

Optical Design of an Off-Axial-Field Two-Mirror System with a Displaced Stop and a Secondary Mirror

Ji-Woo Nam and Jong-Ung Lee[†]

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

(Received September 14, 2020; Revised October 11, 2020; Accepted October 12, 2020)

By using an off-axial field with an inverse Cassegrain system where the aperture stop is at the secondary mirror, the two-mirror system can be used for a wide-field objective. However, aberration corrections in conventional two-mirror systems are limited because the design parameters are too small. In this study, we present a new improved design of the off-axial-field two-mirror system. The new design has an independently displaced aperture stop and a secondary mirror. The new design parameters yield more improvement in correction for 5th-order coma and astigmatism, and better aberration balancing for the whole off-axial field. The spot sizes of the new design system are reduced to half of those for a conventional reference design, and the improvement effects are shown for the whole field evenly.

Keywords: Optical system design, Two-mirror system, Off-axial field, Decentered system

OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (080.4035) Mirror system design; (110.1220) Apertures; (220.1000) Aberration compensation

조리개와 제 2거울이 횡이동된 비축시야 2반사 광학계 설계

남지우 · 이종웅[†]

청주대학교 레이저광정보공학과
☎ 28503 충청북도 청주시 청원구 대성로 298

(2020년 9월 14일 받음, 2020년 10월 11일 수정본 받음, 2020년 10월 12일 게재 확정)

조리개가 제 2거울에 있는 inverse Cassegrain 광학계에서 비축시야를 사용하면, 이 2반사경계는 넓은 시야를 가지는 대물광학계로 사용할 수 있다. 하지만 이 전통적인 회전대칭 구조의 반사경계는 설계변수의 수가 너무 적기 때문에 수차보정에 한계가 있다. 이 연구에서는 조리개와 제 2거울을 별도로 횡이동시켜 성능을 개선한 새로운 2반사 광학계를 설계하였다. 새로운 설계변수를 사용하여 5차 코마와 비점수차에 대한 보정이 개선되었으며, 시야 전체에서 보다 좋은 수차균형을 얻을 수 있었다. 새로 설계된 비축시야 2반사경계는 회전대칭 구조의 통상적인 2반사경계와 비교하여 spot의 크기가 1/2 수준으로 줄어들었으며, 개선의 효과가 시야 전체에 고르게 나타나고 있다.

Keywords: 광학 시스템 설계, 2반사 광학계, 비축시야, 편심

OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (080.4035) Mirror system design; (110.1220) Apertures; (220.1000) Aberration compensation

I. 서 론

2반사 광학계는 2개의 반사경으로만 구성되어 간단한 구조이면서도 넓은 파장대역에서 적용이 가능하고, 근본적으로 렌즈계에 비하여 수차의 발생이 적다. 하지만 부경에 의한 광선차폐로 인하여 시야가 제한되어 협시야의 망원광학계에

주로 사용되었고, 활용범위가 제한적이었다. 최근에는 대량의 영상정보를 전송하고 분석하는 기술이 발전함에 따라 초분광 영상 사진기용 전단광학계나 각종 영상관측장비에서 파장대역이 넓고, 광시야를 가진 대물광학계에 대한 수요가 증가하고 있다¹⁻⁴⁾. 비축시야 2반사 광학계는 부경에 의한 광선차폐가 없는 비축시야만을 사용하기 때문에 보다 넓은 시

[†]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.

야가 요구되는 광학계에 사용 가능하며^[5], 2017년 조리개를 제 2거울에 설치한 유효시야 6°×6°, F-3.0, 유효초점거리 176 mm의 비축 2반사 광학계가 발표된 바 있다^[6]. 이 광학계는 14°~20°의 비축시야를 사용하여 광선의 차폐가 발생하지 않게 하였고, inverse Cassegrain 구조의 Schwarzschild system^[7-10]을 기반으로 하여 왜곡수차를 제외한 3차 수차가 모두 보정되었으나, 적은 설계변수로 인해 고차의 비축수차는 충분히 보정되지 못한 한계가 있었다. 이 광학계에서 광축에 대한 회전대칭구조는 유지하면서, 조리개만을 횡이동시켜 비축수차를 줄인 설계가 2020년에 발표된 바 있다^[11].

이 연구에서는 광축에 대해 회전대칭인 기본 비축시야 2반사 광학계에서 조리개와 제 2거울(M2)을 광축에 수직인 방향(y-방향)으로 독립적으로 횡이동(편심)시키면서 비축수차를 추가로 보정하는 방법에 대하여 연구하였다. 조리개를 횡이동시키면 회전대칭의 구면수차는 코마와 비점수차로 전파되며, 코마수차는 비점수차로 전파된다. 회전대칭의 통상적인 광학계에서는 조리개나 일부 군을 횡이동시켜 y축상의 시야에서 한쪽 방향을 보정하면 반대 방향의 시야에서는 성능이 저하되기 때문에 이 방법을 사용할 수 없다. 하지만 비축시야 광학계에서는 한쪽 방향만을 선택하여 사용하기 때문에 이러한 수차의 전파를 광학설계에 활용할 수 있다. 제 2거울(M2)을 횡이동시키면 조리개만을 횡이동시키는 경우와는 달리, M2의 결상에서는 자체의 광축도 횡이동되기 때문에 M2에서 본다면 물체가 역방향으로 횡이동하는 효과가 나타난다. 그리고 광학계의 조리개는 이동하지 않았기 때문에 M2를 기준으로 보면, 조리개 역시 반대방향으로 횡이동되는 효과가 나타난다.

광학계의 파면수차는 환산좌표 (σ, r, ϕ)의 함수로 주어진다^[12,13]. 여기서 σ 는 물체와 상의 상대적인 크기를 나타내는 규격화된 변수이며, (r, ϕ)는 입사동에 광선이 입사하는 위치를 나타내는 상대좌표이다. 회전대칭광학계에서 조리개만을 횡이동시키면 σ 는 변하지 않고 광선의 (r, ϕ)가 변화하면서 광선의 수차가 달라진다. 그러나 M2를 움직이면 M2에서는 (r, ϕ) 뿐만 아니라 σ 도 변화하므로 조리개를 횡이동시킨 경우와는 다른 형태의 수차변화가 발생한다. 따라서 조리개의 횡이동과 M2의 횡이동은 서로 독립적인 수차보정의 변수로 활용이 가능하다.

이 연구에서는 Schwarzschild system을 기반으로 하는 회전대칭의 초기설계에서 조리개와 M2를 별도로 횡이동시킨 비축시야 2반사광학계를 설계하고, 조리개만을 횡이동시킨 비축시야 2반사광학계와 회전대칭구조의 비축시야 2반사광학계의 수차특성을 비교하였다.

