

Flat Field Anastigmat 조건을 만족하는 3반사 망원경 광학계 설계

최세철 · 김현규 · 김연수

국방과학연구소

(1997년 3월 11일 받음)

가시광선 영역의 고분해능 3반사 망원경 광학계 설계를 위하여, 광학계의 기구적 제한사항을 만족함과 동시에 Flat Field Anastigmat조건을 만족하는 해를 구하는 초기설계 기법이 제시되었으며, 이를 기초로 프로그램을 작성하여 F/14.5, 구경 600 mm, 시야 $0.27^\circ \times 1.3^\circ$ 의 3반사 망원경광학계의 초기설계를 수행하였다. 초기 설계된 광학계의 최적화를 위하여 Code V를 사용하였으며, 그 결과로서 CCD의 모서리 부분 Field를 제외한 모든 Field에서 Nyquist Frequency에서의 MTF값이 0.5이상이었다.

I. 서 론

원격관측을 위한 망원경 광학계에 있어서 고분해능과 넓은 관측파장의 성능을 만족하기 위해서 주로 반사광학계를 사용하고 있는 추세이다. 대표적인 반사광학계로는 Ritchey Chretien 망원경 광학계와 같은 2반사광학계가 있다.^[1] 그러나 2반사광학계는 상면만곡이 매우 심하므로 천체망원경과 같이 관측 시야가 매우 좁은 경우에 국한하여 적용되고 있다. 따라서 관측 파장대역에 제한이 없고 시야도 비교적 넓은 망원경 광학계로 제시된 것이 3반사광학계이다.^[2]

3반사광학계는 굴절광학계에 비해 제작 및 조립이 어려우므로 70년대에는 주로 3차수차를 보정하는 이론적인 연구 결과를 위주로 발표되었다.^[3,4] 그러나 정밀 광학계 제작 기술과 CCD 제작 기술의 발전에 따라 3반사광학계의 설계 및 제작, 시험평가에 관한 많은 연구가 이루어져서, 최근에는 고분해능의 성능을 가짐과 동시에 가시광선 영역에서 적외선 영역까지 관측할 수 있는 3반사 망원경 광학계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[5,6] 3반사 망원경 광학계가 원거리 탐지 및 고분해능의 성능을 만족하려면 구경이 커야 하고 광 차단에 의한 MTF 성능 저하가 최소화되어야 한다. 반사경에 의한 광 차단을 피하기 위해서 여러 가지 형태의 광학계가 연구되었는데, 광 차단을 완전히 피한 것으로는 비축 3반사광학계가 있다.^[2,7] 이것은 사용 가능한 시야가 넓고 설계 파라메타의 수가 많아서 수차특성도 좋지만 입사 구경이 클 수록 제작과 조립이 어려운 것이 단점이다. 따라서 본 연구에서는 기본적인 광학계의 형태는 회전대칭형을 따르고 비축 Field와 평면거울(Fold Mirror)을 사용하므로써 광 차단을 최소화시킨 3반사 망원경 광학계 설계에 관해 논의하고자 한다.

시스템 성능 분석 및 사용 가능한 CCD의 제원을 기초로 F/14.5, 구경 600 mm, 유효초점거리 8710 mm, 시야 $0.27^\circ \times 1.3^\circ$ 의 4개의 밴드를 갖는 가시광선 영역의 3반사 망원경 광학계를 설계하였다(표 1 참조). 광학계의 초기설계를 위해서 3차수차 이론을 도입하였으며, 효율적인 초기설계를 위해 3반사광학계의 Flat-Field Anastigmat조건을 만족함과 동시에 기구적

표 1. 3반사 망원경 광학계의 설계 제원

구 분	제 원
F/#	14.5
FOV	$0.27^\circ \times 1.3^\circ$
EFL	8710 mm
구 경	600 mm
관측파장	
- Panchromatic	0.45~0.9 m
- B1	0.52~0.6 m
- B2	0.63~0.69 m
- B3	0.76~0.9 m

인 제한 조건을 만족하면서 왜곡수차가 최소가 되는 해를 찾는 알고리즘을 개발하여 FORTRAN언어로 프로그램을 작성하였다. 이렇게 작성된 프로그램을 이용하여 초기설계치를 구하고 광학 성능을 보았다. 그 결과로서 수차의 고차항에 의한 비점수차가 여전히 남아있었지만 시야 1.3° 이내에서 대단히 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 문제는 실제로 사용하고 자 하는 시야를 좀더 확장할 경우 시야의 가장자리 부분에 남아있는 수차가 크게 작용하기 때문에 이를 시야 중심으로 적당히 분산시켜서 전체 시야에 대해서 만족할 만한 결과를 얻어야만 한다. 이를 위해서 광학계 설계 프로그램인 Code V를 사용하여 최적화를 수행하였다.

II. 3반사광학계의 Flat Field Anastigmat 조건

2.1. 3반사광학계의 3차수차

그림 1은 물체가 무한대에 있고 유한한 거리에 초점을 맺는 3반사광학계의 기본적인 모양이다. 3개의 반사경을 모두 원주 곡면화했을 때 구해지는 3차수차는^[8]

$$\bullet \text{ 구면수차(Spherical Aberration)}$$

$$S_I = \frac{1}{4} h_1 u_3^3 \left\{ -m_3^3 s_{1f} + a_1 a_2 s_{1r} - m_2^3 m_3^3 \kappa_1 + a_1 (m_2 - 1)^3 m_3^3 \kappa_2 + a_1 a_2 (m_3 - 1)^3 \kappa_3 \right\} \quad (1)$$

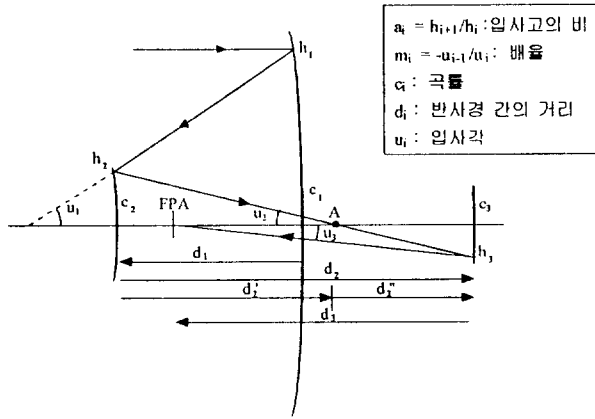


그림 1. 3반사광학계의 기본 구조와 설계 파라메타

● 코마(Coma)

$$S_{II} = \frac{1}{4} H u_3^2 \left\{ m_3^2 s_{2f} + s_{2r} + Q s_{1r} + \frac{(a_1 - 1)(m_2 - 1)^3 m_3^2}{m_2} \kappa_2 + Q (m_3 - 1)^3 \kappa_3 \right\} \quad (2)$$

