

적외선 및 가시광선 결상용 3반사망원경계의 설계*

이 종 응

청주대학교 광학공학과

홍 경 희

육군사관학교 물리학과

권 우 근

국방과학연구소

(1996년 4월 2일 받음)

적외선, 가시광선 겸용의 3반사망원경계를 설계하기 위하여 형상설계법 및 3차수차의 보정방법이 연구되었다. 적외선용의 광학계는 3반사경계만으로 구성되었으며, 원추곡면화를 통하여 구면수차, 코마, 비점수차를 보정하였다. 가시광선용의 광학계는 적외선용의 3반사경계의 상면앞에 보정렌즈를 추가하여 상면만곡을 보정하였다. 설계된 3반사망원경계는 파장 $10\ \mu\text{m}$ 에서는 시계 2.4° 내에서 회절한계의 결상 성능을 가지고 있다. 가시광선대역의 단과장에 대한 rms spot size는 3° 시계내에서 $25\ \mu\text{m}$ 이하이며, CCD의 사용에 적합하도록 flat field 조건을 만족하고 있다.

1. 서 론

반사경계는 색수차가 없고 대구경의 광학계의 제작이 쉬우므로 망원경용의 광학계로 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 주경의 직경이 15 inch 이고 F-수가 8인 적외선, 가시광선 겸용의 3반사망원경계를 설계하였다. 이 망원경은 파장 $10\ \mu\text{m}$ 의 적외선 대역에서는 시계각 2.4° 까지 회절한계의 결상 성능을 가지며, 가시광선 대역에서는 시계각 3° 까지 spot size가 $20\ \mu\text{m}$ 이하이고 CCD의 사용에 적합하도록 flat field 조건을 만족시킬 것이 요구되고 있다.

반사망원경계는 반사경의 배치방법에 따라 반사경이 광축상에 회절대칭성을 유지하면서 일렬로 배치된 centered system, 광축에 대하여 회절대칭적으로 배치된 반사경의 일부만을 사용하는 형태의 conditionally decentered system, 반사경이 비회절대칭적으로 배치된 decentered system으로 구분되며,^[1] 그림 1에 각 경우의 예를 나타내었다. Centered system은 F-수가 크고 0.5°

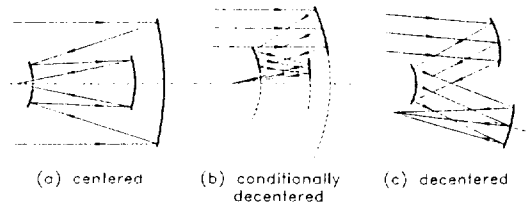


그림 1. 반사경의 배치방법.

이하의 작은 시계를 가지는 경우에 사용되며, decentered system은 F-수가 작고 시계각이 5° 보다 큰 경우에 주로 사용되고 있으며, conditionally decentered system은 그 중간 정도의 범위에서 사용되고 있다.^[1] 본 연구에서 설계된 3반사망원경계는 기본적으로는 centered system의 형태를 취하고 있으며, 광축을 따라 일렬로 배치하는 경우에 시계가 커지면 vignetting에 의한 광선의 손실이 많아지므로, pencil mirror와 folding mirror를 사용하여 광로를 변경시켜 그림 2와 같은 형태의 광학계를 구성하였다. 그림 2와 같은 형태의 광학계가 구성되기 위하여서는 반사경과 상점의 위치가 실제 구성이 가능한 범위에 있도록 선정되어야 하므로, 기초설계에서는 광학계의 형태를 먼저 설정하고, 원추곡면을 사용하여 수

*본 연구는 국방과학연구소의 기초연구비 지원에 의하여 수행된 것임(과제번호 ADD 94-1-2).

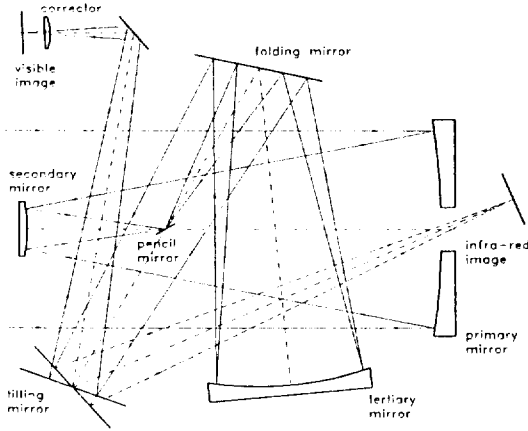


그림 2. Folding mirror를 사용한 적외선 가시광선 겸용의 3반사망원경계.

