

4 반사경 ANASTIGMAT 의 ZOOMING 에 관한 연구

나 승유, 이 상수
(한국 과학 기술원)

초록

연속적으로 aplanat 조건을 만족하는 4 반사경의 zooming 에서 aplanat 4 구면 반사광학계가 갖는 astigmatism 을 줄이기 위하여 4 구면 중 하나의 반사경에 원추곡면을 사용함으로써 줌 궤적상의 한점에서 anastigmat 조건을 만족하도록 하였다. 이 방법에 의한 astigmatism 의 보정효과는 제 1 면에 ellipsoid 를 사용하였을때 가장 우수하였다.

1. 서 론

적외선 영역에서 반사광학계가 갖는 우수한 광 투과능력과 수차특성, 그리고 색수차가 존재하지 않음에도 불구하고 반사중광학계에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있으며 1981년 W.E. Woehl 에 의해 발표된 줌 광학계가 유일하다. [1], [2] 그러나 이 광학계는 결상용 광학계로서 설계된 것이 아니고 실험장치의 조명을 조절하기 위한 조명용으로 설계되었으며 또한 광학계가 축대칭성을 갖지 않으므로 필연적으로 비축수차의 영향을 받게 된다. 저자는 이미 발표된 논문을 통하여 축대칭성을 갖는 4구면 반사광학계로서 연속적으로 aplanat 조건을 만족하는 줌광학계에 대하여 발표한 바 있다, [3], [4], [5] 그림 2. 에 이 광학계의 수차계수를 광학계의 전체 굴절능에 대하여 나타 내었으며 그림 3. 에 이 광학계의 줌 궤적과 광학계의 형태를 그리고 그림 4. 에 spot diagram을 나타내었다. 이 광학계는 aplanat 조건을 만족하는 최초 4구면 반사광학계의 거리변수들을 aplanat 조건을 만족시키면서 변화시키는 방법으로 zooming 을 하여 초점거리 66.67 cm -133.33 cm 의 범위와 F/4 - F/8 의 범위에서 10.6 μm 의 파장에서 약 1° 의 반 시계각을 갖는다. 이 광학계의 반 시계각은 주로 astigmatism 에 의하여 제한을 받는다. 그러나 그림 2. 에서 보듯이 광학계의 astigmatism 은 줌 범위내에서 크게 변화하지 않음을 고려할때 줌범위 내의 한 위치에서

광학계가 anastigmat 조건을 만족하도록 함으로써 전체 범위에서 astigmatism 을 줄일수 있다는 예상이 가능하다. 줌 궤적상의 한점에서 anastigmat 조건 을 만족 시키기 위한 방법으로 최초광학계를 aplanat 4구면경계를 사용하는 대신 anastigmat 4반사경계를 사용할수 있다. 그러나 줌광학계로 사용이 가능한 Cassegrain - Cassegrain 형 4구면 반사경계중 anastigmat의 성능을 갖 는 광학계는 존재하지 않는다고 보고되었다. [6] 그러므로 줌광학계의 최초광학계로 사용할 anastigmat 광학계는 최소한 1개 이상의 2차곡면을 포함해야 한다.

2. 연속적으로 aplanat 조건을 만족하는 사반사경 줌광학계

Cassegrain - Cassegrain 형 광학계의 개략도를 그림 1. 에 나타내었다. 제1면이 원추계수 p_1 인 원추곡면인 4반사경계의 조리개가 4면에 위치하고 조리개면에서 주광선이 광축과 각 β 를 이룬다면 Seidel 1차수차중 구면수차 계수, 코마계수 그리고 astigmatism 계수를 Gauss 괄호를 이용하여 나타내면 각각 다음과 같다.

$$S_I = h_1^4 \{X + k_4 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3]^2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3, k_4 / 2]^2\}, \quad (1)$$

$$S_{II} = \frac{h_1^3 \beta}{[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3]} \left\{ X + \frac{[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3] Y}{2[k_1, d_1, k_2]} \right. \\ \left. + k_4 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3]^2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] / [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3, k_4 / 2] \right\}, \quad (2)$$

$$S_{III} = \frac{h_1^2 \beta^2}{[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3]^2} \left\{ X + \frac{[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3] Y}{[k_1, d_1, k_2]} \right. \\ \left. + \left(k_4 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3]^2 + \frac{Z}{4[k_1, d_1, k_2]^2} \right) [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3]^2 \right\}, \quad (3)$$

