

Zoom접안경에 대한 광설계

임천석 · 이상수

한국과학기술원 물리학과

박충선 · 김재순

한국광학기술개발(주)

(1994년 6월 1일 받음)

출사동의 직경 0.5 cm, eye-relief 1 cm, 각배율 $M_u=7\sim 15$ 인 가변배율의 접안경에 대한 Gauss광학적 해석과, 이 해석의 결과에 따른 접안경을 설계하였다. 망원경 대물경의 초점거리(f_o')는 21 cm이고, 그 직경은 6.2 cm이다. 반시계각 β 는 1.5° 이고, 출사동에서 $\beta'=1.5^\circ \times (7\sim 15) = 10.5^\circ \sim 22.5^\circ$ 이다. 이 zoom 접안경은 세 그룹으로 이루어져 있으며, 각각의 그룹에서 Seidel 3rd order aplanatization이 이루어져 있다. 최종 광설계는 optimization으로서 언어졌으며, 눈의 분해능을 기준으로 해서, 접안경의 성능이 평가되었다.

I. 서 론

직경이 6.2 cm, 초점거리 21 cm인 망원경의 대물경에 대한 광설계는 별도로 완료되어 있어서, 본 연구의 대상에서 제외되었다. 이 대물경과 결합되어서, 각 배율 $M_u=7\sim 15$ 인 zoom eyepiece를 설계하는 일이 본 연구의 목적이다. 이때 물체공간의 시각은, 1000 m 앞에 있는 5 m 높이의 물체를 보는 것을 기준으로 하되, 그 5배를 전체 물체공간으로 잡았다. 따라서 물체공간의 반시계각 β 는 $(5/1000) \times 60^\circ \times 5 = 1.5^\circ$ 이다. Eye-relief는 1.0 cm로 잡고, 출사동의 직경은 눈의 통공의 지름 0.5 cm로 하였다.

본 연구는 다음의 4단계로서 이루어졌다. 즉 1) Gauss광학적 해석 2) Seidel 제 3차 수차 이론에 의한 렌즈설계 3) Computer를 이용한 유한광수차(finite ray aberration)의 optimization 4) 최종상면(허상)에서 눈의 분해능을 기준으로 하는 평가로서 이루어졌다. Zoom eyepiece(그림 1)는 L_1, L_2, L_3 의 렌즈그룹으로 이루어져 있고, L_4 의 접안렌즈의 위치는 고정되어 있다. L_1 이 -렌즈이고, L_2, L_3 가 +렌즈로서 망원경 대물경 L_0 와 L_1 이 결합해서, 대물경계의 상점 O'의 위치를 이동시키고, 그 상점들 (L_2, L_3)계 (초점거리 가변)가 확대경 작용을 하며, 직접 눈으로 허상을 관찰한다.

II. Zoom Eyepiece의 Gauss광학

그림 1과 그림 2에서부터, 망원경의 각 배율 $M_u^{[1]}$ 는

$$M_u = \frac{\tilde{f}_o'}{f_o'} = \frac{k_2 + k_3 - d_2 k_2 k_3}{k_0 + k_1 - (21 - \epsilon) k_0 k_1} \\ = \frac{k_2 + k_3 - (d_0 - d_1 + \epsilon_1) k_2 k_3}{k_0 + k_1 - (21 - \epsilon) k_0 k_1} \quad (1)$$

여기서, $\epsilon > 0$ 이고, 초기조건으로 $k_0 = 1/21, k_1 = -1/4, k_2 = 1/4, k_3 = 1/4$ 이다. 초기조건으로 $M_u = 7$ (최저배율)일

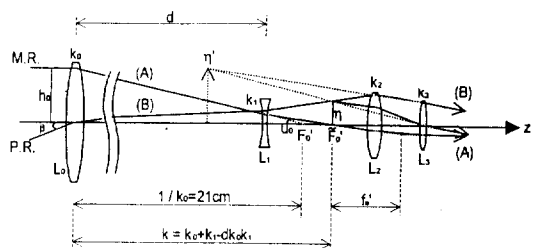


그림 1. Zoom telescope의 전체 광학계. Zoom eyepiece, (L_1, L_2, L_3)에서 L_3 의 위치가 고정되고, L_1 과 L_2 가 각각 좌우로 이동한다. 대물렌즈 L_0 는 얇은 렌즈(무수차)이고, 그 위치가 고정되어 있다.

때, $\epsilon = 0$ 로 잡고, L_2 의 위치 d_{10} (그림 2)를 구하여 보면

$$7 = \frac{\frac{1}{4} + \frac{1}{4} - (4.5 - d_{10}) \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{4}}{\frac{1}{21} - \frac{1}{4} - 21 \cdot \frac{1}{21} \cdot \left(-\frac{1}{4}\right)} = \frac{21}{16} (3.5 + d_{10})$$

에서부터 $d_{10} = 1.83 \text{ cm}$ 를 얻는다. 즉

$$\begin{aligned} \overline{F_0'B} &= 1.83 \text{ (그림 3)} \\ \epsilon_- = \epsilon_+ &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

이고, (1)식은 다음과 같게 된다.

