

3종의 3차수차가 보정된 3구면경계*

오승경 · 이종용

청주대학교 광학공학과

권우근

국방과학연구소

홍경희

육군사관학교

(1995년 1월 15일 받음)

3구면경계에서 aplanat 조건을 해석적으로 유도하고, 이를 바탕으로 3종의 3차수차가 보정된 3구면경계의 형태 및 존재영역을 조사하였다. 실상을 맷으면서 aplanat 조건을 만족하는 3구면경계는 유효초점거리가 양수인 경우 PPN, NPP, PNP형태의 해가 존재하였으며, N은 볼록 거울, P는 오목 거울을 나타낸다. 유효초점거리가 음수인 경우 NPN, NPP, PNP, NNP형의 4종류의 형태가 존재하였다. 3종의 3차수차가 보정된 3구면경계에서 astigmatic aplanat는 실상을 맷는 해가 존재하지 않았다. Flat field aplanat는 PPN, PNP, NPP형태의 해가 존재하였고, distortion free aplanat의 경우는 PPN, PNP, NPN, NPP, NNP형의 해가 존재하였다.

I. 서 론

반사경계는 렌즈계에 비해 큰 재료를 손쉽게 구할 수 있으므로 대구경에 적합하며, 색수차가 없으므로 사용파장 대역에 제한이 적다. 그리고 같은 굴절능을 가질 때, 렌즈의 약 1/4의 곡률만을 가져도 되며, 광학계의 길이를 짧게 할 수 있다는 장점이 있다. 반면에 중앙부의 빛이 차단되므로 입사광의 손실이 따르며, 시계각이 제한되므로 시계각이 작은 광학계에서만 사용이 가능하다.^[1]

반사경계는 사용하는 반사경의 수에 따라 단일반사경계, 2반사경계, 3반사경계 등으로 구분되고 있다. 2반사경계에서는 2면 모두 쌍곡면을 사용하여 구면수차, coma가 보정된 Richey-Chrétien계가 잘 알려져 있으며, 대형의 천체 망원경에 많이 사용되고 있다. Richey-Chrétien계는 비축수차가 보정되어 있지 않으므로 시계각이 매우 작다.^[2] 2반사경계에서 구면수차, coma, 상면만곡이 보정된 광학계로는 Schwartzschild-Couder계^[3]가 있으며, 이 광학계는 2개의 오목 거울로 구성되고 초점이

주경과 부경 사이에 있기 때문에 잘 사용되고 있지는 않다. 2반사경계에서는 원추곡면을 사용하는 경우에도 설계 변수가 5개 밖에 없기 때문에 비축수차까지 보정되면서 사용에 편리한 광학계를 얻기 어렵다. 3반사경계의 경우에는 2반사경계보다 설계 변수가 3개 더 많기 때문에 비축수차까지 보정된 실용성 있는 광학계가 존재할 가능성이 많다.

지금까지 3반사경계에 대한 연구로는 3면 모두 원추곡면을 사용하여 구면수차, coma, 비점수차, 상면만곡이 보정된 3반사경계(D. Korsch, 1972)^[4] 일반 비구면을 사용하여 구면수차, coma를 보정한 3반사경계(D. Korsch, 1980)^[5]가 있고, 1988년 R. Jhonson은 구면수차, coma, 비점수차, Petzval sum이 보정되고 1면, 3면이 타원, 2면이 쌍곡면으로 구성된 3반사경계^[6]를 발표하였다.

본 연구에서는 구면만으로 구성된 3구면경계에서 수차가 잘 보정되면서 형태상으로도 실용가능성이 있는 해가 존재하는지의 여부를 알아보기 위하여 3구면경계에서 구면수차, coma를 보정하는 aplanat 조건을 해석적으로 유도하고, 수치해석을 통하여 aplanat 조건을 만족하는 3구면경계의 존재영역과 3종의 3차수차가 보정된

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

3구면경계에 대하여 조사하였다.

