

A Study on Performance and Sensitivity Improvement of an Off-axis TMA Telescope Optical System by Changing the Aperture-stop Position

Han-Yul Lee¹, Won-Kyoun Jun¹, Sang-min Lee², Ki-hwan Kim², Hyun-Ju Seo^{3,4}, Seung-Han Park², and Mee-Suk Jung^{1†}

¹Department of Nano & Semiconductor Engineering, Korea Polytechnic University, 237, Sangidaehak-ro, Siheung 15073, Korea

²Department of Optics and Photonics, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea

³Satellite System 2 Team, Hanwha systems, 491-23, Gyeonggidong-ro, Cheoin-gu, Yongin 17121, Korea

⁴Space Optics Laboratory, Department of Astronomy, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea

(Received November 19, 2020; Revised December 19, 2020; Accepted December 21, 2020)

In this paper we have studied an optical system according to the aperture position of an off-axis TMA telescope for satellites. An off-axis TMA telescope should have high resolution and wide field of view (FOV). In addition, the optical system should have a wide tolerance range, because it is structurally located off-axis and is difficult to assemble. However, there are differences in performance and sensitivity according to the aperture-stop position, so it is important to select a suitable aperture-stop position. Therefore, in this paper we have designed each off-axis TMA telescope according to the aperture-stop position, and have analyzed the performance and sensitivity to suggest a suitable aperture-stop position.

Keywords: Off-axis TMA telescope, Reflector, Aperture-stop

OCIS codes: (080.4035) Mirror system design; (120.4570) Optical design of instruments

조리개 위치 변경을 통한 비축 삼반사 망원경 광학계의 성능 및 민감도 개선 연구

이한울¹ · 전원균¹ · 이상민² · 김기환² · 서현주^{3,4} · 박승한² · 정미숙^{1†}

¹한국산업기술대학교 나노반도체공학과

☎ 15073 경기도 시흥시 산기대학로 237

²연세대학교 광과학공학과

☎ 03722 서울특별시 서대문구 연세로 50

³한화시스템 위성시스템 2팀

☎ 17121 경기도 용인시 처인구 경기동로 491-23

⁴연세대학교 천문우주학과 우주광학연구실

☎ 03722 서울특별시 서대문구 연세로 50

(2020년 11월 19일 받음, 2020년 12월 19일 수정본 받음, 2020년 12월 21일 게재 확정)

본 논문에서는 인공위성용 비축 삼반사 망원경의 조리개 위치에 따른 광학계 연구를 진행하였다. 인공위성 광학 탑재체로 주로 사용되는 비축 삼반사 망원경은 높은 해상도와 넓은 화각을 가져야 한다. 또한, 광학계가 구조적으로 비축상에 위치하여 조립이 어려우므로 넓은 공차범위를 가져야 한다. 그러나 조리개의 위치 선정에 따라 광학계의 성능 차이 이외에도 민감도의 차이가 있어, 사용 목적에 따른 적합한 조리개의 위치 선정이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 조리개 위치가 각각 다른 비축 삼반사 망원경을 설계하고 성능 및 민감도 분석을 진행하여 적합한 조리개의 위치를 제시하였다.

[†]E-mail: msoptic@kpu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-3430-876X

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

Keywords: 비축 삼반사 망원경, 반사경, 조리개

OCIS codes: (080.4035) Mirror system design; (120.4570) Optical design of instruments

I. 서 론

최근 우주 산업의 발전과 함께 인공위성의 시장이 확대되면서 인공위성 탑재체와 관련된 연구도 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 지상을 관측할 수 있는 망원경을 탑재하는 인공위성 역시 증가하고 있으며, 지표 변화 관측, 재난재해 대응, 안보 및 군용 장비 등 다양한 목적으로 사용되고 있다. 이러한 지상관측 망원경은 넓은 영역을 선명하게 보기 위해 넓은 시야각을 가진다. 동시에 높은 해상도를 가져야 하며^[1], 광학적 성능을 만족하기 위해 인공위성에 주로 탑재되는 망원경 광학계로는 Maksutov Cassegrain, Ritchey-Chrétien Cassegrain, off-axis three-mirror-anastigmat (비축 삼반사) 등 다양한 타입의 망원경이 사용된다. 그 중에서 삼반사 타입의

