

Optical Design of a Wide-field Off-axis Two-mirror System without Ray Obstruction

Hye-Jin Oh and Jong-Ung Lee[†]

*Department of Laser and Optical Information Engineering, Cheongju University,
298 Daeseong-ro, Cheongwon-gu, Cheongju 28503, Korea*

(Received October 31, 2017; Revised November 8, 2017; Accepted November 10, 2017)

To design a wide-field optical system, the inverted telephoto configuration, which has a negative front group and a positive rear group, is popular. For a two-mirror system, the inverse Cassegrain system has the inverted telephoto configuration, but the inverse Cassegrain system with the conventional, axially symmetric configuration shows severe field screening and ray obstruction. To avoid these problems, we put the aperture stop on the secondary mirror of an inverse Cassegrain system to increase field of view, and designed a wide-field off-axis two-mirror system which only uses the off-axis field, without ray obstruction.

Keywords: Optical system design, Telescope, Wide field of view

OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (080.4035) Mirror system design; (110.6770) Telescopes

광선의 차폐가 없는 광시야 비축 2반사광학계 설계

오혜진 · 이종웅[†]

청주대학교 레이저광정보공학과
☎ 28503 충청북도 청주시 상당구 대성로 298

(2017년 10월 31일 받음, 2017년 11월 8일 수정본 받음, 2017년 11월 10일 게재 확정)

넓은 시야를 가지는 광학계에서는 전반부는 음의 굴절능, 후반부는 양의 굴절능을 가지는 inverted telephoto 구조가 일반적으로 사용되고 있고, 2반사광학계에서는 inverse Cassegrain system이 inverted telephoto 구조에 해당한다. 하지만 통상적인 회전대칭 구성의 inverse Cassegrain system에서는 시야가 가려지고 광선의 차폐가 심한 문제점이 있다. 이 연구에서는 이점을 고려하여 inverse Cassegrain system의 제2면에 조리개를 두어 시야를 넓히고, 광선의 차폐가 없는 비축시야만을 사용하는 광시야 비축 2반사광학계를 설계하였다.

Keywords: 광학설계, 반사망원경, 광시야

OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (080.4035) Mirror system design; (110.6770) Telescopes

I. 서 론

2반사광학계는 색수차가 없고 대구경으로 제작이 가능한 반면 부경에 의한 광선의 차폐와 주경의 center hole로 인하여 시야를 넓히는 것에는 구조적인 한계가 있어 주로 대구경의 협시야 광학계로 사용되고 있었다. 최근에는 넓은 범위의 천체관측용 망원경^[1]과 초분광 영상사진기용 전단광학계^[2,3] 등 전통적인 천체망원경과 비교하여 보다 넓은 시야를 가진 2반사광학계에 대한 요구가 증가하고 있다. 이 연구에서는 이와 같은 요구에 부응하기 위하여 넓은 시야를 가지면서 광선

의 차폐가 없는 광시야 비축 2반사광학계의 설계에 대하여 연구하였다.

광학계의 시야를 넓히기 위해서는 inverted telephoto 렌즈계와 같이 조리개 앞에 음의 굴절능(negative refractive power)을 가지는 렌즈군(또는 렌즈)이 있는 광학적 구조가 유리하다. 2반사광학계에서 천체망원경으로 널리 사용되는 Cassegrain 형식은 양의 굴절능(positive refractive power)을 가지는 오목 주경과 음의 굴절능을 가지는 볼록 부경이 결합된 telephoto 구조이기 때문에 망원광학계로는 적절하지만 광시야 광학계로는 적합하지 않으며, Gregorian 형식은 양의 굴절능을 가

[†]E-mail: julee@cju.ac.kr, ORCID: 0000-0001-8245-2278

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

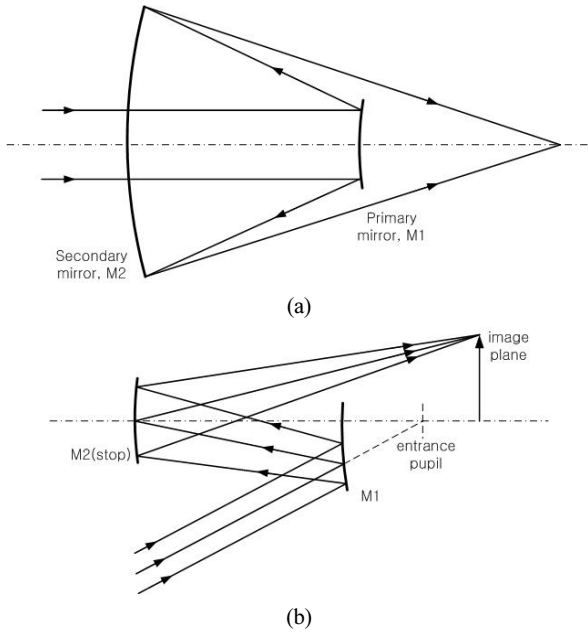


Fig. 1. Optical layouts of an inverse-Cassegrain system: (a) axially symmetric configuration, (b) off-axis configuration.

지는 오목 주경의 실상을 다시 오목 부경으로 증계하여 결상하기 때문에 경통이 길어 역시 광시야 광학계로는 적합하지 않다. 반면에 inverse Cassegrain 형식의 2반사광학계는 음의 굴절능을 가지는 볼록 제1거울(M1)과 양의 굴절능을 가지는 오목 제2거울(M2)로 구성되어 inverted telephoto 구조이며, 조리개를 M2에 설치하면 볼록 M1에 의하여 시야각이 커지는 장점이 있다. 하지만 inverse Cassegrain 형식에서도 그림 1(a)처럼 통상적인 축대칭 광학계(axially symmetric system)로 사용하면 M2의 center hole에 의하여 M1의 시야가 제한되고, M1에 의하여 M2에서 상으로 입사하는 광선이 차단되는 문제가 있다. 그러나 그림 1(b)와 같이 inverse Cassegrain 형식에서 M2에 조리개를 두고 비축 시야만을 사용하면 광선의 차폐 없이 넓은 시야를 확보할 수 있다^[4].