II. 3구면경계의 3차수차와 Aplanat 조건

1. 부호에 관한 규약

광학계는 일반적으로 각 면의 곡률 c_i , 면간의 거리 d_i , 매질의 굴절률 n_i 로 표시되나, 이것은 근축광선 추적식에서 각 면에서의 광선의 입사고 h_i , 굴절 후 광선의 근축각 u_i , 매질의 굴절률 n_i 로 나타낼 수 있다 (그림 1). 편의상 m_i , a_i 를

$$m_i = \frac{n_{i-1}u_{i-1}}{n_iu_i}, \quad (1)$$

$$a_i = \frac{h_{i+1}}{h_i} \quad (2)$$

와 같이 정의하면, m_i 는 i -번째 면의 횡배율이며, d_i , c_i 는

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

$$c_i = \frac{n_iu_i(-m_i + 1)}{h_i(n_i - n_{i-1})}$$

로 쓸 수 있다.^[7]

광학계의 i -번째 굴절면에서 근축광선의 굴절불변량을 A_i , 주광선의 굴절불변량을 B_i 라고 하면, A_i , B_i 는 각각

$$A_i = n_i(c_i h_i - u_i)$$

$$= \frac{n_i u_i (n_{i-1} - m_i n_i)}{n_i - n_{i-1}}$$

$$B_i = \frac{H}{h_i} (1 + A_i E_i h_i) \quad (4)$$

으로 주어진다. (4)식에서 H 는 광학계의 Lagrange 불변량이며, E_i 는 주광선의 입사고 $h_i^{(pr)}$ 를 근축광선의 입사고 h_i 와 H 로 나누어 준 값으로서 E_i 는

$$E_i = \frac{h_i^{(pr)}}{H h_i} = E_{i-1} + \frac{d_{i-1}}{h_{i-1} h_i n_{i-1}} \quad (5)$$

와 같은 점화식으로 표현된다.^[8] 광학계의 조리개 면에서 주광선의 입사고 $h_{stop}^{(pr)} = 0$ 이므로 $E_{stop} = 0$ 이 되어 근축광선 추적식에서 (h_i, u_i, n_i) 가 결정되면 (5)식의 점화식에서 광학계의 모든 면에 대한 E_i 의 값을 결정할 수 있다.

2. 3구면경계의 Aplanat 조건

3구면경계의 구면수차와 coma는

$$S_I = \sum_{i=1}^3 A_i^2 h_i \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_i, \quad (6)$$

$$S_H = \sum_{i=1}^3 A_i B_i h_i \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_i, \quad (7)$$

로 주어진다. (6), (7)식에서 3차수차는 각 면에서의 수차기여분의 합이므로, 3구면경계의 3차수차는 2개의 구면경으로 구성된 전반 2구면경계와 1개의 구면경으로

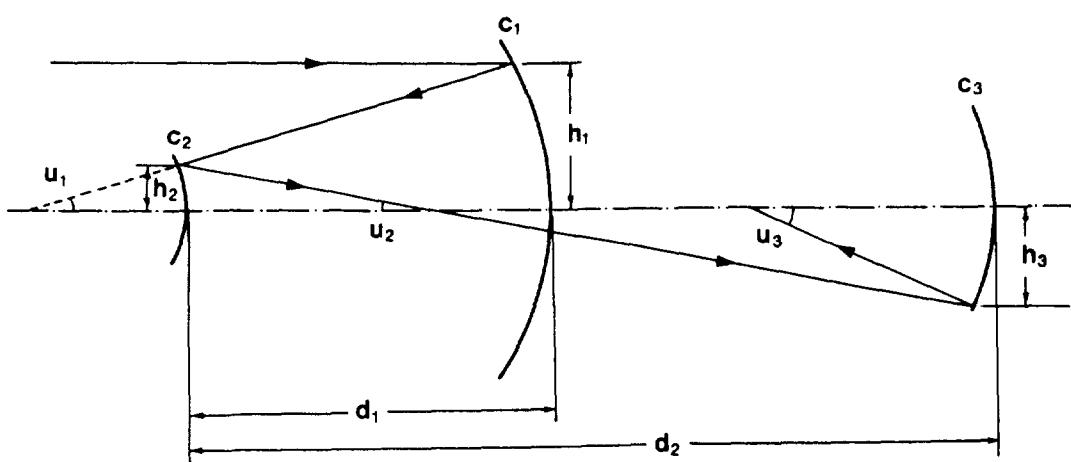


그림 1. 3구면경계의 형태.