II. 비축시야 2반사광학계의 파면수차

2.1. 파면수차의 분석

비축시야 광학계에서는 회전대칭 광학계의 원형시야 일부만을 사용하며, 이 광학계에서 조리개나 제 2거울(M2)을 횡이동시키면 광축에 대한 파면수차의 회전대칭성은 사라지게

된다. 이를 고려하여 이 연구에서는 특정시야의 수차만을 표현하는 W계수를 사용하여 비축시야의 중심에 대해 조리개와 제 2거울을 독립적으로 횡이동시켜 수차를 보정하였다. 광학계의 시야를 넓히기 위해서는 조리개 앞에 음의 굴절능을 가진 렌즈 또는 반사경이 있는 것이 유리하므로, 이 광학계의 조리개는 M2에 설치하였다.

그림 1은 일반적인 회전대칭 광학계에서 높이 η 인 비축물체점 O_1 에서 출사하여 입사동, 출사동을 거쳐 높이 η' 인 최종상점 O_2' 으로 입사하는 광선을 보여주고 있다. 여기에서 O_1 은 제 1거울(M1)의 물체점이라는 의미이며, O_1' 은 M1에 의한 O_1 의 상이다. M2의 물체점 O_2 는 O_1' 과 같으며, M2가 결상한 O_2 의 상이 O_2' 이다. 이 연구에서는 M1과 광학계의 조리개는 고정하고 M2만을 횡이동시킨 다음, 다시 전체 광학계의 조리개를 횡이동시켜 중심시야의 파면수차변화를 살펴보고자 한다. 회전대칭의 초기설계에서 실제 조리개는 M2에 있고, 이것은 M1의 출사동이며 M2의 입사동에 해당한다. 이를 고려하여 M1의 출사동(M2의 입사동)을 기준으로 환산좌표를 적용하여 파면수차의 변화를 살펴보았다. 물체면에서 O_1 의 좌표를 (x, y), 입사동에서 P의 좌표와 출사동에서 P'의 좌표를 각각 (x_E, y_E) , (x'_E, y'_E) 라 하면(그림 1), 물체의 높이 η 와 출사동에서 출사하는 광선의 반직경 ρ' 과 동경각 ϕ' 은 다음과 같이 주어진다. 조리개의 중심이 광축에 있고 회전대칭이 유지되면, 입사동에서의 동경각 ϕ 과 출사동에서의 동경각 ϕ' 은 같다.

$$\eta = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{1}$$

$$\rho' = \sqrt{x'^2_E + y'^2_E} \tag{2}$$

$$\phi' = \tan^{-1}\left(\frac{x'_E}{y'_E}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{x_E}{y_E}\right) = \phi \tag{3}$$

$$x'_E = \rho' \sin \phi \tag{4}$$

$$y'_E = \rho' \cos \phi \tag{5}$$

물체의 최대높이 η_{max} , 출사동의 반직경 ρ'_{max} 를 기준으로 규격화된 환산좌표 σ, r 은

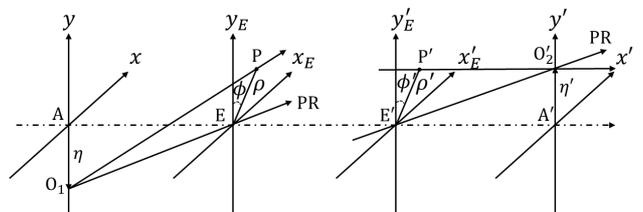


Fig. 1. Optical layout of a centered system (axially symmetric system).

$$\sigma = \frac{\eta}{\eta_{\max}} \quad (6)$$

$$r = \frac{\rho'}{\rho_{\max}} \quad (7)$$

로 정의된다. 회전대칭 광학계의 파면수차는 σ^2 , r^2 , $\sigma r \cos\phi$ 의 함수로 이루어져 있으며, 물체점 O_1 에서 출사동의 P'로 입사하는 광선에 대한 파면수차 W_p 는 C계수를 사용하여 다음과 같이 정의할 수 있다^[12,13].

$$W_p = \sum_{p,q,m} C_{lm} \sigma^k r^l \cos^m \phi \quad (8)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$$k = m + 2p, \quad p = 0, 1, 2, \dots$$

$$l = m + 2q, \quad q = 0, 1, 2, \dots$$

식 (8)에서 p, q, m 은 각각 $\sigma^2, r^2, \sigma r \cos\phi$ 가 조합되는 차수이고, k, l, m 은 각각 $\sigma, r, \cos\phi$ 의 차수를 나타낸다. 위 식을 특정시야의 수차만을 표현하는 W계수에 대한 식으로 정의하면

$$W_p = \sum_{l,m} W_{lm} r^l \cos^m \phi \quad (9)$$

이다. 식 (9)의 W_{lm} 은 특정시야에서 $r^l \cos^m \phi$ 에 비례하는 모든 C계수의 합으로 표현되며, 다음과 같이 정의된다.

$$W_{lm} = \sum_{k=0}^{2k+m} C_{lm} \sigma^{2k+m} \quad (10)$$

5차 수차까지 나타낸 비축물체점 O_1 의 W계수는 다음과 같다.

$$W_{60} = {}_0C_{60} + \dots \quad (11)$$

$$W_{51} = {}_1C_{51}\sigma + \dots \quad (12)$$

$$W_{42} = {}_2C_{42}\sigma^2 + \dots \quad (13)$$

$$W_{33} = {}_3C_{33}\sigma^3 + \dots \quad (14)$$

$$W_{40} = {}_0C_{40} + {}_2C_{40}\sigma^2 + \dots \quad (15)$$

$$W_{31} = {}_1C_{31}\sigma + {}_3C_{31}\sigma^3 + \dots \quad (16)$$

$$W_{22} = {}_2C_{22}\sigma^2 + {}_4C_{22}\sigma^4 + \dots \quad (17)$$

$$W_{20} = {}_0C_{20} + {}_2C_{20}\sigma^2 + {}_4C_{20}\sigma^4 + \dots \quad (18)$$

$$W_{11} = {}_1C_{11}\sigma + {}_3C_{11}\sigma^3 + {}_5C_{11}\sigma^5 + \dots \quad (19)$$