where,

$$X = X_o + \frac{p_1}{4} k_1^3 ,$$

$$Y = Y_o - \frac{p_1}{2} k_1^2 ([k_1, d_1, k_2] [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] - k_2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] - k_1 k_3) ,$$

$$Z = Z_o + p_1 k_1 ([k_1, d_1, k_2] [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] - k_2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] - k_1 k_3)^2 ,$$

$$X_o = k_1 [k_1/2]^2 + k_2 [k_1, d_1]^2 [k_1, d_1, k_2/2]^2 + k_3 [k_1, d_1, k_2, -d_2]^2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3/2]^2 ,$$

$$Y_o = k_1^2 ([k_1/2, d_1, k_2] [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] + k_1 k_3/2)$$

$$+ k_2 [k_1, d_1]^2 [k_1, d_1, k_2/2] (2k_3 [k_1, d_1, k_2/2] + k_2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3]) ,$$

$$Z_o = 4k_1 ([k_1/2, d_1, k_2] [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] + k_1 k_3/2)^2$$

$$+ k_2 [k_1, d_1]^2 (2k_3 [k_1, d_1, k_2/2] + k_2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3])^2$$

$$+ k_3^3 [k_1, d_1, k_2, -d_2]^2 [k_1, d_1, k_2]^2 .$$

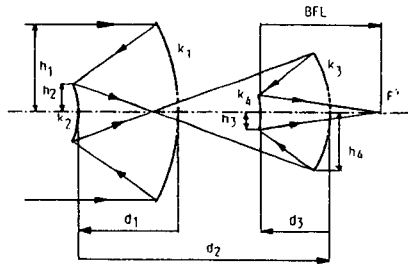


Fig.1 The configuration of Cassegrainian-Cassegrainian type four mirror system.

식 (1), (2) 그리고 (3) 에서 k_i , ($i=1, 2, 3, 4$) 는 각면의 굴절능이고 d_i , ($i=1, 2, 3$) 은 각면간의 거리이다. 또 광학계의 후초점거리 (Back Focal Length; BFL) 과 전체굴절능 K 는 각각 다음과 같이 표시된다.

$$BFL = \frac{[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3]}{[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3, k_4]} \quad (4)$$

$$K = [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3, k_4] \quad (5)$$

광학계가 aplanat 조건을 만족하므로 식 (1) 과 (2) 는 동시에 0 이 되어야 한다. 따라서 식 (2) 로부터 다음과 같은 관계를 구할수 있다

$$\begin{aligned} & k_4[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3]^2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3, k_4/2] \\ &= -\frac{\left\{ X + \frac{[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3]Y}{2[k_1, d_1, k_2]} \right\}}{[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3]} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6) 을 식 (1) 에 대입하면 다음과 같이 S_f 에 대한 새로운 표현을 얻을수 있다.

$$\begin{aligned} S_f &= -\frac{h_1^4 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3]}{2[k_1, d_1, k_2][k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3]} \{ k_4[k_1, d_1, k_2]X + [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3, k_4/2]Y \} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

이때 식 (7) 은 다음과 같은 경우에 한하여 성립한다.

$$[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3] = 0 \quad (8)$$

or,

$$[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3, k_4/2] = -\frac{k_4 X [k_1, d_1, k_2]}{Y} \quad (9)$$

하지만 광학계가 식 (8) 을 만족하면 식 (4) 에서 알수 있듯이 광학계의 BFL 이 동시에 0 이 되므로 결상용광학계로써 가치가 없다. 그러므로 aplanat 4 반사경계는 식 (9) 를 만족 해야 한다. 한편 식 (9) 를 식 (6) 에 대입하면 다음과같은 식을 얻을수 있다.

$$\frac{Y}{k_4[k_1, d_1, k_2]} + \frac{4[k_1, d_1, k_2]X}{Y^3} (k_4X[k_1, d_1, k_2] + Y[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3])^2 = 0 . \quad (10)$$

또 식 (9) 는 d_3 에 대한 1차식으로서 다음과 같이 다시 쓸수있다.

$$\frac{2\left\{\frac{k_4X[k_1, d_1, k_2]}{Y} + [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3 + k_4/2]\right\}}{k_4[k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3]} + d_3 = 0 , \quad (11)$$

그러므로 aplanat 4 반사경계는 식 (10) 과 식 (11) 을 동시에 만족하여야 한다. 여기서 식 (10) 은 d_3 와 무관하고 식 (11) 은 d_3 에 대한 1차 함수이다. 그러므로 주어진 k_i , ($i=1, 2, 3, 4$), F_1 , d_1 값에 대하여 식 (10) 과 식 (11) 을 만족하도록 d_2 와 d_3 를 결정하면 광학계는 aplanat 조건을 만족하고 또 광학계의 BFL 과 전체굴절능 K 는 식 (4), (5) 로부터 계산할수 있다.

