

## 얇은 렌즈 근사를 이용한 Telephoto Lens계의 수차해석

문준석 · 이종용†

청주대학교 정보기술공학부 레이저광정보공학전공

Ⓣ 360-764 충북 청주시 상당구 내덕동 36번지

박성찬

단국대학교 첨단과학대학 전자물리전공

Ⓣ 330-714 충남 천안시 안서동 산 29번지

(2002년 4월 4일 받음, 2002년 6월 26일 수정본 받음)

2매 접합렌즈와 단렌즈로 구성된 2군 렌즈계의 구면수차, 코마, 종색수차 보정을 위한 3차수차 전개식을 얇은렌즈 근사를 이용하여 해석적으로 유도하였다. 유도된 3차수차 전개식은 telephoto 렌즈계의 설계에 적용되었다. 초기설계에서 광학유리 조합은 crown-flint-crown 조합과 flint-crown-flint 조합에 관하여 조사하였다. Crown-flint-crown 조합의 경우 2가지 형태의 achromatic aplanat이 존재하였다. Flint-crown-flint 조합의 경우에서도 2종류의 해가 존재하였으나, 해의 형태가 유용하지 못하였다.

주제어 : optical system design, telephoto-lens, thin lens approximation, achromatic aplanat.

### I. 서 론

Telephoto lens는 제한된 경통길이를 가지는 사진기에서 초점거리가 긴 렌즈계가 필요함에 따라 개발되었고, 양의 굴절능을 가지는 제 1군과 음의 굴절능을 가지는 제 2군으로 구성된다. 이 렌즈계는 1834년 Barlow<sup>[1]</sup>에 의해 그 원리가 고안되었으며, Busch와 Dallmeyer에 의해 개발된 telephoto 렌즈는 각각 양과 음의 이중렌즈로 구성되었는데 zonal spherical aberration이 크고, F/수가 5.6으로 제한되어 있다.<sup>[2]</sup> 이후 Lee에 의해 개발된 광학계는 air-space meniscus를 사용하여 F/수가 5.0으로 작아지고, 왜곡수차도 상당히 잘 보정되었다.<sup>[3]</sup> Telephoto-ratio는  $efl$ 과 전체길이(over-all length)의 비이며, 대부분의 telephoto 렌즈는 telephoto-ratio가 0.75에서 0.85값을 갖지만<sup>[4]</sup> Matsui에 의해 개발된 telephoto 렌즈는 F/수가 2.8이며, telephoto-ratio는 0.9~0.96으로 초점거리가 매우 길고, 구경이 크면서도 좋은 성능을 보여주고 있다.<sup>[5]</sup> 국내에서는 전, 후군이 2매 접합렌즈로 구성된 telephoto형 망원경 대물렌즈를 module별로 수차보정을 하여 설계된바 있다.<sup>[6,7]</sup> Telephoto lens는 망원경 대물렌즈나 35 mm 사진기용 렌즈로 주로 사용되며, 현대의 대부분의 camera 렌즈들은 양과 음의 렌즈들의 조합으로서, 엄격한 의미에서의 telephoto lens는 아니지만 전체적으로 over-all length가 감소하는 방향으로 설계되어지고 있다.<sup>[8]</sup> 사진렌즈 뿐만 아니라 telecentric system,<sup>[9]</sup> zoom 광학계등도 제품의 소형화를 위해 telephoto lens의 형태를 가지는 경우가 있다.

광학설계는 형상 설계, 3차수차를 근사적으로 보정하는 기초설계, 최적화를 통한 수차보정의 순으로 진행된다. 효율적인

설계 최적화를 위하여 3차수차를 보정하는 방법과 보정된 해가 존재하는 영역에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 2군 3매의 렌즈구성에서 얇은렌즈 근사를 통하여 색수차, 구면수차, 코마를 보정하는 방법을 연구하고 이를 telephoto형의 렌즈설계에 적용하였다. Telephoto 렌즈계는  $efl$ 을 100 mm로 규격화하였고 3매의 렌즈로 구성되어 수차보정에 한계가 있으므로 구경비는 5.6, 시계각은 15°로 설정하였다. 얇은 렌즈계로 근사하여 구면수차, 코마, 종색수차가 보정된 해는 등가렌즈 변환법<sup>[10-12]</sup>을 사용하여 두꺼운 렌즈로 변환하였다. Telephoto 렌즈계의 설계에서는 군간거리의 변화와 광학유리의 조합에 따른 잔류수차의 변화를 조사하였다.