● 비점수차(Astigmatism)

$$S_{III} = \frac{H^2 u_3}{4 h_1} \left\{ -m_3 s_{3f} + \frac{s_{3r} + 2Q s_{2r} + Q^2 s_{1r}}{a_1 a_2} + \frac{(a_1 - 1)^2 (m_2 - 1)^3 m_3}{a_1 m_2^2} \kappa_2 + Q^2 \frac{(m_3 - 1)^3}{a_1 a_2} \kappa_3 \right\} \quad (3)$$

● Petzval 상면만곡

$$S_{IV} = \frac{H^2 u_3}{4 h_1} \left\{ -m_3 s_{4f} + \frac{s_{4r}}{a_1 a_2} \right\} \quad (4)$$

● 왜곡수차

$$S_V = \frac{H^3}{4 h_1^2} \left\{ s_{5f} + \frac{Q (3s_{3r} + s_{4r}) + 3Q^2 s_{2r} + Q^3 s_{1r}}{a_1^2 a_2^2} + \frac{(a_1 - 1)^3 (m_2 - 1)^3}{a_1^2 m_2^3} \kappa_2 + Q^3 \frac{(m_3 - 1)^3}{a_1^2 a_2^2} \kappa_3 \right\} \quad (5)$$

과 같이 표현된다. 여기서, m_i 는 각 반사경의 배율이고, a_i 는 반사경 간의 입사고의 비이며, κ_i 는 각 반사경의 원추계수이고, $s_{1f}, s_{2f}, s_{3f}, s_{4f}, s_{5f}$ 는 전반 2반사경의 구면 만에 의한 수차항으로서 아래 식(6)~(10)으로 주어지고, $s_{1r}, s_{2r}, s_{3r}, s_{4r}$ 는 제 3반사경의 구면 만에 의한 수차항으로서 식(11)~(14)으로 주어진다. 또한 Q 는 조리개의 이동에 의한 수차보정항으로서 식(15)와 같이 주어진다. 즉,

$$s_{1f} = m_2^2 + a_1 (1 + m_2)^2 (1 - m_2) \quad (6)$$

$$s_{2f} = -2m_2^2 \frac{(1 - m_2^2) \{ m_2 - 1 + (1 + m_2) a_1 \}}{m_2} \quad (7)$$

$$s_{3f} = 4m_2 + \frac{(1 - m_2) \{ m_2 - 1 + (1 + m_2) a_1 \}^2}{m_2^2 a_1} \quad (8)$$

$$s_{4f} = 4 \left(-m_2 + \frac{m_2 - 1}{a_1} \right) \quad (9)$$

$$s_{5f} = \frac{1 - m_2}{1 + m_2} \times \frac{[4m_2^2 - \{ m_2 - 1 + (1 + m_2) a_1 \}^2] \{ m_2 - 1 + (1 + m_2) a_1 \}}{a_1^2 m_2^3} \quad (10)$$

$$s_{1r} = -(1 + m_3)^2 (1 - m_3) \quad (11)$$

$$s_{2r} = -2(1 - m_3^2) \quad (12)$$

$$s_{3r} = -4(1 - m_3) \quad (13)$$

$$s_{4r} = 4(1 - m_3) \quad (14)$$

$$Q = \frac{a_2 (a_1 - 1 + m_2) - m_2}{m_2 m_3} \quad (15)$$

으로 주어진다.

2.2. 원추곡면 3반사광학계의 Flat Field Anastigmat조건

앞의 2.1절에서 표현된 3반사광학계의 3차수차를 이용하여 Flat Field Anastigmat조건을 구해 보자. 3반사광학계의 Flat Field Anastigmat조건은 식(1)~(4)의 $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}$ 가 0인 경우를 말하며 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다. 즉,

$$S_I = \frac{1}{4} h_1 u_3^3 \{ -m_3^3 s_{1f} + a_1 a_2 s_{1r} - m_2^3 m_3^3 \kappa_1 + a_1 (m_2 - 1)^3 m_3^3 \kappa_2 + a_1 a_2 (m_3 - 1)^3 \kappa_3 \} = 0 \quad (16)$$

$$S_{II} = \frac{1}{4} H u_3^2 \left\{ m_3^2 s_{2f} + s_{2r} + Q s_{1r} + \frac{(a_1 - 1)(m_2 - 1)^3 m_2^2}{m_2} \kappa_2 + Q (m_3 - 1)^3 \kappa_3 \right\} = 0 \quad (17)$$

$$S_{III} = \frac{H^2 u_3}{4 h_1} \left\{ -m_3 s_{3f} + \frac{s_{3r} + 2Q s_{2r} + Q^2 s_{1r}}{a_1 a_2} + \frac{(a_1 - 1)^2 (m_2 - 1)^3 m_3}{a_1 m_2^2} \kappa_2 + Q^2 \frac{(m_3 - 1)^3}{a_1 a_2} \kappa_3 \right\} = 0 \quad (18)$$

$$S_{IV} = \frac{H^2 u_3}{4 h_1} \left\{ -m_3 s_{4f} + \frac{s_{4r}}{a_1 a_2} \right\} = 0 \quad (19)$$

과 같이 쓸 수 있으며, 먼저 식(19)의 $S_{IV}=0$ 인 조건으로부터

$$a_2 = \frac{s_{4r}}{m_3 s_{4f} a_1} \quad (20)$$

의 해를 구할 수 있다. 식(20)을 식(15)에 대입하면,

$$Q = \frac{s_{4r} (a_1 - 1 + m_2)}{m_2 m_3^2 s_{4f} a_1} - \frac{1}{m_3} \quad (21)$$

와 같이 m_2, m_3, a_1 만의 함수로 표현된다. 또한, 식(20)을 식(16), (17), (18)에 대입하여 정리하면, 원추계수 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ 에 대해서 선형 연립방정식으로 되어 있음을 알 수 있으며 이것을 다음과 같이 간단한 형태로 표현하면,

$$\begin{cases} a_{11}\kappa_1 + a_{12}\kappa_2 + a_{13}\kappa_3 = b_1 \\ a_{21}\kappa_1 + a_{22}\kappa_2 + a_{23}\kappa_3 = b_2 \\ a_{31}\kappa_1 + a_{32}\kappa_2 + a_{33}\kappa_3 = b_3 \end{cases} \quad (22)$$

