{grid}} \times \sum \delta n_i$
- 1σ value_{Mechanical} = $\sqrt{\sum \Delta S_i / S \times (\delta n_i - \bar{\delta n})^2}$ 이고

중력에 의한 광학 성능 저하는 다음과 같다.

- Peak to valley_{Optics} = 2 × Peak to valley_{Mechanical}
- Arithmetic mean_{Optics} = 2 × Arithmetic_{Mechanical}
- 1σ value_{Optics} = 2 × σ value_{Mechanical}

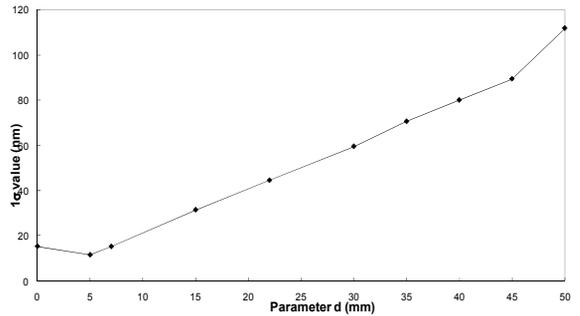


Fig. 9. Optical values depending on supporting points

Fig. 9의 해석결과에 따르면 지지점 위치와 무게 중심의 위치가 같은 평면상에 놓일 때 가장 좋은 광학 성능을 보임을 알 수 있고, 그 값은 d = 5mm 근방이다.

2.4.2 기생하중(Parasite Load)

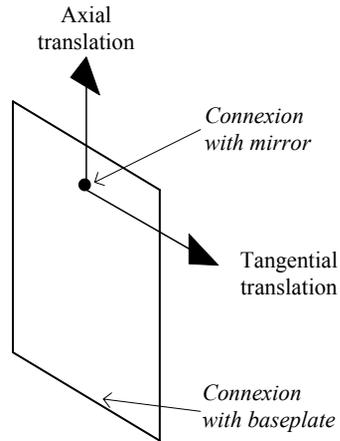


Fig. 10. Fixed DoF for MFD

Kinematic 마운트를 구현하기 위해 3개의 파드(pod)를 가진 마운트에서는 각 파드당 4개의 자유도를 풀어주어야 한다. 즉, Fig. 10과 같이 축 방향과 접선 방향으로의 변위는 구속되고, 나머지 4개의 방향으로의 변위는 풀어준다. 그러나 실제 구조에서는 플렉서가 어느 정도의 강성을 갖기 때문에 4개의 자유도는 완벽하게 풀 수 없다. 이 강성은 반사경과 MFD사이의 접촉지점에서 기생하중을 발생시킨다. 따라서 이 장에서는 접촉지점에서의 기생하중에 대응하는 단위 힘과 모멘트를 부가하고 반사경의 변형에 기인한 광학 성능

저하 값을 구하고자 한다. 반사경을 잡아주는 위치(d)가 매개 변수로 계속 사용된다.

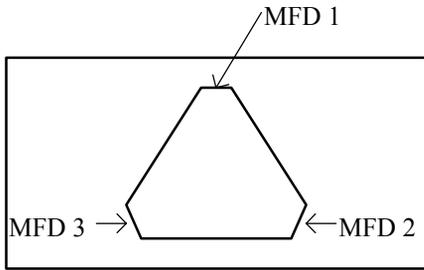


Fig. 11. Position of MFD

적용하중(applied load) ;

- Radial force $F_y = 1\text{N}$
- Tangential torque $M_x = 1\text{ N} \cdot \text{m}$
- Radial torque $M_y = 1\text{ N} \cdot \text{m}$
- Axial torque $M_z = 1\text{ N} \cdot \text{m}$

각 적용하중에 대해 Fig. 11과 같이 3가지 하중형태가 추가된다.