### II. Telephoto 렌즈계의 3차 수차

#### 2.1. 2군 3매 telephoto 렌즈계

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 2군 3매 telephoto lens의 형태이다. 제 1군은 2매 접합렌즈로 구성되고 제 2군은 단렌즈로 구성되었다. 렌즈계는 공기중에 놓여 있으며, 조리개는 제 1면에 놓여있다.  $n_0, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$ 는 각 면에서의 굴절후 매질의 굴절률이며, Fig. 1에서  $n_0, n_3, n_5$ 는 공기중이므로 모두 1이 된다.  $u_0$ 는 1면으로 입사하는 marginal ray의 근축각,  $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$ 는 각 면에서 굴절된 광선의 근축각이다.  $H'$ 는 렌즈계의 제 2주요면이며  $f'$ 은 렌즈계의 유효초점거리,  $\kappa$ 는 telephoto-ratio,  $\kappa l'$ 은 렌즈계의 전체길이인 over-all length이다. Telephoto-ratio는 over-all length를 유효초점거리로 나눈 값이며 통상적으로 0.75~0.85 범위의 값을 갖는다. Fig. 1의 telephoto 렌즈계는 제 1군이 양의 굴절능을, 제 2군은 음의 굴절능을 갖게 되어 유효초점거리가 over-all length 보다 길어지게 된다.

†E-mail: julee@chongju.ac.kr

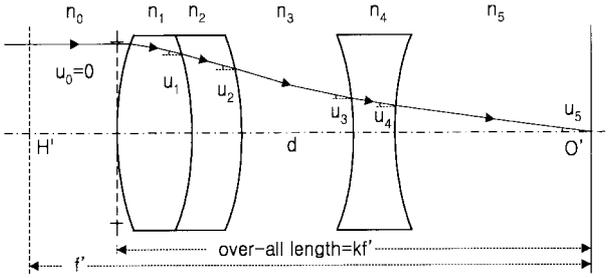


Fig. 1. Optical layout of the telephoto lens system.

Fig. 1에서 각 군의 굴절능의 배치는 유효초점거리  $f'$ , telephoto-ratio  $\kappa$ , 군간의 거리  $d$ 가 주어지면 다음의 (1), (2) 식으로부터 구할 수 있다.

$$f'_f = \frac{f'}{f'(1-\kappa) + d} \tag{1}$$

$$f'_r = \frac{(\kappa f' - d)(f'_f - d)}{f'_f - \kappa f'} \tag{2}$$

위에서  $f'_f$ 은 제1군의 유효초점거리,  $f'_r$ 은 제2군의 유효초점거리이다.

2.2. 2군 3매 telephoto 렌즈계의 3차 수차

광학계의 기초설계에서는 3차수차를 근축광학적 물리량으로 근사하여 계산되는 Seidel 수차가 사용되고 있다. 2군 telephoto 렌즈계의 3차수차는 제1군의 수차기여분과 제2군의 수차기여분의 합으로 주어진다. 본 연구에서는 조리개가 제1군의 제1면에 있는 것으로 가정하였으며, 다음식에서 첨자  $f$ 는 제1군의 Seidel 수차기여분을 나타낸다. 첨자  $r$ 은 제2군에서 조리개가 제2군의 제1면에 있는 경우에 대한 Seidel 수차이며, (3)~(9) 식에서 제2군의 수차기여분은 조리개의 이동에 의한 수차변화량을 고려하여 표현되었다.<sup>[13]</sup> (3)~(10)식에서  $h_1$ 은 marginal ray가 제1군에 입사하는 높이이며,  $h_2$ 는 제2군에 입사하는 높이,  $H$ 는 광학계의 Lagrange 불변량이다.