이고, 여기서

$$\begin{aligned} a_{11} &= -m_2^3 m_3^3, & a_{12} &= a_1(m_2-1)^3 m_3^3, & a_{13} &= \frac{s_{4r}(m_3-1)^3}{m_3 s_{4f}} \\ b_1 &= m_3^3 s_{1f} - \frac{s_{1r} s_{4r}}{m_3 s_{4f}}, \\ a_{21} &= 0, & a_{22} &= \frac{(a_1-1)(m_2-1)^3 m_3^2}{m_2}, & a_{23} &= Q(m_3-1)^3 \\ b_2 &= -(m_3^2 s_{2f} + s_{2r} + Q s_{1r}) \\ a_{31} &= 0, & a_{32} &= \frac{(a_1-1)^2(m_2-1)^3 m_3}{a_1 m_2^2}, & a_{33} &= \frac{Q^2 m_3 s_{4f}(m_3-1)^3}{s_{4r}} \\ b_3 &= m_3 s_{3f} - \frac{m_3 s_{4f}}{s_{4r}}(s_{3r} + 2Q s_{2r} + Q^2 s_{1r}) \end{aligned}$$

이다. 또한, 위의 식(22)를 행렬식으로 표현하면,

$$\bar{A} \cdot \bar{K} = \bar{B} \quad (23)$$

이므로, 연립방정식의 해 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ 는 각각

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= \frac{\begin{vmatrix} b_1 a_{12} a_{13} \\ b_2 a_{22} a_{23} \\ b_3 a_{32} a_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} a_{12} a_{13} \\ a_{21} a_{22} a_{23} \\ a_{31} a_{32} a_{33} \end{vmatrix}}, & \kappa_2 &= \frac{\begin{vmatrix} a_{11} b_1 a_{13} \\ a_{21} b_2 a_{23} \\ a_{31} b_3 a_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} a_{12} a_{13} \\ a_{21} a_{22} a_{23} \\ a_{31} a_{32} a_{33} \end{vmatrix}}, \\ \kappa_3 &= \frac{\begin{vmatrix} a_{11} a_{12} b_1 \\ a_{21} a_{22} b_2 \\ a_{31} a_{32} b_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} a_{12} a_{13} \\ a_{21} a_{22} a_{23} \\ a_{31} a_{32} a_{33} \end{vmatrix}}, & & \text{(단, } \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \neq 0 \text{ 일 때)} \end{aligned} \quad (24)$$

이다. 따라서 3반사광학계의 Flat Field Anastigmat조건을 만족하는 해는 식(20)과 식(24)에 의해 결정된다.

위의 식(20)과 (24)는 제 2반사경의 배율 m_2 , 제 3반사경의 배율 m_3 , 제 1반사경과 제 2반사경의 입사각의 비 a_1 의 함수이므로, $\det|\bar{A}| \neq 0$ 인 조건만 만족하면 모든 m_2, m_3, a_1 에 대해서 Flat Field Anastigmat해가 존재함을 알 수 있다. 그러나, 그 중에는 기구적 구성 측면에서 혹은 광학계의 수차 측면에

서 초기설계치로 사용할 수 없는 해가 존재한다. 예를 들면, Flat Field Anastigmat조건은 만족하지만 기구적으로 구성했을 때 광학계의 길이가 너무 길어서 제작이 불가능한 경우와 보정되지 않은 왜곡수차의 값이 너무 커서 광학계의 수차특성을 만족하지 않는 경우 등이다. 그러므로 그 수많은 해 중에서 하나의 최적인 해를 선택하여 초기설계치로 활용한다는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 많은 시간이 요구된다. 따라서 Flat Field Anastigmat해를 찾고 최적의 초기설계치를 선택하는 과정을 쉽게 수행할 수 있는 프로그램을 작성하였다.

III. 3반사광학계 초기 설계

3.1. 광학계 설계 제한 조건

앞의 그림 1과 같은 광학 구조는 반사경 자체의 광차단에 의해 광학계 성능에 제한을 주므로 그림 2와 같이 평면거울을 사용함과 동시에 비축 Field를 사용하면 광차단을 최소화시킬 수 있다. 그림 2는 설계하고자 하는 3반사광학계의 형태이다.

그러면 이제부터 표 1의 광학계 요구사항에 의해 설정된 광학계 설계변수들을 기초로 하여 그림 2와 같은 광학계 형태를 갖는 3반사광학계를 설계하여 보자. 먼저 그림 2와 같은 형태의 광학계 설계에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 반사경에 의한 광차단을 피하면서 전체적인 광학계의 길이를 짧게 설계하여야 하며 또한 보정되지 않은 왜곡수차의 값을 허용치 이내($S_5 < 0.1$: 5% 이하)로 하여야 한다는 점이다. 따라서 제 1반사경과 제 2반사경 간의 거리(d_1)는 광학계의 구조적인 문제와 수차특성을 만족하는 범위 내에서 짧을 수