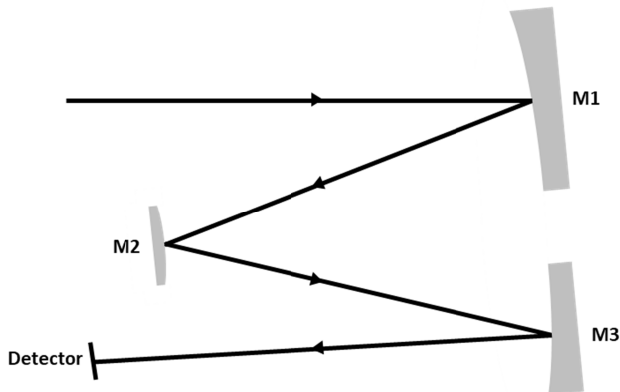


Fig. 1. Schematic of off-axis TMA telescope.

Table 1. Optical specification of other off-axis TMA telescopes

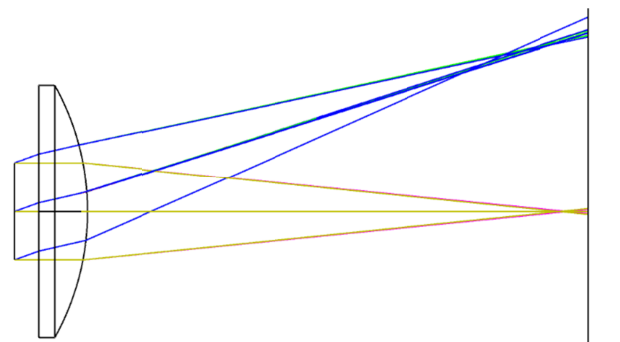
	Centre National d'Etudes Spatiales	National University of Defense Technology
Altitude	633 km	500 km
Aperture-stop	M1	M2
Focal length	1,080 mm	1,750 mm
FOV	8.4°×1.4°	6.0°×1.0°
f-number	6	9
Pixel size	6.5 μm	7 μm
MTF	>0.2 (at 77 cycles/mm)	>0.37 (at 71.4 cycles/mm)
Telescope mass	40 kg	<60 kg
Swath distance	92 km	51 km
GSD	3.8 m	2.0 m

망원경은 구면 수차, 비점 수차, 코마 수차 등을 상쇄시킬 수 있어, 근래에 들어 많은 연구가 진행되고 있다^[2].

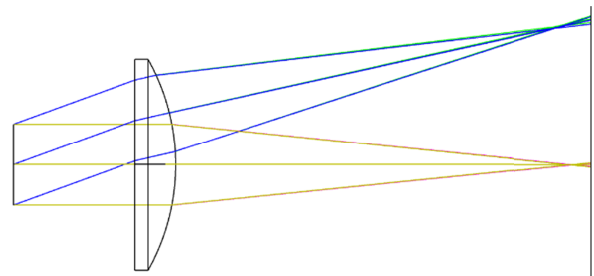
비축 삼반사 망원경은 그림 1과 같이 3개의 비구면 반사경을 이용하여 비축상에 이미지를 형성하는 삼반사 타입의 망원경으로, 반사경을 tilt 및 decenter시켜 구조적으로 광의 차폐가 없는 설계에 유리하고 상대적으로 넓은 시야각을 가지는 장점이 있다^[3].

망원경과 같은 결상 광학계에서는 초점거리, 조리개의 위치, 이미지 센서의 픽셀 사이즈 등 다양한 요소들을 통해 광학계 성능을 결정한다. 특히 조리개는 빛의 양을 조절해주는 요소로, 조리개의 크기와 위치에 따라 광학계의 성능과 크기에 영향을 미치므로 적합한 조리개 위치를 선정하는 것이 중요하다. 표 1은 해외에서 설계 및 연구한 비축 삼반사 망원경 중 실제 인공위성에 탑재된 망원경 모델의 광학 사양을 비교한 표이다^[4,5]. 표를 통해 두 망원경이 조리개의 위치가 서로 다를 수 있음을 확인할 수 있는데, 이는 설계 과정에서 망원경의 용도나 목표 성능에 따라 알맞은 조리개의 위치를 선정한 것임을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 비축 삼반사 망원경의 광학적 사양을



(a) 5 mm from stop to lens



(b) 30 mm from stop to lens

Fig. 2. Influence of stop shift.