$$S_I = S_{If} + S_{Ir} \tag{3}$$

$$S_{II} = S_{IIIf} + S_{IIr} + (HE)S_{Ir} \tag{4}$$

$$S_{III} = S_{IIIIf} + S_{IIIr} + 2(HE)S_{IIr} + (HE)^2S_{Ir} \tag{5}$$

$$S_{IV} = S_{IVIf} + S_{IVr} \tag{6}$$

$$S_V + S_{Vf} + S_{Vr} + (HE)(S_{IVr} + 3S_{IIIr}) + 3(HE)^2S_{IIr} + (HE)^3S_{Ir} \tag{7}$$

$$C_L = C_{Lf} + C_{Lr} \tag{8}$$

$$C_T = C_{Tf} + C_{Tr} + (HE)C_{Lr} \tag{9}$$

$$E = \frac{d_3}{h_1 h_2 n_3} \tag{10}$$

위 식에서 (HE)가 포함된 항은 조리개 이동에 의한 제2군의 수차변화이다.

제1군은 두께가 0인 접합렌즈로 가정하면, 제1군의 3차수차는 다음과 같다.

$$S_{If} = h_1 \left[ \left\{ \frac{n_1}{(n_1-1)^2} - \frac{n_1 n_2^2}{(n_1-n_1)^2} \right\} u_1^3 + \frac{n_1 n_2 (n_1+2n_2)}{(n_2-n_1)} u_2 u_1^2 - \frac{n_1 n_2 (2n_1+n_2)}{(n_2-n_1)^2} u_2^2 u_1 + \left\{ \frac{n_1^2 n_2}{(n_2-n_1)^2} - \frac{n_2}{(n_2-1)^2} \right\} u_2^3 + \frac{n_2 (n_2+2)}{(n_2-1)^2} u_3 u_2^2 - \frac{n_2 (2n_2+1)}{(n_2-1)^2} u_3^2 u_2 + \frac{n_2^2}{(n_2-1)^2} u_3^3 \right] \tag{11}$$

$$S_{IIIf} = H \left[ \left\{ \frac{n_1 (n_2-1)}{(n_1-1)(n_2-n_1)} \right\} u_1^2 \frac{(n_2+n_1)}{(n_2-n_1)} u_2 u_1 + \frac{n_2 (n_1-1)}{(n_2-n_1)(n_2-1)} u_2^2 + \frac{(n_2+1)}{(n_2-1)} u_3 u_2 - \frac{n_2}{(n_2-1)} u_3^2 \right] \tag{12}$$

$$S_{IIIIf} = \frac{H^2}{h_1} u_3^2 \tag{13}$$

$$S_{IVIf} = \frac{H^2}{h_1} \left\{ \left(1 - \frac{1}{n_2}\right) u_1 - \left(1 - \frac{1}{n_1}\right) u_2 + \frac{1}{n_2} u_3 \right\} \tag{14}$$

$$S_{Vf} = \frac{H^3}{h_1^2} \left( \frac{1}{n_0} - \frac{1}{n_3} \right) = 0 \tag{15}$$

$$C_{Lf} = h_1 \left[ \left\{ \frac{n_1 \gamma_1}{(n-1)} - \frac{n_1 n_2 (\gamma_2 - \gamma_1)}{(n_2-n_1)} \right\} u_1 + \left\{ \frac{n_1 n_2 (\gamma_2 - \gamma_1)}{(n_2-n_1)} - \frac{n_2 \gamma_2}{(n_2-1)} \right\} u_2 + \frac{n_2 \gamma_2}{(n_2-1)} u_3 \right] \tag{16}$$

$$C_{Tf} = H(\gamma_3 - \gamma_0) = 0 \tag{17}$$

$$\gamma = \frac{\delta n}{n} = \frac{n_d - 1}{n_d v_d} \tag{18}$$

(18)식에서  $\gamma$ 는 렌즈 재료의 분산을 나타내는 parameter이며,  $n_d$ 는  $d$ -선의 굴절률,  $v_d$ 는 분산상수이다.