식 (11)-(19)에서 고차의 C계수가 낮은 차수의 W계수에 포함되어 있음을 알 수 있다. 이러한 특징은 낮은 차수의 C계수를 알고 있을 때, 특정시야에서 고차수차의 영향을 대략적으로 파악할 수 있게 한다. 제 1거울(M1)과 제 2거울(M2)로 구성된 회전대칭의 2반사경계에서 특정한 물체점 O_1 의 파면수차는 각 거울에서 발생하는 파면수차가 합쳐진 것이다. 만약 3차 파면수차만을 다룬다면, 파면수차는 M1의 기여분과 M2의 기여분의 합으로 주어질 수 있지만, 고차수차항의 경우에 M2의 파면수차가 M1의 파면수차에 영향을 받으므로 전체 광학계의 파면수차는 단순히 두 거울에서 발생하는 파면수차의 합으로는 주어지지 않는다^[12]. 하지만 이 연구에서는 M2와 조리개의 이동에 따른 파면수차의 변화를 근사적으로 알아보기 위하여 고차항의 경우를 단순 합만으로 근사하였다. M1, M2의 파면수차를 각각 $W_p^{(1)}, W_p^{(2)}$ 라 하고, 각각의 W계수를 $W_{lm}^{(1)}, W_{lm}^{(2)}$ 라 하면, 전체 광학계의 파면수차 W_p 는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$W_p = W_p^{(1)} + W_p^{(2)} = \sum_{l,m} (W_{lm}^{(1)} + W_{lm}^{(2)}) r^l \cos^m \phi \quad (20)$$

2.2. 제 2거울의 횡이동과 파면수차

조리개만을 횡이동시켜 수차를 보정한 이전의 연구에서는 각 군에서 광축의 이동이 없으므로 전체광학계에 대한 W계수를 사용할 수 있었다. 제 2거울을 횡이동시킬 경우, 특정한 광선이 제 1거울(M1)과 제 2거울(M2)을 지날 때에는 기준이 되는 광축이 달라지므로 거울마다 서로 독립된 좌표계에서 W계수를 정의하고, 이를 다시 하나의 좌표계로 변환해 주어야 한다. 그림 2는 M2를 횡이동시켜 광학계 2군의 광축이 Δy 만큼 횡이동한 경우를 보여주고 있다. M1의 기준에서 본다면, M2와 M2의 입사동 모두 이동한 것이므로, M2만을 횡

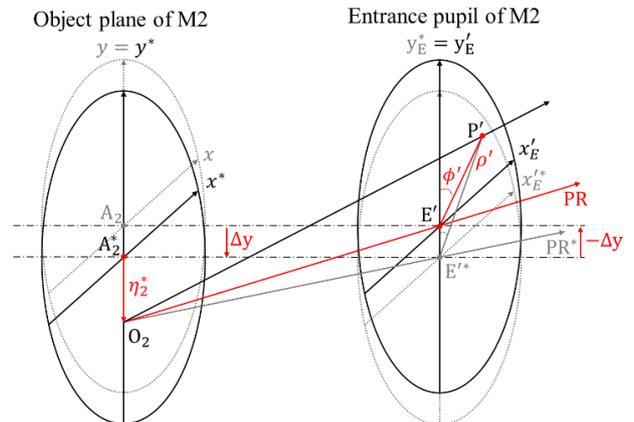


Fig. 2. Displacement of the secondary mirror.

이동시키려면 M2의 입사동을 다시 E'으로 이동시켜 주어야 한다.

그림 2에서 y축상에 있는 M2의 물체점 O₂의 좌표를 (x₂, y₂)라 하고, M2가 Δy만큼 횡이동하였을 때 이동한 M2의 물체면에서의 좌표 (x₂^{*}, y₂^{*})는 다음과 같이 주어진다.

$$x_2^* = x_2 = 0 \quad (21)$$

$$y_2^* = y_2 + \Delta y \quad (22)$$

$$\sigma^* = \frac{y_2^*}{\eta_{2,\max}} \quad (23)$$

식 (23)에서 σ^{*}는 횡이동된 M2에서의 규격화된 상높이이다. O₂의 좌표가 변함에 따라 M2에 대한 W계수는 새로운 좌표계에서 환산좌표 σ^{*}의 함수로 주어지게 된다.

$$W_{lm}^{A(2)} = \sum_{k=0}^{2k+m} C_{lm}^{(2)}(\sigma^*)^{2k+m} \quad (24)$$

식 (24)의 W_{lm}^{A(2)}의 첨자 A는 M2와 M2의 입사동이 광축을 기준으로 동시에 Δy만큼 이동했을 경우에 대한 M2의 W계수를 의미한다. M2만을 이동시키고, 조리개가 원래의 E'에 있도록 하려면, M2의 입사동을 Δy만큼 반대방향으로 이동시켜야 한다. E'를 기준으로 하는 출사동에서 P'의 좌표를 (x'_E, y'_E)라 하면 다음과 같다.

$$x'_E = x_E^* \quad (25)$$

$$y'_E = y_E^* + \Delta y \quad (26)$$

식 (25), (26)을 이용하여 P'의 좌표 (x'_E, y'_E)를 E'를 기준으로 하는 좌표로 변환시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho'^{*2} &= x_E'^{*2} + y_E'^{*2} \\ &= x_E'^2 + y_E'^2 - 2(\Delta y)y'_E + (\Delta y)^2 \\ &= \rho'^2 - 2(\Delta y)\rho' \cos\phi + (\Delta y)^2 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\rho'^* \cos\phi = y_E^* = y'_E - \Delta y = \rho' \cos\phi - \Delta y \quad (28)$$

식 (27), (28)을 규격화된 환산좌표로 표현하고, 5차항까지의 W계수에 해당하는 차수로 전개시키면 다음과 같은 변환관계가 얻어진다.

$$\delta r_A = -\frac{\Delta y}{\rho_{\max}} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} r^{6*} &= r^6 + 6(\delta r_A)r^5 \cos\phi + 12(\delta r_A)^2 r^4 \cos^2\phi \\ &\quad + 8(\delta r_A)^3 r^3 \cos^3\phi + 3(\delta r_A)^2 r^4 \\ &\quad + 12(\delta r_A)^3 r^3 \cos\phi + 12(\delta r_A)^4 r^2 \cos^2\phi \\ &\quad + 3(\delta r_A)^4 r^2 + 6(\delta r_A)^5 r \cos\phi + (\delta r_A)^6 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} r^{5*} \cos\phi^* &= r^5 \cos\phi + 4(\delta r_A)r^4 \cos^2\phi + 4(\delta r_A)^2 r^3 \cos^3\phi \\ &\quad + (\delta r_A)r^4 + 6(\delta r_A)^2 r^3 \cos\phi \\ &\quad + 8(\delta r_A)^3 r^2 \cos^2\phi + 2(\delta r_A)^3 r^2 \\ &\quad + 5(\delta r_A)^4 r \cos\phi + (\delta r_A)^3 \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} r^{4*} \cos^2\phi^* &= r^4 \cos^2\phi + 2(\delta r_A)r^3 \cos^3\phi \\ &\quad + 2(\delta r_A)r^3 \cos\phi + 5(\delta r_A)^2 r^2 \cos^2\phi \\ &\quad + (\delta r_A)^2 r^2 + 4(\delta r_A)^3 r \cos\phi + (\delta r_A)^4 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} r^{3*} \cos^3\phi^* &= r^3 \cos^3\phi + 3(\delta r_A)r^2 \cos^2\phi \\ &\quad + 3(\delta r_A)^2 r \cos\phi + (\delta r_A)^3 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} r^{*4} &= r^4 + 4(\delta r_A)r^3 \cos\phi + 4(\delta r_A)^2 r^2 \cos^2\phi \\ &\quad + 2(\delta r_A)^2 r^2 + 4(\delta r_A)^3 r \cos\phi + (\delta r_A)^4 \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} r^{*3} \cos\phi^* &= r^3 \cos\phi + 2(\delta r_A)r^2 \cos^2\phi + (\delta r_A)r^2 \\ &\quad + 3(\delta r_A)^2 r \cos\phi + (\delta r_A)^3 \end{aligned} \quad (35)$$