선정한 후, 같은 사양에 각 조리개 위치만 변경시킨 비축 삼반사 망원경을 설계하고자 한다. 또한, 비축 삼반사 망원경은 반사경이 비축상에 위치하여 조립 및 제작이 어려운 점을 고려하여 각각의 광학계에 대한 민감도 분석을 진행하고, 이때 비축 삼반사 망원경에 적합한 조리개 위치를 제시하고자 한다.

II. 본 론

조리개는 광학계에 들어오는 빛의 양을 물리적으로 제한하므로 조리개에 의해 chief ray, marginal ray가 결정되며, 결상 광학계를 구성하는 데 있어 중요한 역할을 한다^[6]. 특히, 조리개의 위치 변화가 chief ray와 marginal ray에 작용하는 굴절력에 영향을 미쳐 광학계 성능에 영향을 주게 된다. 그림

2는 광학계에서 조리개와 렌즈 사이가 각각 5 mm, 30 mm 인 광학계 레이아웃이며, 표 2는 두 광학계의 1 field가 형성하는 spot의 radius를 정리한 표다. 두 광학계에서 조리개에 의한 수차를 수치적으로 비교하기 위해 각 광학계의 Zernike 계수를 표 3에 정리하였으며, Z 5와 Z 6은 비점 수차, Z 7와 Z 8은 코마 수차, Z 11은 구면 수차를 의미한다^[7]. 두 광학계의 Zernike 계수 비교를 통해 5 mm 광학계의 비점 수차 및 코마 수차가 크게 발생함을 확인할 수 있다. 이처럼 조리개의 위치에 의해 광학계의 성능이 영향을 받으며, 조리개의 영향을 비교 및 분석하기 위해 조리개 위치가 각각 다른 비축 삼반사 망원경의 광학계 설계를 진행하였다.

광학계의 관측 파장은 위성에서 panchromatic 파장대역으로 주로 사용되는 400 nm~900 nm로 선정하였다. 또한,

Table 2. Spot radius of each optical system

	5 mm from stop to lens	30 mm from stop to lens
Spot radius	1,255 μm	567 μm

Table 3. Zernike coefficients of each optical system

	5 mm from stop to lens	30 mm from stop to lens
Z 5	-7.772	0.538
Z 6	-6.139	0.425
Z 7	-6.362	0.833
Z 8	3.082	-0.403
Z 11	1.309	1.348

Table 4. Optical specification of off-axis TMA telescope

Off-axis TMA telescope		
Detector	Detector size	230 mm×50 mm
	Pixel size	7 μm
Observation	GSD	4.3 m
	Altitude	800 km
Optical system	Spectral range	400 nm-900 nm
	Focal length	1,300 mm
	f-number	8.5
	Entrance pupil diameter	152.9 mm
	FOV	10.0°×2.0°
	Permitted volume size	≤500 mm (W)× 800 mm (D)× 600 mm (H)