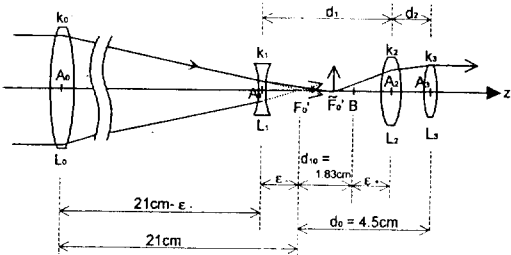


그림 2. Zoom eyepiece의 제원; $d_0 = 4.5 \text{ cm}$, $k_1 = -1/4$, $k_2 = k_3 = 1/4$, $d = 21 \text{ cm}$, $f_3' = 1/k_3 = 4 \text{ cm}$. ϵ_- ; L_1 의 이동거리, ϵ_+ ; L_2 의 이동거리, $\epsilon_+ = \epsilon_-$, $d_{10} = 1.83 \text{ cm}$.

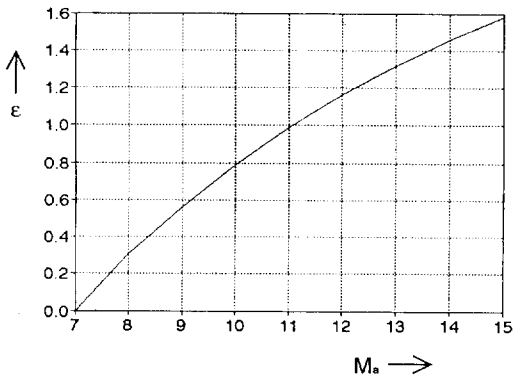


그림 3. L_1 과 L_2 의 이동거리.

$$M_a = \frac{\frac{1}{4} + \frac{1}{4} - (2.67 - \epsilon_+) \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{4}}{\frac{1}{21} + \frac{1}{4} - (21 - \epsilon_-) \cdot \frac{1}{21} \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \quad (3)$$

여기서, $\epsilon_- = \epsilon_+ = \epsilon (> 0)$ 이다.

$M_a = 15$ (최대배율)일 때,

$$d_2 = 4.5 - 1.83 - \epsilon_- = 2.67 - \epsilon_+ \text{ (그림 2 참조)}$$

이니,

$$15 = \frac{\frac{1}{4} + \frac{1}{4} - (2.67 - \epsilon_+) \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{4}}{\frac{1}{21} + \frac{1}{4} - (21 - \epsilon_-) \cdot \frac{1}{21} \cdot \left(\frac{1}{4}\right)}$$

이고, $\epsilon_- = \epsilon_+ = \epsilon$ 인 고로, $\epsilon = 1.796296 \text{ cm}$ 를 얻는다. (1)식에서 $M_a = 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14$ 일 때의 ϵ 값도 같은 방식으로 구할 수 있으며, 다음 표 1 및 그림 3을 얻게 된다.

III. 제 3차 수차이론에 의한 렌즈설계

광학계의 Seidel 제 3차 수차계수는 광축상의 물점을 출발하여 광학계의 조리개의 끝 모서리를 지나는 주변광선(marginary ray)과 비축상의 물점을 통과하여 조리개의 중심을 지나는 주광선(principal ray)의 근축광선

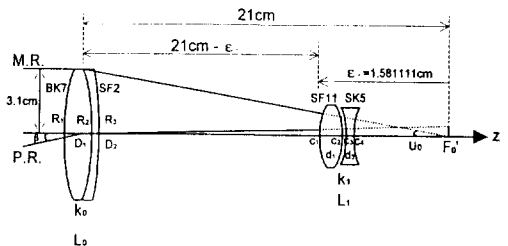


그림 4. 대물경 L_0 의 제원($R_1 = 11.069 \text{ cm}$, $D_1 = 1.12 \text{ cm}$, $R_2 = -9.601 \text{ cm}$, $D_2 = 0.38 \text{ cm}$, $R_3 = -44.326 \text{ cm}$)과 L_1 의 제원($M_a = 15$ 일 때, $u_0 = 0.147619$, $\beta = 1.5^\circ$).

표 1. 각배율(M_a)에 따른 ϵ 값

M_a	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\epsilon_- = \epsilon_+ = \epsilon$	0.000000	0.303208	0.562632	0.788033	0.985692	1.160435	1.316027	1.455455	1.581111

추적치로부터 구할 수 있다. 먼저 이들 Seidel 제 3차 수차계수^[2]를 Gaussian bracket으로 표현하고, 이어서 그림 2의 광학계 L_1, L_2, L_3 가 설계되었다.