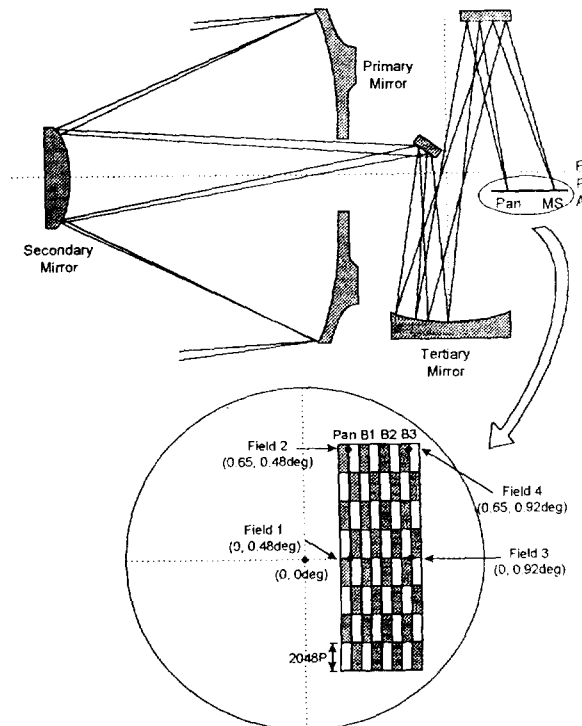


그림 2. 비축 Field와 평면거울을 사용한 3반사광학계와 초점면 배열에서 Field의 정의

록 좋다. 또한 평면거울은 광학계의 광 차단을 피하기 위해서 기본적으로 제1반사경 뒤에 위치시켜야 하며, 제1반사경으로부터 너무 멀리 떨어지면 전체적인 광학계의 길이가 길어지므로 부적당하다. 따라서 가능하면 평면거울은 제1반사경에 가깝게 위치시키되 제1반사경을 지지하는 지지구조물 뒤에 위치시켜야 한다. 그리고 제3반사경과 초점면의 위치는 경통을 벗어나면 곤란하므로 경통 내에 위치할 수 있도록 설계하여야 하며, 제3반사경의 위치는 광 차단을 피하기 쉽도록 가능하면 평면거울에서 멀리 위치시켜야 한다. 위의 설계 제한 조건들을 정리하면 다음과 같다.

- $S_v < 0.1$: 왜곡수차
- $550 < d_1 < 700$: 제1반사경과 제2반사경 간의 거리
- $d_3 < 550$: 후면초점거리(Back Focal Length)
- $150 < d_1 + d_2 < 200$: 제1반사경과 평면거울 간의 거리
- $300 < d_2 < 350$: 평면거울과 제 3반사경 간의 거리

위의 제한 조건을 초기설계 프로그램에 적용하여 F/14.5, 구경 600 mm의 3반사광학계에 대한 Flat Field Anastigmat조건을 만족하는 해는 존재하였지만 보정되지 않은 왜곡수차의 값이 너무 커서(5% 이상) 초기설계치로 활용하기에는 부적당하였다. 따라서 후면초점거리의 제한 범위를 50 mm단위로 증가시키면서 가장 작은 왜곡수차의 값을 갖는 Flat Field Anastigmat해를 찾아서 후면초점거리의 제한 범위와 최소 왜곡수차와의 연관성을 조사하였더니 그림 3과 같이 후면초점거리가 증가할 수록 왜곡수차의 값이 작아지는 것을 알 수 있었다. 이와 반대로 후면초점거리의 제한 범위에 따른 해의 갯수는 점점 증가하였다. 그러나 후면초점거리의 제한 범위가 900 mm 이상에서는 최소 왜곡수차의 값과 해의 갯수 모두 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 왜곡수차가 앞에서 정한 기준값(5% 이하)보다 작은 초기설계치를 얻기 위해서는 후면초점거리의 제한 범위를 900 mm로 하는 것이 가장 효율적이라고 말할 수 있다.

이와 같이 후면초점거리를 550 mm 이상의 값을 허용한다는 것은 초점면이 경통의 구경을 벗어나서 위치한다는 것을 의미하므로, 이것을 피하기 위해서는 평면거울을 한 개 더 추가하여 광경로를 경통 내부로 바꾸어 주어야 한다. 그러므로 광학계의 제작 및 조립이 보다 어려워지고 제작비도 더 증가할 것

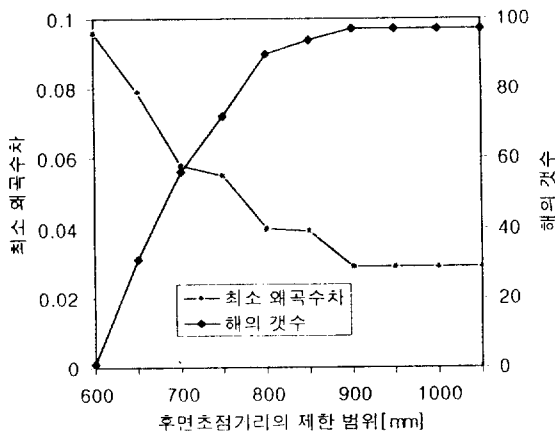


그림 3. 후면초점거리의 제한 범위에 따른 최소 왜곡수차와 해의 갯수

으로 예측되지만 광학계의 성능면에서는 평면거울을 한 개 더 추가하는 것이 유리하다. 지금까지의 연구 결과로는 이에 대한 판단이 어려우므로 나중에 미루고 여기서는 평면거울을 두 개 사용한 3반사광학계의 설계에 대해서 언급하기로 한다.

3.2. 배율에 따른 해의 존재 범위 및 왜곡수차의 특성

본 절에서는 초기설계 프로그램에 적용된 알고리즘을 기초로 Flat Field Anastigmat조건을 만족하는 해를 찾았을 때, 배율에 따른 해의 존재 범위와 왜곡수차의 특성에 대해 설명하고자 한다.

그림 4는 제2반사경의 배율과 제3반사경의 배율의 변화에 따른 해의 존재 범위를 보이고 있다. 그림에서 검게 표시된 영역은 Flat Field Anastigmat조건을 만족하는 해 중에서 앞의 3.1절의 설계 제한 조건을 만족하는 해를 나타낸 것으로서, 제2반사경의 배율은 약 4.8~6의 범위에 있으며 제3반사경의 배율은 약 -2.5~-1.8의 범위에 있음을 알 수 있다. 해의 존재 범위는 설계 제한 조건을 완화하면 점점 넓어질 것이다. 그림에서 화살표 방향은 왜곡수차의 감소 방향을 나타낸 것으로서 제2반사경의 배율이 작을 수록, 제3반사경의 배율이 (-)방향으로 커질 수록 왜곡수차의 값이 작아진다. 이와 같은 사실은 그림 5에서 잘 보이고 있다.