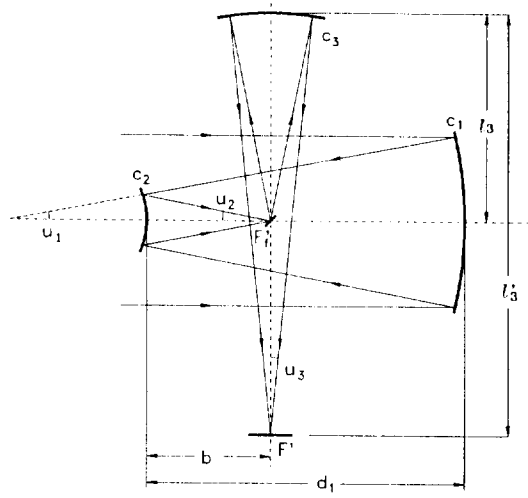


그림 3. 3반사경계의 형상설계 parameter.

차를 보정하였다.

3반사경계의 설계에 있어서 3면 모두 구면을 사용하는 3구면경계의 경우 3종의 3차수차가 보정되는 해는 존재하고 있지만 형태적으로 실용화에 적합한 해가 없었기 때문에^[2] 3면 모두 원추곡면을 사용하여 구면수차, 코마, 비점수차를 보정하였다. 3반사경계에서 3면 모두 원추곡면을 사용하여 4종의 3차수차(구면수차, 코마, 비점수차, 상면만곡)를 보정하는 방법은 1972년 D. Korsch^[3]와 1982년 N. N. Mikhel'son^[4]에 의하여 발표되었으며, 원추곡면만을 사용하여 4종의 3차수차가 보정된 3반사경계로는 1975년 D. Korsch가 발표한 회전대칭성 광학계이나 비축시계만을 사용하는 3반사경계^[5]가 있다. 본 연구에서 설계된 3반사경계는 시계가 3°로 비교적 크고, 설치공간을 최소화하기 위하여 그림 2와 같은 형태로 배치되었으며, 반사경계만으로 4종의 3차수차를 모두 보정하는 경우 Petzval 상면만곡의 보정조건이 반사경계의 형태를 제한하기 때문에 그림 2와 같은 형태의 해를 얻기 어렵다. 또한, 본 연구에서 설계된 반사경계는 시계각이 크기 때문에, 3차 비축수차가 보정된 경우에도 고차수차항의 영향이 크게 나타나 전체 시계에서 고르게 수차가 보정된 설계를 얻기 어려우며, 적외선 결상계의 경우에는 파장이 길어 회절한계가 크기 때문에 약간의 상면만곡은 허용되고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 면을 고려하여 3반사경계의 초기설계에서는 형태상으로 실용화가 가능한 3구면경계를 먼저 구성하였으며, 원추곡면계수(conic constant)를 변수로 하여 3차 구면수차, 코마, 비점수차를 보정하였다. 적외선용 광학계의 최적화는 초기설계의 형상이 크게 변화하지 않도록 제한하

였다. 가시광선 대역에서는 적외선의 경우보다 파장이 짧아 수차의 영향이 크게 나타나고 시계가 크기 때문에 상면 가까이 보정렌즈를 추가하여 Petzval 상면만곡을 보정하였다.^[6]

II. 3반사경계의 형상설계

2.1. 형상설계에서의 고려사항

본 연구에서 설계된 광학계는 적외선, 가시광선 겸용의 광학계이다. 적외선 대역에서는 3반사경계만이 사용되고, 가시광선 대역에서는 반사경계에 보정렌즈가 상면가까이에 추가로 사용되고 있다. 그림 2의 광학계를 구성하기 위하여서는 기초설계 단계에서 각 반사경의 크기 및 위치가 실용가능한 범위에 있도록 반사경계의 형태가 우선적으로 고려되어야 한다. 그림 3은 그림 2에서 folding mirror를 제외한 형태이며, folding mirror를 pencil mirror와 제3면 사이와 제3면과 상면사이에 삽입하게 되면 그림 2와 같은 형태의 3반사광학계가 구성된다.

그림 3에서 무한대에 있는 축상물체점에서 높이 h_1 인 광선이 광축과 평행하게 제1면으로 입사하고, 이 광선이 제2면, 3면에 입사하는 높이를 h_2, h_3 , 각면에서 굴절된 뒤의 광선의 근축각을 u_1, u_2, u_3 라 하자. 이 광선의 입사고의 비(a_1, a_2)와 각 면의 횡배율(m_1, m_2, m_3)을

$$a_1 = \frac{h_2}{h_1}, a_2 = \frac{h_3}{h_2} \tag{1}$$

$$m_1 = -\frac{u_0}{u_1}, m_2 = -\frac{u_1}{u_2}, m_3 = -\frac{u_2}{u_3} \tag{2}$$

라 하면, 3반사경계의 형태 및 수차는 $(a_1, a_2), (m_1, m_2, m_3)$ 로 표현이 가능하다. 그림 3의 경우와 같이 물체면이 무한대에 있는 경우는 $u_0=0$ 이며, 제1면의 횡배율 m_1 은 항상 0가 된다.