구성된 후반 단일구면경계의 수차기여분의 합으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 전반 2구면경계의 수차기여분은 첨자 f 를 사용하여 나타내었으며, 후반 단일구면경계의 수차기여분은 첨자 r 를 사용하여 나타내었다. 전반 2구면경계에서 2면의 횡배율 $m_2 (=n_1u_1/n_2u_2)$ 는 $u_2=0$ 인 경우 ∞ 가 되므로, 전반 2구면경계의 수차기여분은 일반적인 경우 ($u_2 \neq 0$)와 $u_2=0$ 인 경우로 나누어 유도하였다. 3구면경계에서의 매질의 굴절률은 $n_0=1$, $n_1=-1$, $n_2=1$, $n_3=-1$ 이고, 조리개가 제 1면에 있다고 가정하면 (5)식에서

$$\begin{aligned} E_1 &= 0 \\ E_2 &= -\frac{d_1}{h_1 h_2} \end{aligned}$$

가 된다. 3구면경계의 3차수차는 $u_2 \neq 0$ 인 경우에는

$$\begin{aligned} S_I &= S_{Iy} + S_{Ir} \\ &= \frac{1}{4} h_1 u_3^3 (-m_3^3 s_{Iy} + a_1 a_2 s_{Ir}), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} S_{II} &= S_{IIf} + S_{Ibr} + \Delta S_{Ibr} \\ &= \frac{1}{4} H u_3^2 (m_3^3 s_{Iy} + s_{Ir} + Q_{Sbr}) \end{aligned} \quad (9)$$

로 표현될 수 있다. (8), (9)식에서 S_{Iy} , S_{IIf} 는 전반 2구면경계의 수차기여분, S_{Ir} , S_{Ibr} 는 후반 단일구면경계의 수차기여분, H 는 Lagrange 불변량이며, s_{Iy} , s_{Iy}' , s_{Ir} , s_{Ir}' 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s_{Iy} &= (m_1+1)^2 (-m_1+1)m_2^3 + (m_2^2+1)^2 (-m_2+1)a_1, \\ s_{Iy}' &= 2(m_1^2-1)m_2^2 - \frac{(-m_2^2+1)\{m_2-1+(m_2+1)a_1\}}{m_2}, \\ s_{Ir} &= (m_3+1)^2 (m_3-1), \\ s_{Ir}' &= 2(m_3^2-1). \end{aligned}$$

(9)식에서 ΔS_{Ibr} 는 조리개가 후반 단일구면경계에 있지 않으므로 이를 보정하기 위한 항이다. 조리개의 이동에 따른 후반 단일구면경계의 코마 변화량 ΔS_{Ibr} 은 (4)식과 (7)식에서

$$\Delta S_{Ibr} = H \Delta E S_{Ir}$$

로 주어지고, 후반 단일구면경계에서 ΔE 는 조리개가 제 1면에 있으므로

$$\Delta E = E_3 = -\frac{d_1}{h_1 h_2} + \frac{d_2}{h_2 h_3}$$

가 된다. (9)식의 Q 는 $\frac{E_3}{h_3}$ 이며, $u_2 \neq 0$ 인 경우

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

로 주어진다.

물체가 무한대에 있고($m_1=0$) $u_2 \neq 0$ 인 경우에 구면수차와 coma를 보정하는 조건은 (8), (9)식에서

$$a_1 = \frac{(-m_2+1)m_2^2 m_3^3}{m_2(-m_2^2+1)m_3^3 - m_3^2 - m_3 + 1}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} a_2 = & -\frac{|m_2(-m_2^2+1)m_3^3 - m_3^2 - m_3 + 1|m_2 + (m_2+1)^2(-m_2+1)^2 m_3^3}{(-m_2+1)(m_3+1)^2(-m_3+1)} \\ & \quad (11) \end{aligned}$$

로 주어진다.

$u_2=0$ 인 경우는 $u_2 \neq 0$ 인 경우와 구별하기 위하여 첨자 prime를 사용하였으며, 3구면경계의 3차수차는

$$\begin{aligned} S'_I &= S'_{Iy} + S'_{Ir} \\ &= \frac{h_1 u_3^3}{4} \left\{ \left(\frac{u_1}{u_3} \right)^3 s'_{Iy} + a_1 \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} S'_{IIIy} &= S'_{Iy} + S'_{Ir} + \Delta S'_{Ibr} \\ &= \frac{H u_3^2}{4} \left\{ \left(\frac{u_1}{u_3} \right)^2 s'_{Iy} - 2 + Q' \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

로 표현 될 수 있다. (12), (13)식에서 s'_{Iy} , s'_{Iy}' 과 Q' 은

$$s'_{Iy} = (m_1+1)^2 (m_1-1) + 1$$

$$s'_{Iy}' = 2m_1^2$$

$$Q' = \frac{u_3}{u_1} (a_1 - 1)$$

으로 주어진다.