그림 5는 배율에 따른 왜곡수차의 변화를 나타내고 있는데,

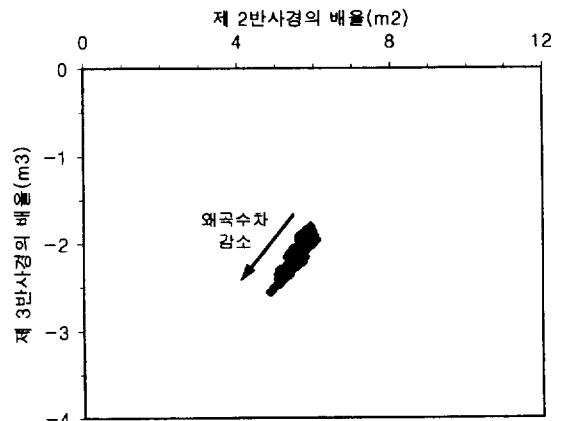


그림 4. 배율에 따른 해의 존재 범위

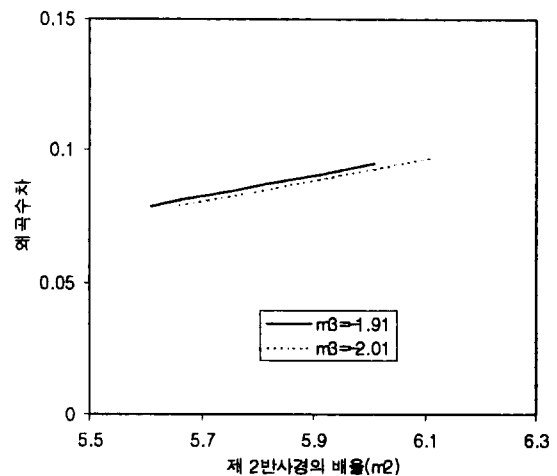


그림 5. 배율에 따른 왜곡수차의 특성

그래프에서 제 3반사경의 배율이 -1.91일 때와 -2.01일 때의 두 가지 경우 제3반사경의 배율이 -2.01일 때의 왜곡수차 값이 더 작은 경향을 보이고 있으며 두 경우 모두 제2반사경의 배율이 작아질 수록 왜곡수차의 값이 작아짐을 알 수 있다. 즉, 제2반사경의 배율이 작을 수록, 제3반사경의 배율이 (-)방향으로 커질 수록 왜곡수차는 작아진다.

위의 사실은 프로그램의 검증 측면에서 매우 중요한 정보를 제공하고 있다. 초기설계 프로그램에서는 배율을 변화시킬 때 적당한 범위를 정해주고 순차적이고 일정한 간격으로 배율을 변화시키면서 왜곡수차가 가장 작은 해를 찾아내는 간단한 알고리즘을 사용하고 있다. 그러나 만약 구하고자 하는 최소치 외에 국부 최소치(Local Minimum)가 존재한다면 초기설계 프로그램에 사용된 알고리즘으로는 전체의 최소치(Global Minimum)를 찾기 힘들다. 하지만, 배율에 따른 왜곡수차의 변화는 그림 5와 같이 간단한 경향을 보이므로 초기설계에 사용된 알고리즘으로도 충분하다고 판단된다. 또한 최소치가 존재하는 경향을 미리 파악하므로써 유사 3반사광학계의 설계에도 그 결과를 예측할 수 있으므로 설계의 오류에 따른 시간 낭비를 줄일 수 있다.

3.3. 초기설계 결과

표 2는 3반사광학계의 초기설계 프로그램을 이용하여 구한 초기설계치를 보이고 있으며, 광학계 설계제원(유효구경, 유효초점거리, 시야)에 따라 출력된 각 반사경의 원추계수, 곡률반경, 각 반사경 간의 거리를 나타낸 것이다. 이러한 출력값은 3반사광학계의 Flat Field Anastigmat조건과 앞의 3.1절의 설계 제한 조건을 만족하는 해 중에서 최소 왜곡수차의 값을 갖는 경우에 해당하는 값들이다.

초기설계된 3반사광학계의 수차특성을 평가하기 위해서 앞의 그림 2와 같이 4개의 Field를 정의하였다. Field 1은 CCD 초점면 배열 상의 Panchromatic밴드의 중앙에 해당하는 것으로서 그 각은 (0°, 0.48°)이고, Field 2는 Panchromatic밴드의 가장자리에 해당하는 것으로서 그 각은 (0.65°, 0.48°)이다. 또한 Field 3는 B3밴드의 중앙에 해당하는 것으로서 그 각은 (0°, 0.92°)이고, Field 4는 B3밴드의 가장자리에 해당하는 것으로서 그 각은 (0.65°, 0.92°)이다. 따라서 앞으로 계산되어

진 수차특성은 위의 4개의 Field를 기준으로 언급될 것이다.

그림 6은 초기설계 3반사광학계의 Field에 따른 광선수차(Ray Aberration)를 나타낸 것으로서, 앞의 그림 2에서 정의된 4개의 Field에 대해서 계산한 결과이다. 이 결과는 근사 없이 계산된 것으로서 그래프에서 x축은 입사동(Entrance Pupil)에 입사하는 광선의 상대적인 위치를, y축은 수차의 크기를 나타내고 있다. Field 2까지는 수차가 0.025 mm내에 있으며, Field 각이 커질 수록 수차특성이 나빠짐을 알 수 있다. 그림 7은 초기설계 3반사광학계의 비점수차와 왜곡수차에 대한 그

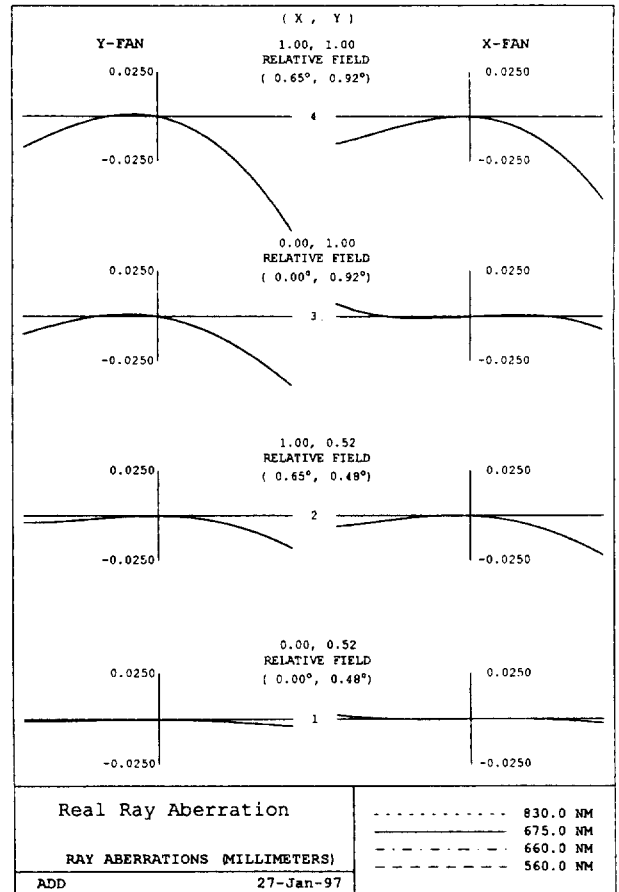


그림 6. 초기설계 3반사광학계의 Field에 따른 광선수차

표 2. 3반사광학계 설계제원에 따른 초기설계치

입력	유효구경	600 mm
	유효초점거리	8710 mm
	시야	1.3 deg
원추계수	cc1	-0.9839013
	cc2	-2.1616440
	cc3	-0.6252041
출력	곡률반경	r1=-1400.1467 r2=-370.2046 r3=-503.2718
	거리	d1=-553.0579 d2=1064.427 d3=-895.8213