이 연구에서는 수차가 잘 보정된 inverse-Cassegrain 형식의 2반사광학계인 S. Rosin의 inverse-Cassegrain system^[5]과 Schwarzschild concentric system^[6-8]을 기반으로 그림 1(b)과 같은 비축시야 광학계의 구성을 위하여 요구되는 구조적 요소를 분석하고, 이를 이용하여 유효초점거리(effective focal length, EFL) 176 mm, f-3, FOV 6°×6°의 광시야 2반사광학계를 설계하였다. 이 사양은 pixel pitch가 9 μm 이고 2048 × 2048 화소의 영상 센서에 대응한다.

II. 2반사광학계의 수차보정과 형상설계

2.1. 2반사광학계의 3차수차와 Aplanat조건

반사경에 사용되는 원추곡면(conic surface)의 sag z 는 다음의 식 (1)로 정의된다^[9,10].

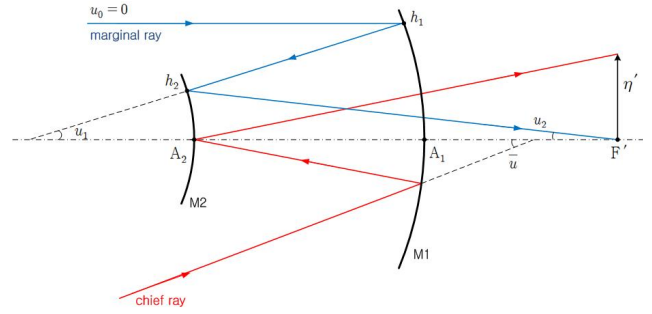


Fig. 2. Design parameters and rays of a two-mirror system.

$$c = \frac{1}{r} \tag{1}$$

$$z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - c^2(1 + \kappa)h^2}}$$

여기에서 h 는 광선이 입사한 높이, r 은 면의 곡률반경, κ 는 원추계수(conic constant)이고, 원추곡면 2반사광학계에서 Ritchey-Chrétien (R-C) system^[3,6]은 제1거울 M1과 제2거울 M2의 원추계수 (κ_1, κ_2)를 적절하게 선택함으로써 구면수차와 코마를 보정한 광학계이다.

광학계의 설계는 일반적으로 각 면의 곡률반경 r_i , 면간의 거리 d_i , 상측 매질의 굴절률 n_i 로 표시되고, 이것은 근축광선 추적에서 각 면에서의 입사고 h_i , 굴절 후 광선의 근축각 u_i , 굴절률 n_i 로 나타낼 수 있다(그림 2). 편의상 i -번째 면의 횡배율 m_i 와 주변광선 입사고의 비 a_i 를 식 (2), (3)과 같이 정의하면, d_i, r_i 는 식 (4), (5)과 같이 주어진다^[3,9]. 2반사광학계에서 상측 매질의 굴절률은 $n_0 = 1, n_1 = -1, n_2 = 1$ 이다.

$$m_i = \frac{n_{i-1}u_{i-1}}{n_i u_i} \tag{2}$$

$$a_i = \frac{h_{i+1}}{h_i} \tag{3}$$

$$d_i = \frac{h_i}{u_i}(a_i - 1) \tag{4}$$

$$r_i = \frac{h_i(n_i - n_{i-1})}{n_i u_i(m_i - 1)} \tag{5}$$

조리개가 제1면(M1)에 위치한 경우에 대한 2반사광학계의 3차 수차식은 이미 여러 연구에서 발표된 바 있으나^[3,6-8], 본 연구에서는 광시야 2반사광학계의 설계를 위하여 조리개가 M2에 위치한 경우에 대하여 물체가 무한대($m_1 = 0$)에 있고, 유한한 유효초점거리를 가지는($u_2 \neq 0$) 원추곡면 2반사광학

계의 3차수차를 유도하였다. 아래의 식 (6)~(10)에서 S_I , S_{II} , S_{III} , S_{IV} , S_V 는 각각 구면수차, 코마, 비점수차, Petzval 상면만곡, 왜곡수차에 대응하는 Seidel 수차계수이다^{3,10)}.

$$S_I = \frac{1}{4} h_1 u_2^3 (s_1 + s_{1a}) \quad (6)$$

$$S_{II} = \frac{1}{4} H u_2^2 (s_2 + s_{2a}) \quad (7)$$

$$S_{III} = \frac{1}{4} H^2 \frac{u_2}{h_1} (s_3 + s_{3a}) \quad (8)$$

$$S_{IV} = \frac{1}{4} H^2 \frac{u_2}{h_1} s_4 \quad (9)$$

$$S_V = \frac{1}{4} H^3 \frac{1}{h_1^2} (s_5 + s_{5a}) \quad (10)$$

위의 식에서 H 는 Lagrange 불변량, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 는 구면의 Seidel 수차 기여분, $s_{1a}, s_{2a}, s_{3a}, s_{5a}$ 는 원추계수의 Seidel 수차 기여분이다.

$$s_1 = -m_2^3 + (m_2 + 1)^2 (m_2 - 1) a_1$$

$$s_2 = -2(m_2^2 - 1) + \frac{m_2^2 (a_1 + 1)}{a_1}$$

$$s_3 = \frac{4(m_2 - 1)}{a_1} - \frac{m_2 (a_1 + 1)^2}{a_1^2}$$

$$s_4 = 4 \left\{ m_2 - \frac{m_2 - 1}{a_1} \right\}$$

$$s_5 = \frac{(a_1 + 1)}{a_1} \left\{ -4 + \frac{(a_1 + 1)^2}{a_1^2} \right\}$$

$$s_{1a} = -m_2^3 \kappa_1 + (m_2 - 1)^3 a_1 \kappa_2$$

$$s_{2a} = -\frac{m_2^2 (a_1 - 1)}{a_1} \kappa_1$$

$$s_{3a} = -\frac{m_2 (a_1 - 1)^2}{a_1^2} \kappa_1$$

$$s_{5a} = -\frac{(a_1 - 1)^3}{a_1^3} \kappa_1$$

물체가 무한대에 위치하고($m_1 = 0$), 유한한 유효초점거리를 가질 때($u_2 \neq 0$), 원추곡면 2반사광학계에서 구면수차, 코마가 보정될 조건은 식 (6), (7)에서

$$S_I = \frac{1}{4} h_1 u_2^3 [-m_2^3 + (m_2 + 1)^2 (m_2 - 1) a_1 - m_2^3 \kappa_1 + (m_2 - 1)^3 a_1 \kappa_2] = 0,$$

$$S_{II} = \frac{1}{4} H u_2^2 \left[-2(m_2^2 - 1) + \frac{m_2^2 (a_1 + 1)}{a_1} - \frac{m_2^2 (a_1 - 1)}{a_1} \kappa_1 \right] = 0$$