물체가 무한대에 있고 $u_2=0$ 인 경우에 구면수차와 coma를 보정하는 조건은 (12), (13)식에서 $u_3=2u_1$ 가 되며, $u_3 < 0$ 인 경우는 발산계가 되었으며, $u_3 > 0$ 인 경우는 $d_1 > 0$ 가 되었다. 전반 2구면경계가 afocal계인 경우는 실상을 맷으면서 aplanat 조건을 만족하는 해가 존재하지 않았다.

3. 3종의 수차가 보정된 3구면경계

(10), (11)식을 살펴보면 a_1 , a_2 는 m_2 , m_3 의 함수로 주어진다. 따라서 주어진 m_2 에 대하여 m_3 를 변수로하여 aplanat 조건을 만족시키면서 잔류 수차 중 하나를 추가로 보정할 수 있다. $u_2 \neq 0$ 인 경우, 3구면경계의 비점

수차 S_{III} , Petzval sum S_{IV} , 왜곡수차 S_V 는 각각

$$\begin{aligned} S_{III} &= S_{IIIr} + S_{IIr} + \Delta S_{IIr} \\ &= \frac{H^2 u_3}{4h_1} \left(-m_3 s_{3r} + \frac{s_{3r} + 2Qs_{2r} + Q^2 s_{1r}}{a_1 a_2} \right), \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{IV} &= S_{IVr} + S_{IVr} \\ &= \frac{H^2 u_3}{4h_1} \left(-m_3 s_{4r} + \frac{1}{a_1 a_2} s_{4r} \right) \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_V &= S_Vr + S_Vr + \Delta S_Vr \\ &= \frac{H^3}{4h_3^2} \left(a_1 a_2 s_{3r} + Q(3s_{3r} + s_{4r}) + 3Q^2 s_{2r} + Q^3 s_{1r} \right) \quad (16) \end{aligned}$$

로 주어진다. (14), (15), (16)식에서 $s_{3r}, s_{4r}, s_{5r}, s_{3r}, s_{4r}$ 은 다음과 같다.

$$s_{3r} = 4(-m_1 + 1)m_2 + \frac{(-m_2 + 1)\{m_2 - 1 + (m_2 + 1)a_1\}^2}{m_2^2 a_1},$$