제2군으로 두께가 0인 단렌즈가 사용되고, 조리개가 제2군의 1면에 있을 때의 3차수차는 다음과 같다.

$$S_{Ir} = h_2 \left[ \frac{n_4 (n_2+2)}{(n_4-1)} (u_5 - u_3) u_4^2 - \frac{n_4 (2n_4+1)}{(n_4-1)^2} (u_5^2 - u_3^2) u_4 + \frac{n_4^2}{(n_4-1)} (u_5^3 - u_3^3) \right] \tag{19}$$

$$S_{IIr} = H \left[ \frac{(n_4+1)}{(n_4-1)} (u_5 - u_3) u_4 - \frac{n_4}{(n_4-1)} (u_5^2 - u_3^2) \right] \tag{20}$$

$$S_{IIIr} = \frac{H^2}{h_2} (u_5 - u_3) \tag{21}$$

$$S_{IVr} = \frac{H^2}{h_2^2} \left\{ \frac{1}{n_4} (u_5 - u_3) \right\} \tag{22}$$

$$S_{Vr} = 0 \tag{23}$$

$$C_{Lr} = h_2 \left[ \frac{n_4 \gamma_4}{(n_4 - 1)} (u_5 - u_3) \right] \quad (24)$$

$$C_{Tr} = H(\gamma_5 - \gamma_3) = 0 \quad (25)$$

### 2.3. 2군 3매 telephoto 렌즈계의 수차보정

얇은 2군 3매 telephoto 렌즈계의 설계조건이 주어지고 각 군의 굴절능의 배치가 결정되면 근축각  $u_0, u_3, u_5$ 가 결정되며, (3)~(25)식으로부터 각각의 3차수차는 근축각  $(u_1, u_2, u_4)$ 의 함수로 주어진다. 사용되는 렌즈의 재질이 모두 결정되면, Fig. 1의 telephoto 렌즈계에서는 근축각  $(u_1, u_2, u_4)$ 가 설계변수로 사용될 수 있으며, 이를 이용하면 3종의 수차보정이 가능하다.

(8), (16), (24)식에서 전체광학계의 종색수차는

$$C_L = C_{Lf} + C_{Lr} = 0 \quad (26)$$

$$C_{Lf} = h_1 \left[ \left\{ \frac{n_1 \gamma_1}{(n_1 - 1)} - \frac{n_1 n_2 (\gamma_2 - \gamma_1)}{(n_2 - n_1)} \right\} u_1 + \left\{ \frac{n_1 n_2 (\gamma_2 - \gamma_1)}{(n_2 - n_1)} - \frac{n_2 \gamma_2}{(n_2 - 1)} \right\} u_2 + \frac{n_2 \gamma_2}{(n_2 - 1)} u_3 \right]$$

$$C_{Lr} = h_2 \left[ \frac{n_4 \gamma_4}{(n_4 - 1)} (u_5 - u_3) \right] \quad (27)$$

이므로, 종색수차의 보정조건은 다음과 같다.

$$u_2 = \frac{b_2 u_1 + b_3 + a_1 b_4}{b_1}, \quad a_1 = \frac{h_2}{h_1} \quad (28)$$

$$b_1 = \frac{n_1 n_2 (\gamma_2 - \gamma_1)}{(n_2 - n_1)} - \frac{n_2 \gamma_2}{(n_2 - 1)}$$

$$b_2 = \frac{n_1 n_2 (\gamma_2 - \gamma_1)}{(n_2 - n_1)} - \frac{n_1 \gamma_1}{(n_1 - 1)}$$

$$b_3 = -\frac{n_2 \gamma_2}{(n_2 - 1)} u_3$$

$$b_4 = \frac{n_4 \gamma_4}{(n_4 - 1)} (u_3 - u_5) \quad (29)$$

(28)식에서 종색수차의 보정조건은  $u_4$ 와는 무관하며,  $u_2$ 는  $u_1$ 의 함수로 주어진다.