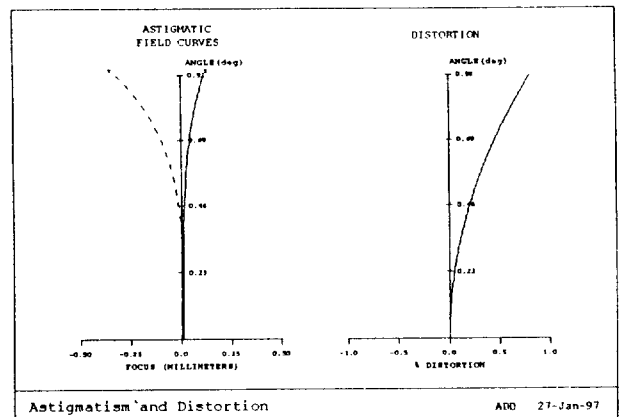


그림 7. 초기설계 3반사광학계의 비점수차와 왜곡수차

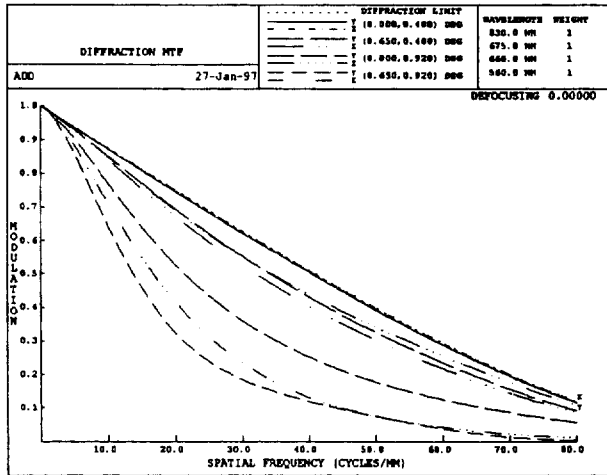


그림 8. 초기설계 3반사광학계의 회절 MTF특성

래프이다. 좌측 그래프에서 y축은 Field 각, x축은 비점수차의 양을 나타낸 것으로, Field 각이 커질 수록 비점수차의 크기는 커진다. 우측 그래프의 y축은 Field 각, x축은 왜곡수차의 백분율(%)을 나타낸 것으로, 0.92°에서 1%이내의 값을 가졌다. 그림 8은 회절 MTF를 나타낸 것으로 Field 1과 Field 2는 회절한계에 가까우나 Field 3과 Field 4는 Field 1, Field 2에 비해 다소 MTF값이 떨어짐을 알 수 있다. 참고로 Field 1과 Field 2는 Nyquist Frequency에서 0.4이상의 값을 나타내고 있다.

이상에서 간단히 살펴본 바와 같이 초기설계된 3반사광학계의 수차특성은 Panchromatic밴드의 경우에는 거의 회절한계에 가깝게 설계되었음을 알 수 있다. 따라서 초기설계 프로그램을 이용한 3반사광학계의 설계는 매우 효율적이었고, 약간의 수정만으로도 목적에 맞는 3반사광학계의 설계가 가능할 것으로 기대된다.

IV. 최적화 및 설계 결과

위에서 언급한 바와 같이 초기설계 결과는 Panchromatic밴드에 한하여 거의 회절한계 수준으로 설계되었으므로 상대적으로 수차특성이 떨어지는 Field 3과 Field 4에 대해서 시스템 사양에 맞도록 수차특성을 향상시킬 필요가 있다. 이를 위해 광학계 설계 S/W인 Code-V를 사용하여 최적화 설계를 수행하였다. Code-V에서 최적화 기법은 먼저 변수를 설정하고 임의의 제한조건(Constraint)내에서 오차함수(Error Function)를 줄여나가는 것을 말하는데, 변수와 제한조건의 설정에 따라 매우 상이한 결과가 나타날 수 있으므로 변수와 제한조건의 설정에 주의하여야 한다.

앞에서 구한 초기설계 결과는 시스템 F/#뿐만 아니라 기구적 제한조건을 만족하도록 설계되었으므로 반사경의 곡률반경과 반사경 간의 거리는 가능하면 변화시키지 않는 것이 좋다. 따라서 세 개의 원추계수를 변수로하여 Field 1, Field 2, Field 3, Field 4에 적당히 가중치를 주고 오차함수(Error Function)를 줄여나가는 방법을 사용하여 최적화 설계를 수행

표 3. 최종 설계 결과

구분	설계 값
원추계수	cc1=-0.984425 cc2=-2.166480 cc3=-0.622220
곡률반경	r1=-1400.1467 r2=-370.2046 r3=-503.2718
거리	d1=-553.0579 d2=1064.427 d3=-895.7891

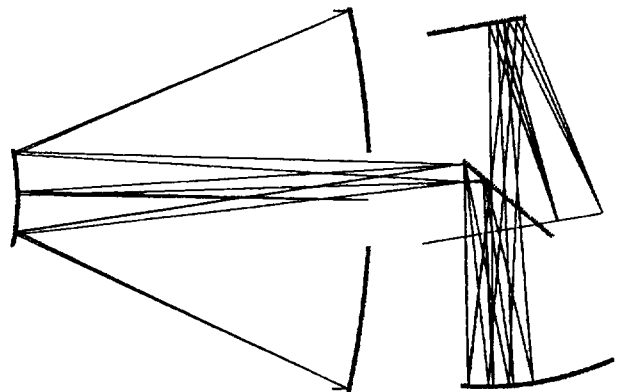


그림 9. 최종 설계된 3반사광학계의 형태

하였다. 여기서 원추계수의 변화는 식(1)~식(5)에서도 알 수 있듯이 구면수차, 코마, 비점수차, 왜곡수차에는 영향을 주지만 Petzval 상면만곡에는 영향을 주지 않는다. 그러므로 Petzval 상면만곡의 결과는 초기설계 결과와 일치함을 예측할 수 있다.