1. L_1 설계

그림 4에서 보듯이 광학유리는 c_1, c_2, c_3, c_4 와 거리변수 d_1, d_2, d_3 가 있다. 렌즈 두께 $d_1=0.8$ cm, $d_3=0.2$ cm로 정하고 렌즈사이의 간격(d_2)도 0.2 cm로 정했다. 그러면 설계변수는 c_1, c_2, c_3, c_4 로서 총 4개이다. Aplanat 렌즈를 만들 조건($S_I < 0.5 \mu m, S_{II} < 0.5 \mu m$), 총굴절능($k_1 = -1/4$)이 될 조건을 고려하면 자유설계변수(c_1)는 하나 남는다. 다음은 위 조건들을 만족시키기 위해 사용된 식들이다. 이들 식은 Gaussian bracket을 이용하여 다음과 같이 표현되었다.^[3,4]

$$\begin{aligned} k_{11} &= c_1(n_1 - 1), \quad k_{12} = c_2(1 - n_1), \quad k_{13} = c_3(n_3 - 1), \\ k_{14} &= c_4(1 - n_3) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} h_1 &= -n_0 u_0 [d_0/n_0] = -n_0 u_0 g_1 \\ h_2 &= -n_0 u_0 [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1] = -n_0 u_0 g_3 \\ h_3 &= -n_0 u_0 [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2] = -n_0 u_0 g_5 \\ h_4 &= -n_0 u_0 [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3] \\ &= -n_0 u_0 g_7 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 d_0 는 부호를 가지며, $d_0 = -\epsilon, n_0 = -1, u_0 = 0.147619$

$$\begin{aligned} n_1 u_1 &= n_0 u_0 [d_0/n_0, -k_{11}] = n_0 u_0 g_2, \\ n_2 u_2 &= n_0 u_0 [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}] = n_0 u_0 g_4, \\ n_3 u_3 &= n_0 u_0 [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}] \\ &= n_0 u_0 g_6, \\ n_4 u_4 &= n_0 u_0 [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3, \\ &\quad -k_{14}] = n_0 u_0 g_8, \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \Delta(u/n)_1 &= n_0 u_0 (g_6/n_1^2 - 1/n_0^2), \\ \Delta(u/n)_2 &= n_0 u_0 (g_4/n_2^2 - g_2/n_1^2), \\ \Delta(u/n)_3 &= n_0 u_0 (g_6/n_3^2 - g_4/n_2^2), \\ \Delta(u/n)_4 &= n_0 u_0 (g_8/n_4^2 - g_6/n_3^2). \end{aligned} \tag{7}$$

$A_j = n_j (c_j h_j - u_j)$ 이고, $k_j = c_j (n_j - n_{j-1})$ 이므로

$$\begin{aligned} A_1 &= -n_0 u_0 \left(\frac{n_1 k_{11}}{n_0 - n_0} g_1 + g_2 \right), \quad A_2 = -n_0 u_0 \left(\frac{n_2 k_{12}}{n_2 - n_1} g_3 - g_4 \right), \\ A_3 &= -n_0 u_0 \left(\frac{n_3 k_{13}}{n_3 - n_2} g_5 + g_6 \right), \quad A_4 = -n_0 u_0 \left(\frac{n_4 k_{14}}{n_4 - n_3} g_7 + g_8 \right), \end{aligned} \tag{8}$$

$$h_1^{pr} = -\beta [d_0'/n_0'] = -\beta g_1'$$

$$\begin{aligned} h_2^{pr} &= -\beta [d_0'/n_0', -k_{11}, d_1/n_1] = -\beta g_3' \\ h_3^{pr} &= -\beta [d_0'/n_0', -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2] = -\beta g_5' \\ h_4^{pr} &= -\beta [d_0'/n_0', -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, k_{13}, \\ &\quad d_3/n_3] = -\beta g_7' \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 $n_0' = 1, d_0' = 21 - \epsilon, \beta = -0.025$

$$\begin{aligned} n_1 u_1^{pr} &= \beta [d_0'/n_0', -k_{11}] = \beta g_2' \\ n_2 u_2^{pr} &= \beta [d_0'/n_0', -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}] = \beta g_4' \\ n_3 u_3^{pr} &= \beta [d_0'/n_0', -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2/n_2, -k_{13}] \\ &= \beta g_6' \\ n_4 u_4^{pr} &= \beta [d_0'/n_0', -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2/n_2, -k_{13}, d_{13}, \\ &\quad d_2/n_3, -k_{14}] = \beta g_8' \end{aligned} \tag{10}$$

$B_j = n_j (c_j h_j^{pr} - u_j^{pr})$ 이고, $k_j = c_j (n_j - n_{j-1})$ 이므로

$$\begin{aligned} B_1 &= -\beta \left(\frac{n_1 k_{11}}{n_1 - n_0} g_1' + g_2' \right), \quad B_2 = -\beta \left(\frac{n_2 k_{12}}{n_2 - n_1} g_3' + g_4' \right), \\ B_3 &= -\beta \left(\frac{n_3 k_{13}}{n_3 - n_2} g_5' + g_6' \right), \quad B_4 = -\beta \left(\frac{n_4 k_{14}}{n_4 - n_3} g_7' + g_8' \right) \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \Delta(\delta n/n)_1 &= (n_1 - 1)/n_1 v_1, \quad \Delta(\delta n/n)_2 = (n_1 - 1)/n_1 v_1, \\ \Delta(\delta n/n)_3 &= (n_3 - 1)/n_3 v_3, \quad \Delta(\delta n/n)_4 = (n_3 - 1)/n_3 v_3 \end{aligned} \tag{12}$$