(3), (11), (19)식에서 전체광학계의 구면수차의 보정조건은 다음과 같다.

$$S_I = S_{If} + S_{Ir} = 0 \quad (30)$$

$$S_{If} = h_1 \left[ \left\{ \frac{n_1}{(n_1 - 1)^2} - \frac{n_1 n_2^2}{(n_2 - n_1)^2} \right\} u_1^3 + \frac{n_1 n_2 (n_1 + 2n_2)}{(n_2 - n_1)^2} u_2 u_1^2 - \frac{n_1 n_2 (2n_1 + n_2)}{(n_2 - n_1)^2} u_2^2 u_1 + \left\{ \frac{n_1^2 n_2}{(n_2 - n_1)^2} - \frac{n_2}{(n_2 - 1)^2} \right\} u_2^3 + \frac{n_2 (n_2 + 2)}{(n_2 - 1)^2} u_3 u_2^2 - \frac{n_2 (2n_2 + 1)}{(n_2 - 1)^2} u_3^2 u_2 + \frac{n_2^2}{(n_2 - 1)^2} u_3^2 \right] \quad (31)$$

$$S_{Ir} = h_2 \left[ \frac{n_4 (n_4 + 2)}{(n_4 - 1)^2} (u_5 - u_3) u_4^2 - \frac{n_4 (2n_4 + 1)}{(n_4 - 1)^2} (u_5^2 - u_3^2) u_4 + \frac{n_4^2}{(n_4 - 1)^2} (u_5^2 - u_3^2) \right] \quad (32)$$

위 식에서 구면수차는  $u_4$ 의 2차 항으로 주어진다. 따라서  $(u_1, u_2)$ 가 주어졌다고 가정하면 구면수차의 보정조건은

$$S_I = e_1 u_4^2 + e_2 u_4 + e_3 \quad (33)$$

$$e_1 = \frac{a_1 n_4 (n_4 + 2)}{(n_4 - 1)^2} (u_5 - u_3)$$

$$e_2 = \frac{a_1 n_4 (2n_4 + 1)}{(n_4 - 1)^2} (u_5^2 - u_3^2)$$

$$e_3 = \frac{a_1 n_4^2}{(n_4 - 1)^2} (u_5^2 - u_3^2) + \frac{S_{If}}{h_1} \quad (34)$$

이며,  $u_4$ 에 대하여 다음과 같은 2개의 해가 존재할 수 있다.

$$\text{branch 1 : } u_4 = \frac{-e_2 + \sqrt{D}}{2e_1}$$

$$\text{branch 2 : } u_4 = \frac{-e_2 - \sqrt{D}}{2e_1} \quad (35)$$

$$D = e_2^2 - 4e_1 e_3 \quad (36)$$

(4), (12), (20)식에서 전체광학계의 코마수차  $S_{II}$ 의 보정조건은 다음과 같이 주어진다.

$$S_{II} = S_{IIf} + S_{IIr} + (HE)S_{Ir} = 0 \quad (37)$$

$$S_{IIf} = \left[ H \left\{ \frac{n_1 (n_2 - 1)}{(n_1 - 1)(n_2 - n_1)} \right\} u_1^2 - \frac{(n_2 + n_1)}{(n_2 - n_1)} u_2 u_1 + \frac{n_2 (n_1 - 1)}{(n_2 - n_1)(n_2 - 1)} u_2^2 + \frac{(n_2 + 1)}{(n_2 - 1)} u_3 u_2 - \frac{n_2}{(n_2 - 1)} u_3^2 \right]$$

$$S_{IIr} = H \left[ \frac{(n_4 + 1)}{(n_4 - 1)} (u_5 - u_3) u_4 - \frac{n_4}{(n_4 - 1)} (u_5^2 - u_3^2) \right] \quad (38)$$

종색수차의 보정조건에서  $u_2$ 는  $u_1$ 의 함수로 주어진다. 그리고 주어진  $u_1$ 에 대하여 (32)식의 구면수차 보정조건에서  $u_4$ 가 결정되기 때문에, (37)식은  $u_1$ 만의 함수가 된다. 따라서  $u_1$ 을 변화시키며  $S_{II}$ 가 보정되는 해를 찾으면, 3종의 3차수차가 모두 보정된 해를 얻을 수 있다.