4 반사경 줌광학계는 세개의 독립된 변수 d_i ($i=1, 2, 3$) 를 갖고 있다. 만약 aplanat 광학계 (anastigmat 광학계) 의 d_1 을 작은량 Δ ($\ll |d_1|$) 만큼 변화시키고 d_2 와 d_3 를 식 (10) 과 (11) 을 동시에 만족하도록 $d_1 + \Delta$ 로 대치된 d_1 에 대하여 구하면 광학계는 역시 aplanat 조건을 만족하며 식 (5) 로 부터 광학계의 새로운 굴절능을 구할수 있다. 이러한 과정을 반복하면 광학계는 연속적으로 aplanat 조건을 만족하는 줌광학계가 되며 만약 최초광학계가 anastigmat 이면 이 줌광학계는 연속적으로 aplanat 조건을 만족하면서 최초 위치에서 anastigmat 조건을 만족한다.

anastigmat 조건은 aplanat 조건에 더하여 식 (3) 이 0 이 되는 조건인데 식 (10) 과 식 (11) 을 대입하면 식 (3) 은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_{III} &= \frac{h_1^2 \beta^2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3]^2}{4[k_1, d_1, k_2]^2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3]^2 X} (XZ - Y^2) \\ &= \frac{h_1^2 \beta^2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3, d_3]^2}{4[k_1, d_1, k_2]^2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3]^2 X} (X_0 Z_0 - Y_0^2 + p_1 k_1 R) , \end{aligned} \quad (12)$$

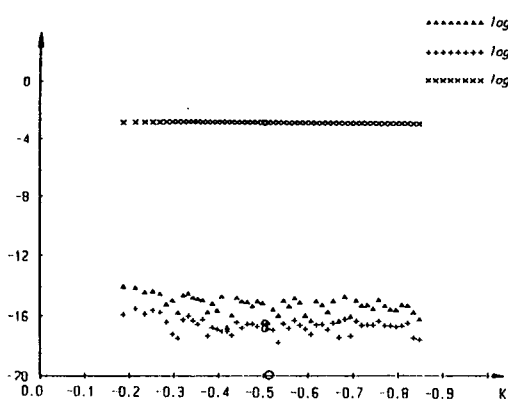


Fig.2 The variations of the aberration coefficients for four spherical mirror zoom system.

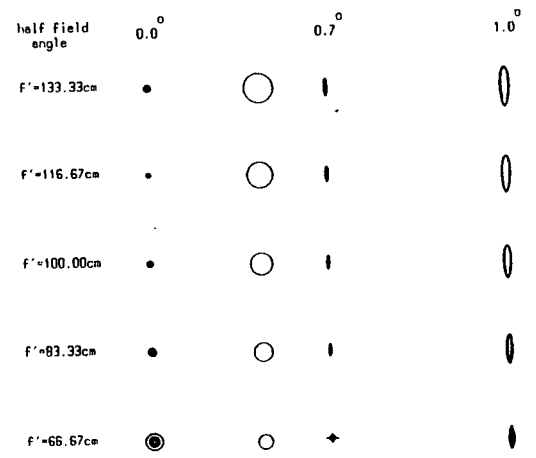


Fig. 4 The spot diagram of the four spherical mirror system. The enclosed circles designate the sizes of Airy disk.

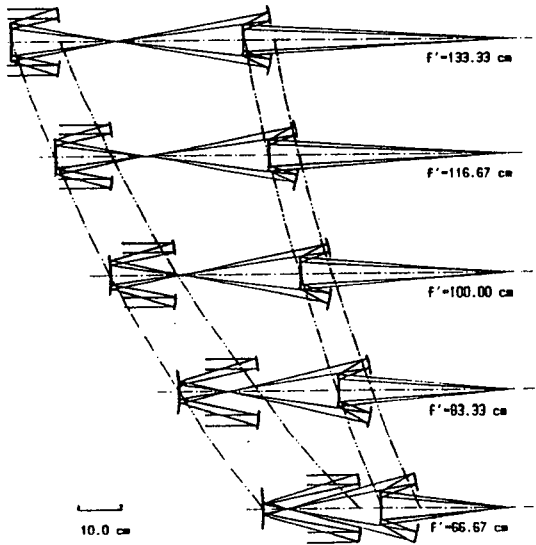


Fig.3 The zooming locus and the configuration of the four spherical mirror zoom system.