구면수차계수(S_I), coma계수(S_{II}), 종색수차계수(C_L), 횡색수차계수(C_T), 총굴절능(k_1)에 대한 해석적인 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_I &= A_1^2 h_1 \Delta(u/n)_1 + A_2^2 h_2 \Delta(u/n)_2 + A_3^2 h_3 \Delta(u/n)_3 \\ &\quad + A_4^2 h_4 \Delta(u/n)_4 < 0.5 \mu m \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} S_{II} &= A_1 B_1 h_1 \Delta(u/n)_1 + A_2 B_2 h_2 \Delta(u/n)_2 + A_3 B_3 h_3 E(u/n)_3 \\ &\quad + A_4 B_4 h_4 \Delta(u/n)_4 < 0.5 \mu m \end{aligned} \tag{14}$$

$$k_1 = [-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3, -k_{14}] = \mathbf{1/4} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} C_L &= A_1 h_1 \Delta(\delta n/n)_1 + A_2 h_2 \Delta(\delta n/n)_2 + A_3 h_3 \Delta(\delta n/n)_3 \\ &\quad + A_4 h_4 \Delta(\delta n/n)_4 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} C_T &= B_1 h_1 \Delta(\delta n/n)_1 + B_2 h_2 \Delta(\delta n/n)_2 + B_3 h_3 \Delta(\delta n/n)_3 \\ &\quad + B_4 h_4 \Delta(\delta n/n)_4 \end{aligned} \tag{17}$$

식 (13), (14), (15)를 동시에 만족시키도록 k_{12}, k_{13}, k_{14} 를 optimization 기법으로^[5] 여러 번에 걸친 iteration을 통해 구한다. 이때 k_{11} 는 자유 설계변수로서 미리 정해준다. 식(13), (14), (15)를 만족시키는 해 중에서 식 (16), (17)의 값이 제일 작은 것을 선택해서, 다음의 설계제원(표 2)을 얻었다.

이때 종색수차계수(C_L), 횡색수차계수(C_T)는 다음과

표 2. 3rd order aplanatization을 만족하는 L₁의 설계제원

Surface Number	1	2	3	4
Curvature (1/cm)	0.180195	0.724917	0.710875	0.433701
Distance (cm)	0.2	0.1	0.5	

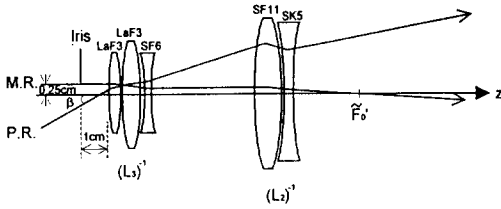


그림 5. (L₂)⁻¹, (L₃)⁻¹의 제원(β=0.375 rad). (L₂)⁻¹, (L₃)⁻¹는 L₂, L₃를 좌우로 뒤집어 놓은 것.

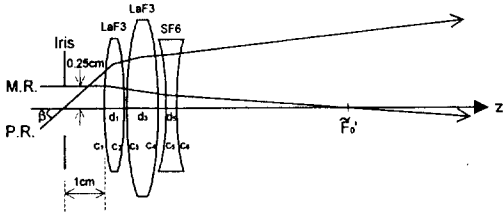


그림 6. (L₃)⁻¹의 제원(β=0.375 rad). M.R.; Marginaryray, P.R.; Principalray.

같다.

$$C_L = 4.162 \times 10^{-4} \text{ cm}, C_T = 1.930 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

2. (L₂-L₃)계 설계^[6-9]

이 설계는, 좌우로 뒤집어 놓고 한다.(그림 5. 참조)

2.1 (L₃)⁻¹ 설계

그림 6에서 보듯이 광학유리는 미리 정했으므로 설계변수로는 곡률 변수 c₁, c₂, c₃, c₄, c₅, c₆와 거리변수 d₁, d₂, d₃, d₄, d₅가 있다. 렌즈 두께 d₁=0.6667 cm, d₃=1.3333 cm, d₅=0.2667 cm로 정하고 렌즈사이의 간격(d₂, d₄)들도 d₂=0.1333 cm, d₄=0.1333 cm로 정했다. 그러면 설계변수는 c₁, c₂, c₃, c₄, c₅, c₆로서 총 6개이다. Aplanat렌즈를 만들 조건(S_I<0.5 μm, S_{II}<0.5 μm, S_{IV}<0.5 μm와 C_T<0.5 μm가 될 조건, 총굴절능(k₃)=1/4이 될 조건을 고려하면 자유설계변수(c₁)는 하나 남는다. 다음은

위 조건들을 만족시키기 위해 사용된 식들이다.

$$\begin{aligned} k_{11} &= c_1(n_1 - 1), k_{12} = c_2(1 - n_1), k_{13} = c_3(n_3 - 1), \\ k_{14} &= c_4(1 - n_3), k_{15} = c_5(n_5 - 1), k_{16} = c_6(1 - n_5) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} h_1 &= h_1, \\ h_2 &= h_1[-k_{11}, d_1/n_1] = h_1G_2, \\ h_3 &= h_1[-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2] = h_1G_4, \\ h_4 &= h_1[-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3] = h_1G_6, \\ h_5 &= h_1[-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3, -k_{14}, \\ &\quad d_4/n_4] = h_1G_8, \\ h_6 &= h_1[-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3, -k_{14}, \\ &\quad d_4/n_4, -k_{15}, d_5/n_5] = h_1G_{10}. \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 h₁=0.25 cm