$$r^{*2} \cos^2\phi^* = r^2 \cos^2\phi + 2(\delta r_A)r \cos\phi + (\delta r_A)^2 \quad (36)$$

$$r^{*2} = r^2 + 2(\delta r_A)r \cos\phi + (\delta r_A)^2 \quad (37)$$

$$r^* \cos\phi^* = r \cos\phi + \delta r_A \quad (38)$$

식 (29)의 δr_A는 그림 2에서 이동한 M2의 입사동의 중심 E'를 기준으로 한 주광선(PR*)의 환산좌표이며, M2의 횡이동량에 의해 정해지는 규격화된 조리개의 이동량이다. 식 (30)-(38)에서 E'*을 원점으로 한 좌표계에서 E'을 원점으로 하는 좌표계로 변환함에 의해 기존의 수차항이 다른 수차항으로 전이되는 것을 알 수 있다. 또한 δr_A, (δr_A)² 등 δr_A만의 항들은 주광선의 광로정과 관련되어 있으므로, E'을 기준으로 하는 W계수에 영향을 주지않는다. 우변 전개항들의 차수를 조합하여 W계수로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$W_{60}^{(2)*} = W_{60}^{A(2)} \quad (39)$$

$$W_{51}^{(2)*} = W_{51}^{A(2)} + 6\delta r_A W_{60}^{A(2)} \quad (40)$$

$$W_{42}^{(2)*} = W_{42}^{A(2)} + 12(\delta r_A)^2 W_{60}^{A(2)} + 4\delta r_A W_{51}^{A(2)} \quad (41)$$

$$W_{33}^{(2)*} = W_{33}^{A(2)} + 8(\delta r_A)^3 W_{60}^{A(2)} + 4(\delta r_A)^2 W_{51}^{A(2)} + 2\delta r_A W_{42}^{A(2)} \quad (42)$$

$$W_{40}^{(2)*} = W_{40}^{A(2)} + 3(\delta r_A)^2 W_{60}^{A(2)} + \delta r_A W_{51}^{A(2)} \quad (43)$$

$$W_{31}^{(2)*} = W_{31}^{A(2)} + 4\delta r_A W_{40}^{A(2)} + 12(\delta r_A)^3 W_{60}^{A(2)} + 6(\delta r_A)^2 W_{51}^{A(2)} + 2\delta r_A W_{42}^{A(2)} \quad (44)$$

$$W_{22}^{(2)*} = W_{22}^{A(2)} + 4(\delta r_A)^2 W_{40}^{A(2)} + 2\delta r_A W_{31}^{A(2)} + 12(\delta r_A)^4 W_{60}^{A(2)} + 8(\delta r_A)^3 W_{51}^{A(2)} + 5(\delta r_A)^2 W_{42}^{A(2)} + 3\delta r_A W_{33}^{A(2)} \quad (45)$$

$$W_{20}^{(2)*} = W_{20}^{A(2)} + 2(\delta r_A)^2 W_{40}^{A(2)} + \delta r_A W_{31}^{A(2)} + 3(\delta r_A)^4 W_{60}^{A(2)} + 2(\delta r_A)^3 W_{51}^{A(2)} + (\delta r_A)^2 W_{42}^{A(2)} \quad (46)$$

$$W_{11}^{(2)*} = W_{11}^{A(2)} + 2\delta r_A W_{20}^{A(2)} + 4(\delta r_A)^3 W_{40}^{A(2)} + 3(\delta r_A)^2 W_{31}^{A(2)} + 2\delta r_A W_{22}^{A(2)} + 6(\delta r_A)^5 W_{60}^{A(2)} + 5(\delta r_A)^4 W_{51}^{A(2)} + 4(\delta r_A)^3 W_{42}^{A(2)} + 3(\delta r_A)^2 W_{33}^{A(2)} \quad (47)$$

식 (39)-(47)은 조리개와 M2가 동시에 이동하는 경우 M2에서 발생하는 파면수차를 광학계의 조리개가 이동하지 않은 파면수차로 변환한 것이다. 따라서 식 (39)-(47)의 W계수는 M1에서 발생하는 파면수차 $W_{lm}^{(1)}$ 과 환산좌표 (r, ϕ) 가 같으므로 M2만 이동한 경우 중심시야의 파면수차는 다음과 같이 기존의 M1과 이동된 M2에서 발생하는 수차의 합으로 주어진다.

$$W_P^* = \sum_{lm} \{ W_{lm}^{(1)} + W_{lm}^{(2)*} \} r^l \cos^m \phi \quad (48)$$

2.3. 조리개와 제 2거울이 별도로 횡이동된 2반사경계의 파면수차

그림 3은 조리개와 제 2거울(M2)이 별도로 편심되어 각각 Δy_E , Δy 만큼 횡이동한 경우를 보여주고 있다.

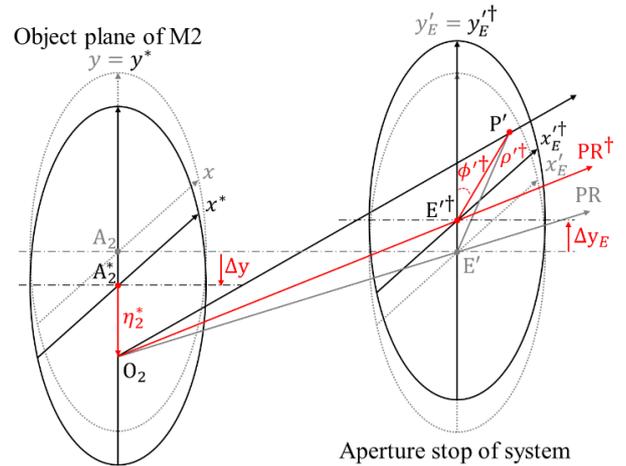


Fig. 3. Displacement of the entrance pupil and M2.