$$s_{4r} = 4 \left\{ (m_1 - 1)m_2 + \frac{m_2 - 1}{a_1} \right\},$$

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

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

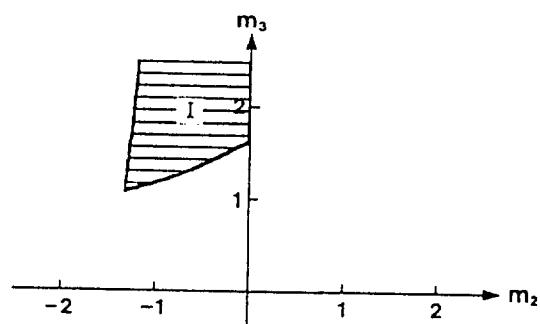
$$s_{4r} = 4(-m_3 + 1),$$

III. 수치적 해석과 토의

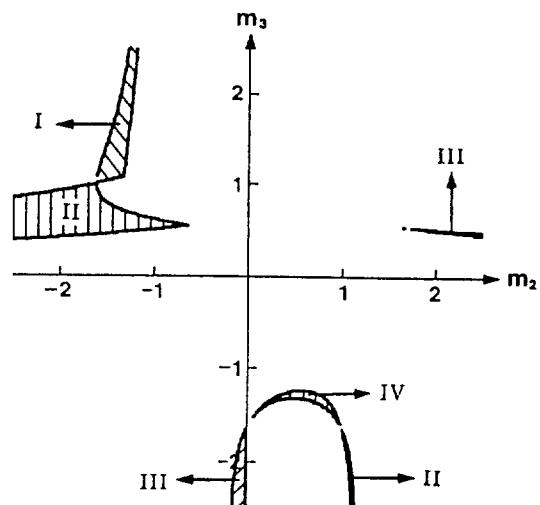
1. Aplanat 조건을 만족하는 3구면경계의 존재 영역

본 연구에서는 물체가 무한대에 있다고 두고 2면과 3면의 횡배율 m_2, m_3 을 각각 -2.5 와 2.5 사이에서 0.05 간격으로 변화시켜가면서 해의 존재 영역을 조사하여 보았으며, 초점거리 f' 은 $+1$ 또는 -1 로 규격화 하였다. (10), (11)식에 의한 해 중 $d_1 > 0, d_2 < 0$ 인 경우는 실제적인 반사광학계의 구성이 불가능한 해이므로 제외하였고, $b/f > 0$ 인 해는 허상을 맷으므로 해에서 제외하였다. 그림 2의 (a), (b)에는 aplanat 조건을 만족하고 $d_1 < 0, d_2 > 0$ 이고 $b/f < 0$ 인 해가 존재하는 영역을 나타내었다. 그림 2(a)는 $f' = 1$ 인 경우로 PPN, NNP, PNP형의 해가 존재하였다. 여기에서 N은 볼록 거울, P는 오목 거울을 나타낸다. 그림 2(b)는 $f' = -1$ 인 경우로 NPN, NPP, PNP, NNP형의 해가 존재하였다.

그림 3에는 $f' = 1$ 인 경우에 각 형태의 예가 나타나



(a) $f' = 1$ 인 경우 (I: PPN, II: NPP, III: PNP).



(b) $f' = -1$ 인 경우 (I: NPN, II: NPP, III: PNP, IV: NNP).

그림 2. Aplanat 조건을 만족하는 3구면경계의 존재 영역.

있으며, 각 해의 세원은 Table 1에 제시하였다. PPN형은 오목 거울과 Cassegrain이 결합된 형태로, 1면과 2면 사이의 거리가 긴 반면에 2면과 3면 사이의 거리는 짧은 편이다. PPN형의 예는 그림 3(a)와 Table 1에 제시하였다. 이 형태의 해는 면간의 거리가 매우 길고, 2면이 너무 커지는 경향이 있고, m_2 가 0에 접근 할 수록 면간의 거리는 짧아지나 2면과 3면 사이의 거리가 너무 짧고,

였다. 이 형태의 해는 면간의 거리가 매우 길고, 2면이 너무 커지는 경향이 있고, m_2 가 0에 접근 할 수록 면간의 거리는 짧아지나 2면과 3면 사이의 거리가 너무 짧고, 광선의 높이도 1면의 10^{-1} 배 정도로 작다. 그럼 3(b)의 NPP형은 inverse Cassegrain과 오목거울이 결합된 형

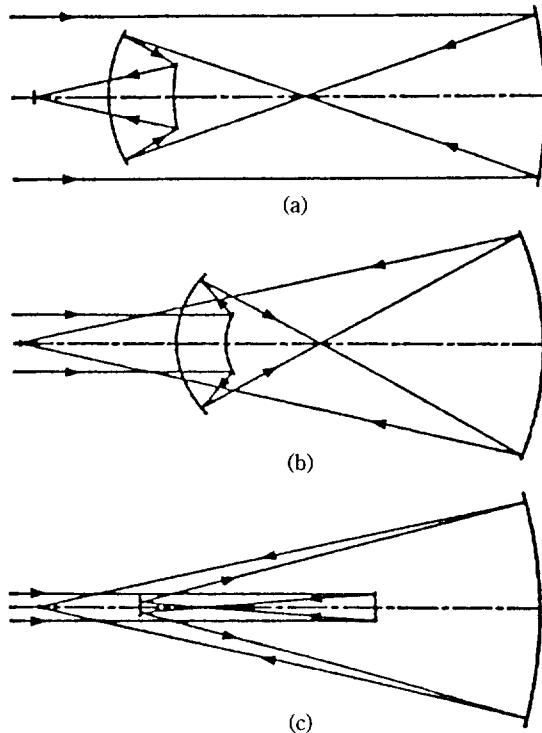


그림 3. Aplanatic three-spherical mirror system($f' = 1$).
 (a) PPN type, (b) NPP type, (c) PNP type.

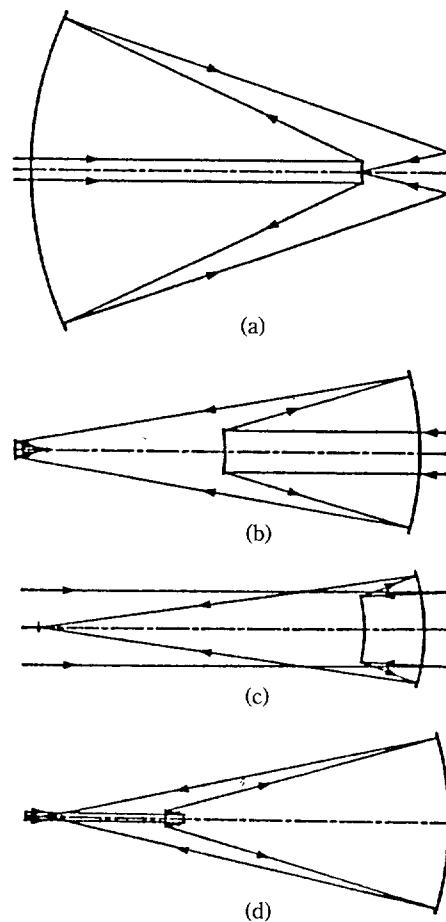


그림 4. Aplanatic 3-spherical mirror system($f' = -1$).
 (a) NPN type, (b) NPP type, (c) PNP type, (d) NNP type.