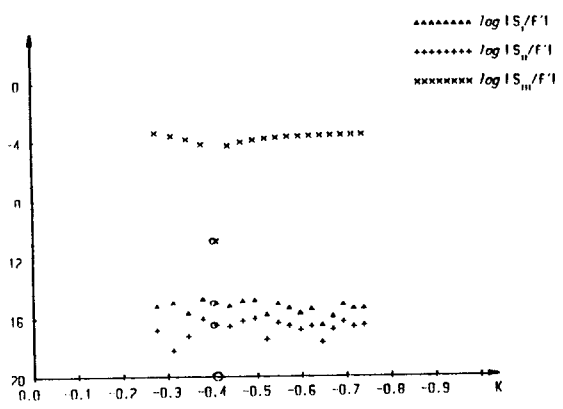


Fig.5 The variations of the aberration coefficients for the zoom system.

where,

$$R = k_1 X_o ([k_1, d_1, k_2] [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] - k_2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] - k_1 k_3) \\ + Y_o ([k_1, d_1, k_2] [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] - k_2 [k_1, d_1, k_2, -d_2, k_3] - k_1 k_3)^2 + \frac{Z_o}{4} k_1^2 .$$

이 식은 d_3 와 무관하며 p_1 의 1차 함수이다.

3, 제 1면이 2차곡면인 4반사경계에 대한 고찰

사반사경 줌광학계의 특성은 최초광학계가 결정되면 제 2절에서 언급된 zooming 방법에 따라 결정된다. 즉 최초 광학계의 선택에 따라 광학계의 줌계적, 유한광선수차등이 결정된다. 따라서 보다 나은 최초 광학계의 선택이 중요하다. 좀더 나은 최초 광학계를 찾기 위하여 다음과 같은 방법과 범위의 광학계에 대하여 조사 하였다.

- 1) 제 1면의 곡률반경 c_1 은 -1 로 정하여 광학계의 크기를 이에 의 해 규격화 하였으며 c_1 이 양의 값을 갖는 경우는 제외하였다.
- 2) 제 1면과 제 2면 사이의 거리는 -0.35 로 고정하였다.
- 3) 제 2면의 곡률 c_2 는 $-2.8 < c_2 < 0$ 의 범위에서 0.1 간격으로 조사하였다.
- 4) 제 3면의 곡률 c_3 는 $-10.0 < c_3 < 0$ 의 범위에서 0.1 간격으로 각 c_2 값에 대해 조사하였다.
- 5) 제 2면과 3면 사이의 거리 d_2 는 $0.35 < d_2 < 1.20$ 의 범위에서 0.05 간격으로 각 c_2, c_3 에 대하여 조사하였다.
- 6) 제 1면의 원추계수 p_1 은 식 (12) 를 만족하도록 결정하였다.
- 7) 제 4면의 굴절능 k_4 는 식 (10) 을 만족하도록 결정하였다.
- 8) 제 3면과 4면 사이의 거리 d_3 는 식 (11) 을 만족하도록 결정하였다.

그러나 조사된 광학계 중에서 $BFL > 0, d_1 + d_2 + d_3 > 0$ 인 광학계만이 실제 결상 광학계로서 유용하다. 여기서 유용한 광학계들의 줌계적과 유한광선수차를 구하여 서로 비교하여 표 1. 에 주어진 광학계가 가장 우수한

Table 1. The design data of the system.

surface #	1	2	3	4
curvature	-1.0000	-0.9000	-1.4000	-1.63337
distance	-0.3500	1.05000	-0.37567	

The stop of the system lies on the last surface and the conic constant p_1 is -0.355310.

성능을 보였다. 이 광학계가 줌 범위내에서 갖는 수차계수의 변화를 그림 5. 에 나타내었다. 이 광학계가 초점거리 66.67 cm - 133.33 cm 의 범위를 갖도록 광학계를 확대시켜서 줌계적과 광학계의 형태를 그림 6. 에 나타냈다.