형상설계에서 우선 고려하여야 할 것은 a_1 이다. 제2면이 제1면 앞에 놓이므로 물체면에서 제1면으로 입사하는 광선은 중심부가 제2면에 의하여 차폐되며, a_1 은 차폐량을 나타내는 parameter이다. 두 번째로 고려하여야 할 사항은 제2면의 상점(그림 3의 F_2')의 위치이다. 이 위치에 그림 2, 3의 예에서와 같이 광축변경을 위한 pencil mirror 가 놓이게 되므로, pencil mirror에 의한 광선의 차폐(제1면에서 제2면으로, 제3면에서 상면으로 진행하는 광선)와 pencil mirror 다음의 folding flat에서 제3면으로 입사하는 광선의 광로를 고려하여 F_2' 의 위치를 설정하여야 한다. 구조적으로 보아 pencil mirror는 제1면과 2면 사이에 놓여야만 하며, 그 위치는 제2면에서 F_2' 까지의 거리 b 와 제1면에서 제2면까지의 거리 d_1 의 비 α_0 로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_0 = -\frac{b}{d_1} \quad (3)$$

(3)식의 α_0 가 0.5이면, pencil mirror는 제1면과 2면의 중간에 놓이며, 그림 2의 경우를 살펴보면 α_0 는 0.3~0.5 정도의 값을 가지는 것이 적절하다고 보인다. 세번째로는 제3면의 배율 m_3 를 고려한다. 그림 2와 3을 살펴보면, 제3면은 제1, 2면에 의하여 pencil mirror에 맺힌 상을 m_3 배 확대하여 상면에 결상하게 한다. 따라서 동일한 크기의 상에 대하여, m_3 의 절대값이 작으면 pencil mirror가 커지게 되며, 이에 따라 pencil mirror에 의한 광선의 차폐가 심하여 진다. 마지막으로 그림 3에서 제3면의 상거리 l_3 를 고려한다. 그림 2를 살펴보면 l_3 는 pencil mirror에서 folding flat까지의 거리와 folding flat에서 제3면까지의 거리의 합이며, 그림 2와 같은 광학계가 구성되기 위하여서는 l_3 가 충분히 길어야하고, 제3면의 배율 m_3 도 충분히 커야 한다.

2.2. 3반사경계의 형상설계법

본 연구에서 설계하고자 하는 광학계의 초점거리는 120 inch이고, F/8이므로 그림 3에서 제1면에 입사하는 높이 h_1 은 7.5 inch, 제3면에서 굴절된 광선의 근축각 u_3 는 0.0625가 된다. h_1, u_3 가 주어지고, 위에서 논의한 4종의 형상결정 parameter(a_1, α_0, m_3, l_3)가 주어지면, 근축광선추적식에서 3반사경계의 곡률과 면간거리가 모두 결정되고 그 과정을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 3반사망원경의 형상설계과정(inch 단위)

(a) 설계 parameter

$h_1 = 7.5, u_0 = 0$	제1면에서 광선의 입사고와 입사근축각
$u_3 = 0.0625$	제3면에서 광선의 굴절후 근축각
$m_1 = 0$	제1면의 횡배율(무한물체점)

(b) 형상설계 parameter

$a_1 = \frac{h_2}{h_1}$	제2면에 의한 광선의 차폐
$\alpha_0 = -\frac{b}{d_1}, b = \frac{h_2}{u_2}$	pencil mirror의 위치
$l_3 = \frac{h_3}{u_2}$	제3면의 물체거리
$m_3 = -\frac{u_2}{u_3}$	제3면의 배율

(c) 형상 설계

$l_3' = m_3 l_3$	3반사경계의 BFL
$h_3 = l_3' u_3$	제3면에서 광선의 입사고
$h_2 = h_1 a_1$	제2면에서 광선의 입사고
$a_2 = \frac{h_3}{h_2}$	
$m_2 = \frac{1-a_1}{a_1} \alpha_0$	제2면의 횡배율
$u_2 = -m_3 u_3$	제2면에서 굴절후의 광선의 근축각
$u_1 = -m_2 u_2$	제1면에서 굴절후의 광선의 근축각
$c_1 = \frac{u_1}{2h_1}$	제1면의 곡률
$d_1 = \frac{h_1 - h_2}{u_1}$	제1면과 제2면 사이의 거리
$c_2 = \frac{u_2 + u_1}{2h_2}$	제2면의 곡률
$d_2 = \frac{h_2 - h_3}{u_2}$	제2면과 제3면 사이의 거리
$c_3 = \frac{u_3 + u_2}{2h_3}$	제3면의 곡률