이다. 위의 두 식을 연립하여 κ_1, κ_2 에 대해 정리하면

$$\kappa_1 = \frac{2a_1}{m_2^2 (a_1 - 1)} - 1, \quad (11)$$

$$\kappa_2 = \frac{2m_2 - (m_2 + 1)^2 (m_2 - 1) (a_1 - 1)}{(m_2 - 1)^3 (a_1 - 1)} \quad (12)$$

이 얻어지며, Richey-Chrétien system (R-C system)은 식 (11), (12)의 aplanat 조건이 만족되도록 설계된 원추곡면 2반사광학계이다^{3,6)}. 구면수차와 코마가 보정된 R-C system의 잔류비점수차 $S_{III,R}$, 잔류 Petzval 상면만곡 $S_{IV,R}$, 잔류 왜곡수차 $S_{V,R}$ 는 다음과 같다.

$$S_{III,R} = \frac{1}{2} H^2 \frac{u_2}{h_1} \left(\frac{-2m_2 - a_1 + 1}{m_2 a_1} \right) \quad (13)$$

$$S_{IV,R} = H^2 \frac{u_2}{h_1} \left\{ \frac{m_2 (a_1 - 1) + 1}{a_1} \right\} \quad (14)$$

$$S_{V,R} = -\frac{H^3}{2h_1^2} \left[\frac{\{m_2^2 (a_1 + 3) + a_1 - 1\} (a_1 - 1)}{a_1^2 m_2^2} \right] \quad (15)$$

R-C system에서 적절한 (m_2, a_1)을 선택하면 추가로 잔류수차를 보정할 수 있으며, 비점수차가 추가로 보정된 광학계를 Couder system, 상면만곡이 추가로 보정된 광학계는 Schwarzschild system, 왜곡수차가 추가로 보정된 광학계를 zero distortion aplanat system이라 한다^{3,6)}.

2.2. Rosin's Inverse Cassegrain System

S. Rosin의 inverse Cassegrain system¹⁵⁾는 R-C system에서 M1, M2 모두 구면을 사용하면서 aplanat 조건을 만족시키는 특별한 경우의 해이며, 식 (13)의 잔류비점수차까지 보정되기 때문에 Couder system의 일종으로도 볼 수 있다. 식 (11), (12)에서 $\kappa_1 = 0, \kappa_2 = 0$ 인 조건을 만족하는 m_2 와 a_1 을 구하면, 다음과 같이 2개의 해 Solution I, Solution II가 있다. 두 해의 광학적 형상은 그림 3에 나타나 있으며, EFL이 167 mm인 경우의 설계제원과 3차 수차는 각각 표 1, 2에 정리하였다.

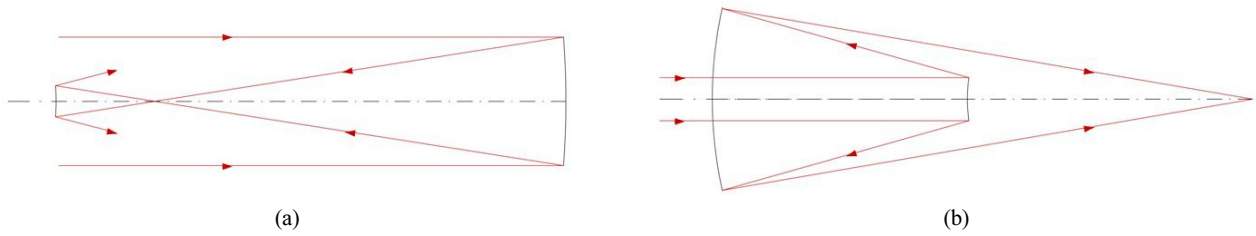


Fig. 3. Optical layouts of the anastigmatic Ritchey-Chrétien system with spherical mirrors only, (a) Solution I, (b) Solution II, Rosin's inverse Cassegrain system.

Table 1. Design data of the anastigmatic Ritchey-Chrétien system with spherical mirrors only (units in mm)

(a) Solution I

Surface #	Curvature radius	Axial distance	Conic constant	Remarks
1	-569.548	-352.000	0.000	Spherical M1
2 (stop)	-217.548	-41.548	0.000	Spherical M2

(b) Solution II, Rosin's inverse Cassegrain system

Surface #	Curvature radius	Axial distance	Conic constant	Remarks
1	217.548	-352.000	0.000	Spherical M1
2 (stop)	569.548	745.548	0.000	Spherical M2

Table 2. The third order aberrations of the anastigmatic Ritchey-Chrétien system with spherical mirrors only (units in mm, evaluated by Code V)

(a) Solution I

#	Spherical aberration	Tangential coma	Tangential astigmatism	Sagittal astigmatism	Petzval blur	Distortion
1	-0.02404	-0.16800	-0.34148	-0.08061	0.04982	-0.18776
2 (stop)	0.02404	0.16800	0.26087	0.00000	-0.13044	0.00000
SUM	0.00000	0.00000	-0.08061	-0.08061	-0.08061	-0.18776