$$\begin{aligned} n_1u_1 &= -h_1[-k_{11}] = -h_1G_1, \\ n_2u_2 &= -h_1[-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}] = -h_1G_3, \\ n_3u_3 &= -h_1[-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}] = -h_1G_5, \\ n_4u_4 &= -h_1[-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3, \\ &\quad -k_{14}] = -h_1G_7, \\ n_5u_5 &= -h_1[-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3, -k_{14}, \\ &\quad d_4/n_4, -k_{15}] = -h_1G_9, \\ n_6u_6 &= -h_1[-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3, -k_{14}, \\ &\quad d_4/n_4, -k_{15}, -d_5/n_5, -k_{16}] = -h_1G_{11}. \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Delta(u/n)_1 &= -h_1G_1/n_1^2, \\ \Delta(u/n)_2 &= -h_1(G_3/n_2^2 - G_1/n_1^2), \\ \Delta(u/n)_3 &= -h_1(G_5/n_3^2 - G_3/n_2^2), \\ \Delta(u/n)_4 &= -h_1(G_7/n_4^2 - G_5/n_3^2), \\ \Delta(u/n)_5 &= -h_1(G_9/n_5^2 - G_7/n_4^2), \\ \Delta(u/n)_6 &= -h_1(G_{11}/n_6^2 - G_9/n_5^2). \end{aligned} \quad (21)$$

A_j=n_j(c_jh_j-u_j)이고, k_j=c_j(n_j-n_{j-1})이므로

$$\begin{aligned} A_1 &= h_1 \left(\frac{n_1 k_{11}}{n_1 - n_0} + G_1 \right), A_2 = h_1 \left(\frac{n_2 k_{12}}{n_2 - n_1} + G_2 + G_3 \right), \\ A_3 &= h_1 \left(\frac{n_3 k_{13}}{n_3 - n_2} + G_4 + G_5 \right), A_4 = h_1 \left(\frac{n_4 k_{14}}{n_4 - n_3} + G_8 + G_9 \right), \\ A_5 &= h_1 \left(\frac{n_5 k_{15}}{n_5 - n_4} + G_8 + G_7 \right), A_6 = h_1 \left(\frac{n_6 k_{16}}{n_6 - n_5} + G_{10} + G_{11} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} h_1^{pr} &= n_0 \beta' [d_0/n_0] = n_0 \beta' G'_1, \\ h_2^{pr} &= n_0 \beta' [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1] = n_0 \beta' G'_3, \\ h_3^{pr} &= n_0 \beta' [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2] = n_0 \beta' G'_5, \\ h_4^{pr} &= n_0 \beta' [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3] \\ &= n_0 \beta' G'_7, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_5^{p'} &= n_0\beta' [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3, \\
 &\quad -k_{14}, d_4/n_4] = n_0\beta' G_9' \\
 h_6^{p'} &= n_0\beta' [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3, \\
 &\quad -k_{14}, d_4/n_4, -k_{15}, d_5/n_5] = n_0\beta' G_{11}' \quad (23)
 \end{aligned}$$

여기서 $d_0 = 1.0 \text{ cm}$, $\beta' = 0.375$

$$\begin{aligned}
 n_1 u_1^{p'} &= -n_0\beta' [d_0/n_0, -k_{11}] = -n_0\beta' G_2' \\
 n_2 u_2^{p'} &= -n_0\beta' [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}] = -n_0\beta' G_4' \\
 n_3 u_3^{p'} &= -n_0\beta' [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}] \\
 &= -n_0\beta' G_6' \\
 n_4 u_4^{p'} &= -n_0\beta' [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, \\
 &\quad d_3/n_3, -k_{14}] = -n_0\beta' G_8' \\
 n_5 u_5^{p'} &= -n_0\beta' [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, \\
 &\quad d_3/n_3, -k_{14}, d_4/n_4, -k_{15}] = -n_0\beta' G_{10}' \\
 n_6 u_6^{p'} &= -n_0\beta' [d_0/n_0, -k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, \\
 &\quad d_3/n_3, -k_{14}, d_4/n_4, -k_{15}, d_5/n_5, -k_{16}] = -n_0\beta' G_{12}' \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$B_i = n_i c h_i^{p'} - u_i^{p'} \circ | \Sigma, k_i = c(n_i - n_{i-1}) \circ | \Sigma$$

$$\begin{aligned}
 B_1 &= n_0\beta' \left(\frac{n k_{11}}{n_1 - n_0} G_1' + G_2' \right), B_2 = n_0\beta' \left(\frac{n k_{12}}{n_2 - n_1} G_3' + G_4' \right), \\
 B_3 &= n_0\beta' \left(\frac{n k_{13}}{n_3 - n_2} G_5' + G_6' \right), B_4 = n_0\beta' \left(\frac{n k_{14}}{n_4 - n_3} G_7' + G_8' \right), \\
 B_5 &= n_0\beta' \left(\frac{n k_{15}}{n_5 - n_4} G_9' + G_{10}' \right), B_6 = n_0\beta' \left(\frac{n k_{16}}{n_6 - n_5} G_{11}' + G_{12}' \right). \quad (25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta(\delta n/n)_1 &= (n_1 - 1)/n_1 v_1, \quad \Delta(\delta n/n)_2 = -(n_1 - 1)/n_1 v_1, \\
 \Delta(\delta n/n)_3 &= (n_3 - 1)/n_3 v_3, \quad \Delta(\delta n/n)_4 = -(n_3 - 1)/n_3 v_3, \\
 \Delta(\delta n/n)_5 &= (n_5 - 1)/n_5 v_5, \quad \Delta(\delta n/n)_6 = -(n_5 - 1)/n_5 v_5. \quad (26)
 \end{aligned}$$