III. 3반사망원경계의 수차보정

3.1. 3반사경계의 3차수차보정

그림 3에서 각면의 원추계수(conic constant)를 χ_1, χ_2, χ_3 라 하고, 물체가 무한대에 있으며 조리개가 제1면에 있다고 가정하면, 3반사경계의 3차구면수차 S_{II} , 3차코마 S_{III} , 3차비점수차 S_{III} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.^[2,7,8]

$$S_{II} = \frac{1}{4} h_1 u_3^3 \{-m_3^3 s_{IV} + a_1 a_2 s_{IV}\}$$

$$-m_2^3 m_3^3 \chi_1 + a_1(m_2 - 1)^3 m_3^3 \chi_2 + a_1 a_2 (m_3 - 1)^3 \chi_3 \} \quad (4)$$

$$S_{II} = \frac{1}{4} H u_3^2 \{ m_3^2 s_{2f} + s_{2f} + Q s_{1f} + (a_1 - 1) m_3^2 \frac{(m_2 - 1)^3}{m_2} \chi_2 + Q(m_3 - 1)^3 \chi_3 \} \quad (5)$$

$$S_{III} = \frac{H^2 u_3}{4h_1} \left\{ -m_3 s_{3f} + \frac{s_{3f} + 2Q s_{2f} + Q^2 s_{1f}}{a_1 a_2} + \frac{(a_1 - 1)^2 (m_2 - 1)^3}{a_1 m_2^2} m_3 \chi_2 + Q^2 \frac{(m_3 - 1)^3}{a_1 a_2} \chi_3 \right\} \quad (6)$$

윗식에서 H 은 광학계의 Lagrange 불변량이며, (4)~(6)식에서 s_{1f} , s_{2f} , s_{3f} 의 첨자 f 는 제1면, 제2면으로 구성된 전반 2반사경계의 구면부에 의한 3차수차기여량과 관련된 함수임을 나타내고 있으며, s_{1f} , s_{2f} , s_{3f} 는 다음과 같다.

$$s_{1f} = m_2^3 + a_1(1 + m_2)^2(1 - m_2)$$

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

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

(4)~(6)식에서 s_{1f} , s_{2f} , s_{3f} 의 첨자 r 은 제3면을 조리개가 면의 정점에 있는 단일반사경계로 보았을 때 제3면의 구면부에 의한 수차기여량과 관련된 함수임을 나타내고 있으며, (5)~(6)식에서 Q 와 곱하여져 있는 항은 실제 3반사경계에서는 조리개가 제3면에 있지 않으므로 후반 단일구면경계에서 조리개의 이동에 따른 수차변화를 보정하는 보정항이다.

$$s_{1f} = -(1 + m_3)^2(1 - m_3)$$

$$s_{2f} = -2(1 - m_3^2)$$

$$s_{3f} = -4(1 - m_3)$$

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

(4)~(6)식의 3차 수차식은 모두 원추곡면계수(χ_1 , χ_2 , χ_3)의 1차함수이므로 이를 변수로 하여 구면수차, 코마, 비점수차가 모두 보정되는 3반사경계의 해를 얻을 수 있다.

3.2. 보정렌즈를 이용한 상면만곡의 보정

3차수차이론에서 광학계의 자오상면만곡 ΔT 와 구결상면만곡 ΔS 는

$$\Delta T = 3 S_{III} + S_{IV} \quad (7)$$

$$\Delta S = S_{III} + S_{IV} \quad (8)$$

로 주어진다. 윗식에서 S_{III} 는 (6)식의 비점수차이며, S_{IV} 는 Petzval 상면만곡으로

$$S_{IV} = H^2 \sum_i P_i \quad (9)$$

$$P_i = -\frac{1}{r_i} \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_i \quad (10)$$

이다. (10)식에서 $\sum_i P_i$ 는 Petzval sum이며, r_i 는 면의 곡률반경이다. 보정렌즈계를 포함한 전체광학계의 Petzval sum의 보정조건은 반사경계의 Petzval sum을 P_m , 보정렌즈계의 Petzval sum을 P_c 라 하면,

$$P_m + P_c = 0 \quad (11)$$

가 된다. 렌즈를 두께가 0인 얇은 렌즈로 근사하면 공기중에 있는 k 개의 렌즈로 구성된 보정렌즈의 Petzval sum P_c 는

$$P_c = \sum_{i=1}^k \frac{\phi_i}{n_i} \quad (12)$$

로 근사할 수 있고, ϕ_i 는 렌즈의 굴절능, n_i 는 재질의 굴절률이다.^[7]

IV. 3반사망원경계의 설계 및 분석

4.1. 3반사경계의 설계 및 분석

초기설계에서는 반사경 및 folding mirror의 위치를 고려하여 다음과 같은 형상결정 parameter를 사용하였다.

$$a_1 = 0.24$$

$$\alpha_0 = 0.38$$

$$m_3 = -2.355$$

$$l_3 = -38.5$$

표 1의 과정에 따라 곡률 및 면간의 거리를 구한 후에 (4), (5), (6)식을 연립하여 구면수차, 코마, 비점수차가 모두 보정되는 해를 얻었으며, 설계제원은 표 3에 나타내었다. 그림 4에 나타나 있는 초기설계의 유한 광선수차를 살펴보면 고차수차항의 영향에 의하여 구면수차가 크게 나타나고, 비점수차는 잘 보정되어 있으나 자오상면만곡 ΔT 와 구결상면만곡 ΔS 가 크다.