(b) Solution II, Rosin's inverse Cassegrain system

#	Spherical aberration	Tangential coma	Tangential astigmatism	Sagittal astigmatism	Petzval blur	Distortion
1	0.43145	0.43984	0.01903	-0.08061	-0.13044	-0.02739
2 (stop)	-0.43145	-0.43984	-0.09964	0.00000	0.04982	0.00000
SUM	0.00000	0.00000	-0.08061	-0.08061	-0.08061	-0.02739

$$\text{Solution I: } m_2 = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}, a_1 = 2 - \sqrt{5} \quad (16)$$

$$\text{Solution II: } m_2 = \frac{-1 - \sqrt{5}}{2}, a_1 = 2 + \sqrt{5} \quad (17)$$

그림 3(a)과 표 1(a)의 Solution I은 오목 M1과 볼록 M2로 구성되어 있으며, M2가 M1의 상측초점 보다 멀리 있어 허상을 맺는 광학계이다. 표 1(a), 1(b)에서 Solution I과 Solution II는 서로 역전된(inverted) 광학계임을 알 수 있다. Solution II는 잘 알려진 S. Rosin의 inverse Cassegrain system이며, M1과 M2의 곡률중심이 일치하는($r_1 = r_2 + d_1$) 특징이 있다. 표 2에서 Solution I과 Solution II는 구면수차, 코마, 비점수차가

보정되었음을 볼 수 있다. Solution II는 평행광을 집속하는 경우에 볼록 M1 보다 오목 M2의 직경이 $2 + \sqrt{5}$ 배 커져야 하는 단점이 있기 때문에 대구경으로는 사용하기 어렵지만, 구면만으로 구성되었으면서도 수차보정이 잘 되어있어 광속의 직경이 크지 않은 광학계로 적합하다.

2.3. Schwarzschild Concentric System

R-C system에서 식 (13)의 잔류 비점수차와 식 (14)의 잔류 Petzval 상면만곡을 모두 보정하면 4종의 3차수차(구면수차, 코마, 비점수차, 상면만곡)가 보정된 해가 얻어진다⁶⁻⁸⁾. 식 (13)에서 비점수차가 보정되는 조건은

$$a_1 = -2m_2 + 1 \quad (18)$$

이며, 이를 식 (14)에 대입하면 Petzval 상면만곡이 추가로 보정되는 조건은 다음과 같다.

$$2m_2^2 - 1 = 0 \tag{19}$$

식 (19)는 2개의 실근을 가지며, 각각을 Solution III, Solution IV라 하고, 광학계의 형상은 그림 4에, 그리고 EFL 167 mm 일 때의 설계제원과 3차 수차는 표 3, 4에 정리하였다.

$$\text{Solution III: } m_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}, a_1 = 1 - \sqrt{2} \tag{20}$$

$$\text{Solution IV: } m_2 = -\frac{\sqrt{2}}{2}, a_1 = 1 + \sqrt{2} \tag{21}$$

그림 4(a)와 표 3(a)의 Solution III은 오목 M1과 볼록 M2로 구성되어 있으며, M2가 M1의 상측초점 보다 멀리 있어 허상을 맺는 광학계이다. 그림 4(b)와 표 3(b)의 Solution IV

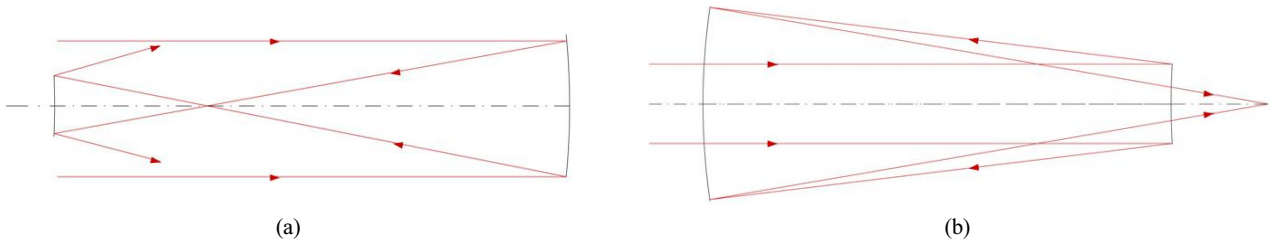


Fig. 4. Optical layouts of the flat-field anastigmats based on the Ritchey-Chrétien system (a) Solution III, (b) Solution IV, Schwarzschild concentric system.

Table 3. Design data of the flat-field anastigmats based on the Ritchey-Chrétien system (units in mm)

(a) Solution III

Surface #	Curvature radius	Axial distance	Conic constant	Remarks
1	-497.803	-352.000	0.1716	Conic M1
2(stop)	-497.803	-72.902	5.8284	Conic M2

(b) Solution IV, Schwarzschild concentric system

Surface #	Curvature radius	Axial distance	Conic constant	Remarks
1	497.803	-352.000	5.8284	Conic M1
2(stop)	497.803	424.902	0.1716	Conic M2

Table 4. The third order aberrations of the flat-field anastigmats based on the Ritchey-Chrétien system (units in mm, evaluated by Code V)

(a) Solution III

#	Spherical aberration	Tangential coma	Tangential astigmatism	Sagittal astigmatism	Petzval blur	Distortion
1	-0.03601 -0.00618*	-0.09611 -0.03981*	-0.02850 -0.08550*	0.02850 -0.02850*	0.05700 0.00000*	0.02536 -0.06122*
2 (stop)	0.03601 0.00618*	0.13592 0.00000*	0.11400 0.00000*	0.00000 0.00000*	-0.05700 0.00000*	0.00000 0.00000*
SUM	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-0.03586

(b) Solution IV, Schwarzschild concentric system

#	Spherical aberration	Tangential coma	Tangential astigmatism	Sagittal astigmatism	Petzval blur	Distortion
1	0.03601 0.20988*	0.096101 -0.23203*	0.02850 0.08550*	-0.02850 0.02850*	-0.05700 0.00000*	-0.02536 -0.01050*
2 (stop)	-0.03601 -0.20988*	0.13592 0.00000*	-0.11400 0.00000*	0.00000 0.00000*	0.05700 0.00000*	0.00000 0.00000*
SUM	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-0.03586

*Aspheric contributions

는 inverse Cassegrain 형식으로 잘 알려진 Schwarzschild concentric system이다. 앞의 예와 마찬가지로 Solution III와 IV는 서로 역전된 광학계이며, $r_1 = r_2$ 이고 이것은 2반사광학계에서 Petzval 상면만곡의 보정조건이기도 하다. 표 4에서 Solution III, Solution IV는 구면수차, 코마, 비점수차, 상면만곡이 모두 보정되었음을 알 수 있다.