이 광학계의 광 투과는 제 4면의 높이에 의해 결정되는데 광학계의 초점 거리가 66.67 cm 일때 F/4 가 되도록 그린 것인데 이 광학계의 BFL 은 거의 초점거리에 비례하여 증가하므로 광학계의 초점거리가 증가하면 광학계의 F/수 도 증가한다. 그림 7. 은 그림 6. 의 각 위치에서 광학계가 갖는 spot diagram 을 반 시계각 2 까지 나타낸것이며 그림중의 동그라미는 $10.6\mu\text{m}$ 일때 각 위치에서 이상적인 광학계의 Airy disk 크기를 표시한 것이다.

4. 결 론

4 구면 반사경 광학계가 갖는 astigmatism 을 줄이기 위하여 4 개 구면중 1개면에 원추곡면을 사용하여 줌범위내의 한 위치에서 anastigmat조건을 만족하도록 함으로써 광학계의 초점거리 66.67 cm - 133.33 cm 범위 F/수 F/4 - F/8 의 줌광학계의 반 시계각을 2 까지 늘일수 있었다.

4 구면 반사경 줌광학계의 astigmatism 을 줄이기 위하여 제 2면, 제 3면, 제 4면등 각면의 2차곡면화를 시도하셨으나 제1면의 2차곡면화에 의한 astigmatism 보정효과가 가장 우수하였다.

현재 보정렌즈를 사용하여 4 구면 반사 줌 광학계의 astigmatism 을 줄이기 위한 시도가 계속되고 있다.

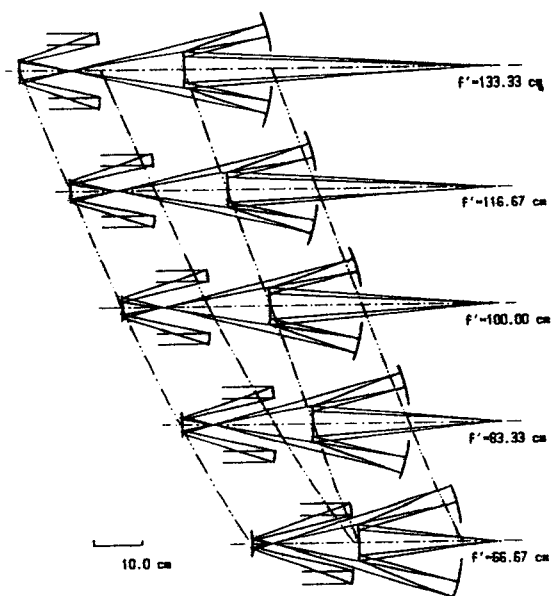


Fig.6 The zooming locus and the configuration of the system.

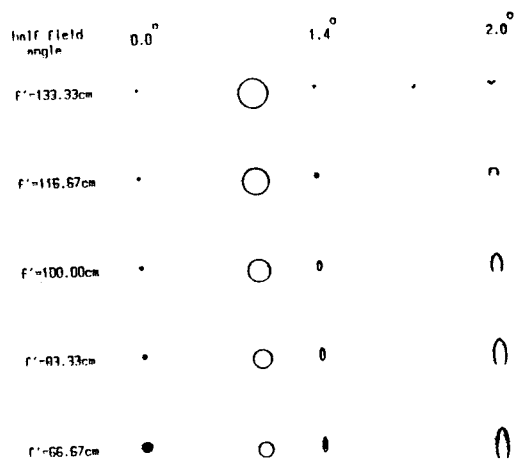


Fig.7 The spot diagram of system. The enclosed circles designate the sizes of Airy disk.

6. 참고 문헌

1. W.E. Woehl, Opt. Eng., vol.20, pp 450-459 (1981).
2. A.A. Desrochers, Opt. Eng., vol.21, pp868-871 (1982).
3. 나승유, 이상수, "연속적으로 아플라넛 조건을 만족하는 4구면 반사 줌 광학계", 제 55회 물리학회 발표논문 (1987).
4. 나승유, 이상수, 새물리, vol.28, pp241-247 (1988).
5. S.Y. Rah, S.S. Lee, "Four Spherical Mirror Zoom Telescope Continuously Satisfying the Aplanat condition", Opt. Eng. 투고중.
6. J.U. Lee, S.S. Lee, Opt. Eng., vol.27, No 6, (1988).