의 표현을 얻는다. 구면수차계수(S_i), coma계수(S_{ii}), Petz-

val sum(P), 종색수차계수(C_L), 횡색수차계수(C_T), 총굴절능(k_3)에 대한 해석적인 표현은 다음과 같다.

$$S_i = A_1^2 h_1 \Delta(u/n)_1 + A_2^2 h_2 \Delta(u/n)_2 + A_3^2 h_3 \Delta(u/n)_3 + A_4^2 h_4 \Delta(u/n)_4 + A_5^2 h_5 \Delta(u/n)_5 + A_6^2 h_6 \Delta(u/n)_6 < 0.5 \mu\text{m} \quad (27)$$

$$S_{ii} = A_1 B_1 h_1 \Delta(u/n)_1 - A_2 B_2 h_2 \Delta(u/n)_2 + A_3 B_3 h_3 \Delta(u/n)_3 + A_4 B_4 h_4 \Delta(u/n)_4 + A_5 B_5 h_5 \Delta(u/n)_5 + A_6 B_6 h_6 \Delta(u/n)_6 < 0.5 \mu\text{m} \quad (28)$$

$$P = k_{11} \frac{k_{11}}{n_1} + \frac{k_{12}}{n_2} + \frac{k_{13}}{n_3} + \frac{k_{14}}{n_4} + \frac{k_{15}}{n_5} + \frac{k_{16}}{n_6} < 0.5 \mu\text{m} \quad (29)$$

$$C_T = B_1 h_1 \Delta(\delta n/n)_1 + B_2 h_2 \Delta(\delta n/n)_2 + B_3 h_3 \Delta(\delta n/n)_3 + B_4 h_4 \Delta(\delta n/n)_4 + B_5 h_5 \Delta(\delta n/n)_5 + B_6 h_6 \Delta(\delta n/n)_6 < 0.5 \mu\text{m} \quad (30)$$

$$k_3 = [-k_{11}, d_1/n_1, -k_{12}, d_2/n_2, -k_{13}, d_3/n_3, -k_{14}, d_4/n_4, -k_{15}, d_5/n_5, -k_{16}] = 1/4 \quad (31)$$

식 (27), (28), (29), (30), (31)을 동시에 만족시키도록 $k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{15}, k_{16}$ 를 optimization 기법으로 몇번의 iteration을 통해 구한다. 이때 k_{11} 는 자유 설계변수로서 미리

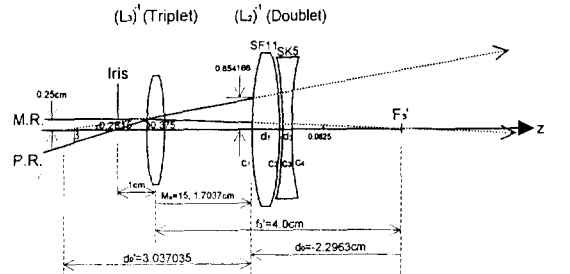


그림 7. $(L_2)^1$ 의 제원. $(L_3)^1, (L_2)^1$ 는 L_3, L_2 각각을 광축위에서 좌우 뒤집어 놓은 꼴을 뜻함.

표 3. 3rd order aplanatization을 만족하는 $(L_3)^1$ 의 설계제원

Surface Number	0	1	2	3	4	5	6
Curvature (1/cm)		0.104604	-0.063875	0.546680	-0.003195	-0.128511	0.544025
Distance (cm)	1.0	0.6667	0.1333	1.3333	0.1333	0.2667	

표 4. 3rdorder aplanatization을 만족하는 $(L_2)^1$ 의 설계제원

Surface Number	1	2	3	4
Curvature (1/cm)	0.636532	-0.078238	-0.381090	-0.120022
Distance (cm)	0.6667	0.1333	0.2667	

정해준다. 다음에 식 (27), (28), (29), (30), (31)을 만족하는 설계치를 제시한다(표 3).

2.2 (L₂)⁻¹ 설계

설계변수로는 곡률 변수 c₁, c₂, c₃, c₄와 거리변수 d₁, d₂, d₃가 있다(그림 7 참조). 렌즈 두께 d₁=0.6667 cm, d₃=0.1333 cm로 정하고 렌즈사이의 간격(d₂)도 0.2667 cm로 정했다. 그러면 설계변수는 c₁, c₂, c₃, c₄로서 총 4개이다. Aplanat 렌즈를 만들 조건(S_T<0.5 μm, S_H<0.5 μm), 총굴절능=1/4이 될 조건을 고려하면 자유설계변수(c₁)는 하나 남는다. (L₂)⁻¹의 설계는 L₁설계와 Gaussian bracket의 표현이 동일하여서 생략한다. 다음에 aplanat 조건을 만족하고 (L₂)⁻¹의 굴절능이 1/4인 설계제원이 있다(표 4). 이때 종색수차계수(C_L), 횡색수차계수(C_T)는 다음과 같다.