2.4. 광선의 차폐가 없는 비축 2반사광학계의 형상설계

이 연구에서는 M1이 볼록이고 M2가 오목인 inverse Cassegrain system를 기반으로 조리개가 M2에 있고, 광선의 차폐가 없는 비축시야를 사용하는 그림 5와 같은 형태의 광시야 비축 2반사광학계를 설계하고자 한다. 그림 5에서 비축상점 O_1' 으로 입사하는 광선이 M1과 M2에 의하여 차폐되지 않기 위해서는 다음과 같은 구조적 요구를 만족하여야 한다.

① 그림 5에서 입사동의 위쪽 끝단 η_E 로 입사하는 UMR (upper marginal ray)가 M1을 지나는 높이 h_U^* 가 출사동 (여기서는 조리개)의 아래쪽 끝단 $-\eta_E'$ 보다 낮아야 한다. 그림 3에서 η_E 는 입사동의 반직경이며, η_E' 는 출사동의 반직경이다.

$$h_U^* < -\eta_E' \tag{22}$$

② 그림 5에서 입사동의 아래쪽 끝단 $-\eta_E$ 로 입사한 LMR (lower marginal ray)이 M1, M2에서 반사된 후 상점 O_1' 으로 갈 때, M1을 지나는 높이 h_L^* 는 UMR이 M1에 입사하는 높이 $h_{1,U}$ 보다 높아야 한다.

$$h_L^* > h_{1,U} \tag{23}$$

2반사광학계의 EFL과 f-수가 설계사양에서 주어지고, 기초 설계(r_1, r_2, d_1)가 확정되고, 조리개가 M2에 있다면

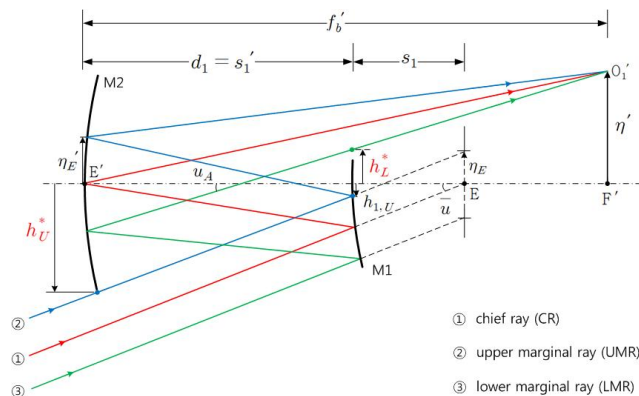


Fig. 5. Design considerations for an off-axis two-mirror system without ray obstruction.

$$s_1' = d_1, \tag{24}$$

$$\frac{1}{s_1} = \frac{1}{s_1'} + \frac{2}{r_1}, \tag{25}$$

$$M_E = \frac{\eta_E'}{\eta_E} = -\frac{s_1'}{s_1} \tag{26}$$

이다. 위의 식에서 s_1' 은 M1에서 조리개(여기에서는 M2이며, 광학계의 출사동이다)까지의 거리이고, s_1 은 M1에서 입사동까지의 거리, M_E 는 동 의 횡배율이다. 식 (24)~(26)에서 입사동의 위치와 동 의 횡배율이 주어지면, UMR과 LMR에 대한 근축광선추적을 이용하여 식 (22)는 다음의 식 (27)로, 식 (23)은 다음의 식 (28)로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\bar{u} > -\frac{(1+M_E)f'}{2(d_1-s_1)} \frac{1}{F_N} \tag{27}$$

$$\bar{u} > \frac{\{f_b'(1+M_E)+d_1M_E\}f'}{2\{s_1f_b'-d_1f'\}} \frac{1}{F_N} \tag{28}$$

식 (27), (28)에서 F_N 은 광학계의 f-수이고, f_b' 는 후초점거리(back focal length, BFL)이다. 식 (27)의 \bar{u} 는 조건 ①을 만족시키는 주광선의 최소 입사각이며, 식 (28)의 \bar{u} 는 조건 ②를 만족시키는 주광선의 최소 입사각이다. 광선의 차폐가 없으려면 조건 ①, ②를 모두 만족시켜야 하므로, 식 (27), (28)에서 계산되는 \bar{u} 중에서 절대치가 큰 해가 광선의 차폐가 없는 주광선의 최소 입사각이 된다.

III. 광시야 비축 2반사광학계의 설계와 분석

앞 절에서 inverse Cassegrain 형식의 2반사광학계에서 anastigmatic aplanat인 Solution II (Rosin's inverse Cassegrain system)과 flat-field anastigmatic aplanat인 Solution IV (Schwarzschild concentric system)에 대하여 살펴본 바 있다. Solution II는 Solution IV와 비교하여 상면만곡이 보정되지 않은 단점이 있으나 구면만으로 구성되었다는 것은 매우 좋은 장점이다. 이 점을 고려하여 광시야 비축 2반사광학계의 설계에서는 Solution II와 Solution IV 모두 광선의 차폐가 없는 비축광학계로 구성하여 특성을 비교하고, 최종설계를 선택하였다.