초기설계는 수차가 크고, 수차간의 균형이 적절하지 못하므로 이를 다시 최적화하였다. 최적화에는 damped

표 2. 3반사경계의 초기설계제원(inch 단위)

면번호	곡률반경	면간의 거리	원추곡면상수
1	-84.6904	-32.1824	-1.054644
2	-120.2882	48.0293	-0.021196
3	-50.2587		-0.326840

EFL 120.0 inch (F/8)

BFL -84.3090 inch

표 3. 최적화된 3반사경계의 설계제원(inch 단위)

면번호	곡률반경	면간의 거리	원추곡면상수
1	-73.4085	-30.6000	-0.87896
2	-43.1984	44.3700	-25.2258
3	-50.3057		-0.26582

EFL 120.0185 inch (F/8)

BFL -84.2356 inch

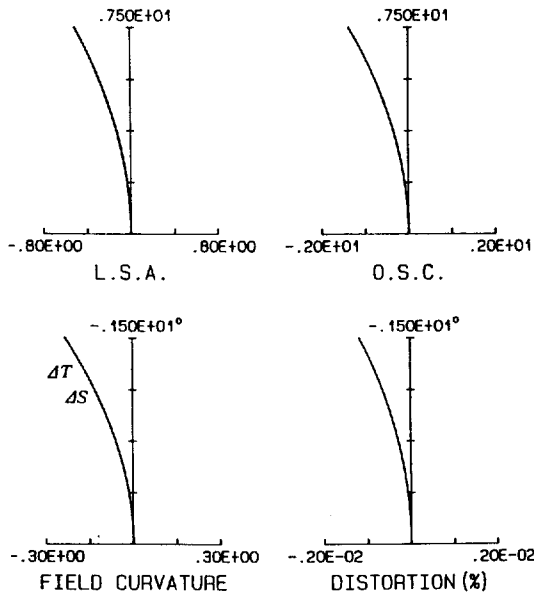


그림 4. 3반사경 초기설계의 유한광선수차(inch 단위).

least squares method를 사용하였으며, 초기설계의 형상이 크게 변화하지 않는 범위내에서 최적화를 진행하였다. 최적화된 3반사경계의 설계제원은 표 4에 정리하였고, 이 광학계의 유한광선수차는 그림 5에 나타나 있다.

그림 5의 유한광선수차를 살펴보면 구면수차, OSC, 비점수차는 모두 잘 보정되어 있다. 파장 10 μm의 적외선 대역에서 Rayleigh 최절한계를 기준으로 한 LSA의 보정목표치는 0.061 inch이며, 그림 5의 LSA, OSC, 비점

표 4. 가시광선 관측용 3반사망원경계의 초기설계제원(inch 단위)

면번호	곡률반경	면간의 거리	원추곡면상수	비 고
1	-73.4085	-30.6000	-0.87896	반사경
2	-43.1984	44.3700	-25.2258	반사경
3	-50.3057	-82.6107	-0.26582	반사경
4	-14.6884	-0.6250	0.0	보정렌즈
5	평면		0.0	보정렌즈

EFL 114.6392 inch, BFL -1.1151 inch

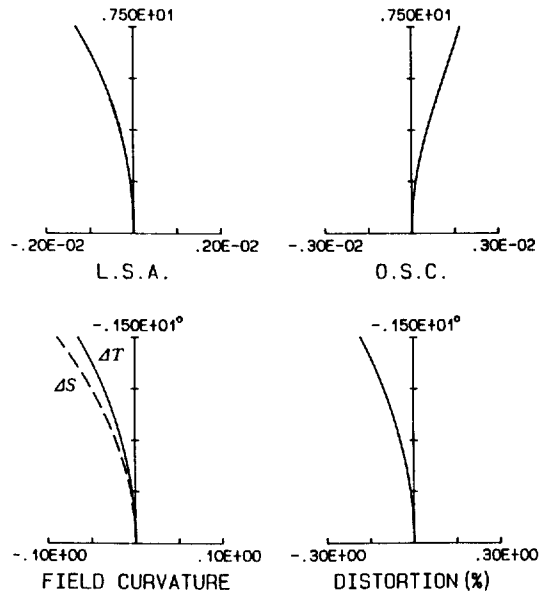


그림 5. 최적화된 3반사경계의 유한광선수차(inch 단위).