Table 1. Typical example of aplanatic 3-spherical mirror system($f' = 1$).

TYPE	m_2	m_3	a_1	a_2	BFL	remark
PPN	-0.65	2.4	-0.780380	0.473246	-0.369311	Fig. 3(a)
NPP	-1.65	-2.3	2.400329	-1.640238	-3.937110	Fig. 3(b)
PNP	0.30	-1.2	-0.377664	21.825974	-8.242891	Fig. 3(c)

Table 2. Typical example of aplanatic 3-spherical mirror system($f' = -1$).

TYPE	m_2	m_3	a_1	a_2	BFL	remark
NPN	-1.35	1.5	14.490703	0.127532	-1.848027	Fig. 4(a)
NPP	-1.65	0.8	3.638696	0.090799	-0.330390	Fig. 4(b)
PNP	-0.15	-2.5	0.880851	1.640959	-1.445440	Fig. 4(c)
NNP	0.70	-1.3	1.852583	11.166989	-20.687777	Fig. 4(d)

광선의 높이도 1면의 10^{-1} 배 정도로 작다. 그림 3(b)의 NPP형은 inverse Cassegrain과 오목거울이 결합된 형태로, 1면과 2면 사이의 거리에 비해 2면과 3면 사이의 거리가 길고 3면이 크다. PNP형은 그림 3(c)의 예와 같이 전체 길이가 길고 3면이 크다.

그림 4에는 $f' = -1$ 인 경우에 각 형태의 해가 나타나 있으며, 각 해의 제원은 Table 2에 제시하였다. 그림 4(a)의 NPN형은 inverse Cassegrain과 볼록 거울이 결합된 형태이다. 이 경우는 $f' = -1$ 인 경우만 존재하고, 전체 길이가 길고 2면의 크기가 크기 때문에 집광력에 비해 광학계의 크기가 큰 단점이 있다. 그림 4(b)의 NPP형에서는 1면과 2면 사이의 거리에 비해 2면과 3면 사이의 거리가 긴 편이나 3면이 심하게 커지지는 않는다. 그림 4(c)의 PNP형은 2면에 의한 광선의 차폐가 매우 심하며, 그림 4(d)의 NNP형은 1면과 2면 사이의 거리에 비해서 2면과 3면 사이의 거리가 매우 길고 3면이 크다.

2. 3종의 3차수차가 보정된 3구면경계

3개의 3차수차가 보정되는 영역 조사는 aplanat 조건을 만족하는 영역을 조사할 때와 같은 방법으로 2면의 횡배율 m_2 를 -5.0 와 5.0 사이에서 0.05 간격으로 변화시켜가면서 3면의 횡배율 m_3 를 변수로 이분법(bi-section method)을 사용하여 해의 존재영역을 조사하였다.

Anastigmatic aplanat의 경우 2면의 횡배율이 1.0 과

-1.0 일 때 수식적인 해는 존재하고 있었으나, 면간의 거리와 2면에서 광선의 높이가 초점거리의 10^8 배 정도로 실용적인 해가 되지 못하므로 제외하였다. Flat field aplanat의 경우는 $f' = 1$ 인 경우 PPN, PNP, NPP형의 해가 존재하였으며, $f' = -1$ 인 경우 NPP형의 해가 존재하였다 (그림 5). $f' = 1$ 일 때 PPN형은 m_2 가 -1.0 의 근처에서 존재하고 있고 집광력에 비해 2면이 커지고 있다.

Table 3. Typical example of flat field aplanat system (PPN type, $f' = 1$)

surface #	c	d	n
1	-0.4381193	-2.0550066	-1
2	-0.1823955	3.5618000	1
3	-0.2184927		-1

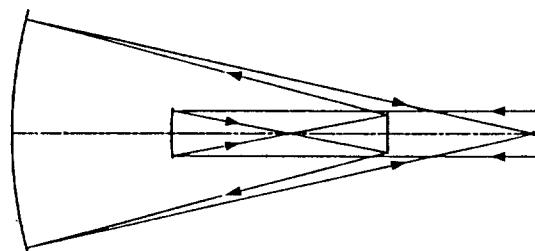


그림 6. Typical example of flat field aplanat(PPN type, $f' = 1$).