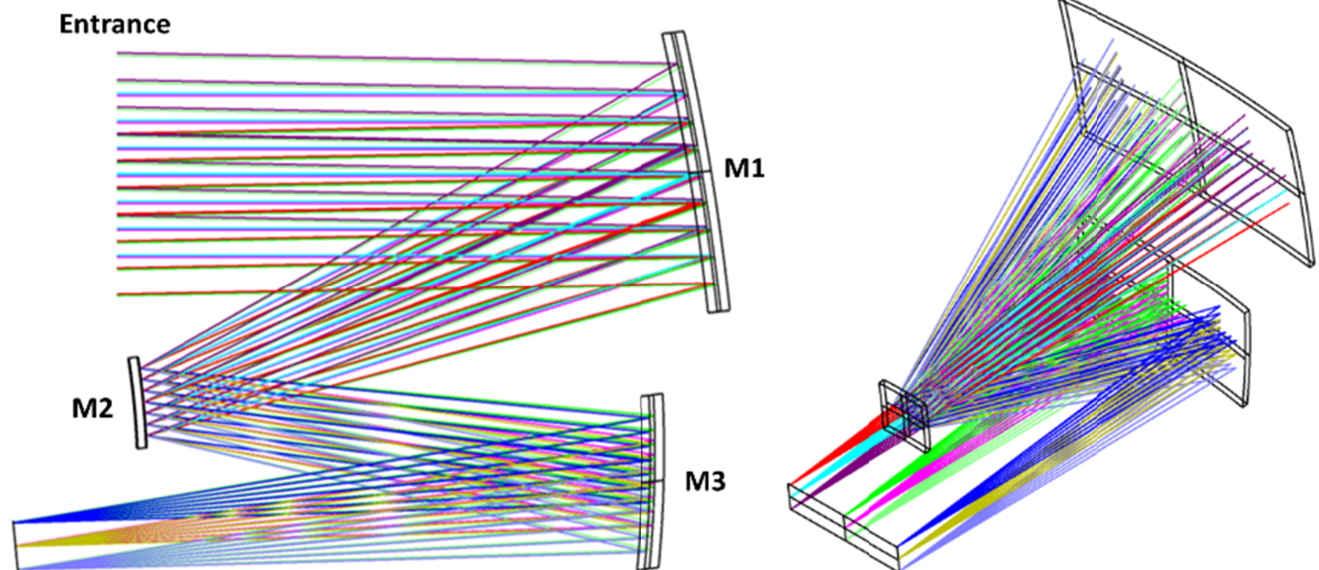


Fig. 3. Layout of M2 stop optical system.

Table 5. Mirror parameters for M2 stop optical system

	M1	M2	M3
Radius	-2,185.92	-739.43	-1,099.73
Conic	-1.91	-0.82	0.94
4 th aspheric coefficients	-3.39 E-12	-	8.20 E-11
6 th aspheric coefficients	-3.66 E-18	-	1.04 E-16
8 th aspheric coefficients	9.18 E-24	-	1.13 E-22
10 th aspheric coefficients	-	-	6.02 E-28

상면 크기 230 mm×50 mm, 픽셀 크기 7 μm인 검출기를 사용하고, 광학계 할당 공간은 500 mm (W)×800 mm (D)×600 mm (H) 내에 들어오도록 하였다. 광학계는 FOV 10°×2°, 고도 800 km에서 GSD 4.3 m의 성능을 만족할 수 있도록 초점거리, f-number 등의 광학적 사양을 도출하여 설계를 진행하였다.

설계한 광학계의 이미지가 지정한 상면 크기 안에 형성될 수 있도록 광학계의 초점거리를 결정해야 한다. 광학계의 초점거리는 FOV와 상면 크기를 이용해 1,300 mm로, 그리고 f-number는 8.5로 계산되었다. 초점거리와 f-number 값을 고려해 광학계의 입사동의 크기는 152.9 mm으로 하였다.

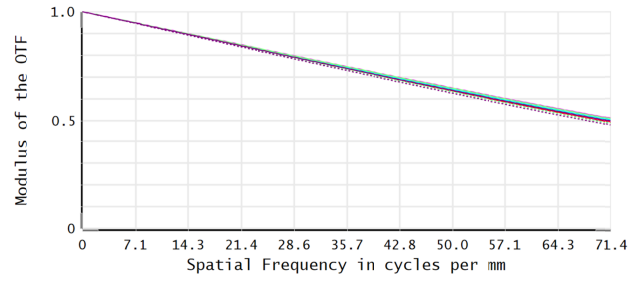
GSD는 이미지 센서의 한 픽셀당 취득할 수 있는 지표면 측정거리로, 인공위성용 광학계의 해상도를 나타내는 지표이다. 한 픽셀이 취득하는 거리가 짧을수록 더 정밀한 거리와 면적을 계산할 수 있다. GSD는 식 (1)을 통해 계산할 수 있으며, 그 값은 4.3 m로 도출하였다. 표 4는 비축 삼반사 망원경의 사양을 정리한 표이다.