수차는 모두 이 기준내의 값을 가지고 있다. 자오상면만곡 ΔT와 구결상면만곡 ΔS가 완전히 보정되지 않고 남아있으며, 이 수차들은 비점수차가 보정되었기 때문에 거의 Petzval 상면만곡에 기인하고 있다. 그림 6에서 적외선 관측시계인 반시계각 1.2°까지의 rms spot radius를 살펴보면 -0.095~0.05 inch의 defocus 범위내에서는 rms spot radius가 파장 10 μm의 최절한계 0.004 inch 보다 작음을 알 수 있다.

4.2. 상면만곡 보정렌즈의 설계 및 분석

일반적인 경우에는 단렌즈는 수차보정의 변수가 적고 색수차가 보정되지 않으므로 용도가 매우 제한적이다. 그러나 상면가까이에서 보정렌즈로 사용되는 경우에는 축상광선의 입사각이 낮아 색상수차에 거의 영향을 주지 않으며, 굴절능을 작게하면 색수차도 크게 발생하지 않

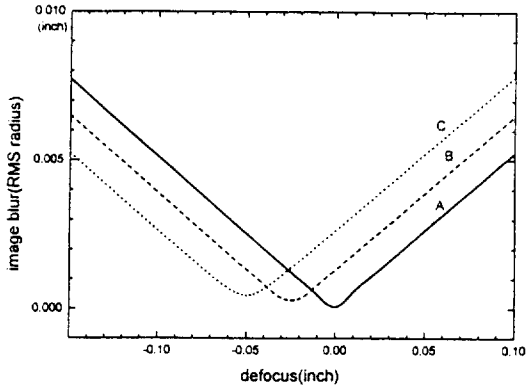


그림 6. Defocus에 따른 3반사경계의 rms spot radius의 변화 (A: on-axis, B: 반시계각 0.84°, C: 반시계각 1.2°).

으므로 사용이 가능하다. 본 연구에서는 단렌즈만을 사용한 보정렌즈계를 설계하였으며, 색수차의 발생을 최소화하기 위하여 분산이 작은 FK-54를 재질로 사용하였다. FK-54는 d-선의 굴절율은 1.43700, Abbe 상수는 90.7 이며, F-선과 C-선간의 굴절률차가 0.005로 분산이 아주 작은 광학유리이다.

반사경계의 Petzval sum P_{Σ} 은 표 3의 반사경계의 제원에서 -0.00207 로 주어지므로, FK-54를 사용한 보정렌즈의 굴절능은 (12)식에서 0.02975 로 주어진다. 이를 plano-convex 렌즈로 바꾸어 적절한 두께를 부여하면 단렌즈의 기초설계가 완성되며, 본 연구에서는 상면의 크기가 6.28 inch이므로 렌즈의 두께는 0.625 inch로 하고, 상면에서 약 1 inch 앞에 놓이도록 하였다

표 4에는 보정렌즈가 포함된 가시광선용의 3반사망원경계의 초기설계가 나타나 있다. 보정렌즈가 추가됨으로 인하여 EFL이 114.6392 inch로 약간 줄어들었다. 보정렌즈의 두께와 굴절율이 음수로 표현된 것은 회전대칭형 광학계의 배치를 가정하였을 때, 세번째 거울에서 반사된 빛은 $-z$ 방향으로 진행하기 때문에 수치계산의 편의를 위하여 음수로 표현한 것이다. 실제 제작을 한다면 보정렌즈의 제원은 표 4의 곡률, 굴절율, 축상두께에 -1 을 곱한 값이 된다. 그림 7에는 가시광선용 초기설계의 유한광선수차(inch 단위)가 나타나 있다. 이를 살펴보면 굴절렌즈가 추가됨으로 인하여 색수차가 발생하였으나 종구면수차에서는 거의 문제되지 않는 수준이다. 상면만곡은 상당히 보정되었으나 flat field의 조건에서 벗어나 있고, OSC가 보정렌즈가 없는 경우보다 커져 있다.

가시광선용 광학계의 최적화에서는 보정렌즈만을 변화시킬 수 있으므로, 수차의 보정보다는 수차의 균형에

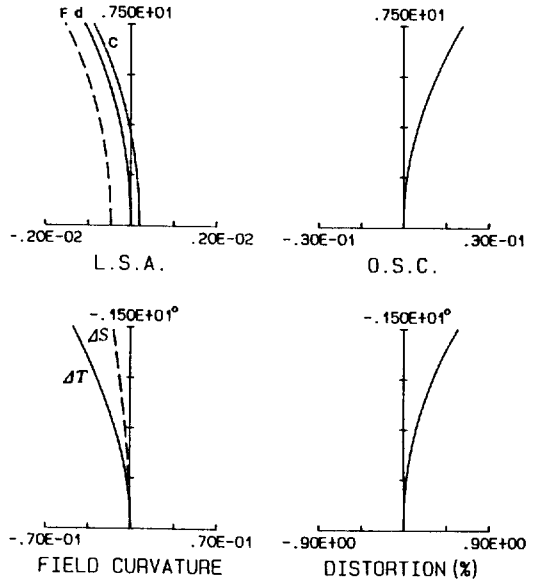


그림 7. 가시광선 관측용 3반사망원경계 초기설계의 유한광선수차(inch 단위).