- ① MFD 1 단독 부가하중
- ② MFD 2 단독 부가하중
- ③ MFD1, MFD2 and MFD3 동시 부가하중

Fig. 12 ~ Fig. 15은 기생하중에 해당하는 힘과 모멘트를 하중 형태별로 부가하였을 때 발생한 반사경의 변형을 광학성능 저하 값으로 환산된 값들의 변화 추이를 보여준다.

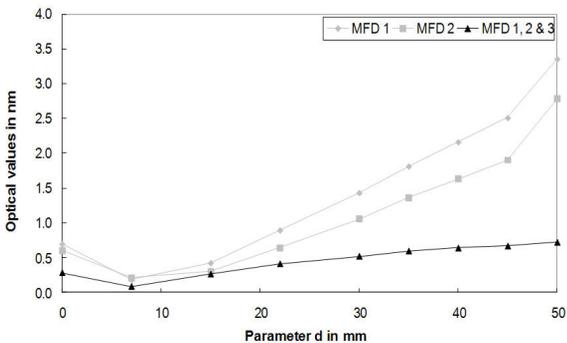


Fig. 12. Optical values for a radial force of 1N

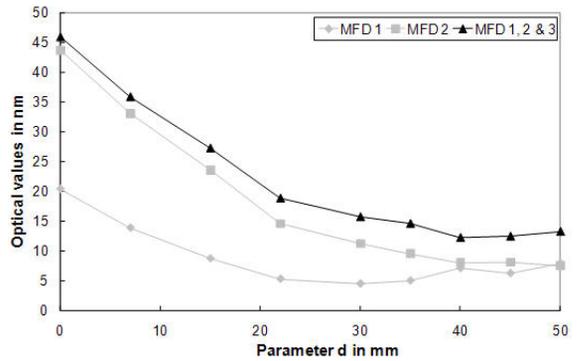


Fig. 13. Optical values for a tangential torque of 1N · m

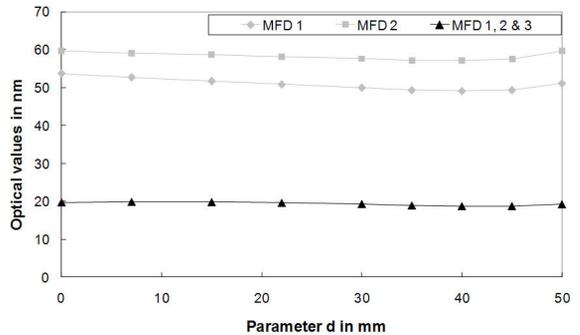


Fig. 14. Optical values for a radial torque of 1N · m

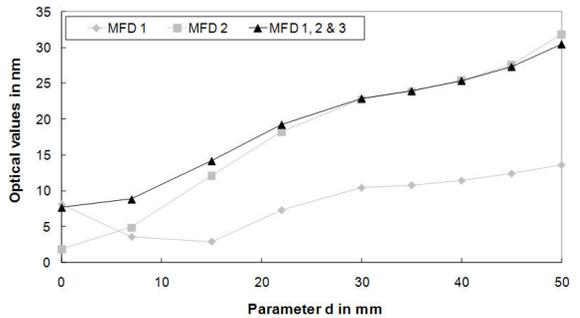


Fig. 15. Optical values for a axial torque of 1N · m

2.4.3 허용 힘과 토크의 계산

표준 3반사 광학계에서 주 반사경에 할당된 광학적 파면오차 허용 값은 11nm RMS이고, 이 값은 각 하중 케이스 별로 배분된다. 배분된 값들은 유사 시스템으로부터의 경험에 근거한다.

각 하중케이스별로 배분된 허용값은 다음과 같다.

- 허용 WFE by Radial force $F_y = 8.5\text{nm}$

- 허용 WFE by Tangential torque $M_x = 4.1\text{nm}$
- 허용 WFE by Radial torque $M_y = 4.1\text{nm}$
- 허용 WFE by Axial torque $M_z = 4.1\text{nm}$

앞서 계산된 민감도해석 결과와 배분된 광학성능을 이용하여 매개변수 d 를 변화시키면서 허용힘과 토오크 값을 구하였다. 결과는 Fig. 16, Fig. 17와 같다.