$$GSD = \frac{\text{Altitude} \times \text{Detector Focal Length}}{\text{Number of Pixel}} \quad (1)$$

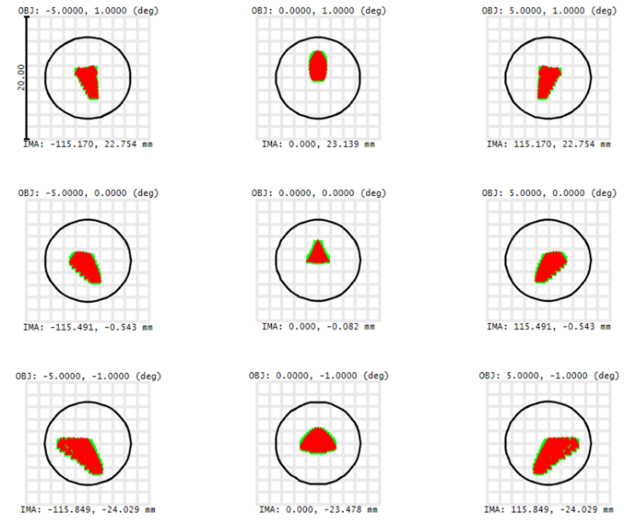
광학계에서 조리개의 역할을 비교하기 위해 광학계의 상세 사양을 토대로, 조리개를 entrance, M1, M2, M3에 각각 위치시킨 비축 삼반사 망원경의 광학계 설계를 진행하였다. 그림 3과 표 5는 M2에 조리개가 위치하는 광학계의 레이아웃과 반사경 데이터이며, 그림 4는 광학계의 성능 지표인 MTF, 파면 오차, spot diagram, distortion grid이다. 각 광학계는 이와 같은 방식으로 설계를 진행하고 광학 성능 지표를 비교하였다.

각 광학계는 광경로와 각 반사경의 y축 사이 간격을 30 mm 이상으로 배치함으로써 구조적인 광의 차폐가 발생하지 않도록 하였다. 표 6은 설계한 각 광학계의 부피, MTF, 파면 오차, spot diagram, distortion, Zernike 계수를 비교하여 정리한 표이다.

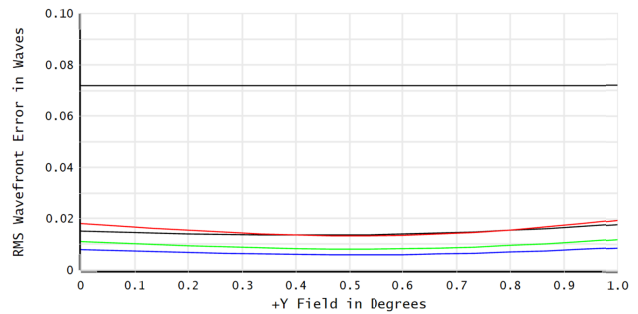
설계 결과, M3에 조리개가 있는 광학계는 M1 반사경의 크기가 커져 광학계의 할당 공간 제한 사양을 만족하지 못하였



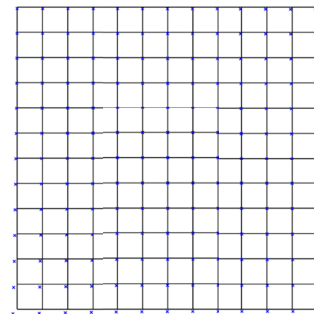
(a) MTF



(b) Spot diagram



(c) RMS wavefront error



(d) Distortion grid

Fig. 4. Optical performance of M2 stop optical system.

다. Entrance, M1, M2에 조리개가 있는 광학계의 경우엔 광학계 할당 공간을 모두 만족하였으나, entrance, M1에 조리개가 있는 광학계에서는 M3 반사경의 크기가 다른 반사경보다 상대적으로 커짐을 확인하였다.