식 (48)의 파면수차 W_P^* 은 광학계 전체의 조리개와 제 1거울(M1)의 출사동이 같고, 횡이동된 M2의 입사동도 광학계의 조리개가 일치하도록 변환되어 있다. 따라서 M2가 횡이동된 2반사경계의 W계수는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$W_{lm}^* = W_{lm}^{(1)} + W_{lm}^{(2)*} \quad (49)$$

그림 3에서와 같이 Δy_E 만큼 횡이동된 M2의 입사동에서 P'의 좌표를 $(x_E^\dagger, y_E^\dagger)$ 라 하면 다음과 같다.

$$x_E^\dagger = x_E' \quad (50)$$

$$y_E^\dagger = y_E' - \Delta y_E \quad (51)$$

식 (50), (51)을 이용하여 P'의 좌표를 E'^\dagger 를 기준으로 하는 좌표로 변환시키면

$$\begin{aligned} \rho'^2 &= x_E'^2 + y_E'^2 = x_E^{\dagger 2} + y_E^{\dagger 2} + 2(\Delta y_E)y_E^\dagger + (\Delta y_E)^2 \\ &= \rho^{\dagger 2} + 2(\Delta y_E)\rho^\dagger \cos \phi^\dagger + (\Delta y_E)^2 \end{aligned} \quad (52)$$

$$\rho' \cos \phi = y_E' = y_E^\dagger + \Delta y_E = \rho^\dagger \cos \phi^\dagger + \Delta y_E \quad (53)$$

이다. 식 (29)-(38)과 같이 각 수차항의 차수로 전개시키고 W계수로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\delta r = \frac{\Delta y_E}{\rho_{\max}} \quad (54)$$

$$W_{60}^\dagger = W_{60}^* \quad (55)$$

$$W_{51}^\dagger = W_{51}^* + 6\delta r W_{60}^* \quad (56)$$

$$W_{42}^\dagger = W_{42}^* + 12(\delta r)^2 W_{60}^* + 4\delta r W_{51}^* \quad (57)$$

$$W_{33}^\dagger = W_{33}^* + 8(\delta r)^3 W_{60}^* + 4(\delta r)^2 W_{51}^* + 2\delta r W_{42}^* \quad (58)$$

$$W_{40}^\dagger = W_{40}^* + 3(\delta r)^2 W_{60}^* + \delta r W_{51}^* \quad (59)$$

$$W_{31}^\dagger = W_{31}^* + 4\delta r W_{40}^* + 12(\delta r)^3 W_{60}^* + 6(\delta r)^2 W_{51}^* + 2\delta r W_{42}^* \quad (60)$$

$$W_{22}^\dagger = W_{22}^* + 4(\delta r)^2 W_{40}^* + 2\delta r W_{31}^* + 12(\delta r)^4 W_{60}^* + 8(\delta r)^3 W_{51}^* + 5(\delta r)^2 W_{42}^* + 3\delta r W_{33}^* (\delta\sigma) \quad (61)$$

$$W_{20}^\dagger = W_{20}^* + 2(\delta r)^2 W_{40}^* + \delta r W_{31}^* + 3(\delta r)^4 W_{60}^* + 2(\delta r)^3 W_{51}^* + (\delta r)^2 W_{42}^* \quad (62)$$

$$W_{11}^\dagger = W_{11}^* + 2\delta r W_{20}^* + 4(\delta r)^3 W_{40}^* + 3(\delta r)^2 W_{31}^* + 2\delta r W_{22}^* + 6(\delta r)^5 W_{60}^* + 5(\delta r)^4 W_{51}^* + 4(\delta r)^3 W_{42}^* + 3(\delta r)^2 W_{33}^* \quad (63)$$

식 (54)-(63)에서 조리개의 횡이동에 의해서도 고차수차항이 낮은 차수의 수차항으로 전이^[11]되는 것을 알 수 있다.

III. 비축시야 2반사광학계의 설계

조리개가 M2에 있는 inverse Cassegrain 구조의 Schwarzschild system은 왜곡수차를 제외한 모든 3차 수차가 보정되어 있고, 동시에 광시야 광학계 설계에 유리한 장점이 있다. 이 광학계에서 비축시야를 사용함으로써 광선의 차폐와 시야 가림을 피할 수 있는 설계방법이 이미 제안된 바 있다^[6]. 그러나 적은 설계변수로 인해 고차의 비축수차에 대한 보정이 충분히 이루어지지 못한 한계가 있었다. 이 문제점을 해결하기 위해 조리개를 편심시켜 비축수차를 보정하는 방법이 발표된 바 있다^[11]. 이 연구에서는 이를 보다 확장하여 조리개와 M2를 별도로 횡이동시킨 비축시야 2반사광학계를 설계하고, 조리개만을 횡이동시킨 비축시야 2반사광학계와 회전대칭구조의 비축시야 2반사광학계와 수차특성을 비교하였다. 설계된 광학계는 F-수는 3.0, 유효초점거리는 176 mm이고, 유효시야는 $6^\circ \times 6^\circ$ 이며, x-방향 $\pm 0^\circ \sim 3^\circ$, y-방향 $14^\circ \sim 20^\circ$ 의 시야를 사용하고 있다. 설계방법에 따라 얻어진 설계는 Design I-III로 명명하였고, 각 설계는 중심시야 ($0^\circ, 17^\circ$)를 기준으로 최적화하였다. Design I은 통상적인 회전대칭구조를 가지는 광학계이고, Design II는 조리개만을 횡이동시킨 광학계이며,

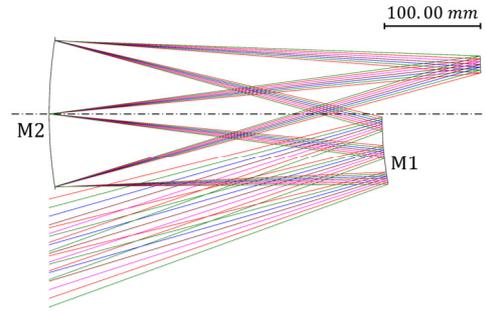


Fig. 4. Optical layout of the Design I (centered system with the off-axial field).

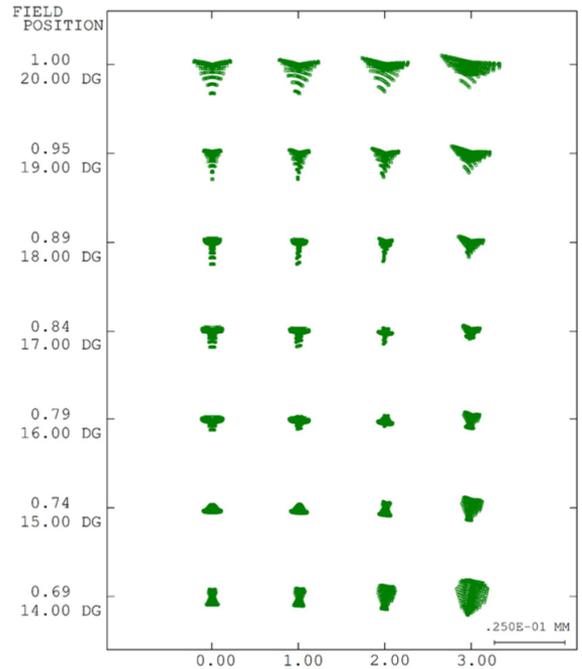


Fig. 5. Spot diagram of the Design I.