표 5는 그림 3(b)와 표 1(b)의 Solution II를 광선의 차폐가 없는 비축광학계로 구성하기 위한 parameter와 식 (27), (28)에 의하여 계산된 주광선의 최소 입사각을 정리한 것이다. 이 표에서 주광선의 최소 입사각은 식 (28)의 조건 ②에서 결정되며, 근축각 0.57118을 $\tan \beta$ 로 근사하면, 최소 반시야각 β 는 29.7°이지만 유향광선 추적결과와 구조적인 여유를 고려하여 최소 반시야각을 33°로 하였다. 그림 6, 7은 비축광

Table 5. Design parameters of the Solution II (inverse Cassegrain system) for the off-axis configuration

Design Parameters	Value	Remarks
Effective focal length	176 mm	f'
Back focal length	745.548 mm	f'_b
Distance from M1 to M2	-352.000 mm	d_1
Distance from M1 to the entrance pupil	83.096 mm	s_1
Transverse magnification of the pupils	4.236	M_E
F-number	3.0	F_N
Minimum incident angle by the condition ①	0.35300	\bar{u}
Minimum incident angle by the condition ②	0.57118	\bar{u}

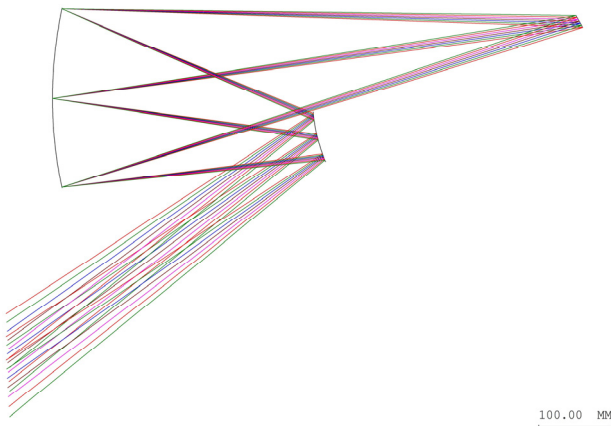


Fig. 6. Optical layout of the Solution II with the off-axis configuration.

Table 6. RMS spot diameters of the Solution II with the off-axis configuration (units in μm)

x \ y	0°	1°	2°	3°
33°	173.6	170.1	158.8	141.3
34°	159.4	156.3	145.1	133.1
35°	142.5	141.0	135.0	127.8
36°	136.6	135.8	136.3	138.7
37°	157.3	159.8	163.5	174.0
38°	206.5	209.0	217.8	232.5
39°	281.7	285.3	295.4	312.8

*defocus from the paraxial image plane: 27.880 mm, α -tilt: 30.41°

학계로 구성된 Solution II의 형상과 spot diagram이며, 그림 7의 spot은 $6 \times 6^\circ$ 비축시야의 최적상면에서 계산된 것이다. 최적상면은 Gauss 상면에서 27.88 mm 이동되어 있고, x-축을 회전축으로 30.4° 기울어져 있다(α -tilt). 최적상면의 이동과 기울어짐이 상당히 큰 것은 Petzval 상면만곡이 보정되지 않았고, y-방향의 반시야각이 33~39°로 크기 때문으로 이해된다. 따라서 Solution II는 구면만으로 구성된 장점은 있으나 현재의 설계사양에서는 광시야 광학계로 사용하기에는 미흡한 것으로 본다. 표 6은 비축구성 Solution II의 rms spot diameter를 정리한 것이다.

그림 4(b)와 표 3(b)의 Solution IV (Schwarzschild concentric system)는 2면 모두 원추곡면을 사용해야 한다는 점에서는 Solution II와 비교하여 단점이나 왜곡수차를 제외한 모든 3차 수차가 보정되었다는 아주 큰 장점이 있다. 표 7은 Solution IV를 광선의 차폐가 없는 비축광학계로 구성하기 위한 parameter와 식 (27), (28)에 의하여 계산된 주광선의 최소 입사각을 정리한 것이다. 이 표에서 주광선의 최소 입사각은 식 (27)의 조건 ①에서 결정되며, 근축각 0.20118을 $\tan \beta$ 로 근사하면, 최소 입사각 β 는 11.4°이지만 유한광선 추적결과와 구조적인 여유를 고려하여 최소 입사각은 14°로 하였다. Solution IV의 최소 입사각은 Solution II의 경우보다 작다. 이것은 Solution IV에서 동의 횡배율이 Solution II의 57% 수준이어서 출사동(여기에서는 M2의 유효구경)도 그만큼 작아졌고,

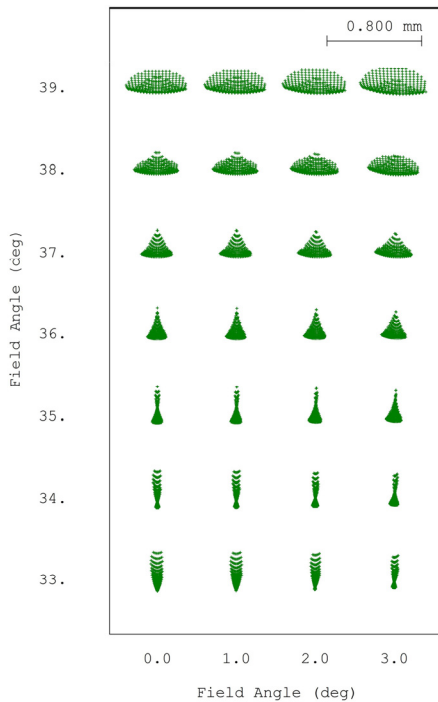


Fig. 7. Spot diagram of the Solution II with the off-axis configuration.

Table 7. Design parameters of the Solution IV(Schwarzschild concentric system) for the off-axis configuration

Design Parameters	Value	Remarks
Effective focal length	176 mm	f'
Back focal length	424.902 mm	f'_b
Distance from M1 to M2	-352.000 mm	d_1
Distance from M1 to the entrance pupil	145.803 mm	s_1
Transverse magnification of the pupils	2.414	M_E
F-number	3.0	F_N
Minimum incident angle by the condition ①	0.20118	\bar{u}
Minimum incident angle by the condition ②	0.14226	\bar{u}

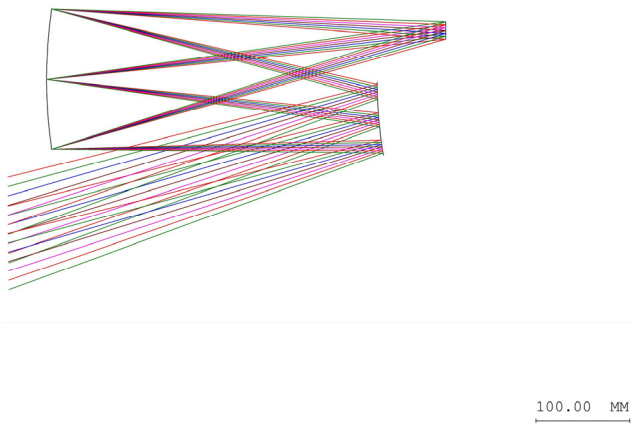


Fig. 8. Optical layout of the Solution IV with the off-axis configuration.