표 3은 최적화 과정을 통하여 설계된 3반사광학계의 최종 결과이다. 표 2의 초기설계 결과와 비교하면 원추계수의 값만 약간 달라진 것을 알 수 있다. 또한 그림 9는 최종 설계된 광학계 형태이다.

그러면 이제부터 최적화 과정을 통하여 최종 설계된 3반사광학계의 수차특성과 성능에 대해서 알아보기로 하자. 그림 10은 근사없이 계산된 광선수차이다. 그림 6의 초기설계 결과와 비교하면 Field 1을 제외하고 조금씩 수차특성이 향상됨을 볼 수 있다. 이는 초기설계에서 이미 Field 1의 수차특성이 회절한계를 나타냈으므로 나머지 Field에 더 가중치를 두고 최적화 과정을 수행한 것에 기인한다. 그림 11은 최종 설계된 3반사광학계의 비점수차와 왜곡수차이다. 그림 7의 초기설계 결과와 비교할 때 왜곡수차는 거의 동일하나 비점수차의 특성은 많이 향상되었음을 알 수 있다. 그림 12는 초점면에서의 Spot Diagram이다. Field 4에 해당하는 Spot의 크기는 Field 1, Field 2, Field 3에 비해 크음을 알 수 있다. 이것은 그림 10의 광선수차의 특성파도 일치하는 결과를 보여준다.

그림 13-(a)는 각 Field에 대한 회절 MTF특성을 나타낸 것으로, 특히 Field 1, Field 2, Field 3는 Nyquist Frequency(38.5 cycles/mm)에서 0.5 이상의 값을 가짐으로써 거의 회절한계에

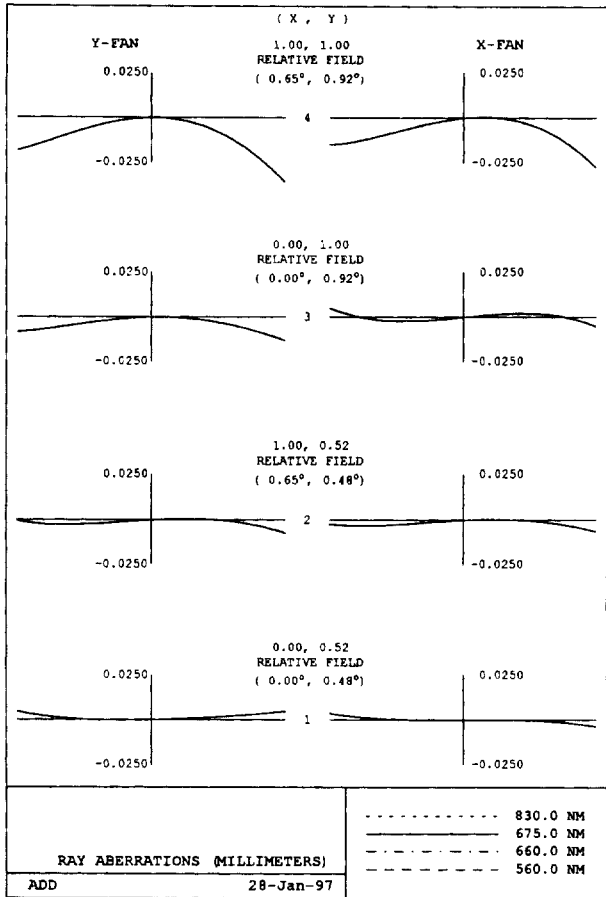


그림 10. 최종 설계된 3반사광학계의 광선수차

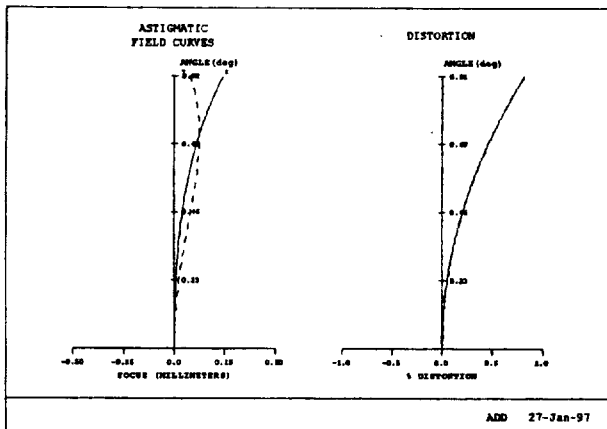


그림 11. 최종 설계된 3반사광학계의 비점수차와 왜곡수차

가까우나 Field 4는 다소 특성이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 13-(b)는 광축상의 초점면 이동에 따른 Nyquist Frequency에서의 회절 MTF값의 변화를 나타낸 것으로 초점면이 광축상으로 0.1 mm이동에 따라 MTF값의 변화는 아주 작음을 알 수 있다. 이러한 사실은 실제 광학계 조립시 초점면이 광축상으로 0.1 mm정도 벗어나도 성능의 저하가 크지 않다는 것을 의미한다.