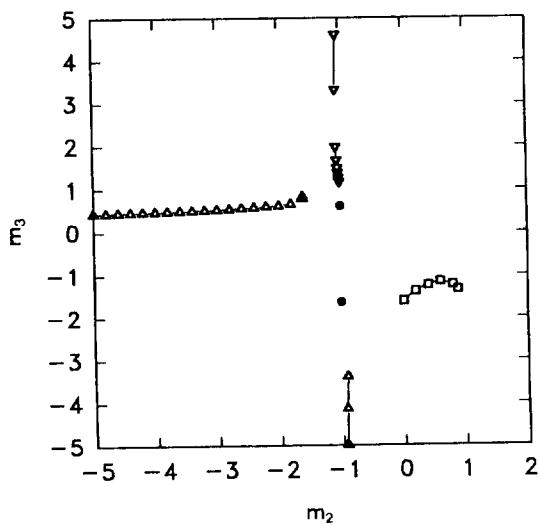


그림 5. 3구면경계에서 anastigmatic aplanat와 flat field aplanat의 존재 영역.

Anastigmatic aplanat ●: NPP, Flat field aplanat △: NPP, ▽: PPN, □: PNP, ◇: NNP.

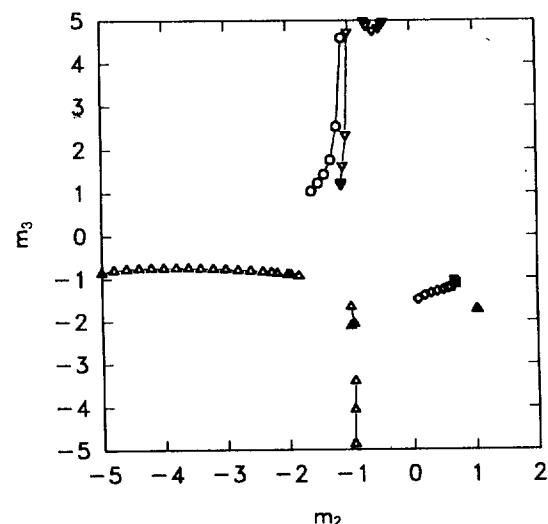


그림 7. 3구면경계에서 distortion-free aplanat의 존재 영역.

○: NPP, △: NPP, ▽: PPN, □: PNP, ◇: NNP.

Table 4. Typical example of distortion-free aplanat system(PPN type, $f' = 1$).

surface #	c	d	n
1	-1.5582678	-0.6826057	-1
2	3.5087158	0.1444686	1
3	4.3648441		-1

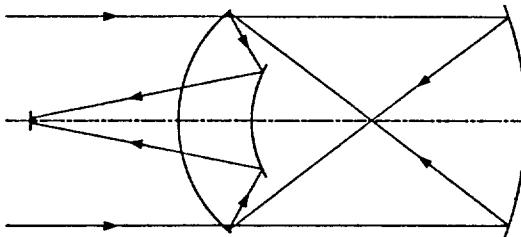


Fig. 8. Typical example of distortion-free aplanat(PPN type, $f' = 1$).

PNP형은 m_2 가 0.0에서 1.0 사이에서 존재하고 있었으며, 1.0으로 접근할수록 면간의 거리는 약간 짧아지고 있으며, 3면이 크다. $f' = 1$ 일 때 NPP형은 2면이 매우 큰 inverse Cassegrain의 상을 오목 거울이 중계하는 형태이며, $f' = -1$ 일 때 NPP형은 inverse Cassegrain과 오목 거울이 결합된 형태이다. Table 3과 그림 6에 PNP형의 flat field aplanat의 예를 보였다.