$$C_L = -3.807 \times 10^{-4} \text{ cm}, C_T = -1.268 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

IV. 설계의 최적화^[10]

초기 광학계에 대한 최적화는 objective group과 eyepiece group 두 부분으로 나누어서 실시한다. Objective group은 L₀렌즈(직경 6.2 cm, 초점거리 21 cm인 망원경 대물경)와 L₁렌즈로 구성하고, eyepiece group은 L₂렌즈와 L₃렌즈이다. 최적화 과정은 먼저 초기 광학계에 대해 각각의 단점을 보완할 수 있는 방향으로 computer를

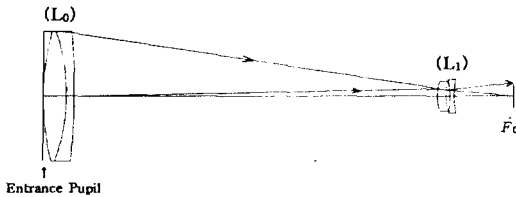


그림 8. Objective group(L₀+L₁)의 광학계(M_a=15).

이용하여 광학계의 최적화 과정을 실행하는데, 이때 기존의 장점이 약화 또는 소멸되어 버릴 소지가 있으므로 적당한 배려가 필요하다. 최적화 과정은 광학계의 특정 한 상태에 대한 지표가 되는 merit function값이 줄어들도록 DLS(Damped Least Square)최적화 방법을 사용하여 광학계의 설계변수 일부 또는 모두를 변화시켜 원하는 광학계의 상태를 얻는 과정이다. 여기서 merit function은 광학계의 단점을 야기시키는 양에 많은 가중치를 주는 오차함수(error function)의 제곱합의 합으로 정의된다. 오차함수는 광학계의 상태를 설계변수의 함수로 수치화한 상태함수로서 특정광선들의 유향광선수차, 광학계 자체에 관련된 값을 수치화한 함수들로 구성하였다.

1. Objective group (L₀+L₁)

L₀렌즈의 곡률 변수 3개와 L₁렌즈 곡률 변수 4개와 거리변수 3개를 변화시켜 최적화를 실시하였다. 최적화는 M_a=15일 때 최적화한 결과가 M_a=7일 때보다 더 나은 결과를 보였다. 즉, M_a=15일 때 최적화한 결과를 M_a=7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14일 때 수차특성을 조사하여 보니 M_a=15일 때 최적화한 결과와 큰차이를 보이지 않았다. 다음에 objective group의 광학계, 설계제원 및

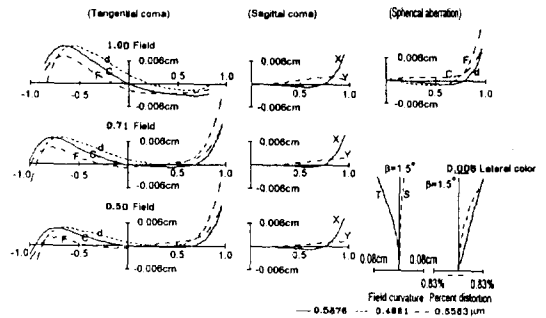


그림 9. Objective group(L₀+L₁)의 수차특성(M_a=15).

표 5. M_a=15 일 때, objective group(L₀+L₁)의 설계제원

(단위 cm)

	Surface	Radius	Thickness	M _a terial	Half-clear Aperture
Entrance pupil	1	0.0000	0.000	Air	3.10
L ₀	2	11.9045	1.120	BK7	3.10
	3	-9.5928	0.380	SF2	3.10
	4	-35.7373	17.683	Air	3.10
L ₁	5	2.2393	0.400	SF11	0.72
	6	2.1612	0.200	Air	0.69
	7	-4.2383	0.200	SK5	0.69
	8	3.9743		Air	0.82

표 6. $M_a=15$ 일 때, eyepiece group(L_2+L_3)의 설계제원

(단위 cm)

	Surface	Radius	Thickness	Material	Half-clear Aperture
Exit Pupil (L_3) ⁻¹	1/	0.0000	1.000	Air	0.25
	2	-4.7657	0.200	LaF3	0.65
	3	-2.2450	0.100	Air	0.75
	4	6.0321	0.500	LaF3	0.78
	5	-4.3435	0.100	Air	0.80
	6	5.4355	0.200	SF6	0.82
(L_2) ⁻¹	7	2.0092	0.249	Air	1.28
	8	3.0292	0.600	SK5	1.35
	9	-5.5627	0.100	Air	1.35
	10	-11.5413	0.200	SF11	1.31
	11	-37.1778		Air	1.30

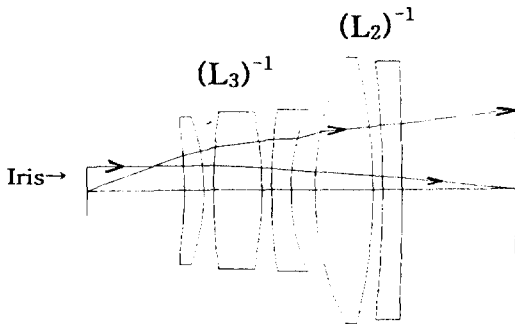


그림 10. Eyepiece group(L_2+L_3)의 광학계($M_a=15$).