표 5. 가시광선 관측용 3반사망원경계의 최적화된 설계 제원(inch 단위)

면번호	곡률반경	면간의 거리	원추곡면상수	비 고
1	-73.4085	-30.6000	-0.87896	반사경
2	-43.1984	44.3700	-25.2258	반사경
3	-50.3057	-82.8842	-0.26582	반사경
4	-36.0766	-0.6250	0.0	보정렌즈
5	32.8110		0.0	보정렌즈

EFL 116.8534 inch(F/7.79), BFL -0.8842 inch

중심을 두었으며, OSC를 줄이고 flat field가 되는 방향으로 설계를 변화시켰다. 이 과정에서 보정렌즈가 상쪽으로 너무 가까이 놓이지 않도록 제한을 주었다. 표 5에 단렌즈를 보정렌즈로 사용한 가시광선용 3반사망원경계의 최종설계제원을 정리하였고, 그림 8에 유한광선수차가 나타나 있으며, 유한광선수차는 상당히 보정된 편이나 OSC와 상면만곡이 구면수차에 비하여 큰 편이다. 그림 9에는 defocus에 따른 d-선(587.6 nm)의 rms spot radius의 변화가 나타나 있다. 그림 9에서 최적상면에서 반시계각 1.2°까지의 rms spot radius는 0.0004 inch(10.2 μm) 이하로 충분히 수차가 보정되었으며, 반시계각 1.5°에서는 0.0005 inch(12.7 μm) 정도로 커짐을 알 수 있다. 최대반시계각에서 spot이 커진 것은 코마에 기인하고 있으며, 이것은 유한광선수차 및 그림 10의 spot diag-

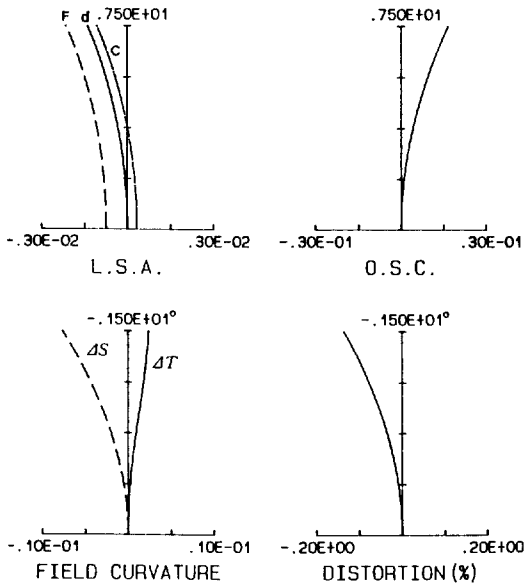


그림 8. 최적화된 가시광선 관측용 3반사망원경의 유한 광선수차(inch 단위).

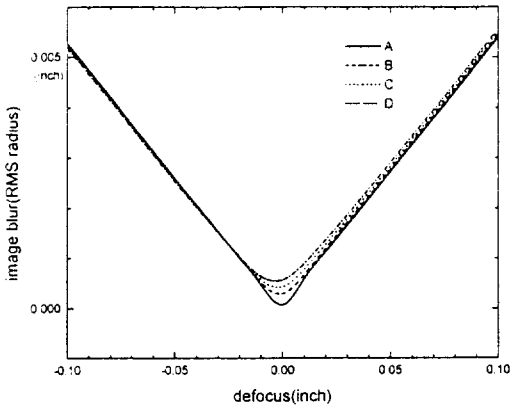


그림 9. Defocus에 따른 3반사망원경계 최종설계의 rms spot radius의 변화 (A: on-axis, B: 반시계각 0.84°, C: 반시계각 1.2°, D: 반시계각 1.5°).

ram에서 확인할 수 있다. 그림 10은 d-선의 최적상면에서 d-선, F-선(486.1 nm), C-선(656.3 nm)의 spot을 합성한 것이다. 이 spot diagram을 살펴보면 최대시계에서 단 파장에 대한 spot size는 약 0.001 inch(25 μm) 정도로 설계목표보다는 크지만 대부분의 광량이 20 μm 내에 집중되고 있으므로 수차보정은 충분하다고 볼 수 있으며, 흰색수차는 0.001 inch 정도로 나타나고 있다.