MTF는 픽셀 크기 7 μm를 고려하여 max frequency를 71.4 cycles/mm에서 확인하였으며, 모든 설계가 회절한계에 근접하였다. 파면 오차는 entrance에 조리개가 있는 광학계가 0.04 λ 이하, M1에 조리개가 있을 때 0.05 λ 이하이나, M2와 M3에 조리개가 있을 때 0.02 λ 이하로 상대적으로 좋은 파면 오차를 나타냈다. Spot radius 역시 entrance와 M1에 조리개가 있는 광학계는 일부 field가 Airy disk인 13.6 μm를 벗어났으나, M2와 M3에 조리개가 있는 광학계는 모든 field에서 Airy disk 내에 맺힘을 확인하였다. Distortion은

모든 광학계에서 1% 이하임을 확인하였으며, Zernike 계수 비교를 통해 M1에 조리개가 있는 광학계의 비점 수차, 코마 수차, 구면 수차가 크게 발생하고, M2와 M3에 조리개가 있는 광학계는 수차가 상대적으로 적게 발생한 것을 알 수 있다.

이처럼 광학 사양을 동일하게 유지하고 조리개의 위치만 변경시킨 광학계 설계 결과, 광학계의 할당 공간과 광학적 성능을 고려할 때, M2에 조리개가 위치하는 것이 비축 삼반사 망원경에 적합함을 확인하였다.

이후 광학계의 민감도를 비교 및 분석하기 위해 설계한 각 광학계에 대한 공차분석을 진행하였으며, 공차분석 방식으로는 파면 오차를 공차 기준으로 하여 Monte-Carlo 분석 방법을 사용하였다^[8]. 공차 항목은 광학계의 제작성을 고려하여 반사경의 Zernike irregularity, 광학계의 조립성을 고려하여

Table 6. Optical performance comparison of each optical system

Off-axis TMA telescope				
	Entrance stop optical system	M1 stop optical system	M2 stop optical system	M3 stop optical system
Permitted volume size (mm)	500(W)×798(D)×505(H)	480(W)×791(D)×525(H)	490(W)×779(D)×533(H)	1,080(W)×799(D)×781(H)
MTF	>0.4 (at 71.4 cycles/mm)	>0.4 (at 71.4 cycles/mm)	>0.4 (at 71.4 cycles/mm)	>0.4 (at 71.4 cycles/mm)
Wavefront error	≤0.04 λ	≤0.05 λ	≤0.02 λ	≤0.02 λ
Spot radius	>13.6 μm	>13.6 μm	≤13.6 μm	≤13.6 μm
Distortion	<1%	<1%	<1%	<1%
Z 5	0.005	0.034	0.004	-0.004
Z 6	-0.01	0.01	0.001	0.009
Z 7	0.01	0.03	-0.009	-0.001
Z 8	0.011	0.014	0.004	-0.001
Z 11	-0.001	-0.006	-0.00007	-0.00004

Table 7. Tolerance range of each optical system

		Entrance stop optical system	M1 stop optical system	M2 stop optical system	M3 stop optical system
Zernike irregularity [fringe]	Entrance	-	-	-	-
	M1	0.01	0.005	0.01	0.01
	M2	0.01	0.005	0.01	0.01
	M3	0.01	0.01	0.015	0.015
Thickness [mm]	Entrance	0.15	-	-	-
	M1	0.15	0.15	0.2	0.15
	M2	0.15	0.15	0.2	0.15
	M3	0.15	0.15	0.2	0.15
Decenter [mm]	Entrance	-	-	-	-
	M1	0.1	0.05	0.2	0.15
	M2	0.1	0.1	0.18	0.15
	M3	0.15	0.1	0.2	0.15
Tilt [°]	Entrance	-	-	-	-
	M1	1	0.5	1.5	1.5
	M2	1	1	1.5	1.5
	M3	1	1	1.5	1

thickness, decenter, tilt를 선정하여 총 4가지의 공차 항목을 지정하였다. 또한, 광학계에서 조리개가 위치하지 않은 반사경의 tilt와 decenter를 보상자로 선정하였고, 추가로 이미지 센서의 거리를 보상자로 선정하였다. 반사경의 공차 분석은 공차 범위를 적용한 후 1000번의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 파면 오차 0.07λ 이하를 만족하도록 진행하였다.