Table 8. RMS spot diameters of the Solution IV with the off-axis configuration (units in μm)

y \ x	0°	1°	2°	3°
	14°	13.3	13.4	13.8
15°	16.4	16.5	16.8	17.4
16°	20.1	20.2	20.6	21.2
17°	24.4	24.6	25.0	25.5
18°	29.4	29.5	30.0	30.6
19°	35.1	35.3	35.7	36.5
20°	41.5	41.7	42.2	43.0

*defocus from the paraxial image plane: -0.17 mm, α -tilt: -0.28°

따라서 조건 ①, ②에 의한 광선의 차폐가 완화된 것으로 이해된다. 그림 8, 9는 비축광학계로 구성된 Solution IV의 형상과 spot diagram이며, 그림 9의 spot은 $6 \times 6^\circ$ 시야의 최적상면에서 계산된 것이다. 이 그림에서 Solution IV의 수차특성은 Solution II에 비하여 매우 우수함을 알 수 있고, 주광선의 최소 입사각이 작기 때문에 보다 compact한 구성이 가능하다는 장점도 있다. 표 8은 비축구성 Solution IV의 rms spot diameter를 정리한 것이다.

그림 6, 8, 그리고 표 6, 8에서 광선의 차폐가 없는 비축 2반사광학계로 구성하는 경우 설치공간과 광학수차 모두에서 Solution IV가 Solution II 보다 우수한 특성을 가진 것을 알 수 있다. 최종설계는 표 3(b)의 Solution IV를 y-방향 $14\sim 20^\circ$, x-방향 $+3\sim -3^\circ$ 의 시야에서 최적화하여 확정하였다. 표 9와 그림 10은 Solution IV를 기반으로 최적화된 광시야 비축 2반사광학계이며, $r_1 = r_2$ 이던 초기설계와 비교하여 r_1 은 작아지고 r_2 는 커졌다. 이것은 초기설계에서 고려되지 않았던 고차 수차와 균형을 맞추어 주기 위하여 Petzval 상면만곡이 약하게 발생된 결과로 이해되며, 그림 11의 spot diagram과 표 10에 정리된 rms spot diameter를 보면 최적화 이전보다 상당한 수준으로 결상성능이 개선되었음을 알 수 있다. 표 10에서 광시야 비축 2반사광학계의 최종설계는 $6 \times 6^\circ$ 시야에서 rms spot size가 $8.4 \mu\text{m}$ 이하로서 pixel pitch $9 \mu\text{m}$ 의

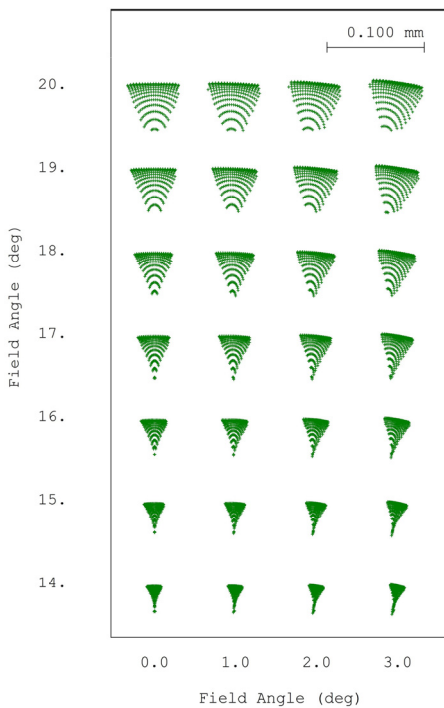


Fig. 9. Spot diagram of the Solution IV with the off-axis configuration.

Table 9. Final design of the wide field off-axis two-mirror system (units in mm)

Surface #	Curvature radius	Axial distance	Conic constant	Remarks
1	451.573	-347.315	4.3751	Conic M1
2 (stop)	502.087	446.731	0.1656	Conic M2
Image	Infinity	0.631*	-	Decentered, α -tilt: 1.51°

*defocus from the paraxial image plane

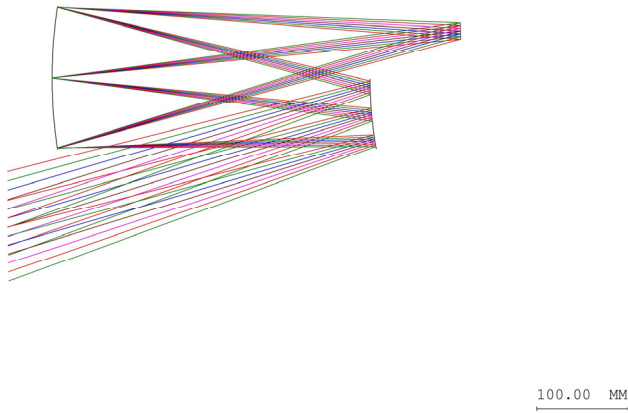


Fig. 10. Optical layout of the final design, the wide-field off-axis two-mirror system.