Design III는 M2와 조리개가 별도로 횡이동된 광학계이다. 최종설계는 비축시야 전체를 고려하면서 M2와 조리개를 별도로 횡이동시켜 최적화한 광학계이다.

그림 4의 Design I은 유효시야 $6^\circ \times 6^\circ$ 를 가지는 inverse Cassegrain 구조의 비축시야 2반사 광학계이며, M2에 조리개가 설치되어 있다. 이 반사광학계는 Schwarzschild system을 기반으로 설계되었고, 상면만 defocus, tilt를 주고 M1, M2, 조리개는 광축에 대한 회전대칭구조를 유지하면서, 중심시야 ($0^\circ, 17^\circ$)를 기준으로 최적화되었다. 그림 5는 Design I의 spot diagram이며, 설계제원과 spot size는 표 1, 표 2에 정리하였다. 표 1에서 r 은 면의 곡률반경, d 는 면간거리, κ 는 원추계수(conic constant)이다.

Design I의 중심시야 ($0^\circ, 17^\circ$)에서 파장 587.6 nm의 비축수차를 분석해보면 비점수차 계열의 W_{22} 가 0.88λ , W_{42} 가 -0.70λ , 코마 계열의 W_{33} 이 0.57λ , W_{31} 이 -0.63λ 의 순으로

Table 1. Design data of Design I

#	r (mm)	d (mm)	κ	Remarks
1	444.947	-347.290	4.1938	M1
2	503.313	450.743	0.1638	M2 (stop)
3	Defocus 0.7448 mm, α -tilt 1.74°			Image plane

Table 2. RMS spot sizes of Design I (units in μm)

x-field	y-field						
	14°	15°	16°	17°	18°	19°	20°
0°	4.22	3.5	4.11	4.35	4.12	4.01	6.02
1°	4.56	3.37	3.69	3.87	3.72	3.97	6.25
2°	5.94	3.66	2.92	2.8	2.96	4.25	7.22
3°	8.65	5.71	3.97	3.33	3.92	5.94	9.33

잔류하고 있다. Schwarzschild system은 왜곡수차를 제외한 모든 3차 수차가 잘 보정된 광학계이므로 잔류수차들은 5차 이상의 고차 수차에 의해 발생한 것으로 볼 수 있다.

각각의 수차들은 서로 상쇄되는 방향으로 적절하게 최적화 되어 있지만 광학계의 성능을 개선시키기 위하여서는 수차의 균형을 유지하면서 크기를 줄일 필요가 있다.

그림 6은 광학계의 조리개만을 회전시키면서 중심시야 (0°, 17°)에 대해 최적화한 Design II의 형상이다. 이 광학계에서 M1과 M2는 광축에 대한 회전대칭이 유지되고 있으며, 조리개만 회전되어 있다. 그림 7은 Design II의 spot diagram이며, 설계제원과 spot size는 표 3, 표 4에 정리하였다. 표 3의 y-decenter는 광학계 1면의 광축을 기준으로 한 광학면의 회전량을 의미한다.

Design II는 그림 4의 Design I과 비교하여 조리개만 +y 방향으로 편심되었으며 이로 인해 M1에 의한 광선의 차폐가 크게 줄어들었다. 이를 이용하면 유효시야를 유지하면서 반시야각을 줄여 비축수차 자체의 발생을 줄일 수 있지만 M1과 M2를 지나 바로 상면에 입사하는 잡음광이 발생할 가능성이 있다. 이를 고려하여 추후 baffle을 이용하여 잡음광을 차단할 수 있도록 상 중심의 시야는 그대로 유지하였다. 중심시야에서의 비축수차를 분석해보면 W_{22} 가 0.85λ , W_{42} 가 -0.72λ , W_{33} 이 -0.16λ , W_{31} 이 0.08λ 의 순으로 나타나 코마 계열의 수차가 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. W_{22} , W_{42} 의 경우 전과 비교하여 크게 변하지 않았다. 표 4에서 Design II의 rms spot size는 Design I (표 2)과 비교하여 1/2 수준으로 감소하였고, 중심시야를 기준으로 특히 시야의 x-방향 line image에 대하여 좋은 특성을 보여주고 있다.

그림 8은 M2와 조리개를 별도로 회전시키면서 중심시야 (0°, 17°)에 대해 최적화한 Design III의 형상이다. 그림 9는 Design III의 spot diagram이며, 설계제원과 spot size는 표 5, 표 6에 정리하였다.

중심시야의 비축수차를 분석해보면 W_{22} 가 0.66λ , W_{42} 가 -0.73λ , W_{31} 이 0.05λ , W_{33} 이 0.03λ 의 순으로 나타나 W_{33} 이

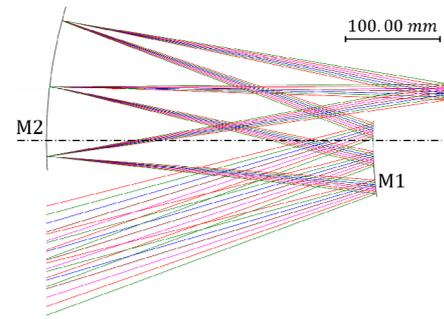


Fig. 6. Optical layout of Design II (axially symmetric structure with displaced off-axial stop).

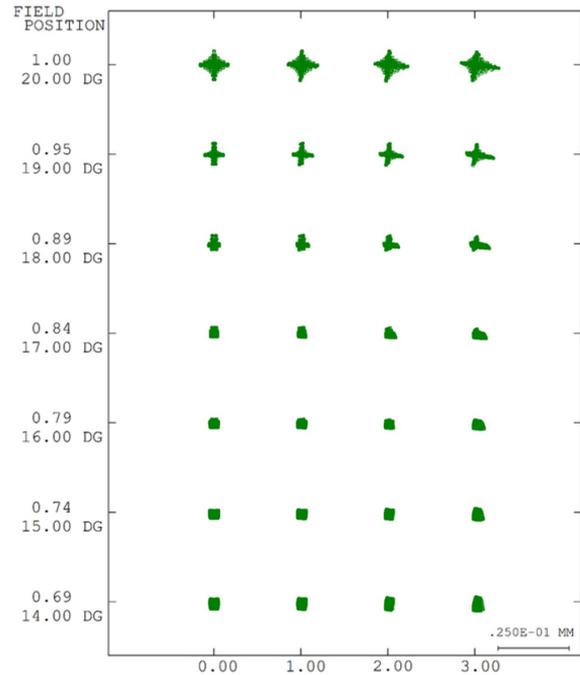


Fig. 7. Spot diagram of Design II.