## III. Telephoto 렌즈계의 설계

### 3.1. 설계조건

본 연구에서 사용된 telephoto 렌즈계는 1군이 2매 접합, 2군이 단렌즈이며, 광학계 전체가 공기중에 놓여 있으며, 조리개는 제1면에 위치한다. 설계된 렌즈는  $eff$ 이 100 mm, 반시계각이 7.5°인 사진용 렌즈이며, 렌즈가 3매로 구성되므로 수차보정의 한계가 있어 구경비는 F/5.6으로 하였다. 초기설계에서

Table 1. Design specification and optical characteristic of the materials

|                        |                                     |
|------------------------|-------------------------------------|
| effective focal length | : 100 mm                            |
| F-number               | : 5.6                               |
| Half field angle       | : 7.5°                              |
| Image height           | : 13.17 mm                          |
| Glass                  | : BaK-2 ( $n_d=1.53996, v_d=59.7$ ) |
|                        | : SF-2 ( $n_d=1.64768, v_d=33.8$ )  |

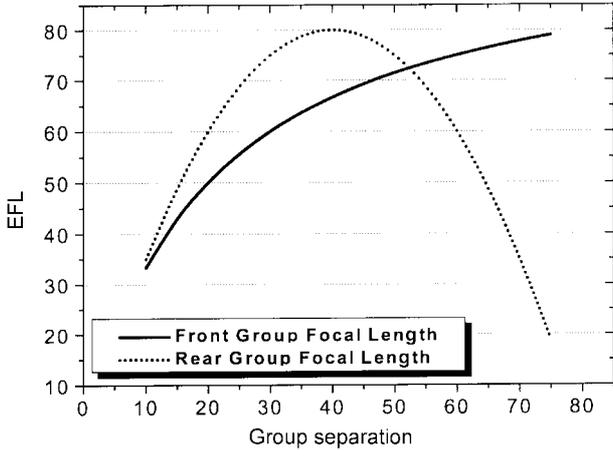


Fig. 2. Variation of group powers as a function of group separation.

광학유리의 선택은 다양한 조합이 가능하지만 두 번째 렌즈를 기준으로 대칭적 배치를 가지는 crown-flint-crown(C-F-C) 조합과 flint-crown-flint(F-C-F)의 경우에 대해서만 조사하였다. Crown 유리로는 BaK-2, flint 유리로는 SF-2를 사용하였다. 설계제원과 재질의 특성은 Table 1에 정리하였다.

Telephoto-ratio와 군간거리  $d$ 가 주어지면 제1군과 제2군의 유효초점거리는 (1), (2)식으로 주어진다. 유효초점거리가 100 mm이고 telephoto-ratio가 0.8인 경우, 군간거리  $d$ 에 따른 각 군의 초점거리는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서  $d$ 가 40 mm일 때 제2군의 굴절능이 가장 작으며,  $d$ 가 52.1 mm이면 제1군과 제2군의 굴절능의 절대값이 같다.

**3.2. Achromatic aplanat의 존재영역과 특성**

2군 3매 telephoto 렌즈계에서 군간거리  $d$ 를 변화시키면서 얇은렌즈 근사를 통하여 구면수차, 코마, 종색수차가 모두 보정된 해의 존재영역을 구하여 보면 Fig. 3, 4와 같다.

Fig. 3은 제1군의 재질로 BaK-2, SF-2의 순으로 사용하고, 제2군은 BaK-2를 사용한 crown-flint-crown(C-F-C) 조합인 경우이며, Fig. 4는 제1군에서 SF-2, BaK-2를 사용하고, 제2군은 SF-2를 사용한 flint-crown-flint(F-C-F) 조합이다. Fig. 3의 C-F-C 조합의 경우 (35)식의 branch 1이 branch 2보다 더 넓은 범위의 해를 갖고 있다.