Table 10. RMS spot diameters of the final design, the wide field off-axis two-mirror system (units in μm)

y \ x	0°	1°	2°	3°
	14°	4.1	4.2	5.0
15°	4.1	3.9	3.6	4.8
16°	4.7	4.3	3.4	3.5
17°	4.8	4.4	3.3	3.0
18°	4.5	4.1	3.3	3.5
19°	4.5	4.4	4.3	5.3
20°	6.1	6.3	6.9	8.4

*defocus from the paraxial image plane: 0.631 mm, α -tilt: 1.51°

IV. 결 론

이 연구에서는 넓은 시야를 가지면서 광선의 차폐가 없는 2반사광학계를 설계하였다. 광시야 광학계로는 조리개 앞면에 음의 굴절능을 가지는 렌즈군이 있고, 조리개 뒤에 양의 굴절능을 가지는 inverted telephoto 구조가 적합하다. 2반사광학계에서 inverse Cassegrain system은 제1면(M1)이 음의 굴절능, 제2면(M2)가 양의 굴절능을 가지므로 M2에 조리개를 두면 광시야 광학계로 적합한 구조이다. 하지만 광축에 대하여 회전대칭을 가지는 통상적인 광학계로 구성하면, M2가 M1의 전방에 위치하기 때문에 시야가 가려지고 광선의 차폐가 발생하기 때문에 시야를 넓히기 어려운 문제점이 있다. 이 연구에서는 조리개를 M2에 두고, 비축시야만을 사용하여 광선의 차폐가 발생하지 않도록 하였으며, 이를 위하여 조리개가 제2면(M2)에 있을 때의 Seidel 수차와 비축시야에서 광선의 차폐가 없을 조건을 근축광학에서 해석적으로 유도하여 광시야 2반사광학계를 설계에 활용하였다.

수차가 잘 보정된 inverse Cassegrain 형식의 2반사광학계로는 S. Rosin의 inverse Cassegrain system (Solution II)과 Schwarzschild concentric system (Solution IV)이 있다. Solution II는 구면만으로 구성된 장점은 있으나, Petzval 상면만곡이 보정되지 않았고, 출사동의 직경이 크기 때문에 광선의 차폐가 없는 주광선의 최소 입사각이 커지는 문제가 있었다. 반면에 Solution IV는 원추곡면을 사용해야하는 단점은 있으나, 왜곡수차를 제외한 모든 3차수차가 보정되어 있고, 출사동의 직경이 작아 광선의 차폐가 없는 주광선의 최소입사각이 Solution II의 1/2 수준이기 때문에, 고차수차의 영향이 적고 보다 compact한 구성이 가능한 장점이 있었다.

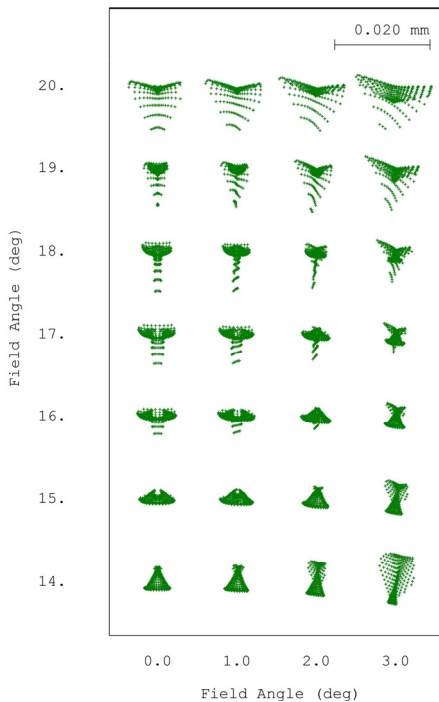


Fig. 11. Spot diagram of the final design, the wide-field off-axis two-mirror system.

digital image sensor에 충분히 사용가능한 결상성능을 가지고 있다. 또한 이 광학계는 반사경으로만 구성되어 있으므로 사용하는 파장에 제한이 없다는 장점이 있다.

이 연구에서 광시야 2반사광학계는 pixel pitch $9\ \mu\text{m}$, 2048×2048 화소의 영상 센서로 $6 \times 6^\circ$ 의 시야를 관측할 수 있도록 설계되었으며, EFL 176 mm, f-3의 광학계이다. 최종설계는 Schwarzschild concentric system (Solution IV)을 초기설계로 하여 x-방향 $-3\sim 3^\circ$, y-방향 $14\sim 23^\circ$ 의 시야에서 최적화되었으며, 최적상면에서 rms spot size는 $8.4\ \mu\text{m}$ 이하로서 설계의 요구를 잘 충족시키고 있다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 청주대학교 연구장학 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

1. I. Moon, S. Lee, J. Lim, H. S. Yang, H.-G. Rhee, J. B. Song, Y. W. Lee, J. U. Lee, and H. Jin, "Design and development of a wide field telescope," Proc. SPIE **8444**, 844448 (2012).
2. Y. S. Kim, J. Hong, B. Choi, J.-U. Lee, Y. Kim, and H. Kim, "Assembly and alignment method for optimized spatial resolution of off-axis three-mirror fore optics of hyperspectral imager," Opt. Express **25**, 20817-20828 (2017).
3. J. U. Lee, Y. Kim, S. H. Seo, Y. Kim, and H. Kim, "Optical design of an image-space telecentric two-mirror system for wide-field line imaging," Curr. Opt. Photonics **1**, 344-350 (2017).
4. G. I. Lebedeva and A. A. Garbul, "Prospective aerospace reflective objectives," J. Opt. Technol. **61**, 610-614 (1994).
5. S. Rosin, "Inverse Cassegrainian systems," Appl. Opt. **7**, 1483-1497 (1968).
6. W. B. Wetherell and M. P. Rimmer, "General analysis of aplanatic Cassegrain, Gregorian, and Schwarzschild telescopes," Appl. Opt. **11**, 2817-2832 (1972).
7. C. L. Wyman and D. Korsch, "Aplanatic two-mirror telescopes; a systematic study. 3: Schwarzschild-Couder configuration," Appl. Opt. **14**, 992-995 (1975).
8. H. Gross, F. Blechinger, and B. Achtner, "Survey of Optical Instruments," in *Handbook of Optical Systems*, Vol. IV, H. Gross, ed. (Wiley-VCH, Weinheim, 2007), Chapter 43.
9. J. U. Lee and S. M. Yu, "Analytic design procedure of three-mirror telescope corrected for spherical aberration, coma, astigmatism, and Petzval field curvature," J. Opt. Soc. Korea **13**, 184-192 (2009).
10. W. T. Welford, *Aberrations of optical system* (Adam Hilger, Bristol, 1986).