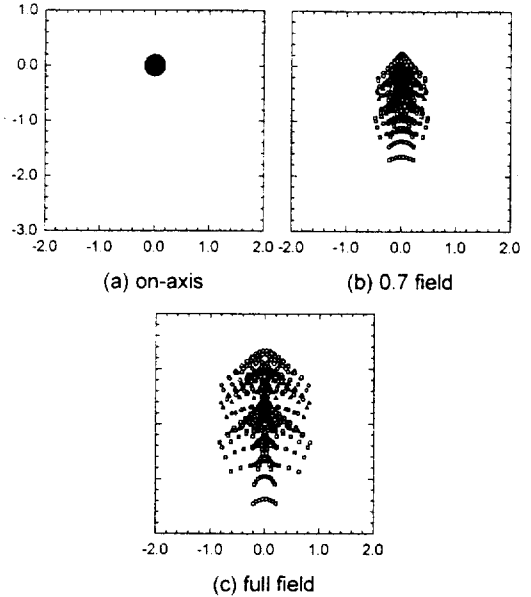


그림 10. 3반사망원경의 최적상면에서의 spot diagram (○: F-선, △: d-선, □: C-선, 0.001 inch단위).

V. 결 론

본 연구에서는 3반사경계의 형상설계방법, 원추곡면화를 통한 3차수차의 보정방법, 보정렌즈를 이용한 Petzval 상면만곡의 보정방법이 연구되었으며, 이를 바탕으로 F/8의 적외선, 가시광선 겸용의 3반사망원경을 설계하였다. 본 연구에서 설계된 3반사망원경은 파장 10 μm의 적외선 대역에서는 반사경만으로 구성되며, 시계 2.4°내에서 회절한계의 결상성능을 가지고 있다. 가시광선대역에서는 상면만곡보정용 단렌즈를 상면 앞에 사용하고 있으며, 3°의 시계에서 spot size는 25 μm 이하이며, CCD의 사용에 적합하도록 flat field로 설계되었다.

본 연구에서 설계된 3반사망원경의 결상성능은 pixel의 크기 20 μm 정도인 CCD를 사용하는 경우 충분히 수차가 보정되었다고 볼 수 있으나, CCD의 pixel가 점차로 작아지는 추세에 있으므로 10 μm 대의 pixel을 가진 CCD를 사용하는 고분해능 광학계로 사용되기 위하여서는 좀 더 수차가 보정될 필요가 있다. 현 설계의 수차를 살펴보면 구면수차에 비하여 비축수차가 크게 나타나고 있으며, 이것이 전체 시계에서 spot size를 크게하는 요인으로 작용하고 있다. 따라서 보다 고분해능 광학계를 설계하기 위하여서는 achromatic doublet을 사용한 상면만곡의 보정방법에 대하여 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] G. I. Lebedeva, "Prospective aerospace reflective objectives", J. Opt. Technol. 61, 610 (1994).
- [2] 오승경 외, "3종의 3차수차가 보정된 3구면경계", 한국광학회지, 6(2), 93 (1995).
- [3] D. Korsch, "Closed form solution for three-mirror telescopes corrected for spherical aberration, coma, astigmatism, and field curvature", Appl. Opt. 11, 2986 (1972).
- [4] N. N. Mikhe'son, "Three-mirror telescope anastigmats", Optica Acta, 29(7), 979 (1982).
- [5] D. Korsch, "A three-mirror space telescope", Opt. Eng., 14(6), 533 (1975).
- [6] R. N. Wilson, "Corrector system for Ritchey-Chrétien telescopes", Appl. Opt. 7, 1232 (1968).
- [7] 이상수, 기하광학, (교학연구사, 서울, 1985).
- [8] H. H. Hopkins, *Wave Theory of Aberrations*, (Clarendon, Oxford, 1950), pp. 149-158.

**Optical Design of Three-Mirror Telescope System for
Infra-Red and Visible Imaging**

Jong Ung Lee

Department of Optical Engineering, Chongju Univerisity, Chongju 360-764, Korea

Kyung Hee Hong

Korea Military Acamedy, Seoul 139-799, Korea

Woo Gun Kwon

Agency for Defense Development, Taejeon 305-600, Korea

(Received: April 2, 1996)

To design three-mirror telescope system (F/8, 120 inch in focal length) for visible and infra-red band imaging, methods for power configuring and correction of the third order aberrations were studied. In the design of the telescope system, a three-mirror system corrected for spherical aberration, coma, and astigmatism was used for infra-red imaging, and the aberrations were corrected by using conic surfaces. For visible imaging, a singlet corrector lens was appended at the front of the focal plane to correct field curvature. The telescope system has diffraction limited performance for 10 μm in wavelength within 2.4° of field-of-view. In the visible band imaging, the rms spot size of the telescope system is less than 25 μm within 3° of field-of-view for monochromatic light, and the telescope system satisfies flat field condition for CCD application.