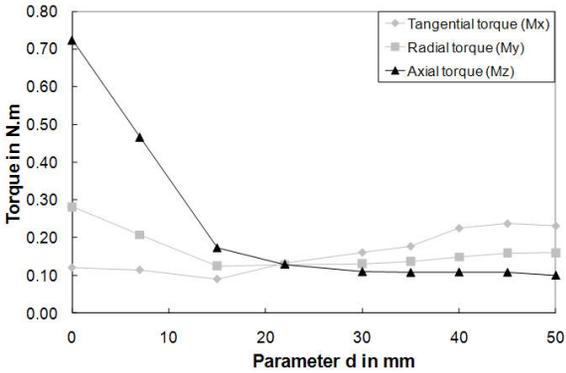


Fig. 16. Allowable values on MFD's Torque

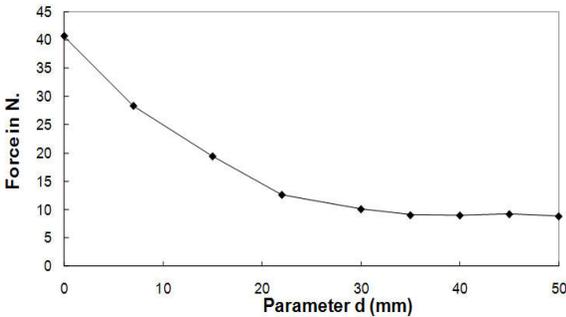


Fig. 17. Allowable values on MFD's Force

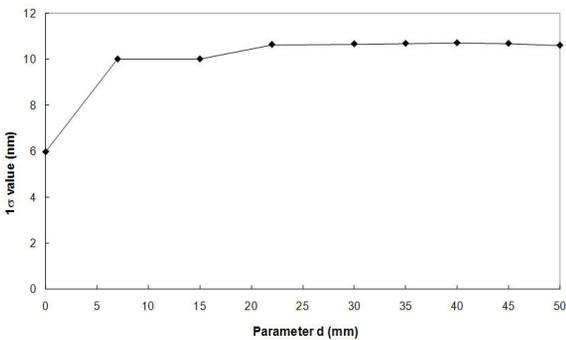


Fig. 18. Optical value for allowable force and torque

허용 힘과 토오크를 동시에 작용시킬 때 광학적 허용오차 할당 값이 만족되는 지를 검토해보면 Fig. 18과 같이 전 구간에 걸쳐 광학적으로 할당된 성능 11nm를 만족한다.

3. 설계검토

- 접근성 제한 : 반사경에 MFD를 설치할 때 첫 번째로 고려해야 할 제한조건은 체결부위에 대한 접근성이다. 보강재 부분의 높이가 최소 15mm이므로 광학면의 중립면과 지지위치 사이의 거리는 $d = 15\text{mm}$ 이상이어야 한다.
- Parasite load 민감도 분석 : Fig. 17에서 현실적인 설계가 되기 위해서는 최소 8N의 힘이 반경방향으로의 힘에 관한 규정이 되어야 한다. 이 보다 더 적은 하중에 관한 규정은 만족시키기 어려운 설계 규정이 된다. 또한 너무 허용 하중을 크게 하면 d 가 작아져서 접근성이 나빠진다. 이러한 현실적인 제한 요소들을 고려하여 매개변수 $d = 30\text{mm}$ 를 선정하였다. 이때 힘과 토오크에 관한 규정은 Table 2와 같다.

Table 2. Parasite load specifications

max. radial force	max. tangential torque	max. radial torque	max. axial torque
10.0N.	0.15N.m	0.12N.m	0.10N.m

그러나 MFD 부착 위치($d = 30\text{mm}$)를 반영하면 $d = 30\text{mm}$ 에 대한 중력효과는 60nm의 광학성능 저하 값을 초과하는 값으로 이것을 해결하기 위한 방법으로 Fig. 19과 같은 MFD를 블레이드 형태가 아닌 바이포드 형태로 설계하여 바이포드의 수렴점을 광학면의 변위를 최소화시키는 지점에 위치시킨다.