위에서 살펴본 바와 같이 상대적으로 Field 4에 비해 시야 각이 작은 Field 1, Field 2, Field 3는 거의 회절한계 수준으로

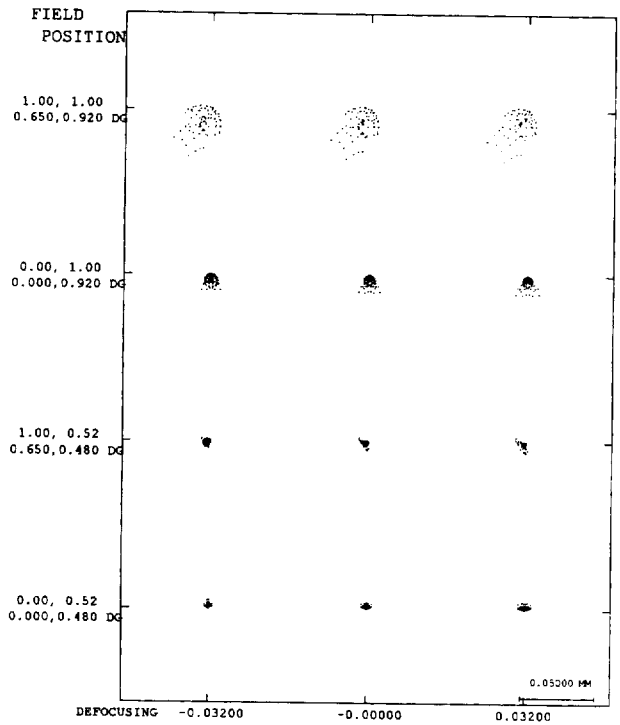
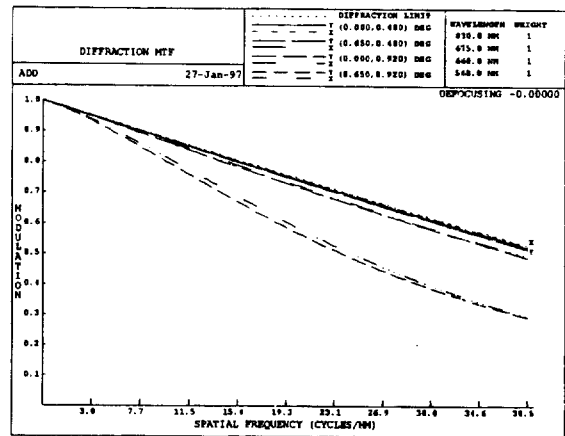
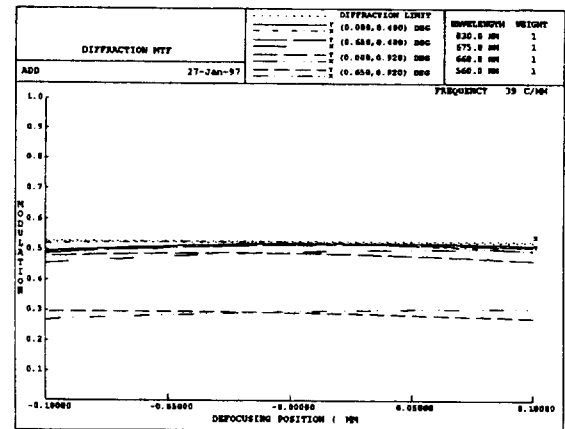


그림 12. Spot Diagram



(a) 공간 주파수에 따른 MTF특성



(b) 초점면 이동에 따른 MTF특성

그림 13. 최종 설계된 3반사광학계의 회절 MTF특성

설계되었지만 B3밴드의 가장자리인 Field 4는 회절한계의 약 1/2수준으로 설계되었다고 말할 수 있다.

V. 결 론

F/14.5, 구경 600 mm, 시야 $0.27^\circ \times 1.3^\circ$, 관측과장 0.45~0.9 m의 CCD를 사용하는 3반사 망원경 광학계 설계를 위해서, 회절대칭계의 3반사광학계에 대하여 3차수차를 근거로 한 Flat Field Anastigmat조건을 구하였으며, 이를 평면거울과 비축 Field를 사용하는 3반사광학계에 적용하여 Flat Field Anastigmat조건을 만족함과 동시에 기구적 제한 사항과 왜곡 수차의 허용치를 만족하는 최적의 초기설계치를 찾는 알고리즘을 개발하여 초기설계 프로그램에 적용하였다. 또한 초기 설계된 3반사광학계의 성능 향상을 위해 Code-V를 사용하여 각 Field에 대한 가중치(Weighting Factor)를 조절하는 방법으로 최적화하였다.

초기설계 프로그램의 기본적인 알고리즘은 F/#, 구경, 유효 초점거리, 시야의 광학계 설계제원을 입력값으로 하여 3반사 광학계의 Flat Field Anastigmat조건과 기구적인 제한사항을 만족하는 해 중에서 보정되지 않은 왜곡수차가 최소인 해를 초기설계치로 결정하는 것으로서, 초기설계치에 대한 해의 적절성을 조사하기 위해 기구적인 제한범위 내에서 제2반사경과 제3반사경의 배율에 따른 왜곡수차의 특성과 후면초점 거리에 따른 왜곡수차의 특성을 조사하였다. 초기설계 프로그램으로 얻은 초기설계치는 Field 1과 Field 2에 대해서 거의 회절한계를 만족하는 수차특성을 보였으며, 최적화 설계를

통해 얻은 최종 설계 결과는 Panchromatic밴드의 경우 Nyquist Frequency에서 0.5이상의 MTF성능을 보였고, B3밴드의 경우 Field중앙에서는 Nyquist Frequency에서 0.5, Field 가장자리에서 0.3정도의 MTF성능을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] W.B. Wetherell, "General Analysis of Aplanatic Cassegrainian, Gregorian, and Schwartzschild Telescope," *Appl. Opt.*, **11**, 2817(1972).
- [2] R. Geyl, "Design and Fabrication of a Three Mirror Flat Field Anastigmat for High Resolution Earth Observation," *SPIE Vol.* **2210**, 739 (1994).
- [3] D. Korsch, "Closed Form Solution for Three-Mirror Telescopes, Corrected for Spherical Aberration, Coma, Astigmatism, and Field Curvature," *Applied Optics*, **11**(12), 2986 (1972).
- [4] P. N. Robb, "Three-Mirror Telescopes : Design and Optimization," *Applied Optics*, **17**(17), 2677 (1978).
- [5] K. Shu, "Optical Design For a Visible Through Infrared Multi-Band Imaging System," submitted to SPIE.
- [6] 이 종웅, 홍 경희, 권 우근, "적외선 및 가시광선 결상용 3반사망원경계의 설계," *한국광학회지*, **7**(3), 183 (1996).
- [7] D. Korsch, "Design and Optimization Technique for Three-Mirror Telescopes," *Applied Optics*, **19**(21), 3640 (1980).
- [8] 오 승경, "Aplanat 조건을 만족하는 3반사경계에 관한 연구," 석사학위논문, 청주대 (1995)

Optical design of flat field anastigmatic three-mirror telescope

Se Chol Choi, Hyun Kyu Kim and Yeon Soo Kim
Agency for Defense Development, Taejon 305-600, Korea

(Received : March 11, 1997)

To design a high resolution three-mirror telescope for visible spectral region, initial design technique based on the generation of flat field anastigmatic solutions limited by mechanical structure was proposed. An initial design of the three-mirror telescope that features relatively high focal ratio(F/14.5), large aperture diameter(600 mm), and squared field of view($0.27^\circ \times 1.3^\circ$) was done using an initial design program. Code V was used to optimize the initially designed optical system. As a result, MTF value of the telescope was about 0.5 at Nyquist frequency in each field except for the edge of the CCD.