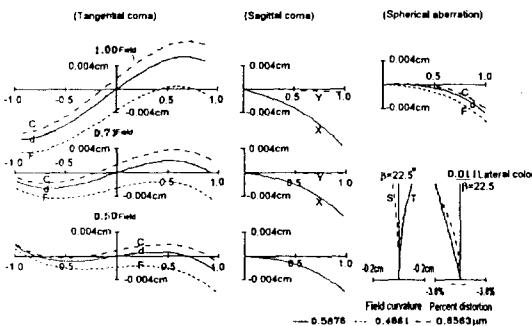
$M_a=15$ 일 때 설계제원 및 수차특성이 제시되어 있다 (그림 10, 표 6, 그림 11), 눈의 분해능은^[11-13] 축상물점에 대하여 명시거리(25cm)에서 약 0.01cm이므로, 각 배율 $M_a=15$ 를 기준으로 했을 때 눈은 구면수차(d-line에 대해서 10^{-3} cm order)를 느낄 수 없다. 그리고 반시계각이 20° 의 물점에 대하여 눈의 분해능은 0.1cm 정도이므로, 눈은 비축수차들(coma, 비점수차, 상면만곡, 왜곡수차)을 거의 느낄 수 없다.

V. 결 론

Zoom접안경에 대해서 Gauss광학적인 해석을 하였고, L_1, L_2, L_3 렌즈에 대해서 해석적인 해(Gauss 괄호를 사용하여 수차계수를 표현하고 Seidel 3차 수차중 구면수차계수, coma계수가 $0.5 \mu\text{m}$ 보다 작은 해)를 구하였다. 이미 설계되어 있는 대물경과 L_0 렌즈(objective group)를 한 그룹으로 해서 최적화를 실시하였고, L_2, L_3 렌즈(eyepiece group)를 뒤집어서 최적화를 하였다. Eyepiece부분의 최적화한 결과는 눈의 분해능을 기준으로 평가했다.

참 고 문 헌

그림 11. Eyepiece group(L_2+L_3)의 수차특성($M_a=15$).



수차특성($M_a=15$ 일 때)이 제시되어 있다(그림 8, 표 5, 그림 9).

2. Eyepiece group (L_2+L_3)

Eyepiece group의 최적화는 뒤집어 놓고 실시한다. (L_3)⁻¹렌즈와 (L_2)⁻¹렌즈의 경우 최적화를 실시한 결과

[1] 이상수, 기하광학(교학 연구사, 서울, 1985) chap. 1, 2.
 [2] W. T. Welford, "Aberration of the Symmetrical Optical System", Adams Hilger Ltd., 1986, Bristol.
 [3] 임천석, 조영민, 김종대, 이상수, "Aplanat 조건과 Achromat조건 Gauss괄호 표현과 Telephoto형

- 망원경 대물렌즈의 설계,” 한국광학회지, **4**, 1(1993).
- [4] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics* (Interscience Publisher, New York, 1978).
- [5] R. W. Daniels, *An Introduction to Numerical Methods and Optimization Techniques*(North-Holland, New York, 1978) chap. 8.
- [6] G. N. Repinskii, “Wide-angle five lens eyepiece,” *Sov. J. Opt. Technol.*, **45**, 287(1987).
- [7] Thomas L. Clarke, “Simple flat-field eyepiece,” *Applied Optics*, **22**, 1807(1983).
- [8] A. Nagler, “Ultra Wide Angle Flat Field Eyepiece,” U.S. Patent 4286844(1981).
- [9] W. H. Skidmore, “Wide Angle Eyepiece,” U.S. Patent 3390935 (1967).
- [10] Genesee Reference Manual(Genesee Optics Software, Inc., New York, 1991) chap. 4.
- [11] M. Laikin, *Lens Design*(Marcel Dekker Inc., New York, 1991) pp. 101-111.
- [12] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*(Pergamon Press, New York, 1989) pp. 233-235.
- [13] K. N. Olge, “On the Resolving Power of the Human Eye,” *JOSA*, **41**, 517(1951).

Optical Design of a Zoom Eyepiece

Cheon Seog Rim and Sang Soo Lee

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

Choong Sun Park and Jai Soon Kim

Optechs Korea, Inc., Incheon 563-4, Korea

(Received: June 1, 1994)

By Gaussian optics, a zoom eyepiece is analyzed, which has the diameter of exit pupil 0.5 cm, eye-relief 1 cm, and angular magnification $M_a = 7 \sim 15$. The initial design is based on this analysis. Telescope objective which was previously designed has focal length(f_0') 21.0 cm, and its clear aperture is 6.2 cm. Zoom telescope has half field angle $\beta = 1.5^\circ$ at the entrance pupil and at exit pupil it is $\beta' = 1.5^\circ \times (7 \sim 15) = 10.5^\circ \sim 22.5^\circ$. Zoom eyepiece consists of three groups, of which each one satisfies the Seidel 3rd order aplanatization. Final design is obtained by optimization for the finite ray aberration, and the zoom eyepiece is assessed on the basis of the resolution of eyes.