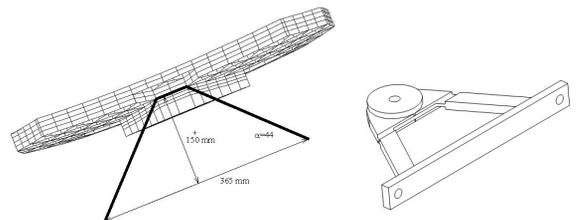


Fig. 19. Dimensions of the proposed Bipod

Fig. 20은 제안된 바이포드의 형상과 바이포드의 각도에 따른 광학 성능 결과이다. 해석결과 수렴점의 위치가 약 $d = 4\text{mm}$ 일 때 광학성능이 가장 좋고, 이에 대응하는 바이포드의 각도는 $\alpha = 44^\circ$ 이다.

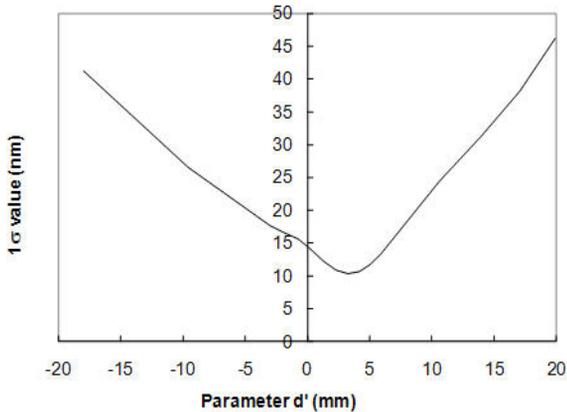


Fig. 20. Gravity effect on a stiffened mirror

- 고유진동해석 : $d = 30\text{mm}$ 의 체결위치를 선정하는 경우 첫 번째 모드는 857Hz 이고, 동특성 측면에서 매개변수 d 의 모든 값에 대해 진동수 규정(700Hz)을 만족한다.

4. 결론

본문에서의 마운트 설계계정을 통하여 중력, 진동 등 기계적 영향으로부터 고 분해능 반사경이 변형되는 것을 차단하기 위한 허용가능한 반사경의 광학성능에 상응하는 각 지지점에서의 하중스펙을 도출하였고, 도

출된 하중에 대한 마운트의 구체적 형상을 제시하였다. 단일 평판형태의 플렉서보다는 바이포드형 플렉서 마운트로 설계함으로써 접근성제한 문제를 해결하면서 허용된 11nm 의 광학성능을 만족시킬 수 있었다.

References

- [1] Daniel Vukobratovich, "Flexure Mounts for High-Resolution Optical Elements," SPIE Vol. 9959, pp. 18-36, 1998.
- [2] Paul R. Yoder, "Opto-Mechanical Systems Design," Marcel Dekker, Inc., 2nd ed, Chapter 13, 1992.
- [3] MSC/NASTRAN Linear Static and Modes Analysis User's Guide
- [4] MSC/NASTARN Quick Reference Guide.
- [5] Ji-Yeon Kim et al, "A Study on the Design of Lightweight Primary Mirror and Its Mount," The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 2829-2834, 2006. 6.
- [6] Il Kweon Moon, "Optimization of Large Telescope Mirror Support System," Optical Society of Korea Annual Meeting, pp. 303-304, 2007.2
- [7] Kyung-Won Kim et al, "Design of the Blade-Type Optical Bench for Earth Observation Satellite," The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 33, No. 11, pp. 88-94, 2005. 11.
- [8] Hyun-Jung Kim et al, "Optimal Design of the Flexure Mounts for Satellite Camera by Using Design of Experiments," The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 32, No. 8, pp. 693-700, 2008.