Distortion-free aplanat의 경우는 $f' = 1$ 인 경우 PPN, PNP, NPP형이, $f' = -1$ 인 경우 NPN, NPP, NNP형의 해가 존재하였다. 그림 7는 distortion이 추가로 보정되는 영역을 나타낸 것이다. $f' = 1$ 일 때 PPN형은 m_2 가 -1.0의 근처에서는 집광력에 의해 2면이 너무 커지고 있고, m_2 가 -0.5 근처의 값을 가질 때에는 2면과 3면 사이의 거리가 너무 짧아지는 경향이 있으며 Table 4와 그림 8에 한 예를 보였다. PNP형은 집광력에 의해 3면이 매우 크며, m_3 가 -1.0에 가까운 값을 가지므로 3면에서 상면으로 입사할 때 광선의 차폐가 심하다. NPP형은 1면과 2면 사이의 거리에 의해 2면과 3면 사이의 거리가 너무 길며, m_2 또는 m_3 중의 하나는 -1.0 또는 1.0의 근처의 해를 가지게 된다. $f' = -1$ 일 때 NPN형은 전반 2구면경계가 inverse Cassegrain으로 2면의 크기가 1면에 비해 4배 이상 크다. NPP형은 inverse Cassegrain과 오목 거울이 결합된 형태이다. NNP형은 집광력에 의해 3면이

너무 크고, 1면과 2면 사이의 거리에 의해 2면과 3면 사이의 거리가 너무 길기 때문에 광학계의 전체 길이가 길어지며, 광선의 차폐가 큰 단점이 있다.

IV. 결 론

3구면경계의 구면수차와 coma를 보정하기 위한 aplanat 조건을 전반 2구면경계가 afocal system($u_2 = 0$)인 경우와 일반적인 경우($u_2 \neq 0$)로 나누어 유도하고 수치적인 해를 구하여 보았다. 전반 2구면경계가 afocal system인 경우는 해가 존재하지 않았고, $u_2 \neq 0$ 인 경우에는 PPN, NPN, NPP, PNP, NNP형의 5가지 형태가 존재하였으며, 여기에서 P는 볼록 거울을 N은 오목 거울을 나타낸다. 그 형태는 inverse Cassegrain계의 앞이나 뒤에서 오목 거울이나 볼록 거울이 결합된 형태가 많았으며, PPN의 경우에는 오목 거울과 Cassegrain이 결합된 형태가 존재하여 2, 3면에서 광선의 차폐는 많으나 가장 실용 가능성 있는 해가 존재하였다. Astigmatic aplanat는 실상을 맷는 해가 존재하지 않았으며, flat field aplanat는 PPN, NPP, PNP형태의 해가 존재하였다. Distortion free aplanat은 PPN, NPN, NPP, PNP, NNP형 모두에서 존재하였다. 그러나 대체로 집광력에 의해 광학계가 커지는 단점이 있어서 실용적인 3반사경계를 위해서는 원추곡면을 도입한 비구면화가 필요하리라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 정해빈, 적외선용 4-구면경계의 수차해석과 광학설계, 박사학위논문, 한국과학기술원(1984).
- [2] W. B. Wetherell and M. P. Rimmer, Appl. Opt. **11**, 2817(1972).
- [3] C. L. Wyman and D. Korsch, Appl. Opt. **13**, 2402 (1974).
- [4] Dietrich Korsch, Appl. Opt. **11**, 2986(1972).
- [5] Dietrich Korsch, Appl. Opt. **19**, 3640(1980).
- [6] R. Barry Johnson, Opt. Eng. **27**, 1046(1988).
- [7] 이종웅, 4반사경계의 전자계산기를 이용한 설계 및 수차해석, 박사학위논문, 한국과학기술원(1988).
- [8] H. H. Hopkins, *Wave theory of aberrations*(Oxford at Clarendon Press, London, 1950) pp. 87-95.

Three-Spherical-Mirror System Corrected for Three Kinds of Third Order Aberrations

Sung Kyong Oh and Jong Ung Lee

Deft. of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea

Woo Gun Kwon

Agency for Defense Development, Taejeon 305-600, Korea

Kynug Hee Hong

Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

(Received: January 15, 1995)

Aplanatic conditions for three-spherical-mirror system were derived analytically on the base of the third order aberration theory. Domains of existence for three-spherical-mirror system corrected for three kinds of the aberrations (anastigmatic aplanats, flat field aplanats and distortion-free aplanats) were numerically investigated. For aplanatic three-spherical-mirror system which has positive focal length and real image, there are PPN, NPP and PNP type solutions, where the P means positive mirror (a concave mirror) and the N means negative mirror (a convex mirror). For the case of negative focal length with real image, there are NPN, NPP, PNP and NNP type solutions. Among those aplanatic system, flat field aplanats are found in PPN, PNP and NPP type, and distortion-free aplanats are found in all of the types except PNP with negative focal length. But, practical anastigmatic aplanat which has real image dose not exist in three-spherical-mirror system.