표 7은 각 광학계의 4가지 항목의 공차 범위를 정리한 표로, entrance에 조리개가 있는 광학계에 대해서만 entrance의 거리 공차 항목을 추가로 확인하였다. 표를 통해 M2에 조리개가 있는 광학계의 Zernike irregularity가 0.01λ 이상의 공차 범위를, thickness와 decenter가 0.18 mm 이상의 공차 범위를, tilt의 공차 범위는 $1.5'$ 으로 더 여유로운 공차 범위를 가지고 있음을 확인하였다.

비축 삼반사 망원경 광학계는 비축상에 위치하는 반사경으로 인해 조립 및 제작이 어렵기 때문에 thickness, decenter, tilt 등과 같이 제작 과정에서 영향을 받는 요소들의 민감도가 중요하다. 이러한 점을 고려하면, M2 조리개 광학계가 가지는 여유로운 공차 범위는 광학계 제작에 있어 다른 광학계보다 광학적으로 더 유리함을 알 수 있다.

광학계 설계 및 분석 결과, M2에 조리개를 위치시킨 광학계가 광학계 성능 지표인 MTF, 파면오차, spot radius, distortion이 모두 우수함을 알 수 있으며, 광학계 부피는 $490 \text{ mm (W)} \times 779 \text{ mm (D)} \times 533 \text{ mm (H)}$ 로 광학계의 목표 할당 공간에 적합함을 확인하였다. 또한, Zernike 계수를 통해 비점 수차, 코마 수차, 구면 수차 역시 적게 발생함을 확인하였으며, 광학계의 민감도는 다른 조리개 위치 광학계에 비해 여유로운 공차 범위를 가져, 조립 및 제작이 용이함을 확인하였다.

III. 결 론

조리개 위치에 따른 비축 삼반사 망원경 광학계의 비교 분석을 통해 M2에 조리개가 위치한 경우에 크기와 광학적 성능이 우수함을 확인하였다. 또한, 민감도 분석으로부터 M2에 조

리개가 위치한 설계의 공차 범위가 다른 광학계에 비해 상대적으로 더 넓은 공차 범위를 가지는 것을 확인하였다. 이를 통해 광학계 설계에 있어 조리개의 위치가 광학적 성능 이외에도 광학계의 민감도에 영향을 주는 것을 확인하고, 비축 삼반사 망원경에 적합한 조리개의 위치를 제안하였다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행되었습니다(초소형위성 광학 탑재체 연구).

References

1. B. Singaravelu and R. A. Cabanac, "Obstructed telescopes versus unobstructed telescopes for wide field survey—a quantitative analysis," *Publ. Astron. Soc. Pac.* **126**, 386 (2014).
2. D. Korsch, "Closed form solution for three-mirror telescopes, corrected for spherical aberration, coma, astigmatism, and field curvature," *Appl. Opt.* **11**, 2986-2987 (1972).
3. H. M. Kang, "Alignment state estimation of an off-axis three mirror telescope with multiple design configuration optimization algorithm," M. S. Thesis, Yonsei University, Korea (2016).
4. T. Bret-Dibat, V. Albouys, J. Berthon, N. Bouzou, P. Etcheto, D. Laubier, and K. Mercier, "Tests of a high-resolution three-mirror anastigmat telescope," *Proc. SPIE* **3870**, 126-137 (1999).
5. B. Fan, W.-J. Cai, and Y. Huang, "Design and test of a high performance off-axis TMA telescope," *Proc. SPIE* **10564**, 1056417 (2012).
6. G. Herbert, H. Zügge, M. Peschka, and F. Blechinger, *Handbook of Optical Systems: Aberration Theory and Correction of Optical Systems* (Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2015), vol. 3, pp. 242-250.
7. B.-H. Kim, "Opto-mechanical design of telescope mirror for an airborne application," M. S. Thesis, Cheongju University, Korea (2010).
8. J. H. Lim, "Analyses of optical and opto-mechanical performance of a wide field telescope," M. S. Thesis, Kyunghee University, Korea (2013).