Table 3. Design data of Design II

#	r (mm)	d (mm)	κ	y-decenter (mm)	Remarks
1	487.330	-346.720	5.4851	-	M1
2	495.194	0.000	0.1743	57.080	Stop
3	495.194	426.437	0.1743	-	M2
4	Defocus 0.1381 mm, α -tilt 0.36°				Image plane

Table 4. RMS spot sizes of Design II (units in μm)

x-field	y-field						
	14°	15°	16°	17°	18°	19°	20°
0°	2.90	2.68	2.34	1.96	1.94	2.82	4.57
1°	2.92	2.67	2.31	1.94	1.96	2.88	4.63
2°	3.04	2.69	2.30	1.94	2.06	3.08	4.87
3°	3.39	2.92	2.48	2.18	2.43	3.51	5.28

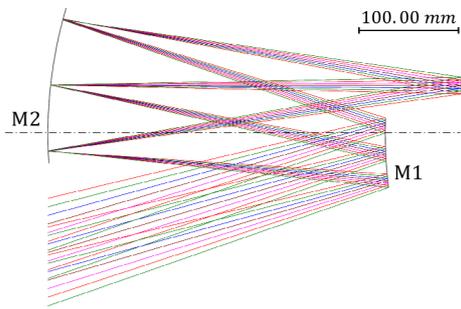


Fig. 8. Optical layout of Design III (decentered system with displaced secondary mirror and off-axial stop).

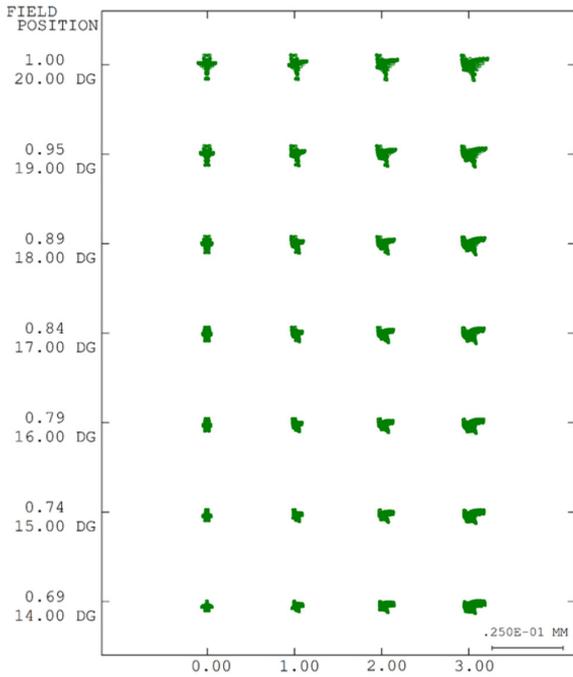


Fig. 9. Spot diagram of Design III.

Table 5. Design data of Design III

#	r (mm)	d (mm)	κ	y-decenter (mm)	Remarks
1	498.724	-338.508	5.8586	-	M1
2	486.480	0.000	0.1788	50.983	Stop
3	486.480	414.919	0.1788	-0.612	M2
4	Defocus 0.0521 mm, α -tilt 0.11°				Image plane

크게 감소하였을 뿐만 아니라 W_{22} 또한 잔류수차의 균형을 유지하면서 감소한 것을 확인할 수 있다. 표 6에서 Design III의 spot size를 Design II와 비교해보면 중심시야를 기준으로 시야의 y-방향 line image에 대하여 좋은 특성을 보여주고 있다.

그림 10은 M2와 조리개를 별도로 횡이동시키면서 비축시야 전체에 대하여 최적화된 최종설계의 형상이다. 그림 11은

Table 6. RMS spot sizes of Design III (units in μm)

x-field	y-field						
	14°	15°	16°	17°	18°	19°	20°
0°	1.46	1.46	1.60	1.80	2.04	2.40	3.04
1°	1.88	1.88	2.00	2.18	2.39	2.75	3.32
2°	2.81	2.80	2.91	3.04	3.25	3.54	4.06
3°	4.04	4.03	4.10	4.24	4.42	4.68	5.05

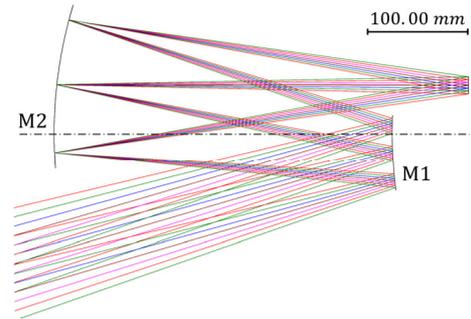


Fig. 10. Optical layout of the final design (decentered system with displaced secondary mirror and off-axial stop optimized for a square image).

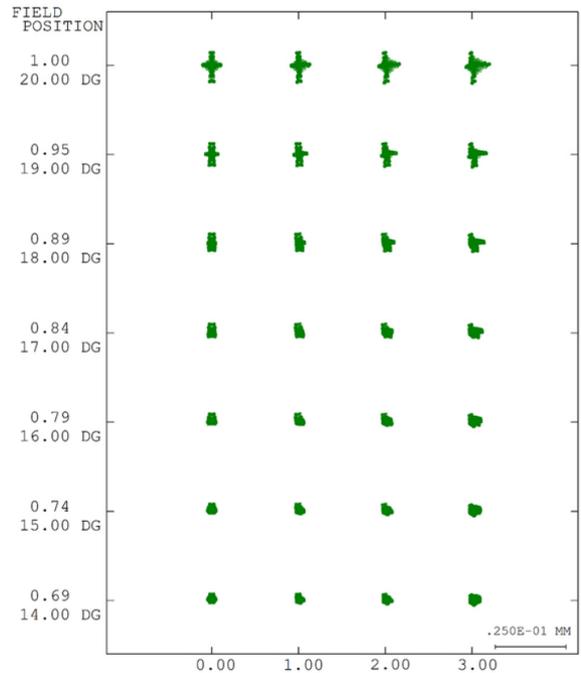


Fig. 11. Spot diagram of the final design.

이 최종설계의 spot diagram이며, 설계제원과 spot size는 표 7, 표 8에 정리하였다.

중심시야의 비축수차를 분석해보면 W_{22} 가 0.80λ , W_{42} 가 -0.74λ , W_{33} 이 -0.11λ , W_{31} 이 0.07λ 의 순으로 나타났으며, 비축시야 전체에 대해 최적화를 했음에도 중심시야에서 심각한 성능저하는 나타나지 않았다.