Fig. 4의 F-C-F 조합의 경우 (35)식의 branch 1 영역에서만 해가 존재하며, C-F-C 조합에 비하여 해의 존재범위가 좁음을 알 수 있다. Fig. 3에서 A, B는 제2군의 굴절능이 가장 작은

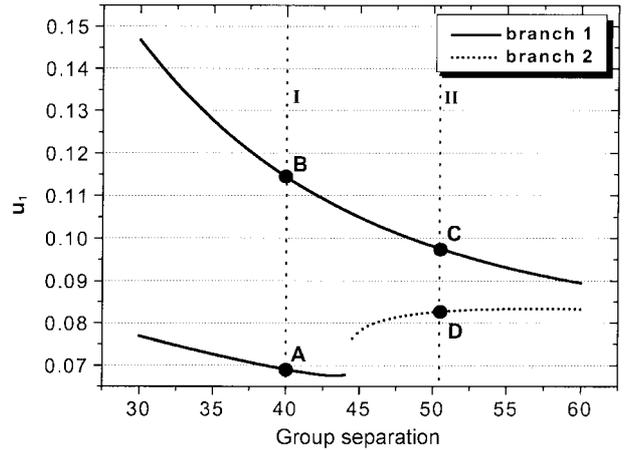


Fig. 3. The achromatic aplanat solutions for the case of crown-flint-crown combination (I: solution for maximum  $|f'_r|$ , II: solution for  $f'_r = |f'_r|$ ).

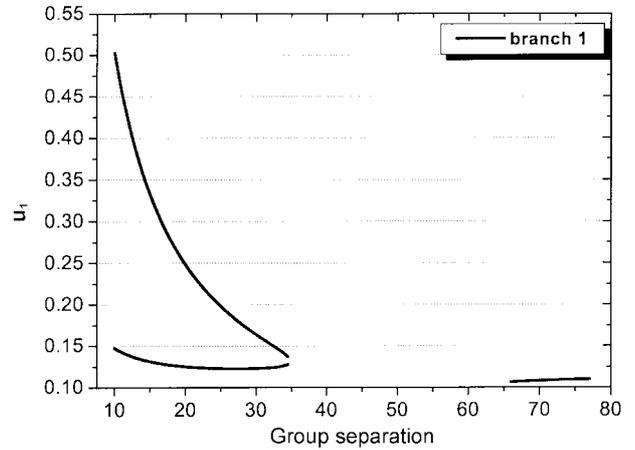


Fig. 4. The achromatic aplanat solutions for the case of flint-crown-flint combination.

경우인 때의 해를 나타내고 있고, C, D는 제1군과 2군의 굴절능의 절대값이 같은 경우에 해당하는 해이다. Table 2에는 A, B, C, D의 설계제원이 나타나 있으며, 유효구경(clear aperture)은 F/5.6, 반시계각 7.5°인 광학계의 구성에 필요한 렌즈군의 구경이며, D의 경우는 제2군에서 필요한 유효구경에 비하여 곡률반경이 작아 실용적인 광학계가 구성되지 않는다.

Fig. 5는 Fig. 3의 achromatic aplanat의 해에서 비점수차와 상면만곡의 변화를 나타내며, branch 1에서  $u_1$ 의 절대값이 작은 해가 다른 해보다 비점수차와 상면만곡이 작음을 알 수 있다. 이를 고려하여 설계의 최적화에서는 branch 1의 해 B, C를 초기설계로 사용하였다. Fig. 5에서 군간의 거리를 변수로 사용하면 비점수차, 또는 상면만곡이 추가로 보정된 해를 얻을 수 있으나 군간의 거리가 너무 길어져 실용성이 저하되는 문제점이 있다.

Table 3은 Fig. 3의 A, B를 렌즈의 두께가 각각 3.5 mm, 2.5 mm, 2.5 mm가 되도록 두꺼운 렌즈로 변환하였을 때의 설계제원이다. Table 3에서 구면수차, 코마, 종색수차가 0이 되지 않은 것은 렌즈의 두께를 0으로 근사하여 수차를 보정하였