Table 7. Design data of the final design

#	r (mm)	d (mm)	κ	y-decenter (mm)	Remarks
1	496.919	-342.302	5.8162	-	M1
2	489.912	0.000	0.1772	57.256	Stop
3	489.912	418.474	0.1772	-0.301	M2
4	Defocus 0.0358 mm, α -tilt 0.11°				Image plane

Table 8. RMS spot sizes of the final design (units in μm)

x-field	y-field						
	14°	15°	16°	17°	18°	19°	20°
0°	1.83	1.92	1.92	1.88	2.01	2.58	3.62
1°	1.89	1.97	1.97	1.95	2.09	2.68	3.72
2°	2.08	2.16	2.18	2.19	2.36	2.93	3.99
3°	2.49	2.54	2.57	2.61	2.81	3.39	4.37

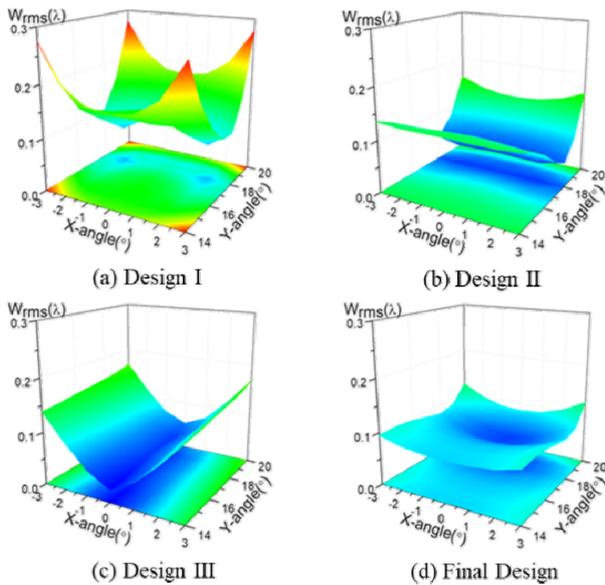


Fig. 12. RMS wavefront error of the designs (units in λ).

그림 12는 앞에서 설계한 4개의 비축시야 2반사 광학계에 대한 RMS wavefront error를 보여주고 있다. 그림 12(a)는 최적 설계된 회전대칭 광학계인 Design I의 경우이다. 그림 12(b)는 조리개만 회이동시키면서 비축상의 중심에 대하여 최적화시킨 Design II이며, x-방향의 line image에 대하여 좋은 특성을 보여주고 있다. 그림 12(c)는 조리개와 M2를 별도로 회이동시키면서, 비축상의 중심에 대하여 최적화한 Design III이며 y-방향에서 line image에 대하여 좋은 특성을 보여주고 있다. 그림 12(d)는 조리개와 M2를 별도로 회이동시키면서, 비축 시야 전체에 대하여 최적화한 최종설계이며, 전체 유효시야에서 다른 설계와 비교하여 상대적으로 파면수차의 차이가 매우 적은 특징이 있고, 그림 12(a)의 회전대칭 광학계와 비교하면 상당히 개선된 성능을 보여주고 있다.

IV. 결 론

이 연구에서는 비축 2반사광계에서 조리개와 제 2거울 (M2)을 회이동시켜 비축수차를 보정하여 결상성능을 개선하는 설계방법에 대해 연구하였다. Inverse Cassegrain 구조의 Schwarzschild system은 2개의 반사경만을 사용하면서도 왜곡수차를 제외한 3차 수차가 보정된 광학계이지만, 광시야의 비축시야를 가지는 광학계로 사용하면 설계변수가 적기 때문에 보정되지 못한 고차수차로 인하여 성능이 제한된다.

이 연구에서는 유효시야 $6^\circ \times 6^\circ$, $f/3$, 유효초점거리 176 mm의 사양을 가지는 비축시야 2반사 광학계에서 조리개와 M2를 별도로 회이동시켜 Schwarzschild system에 잔류하는 코마, 비점수차의 영향이 줄어들도록 하였다. 조리개와 M2가 별도로 편심된 비축시야 2반사광계의 최종설계는 광축에 대해 회전대칭구조를 유지하고 있는 광학계와 비교하여 spot size는 1/2 수준으로 개선되었다. 동시에 구조적으로는 물체 측에서 입사하는 광선이 제 1거울(M1), M2를 거치지 않고 상면으로 바로 입사하는 잡음광을 baffle을 사용하여 차단시킬 수 있도록 광학계가 설계되었다. 조리개만을 회이동시켰을 경우에는 중심시야를 기준으로 x-방향의 line image에 대해 좋은 특성을 보여주었다. 조리개와 M2를 별도로 회이동시켰을 경우 $6^\circ \times 6^\circ$ 의 유효시야에 대한 파면수차의 균형이 조정되는 효과가 나타나 상대적으로 균일한 성능을 얻을 수 있었으며, 조리개와 M2의 회이동은 광시야 비축광학계의 성능개선에 유용하게 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 청주대학교 연구장학 지원으로 수행되었습니다.

References

1. S. H. Kim, H. J. Kong, J. U. Lee, J. H. Lee, and J. H. Lee, "Design and construction of an Offner spectrometer based on geometrical analysis of ring fields," *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 083108 (2014).
2. 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).
3. 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).
4. J. U. Lee, Y. Kim, S. H. Kim, Y. Kim, and H. Kim, "Optical design of an image-space telecentric two-mirror system for wide-field line imaging," *Curr. Opt. Photon* **1**, 344-350 (2017).
5. G. I. Lebedeva and A. A. Garbul, "Prospective aerospace reflective objectives," *J. Opt. Technol.* **61**, 610-614 (1994).

6. H.-J. Oh and J.-U. Lee, "Optical design of a wide-field off-axis two-mirror system without ray obstruction," *Korean J. Opt. Photon.* **28**, 263-272 (2017).
7. S. Rosin, "Inverse Cassegrainian systems," *Appl. Opt.* **7**, 1483-1497 (1968).
8. W. B. Wetherell and M. P. Rimmer, "General analysis of aplanatic Cassegrain, Gregorian, and Schwarzschild telescopes," *Appl. Opt.* **11**, 2817-2832 (1972).
9. C. L. Wyman and D. Korsch, "Aplanatic two-mirror telescopes; a systematic study. 3: the Schwarzschild-Couder configuration," *Appl. Opt.* **14**, 992-995 (1975).
10. H. Gross, F. Blechinger, and B. Aichtner, *Handbook of Optical Systems: Survey of Optical Instruments: Survey of Optical Instruments* (Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2008), Vol. 4, Chapter 43.
11. J. U. Lee, "Aberration correction of an off-axial field two-mirror system using a decentered aperture," *Korean J. Opt. Photon.* **31**, 20-25 (2020).
12. J. Sasian, *Introduction to Aberrations in Optical Imaging Systems* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013).
13. W. T. Welford, *Aberrations of Optical System* (Taylor & Francis Group, NY, USA, 1986).