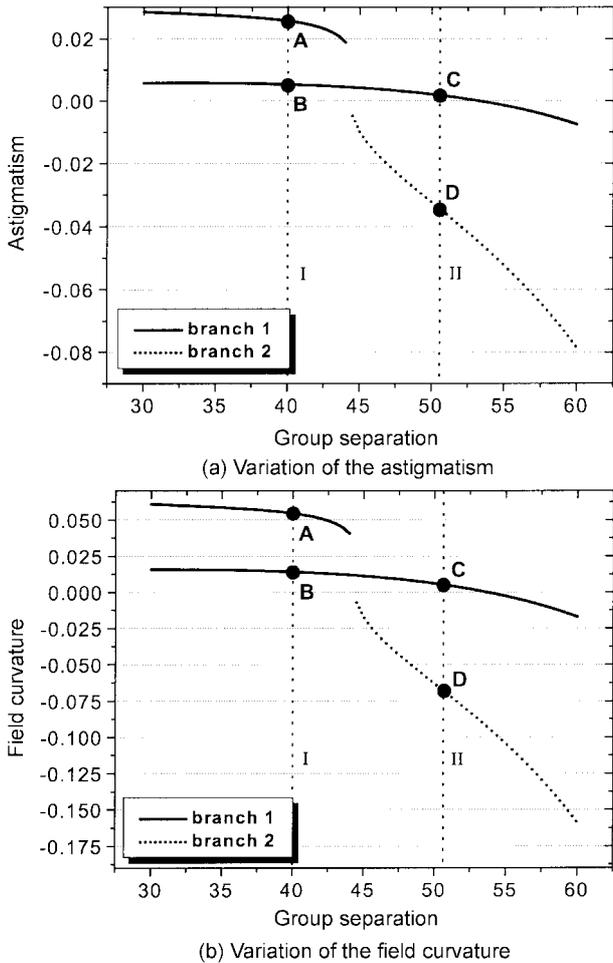


Fig. 5. Astigmatism and field curvature of the achromatic aplanat solutions for the case of crown-flint-crown combination.

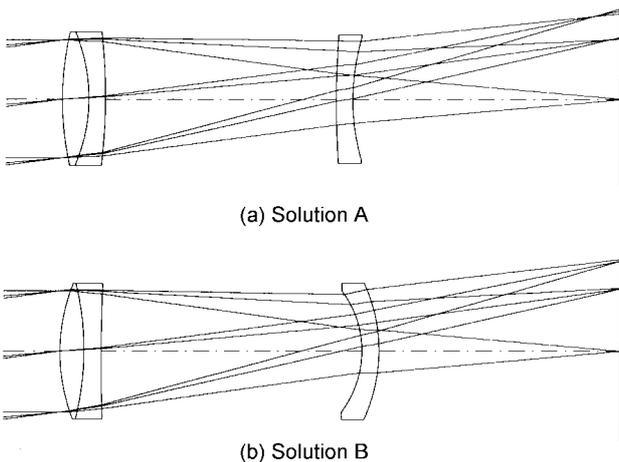


Fig. 6. Optical layout of the solution A and B.

기 때문에 생긴 차이이다. 또한 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환하는 과정에서 telephoto-ratio  $\kappa$ 가 0.8에서 각각 0.845, 0.82로 변화하였다. Fig. 6은 해 A, B의 형태이며, 2군의 경우에 있어 A는 모두 양의 곡률을 가지는 meniscus, B는 음

Table 2. Thin lens solution of the achromatic aplanat A, B, C and D in Fig. 3

| (a) Solution A   |           |       |                |
|------------------|-----------|-------|----------------|
| curvature radius | thickness | glass | clear aperture |
| 45.356           | 0.000     | BaK-2 | 17.86          |
| -26.853          | 0.000     | SF-2  | 18.40          |
| -91.134          | 40.00     |       |                |
| 138.733          | 0.000     | BaK-2 | 17.49          |
| 32.940           |           |       |                |
| (b) Solution B   |           |       |                |
| curvature radius | thickness | glass | clear aperture |
| 27.379           | 0.000     | BaK-2 | 17.86          |
| -43.931          | 0.000     | SF-2  | 18.48          |
| 285.355          | 40.00     |       |                |
| -16.656          | 0.000     | BaK-2 | 17.01          |
| -27.110          |           |       |                |
| (c) Solution C   |           |       |                |
| curvature radius | thickness | glass | clear aperture |
| 32.719           | 0.000     | BaK-2 | 17.89          |
| -38.467          | 0.000     | SF-2  | 18.42          |
| -4984.448        | 52.10     |       |                |
| -17.275          | 0.000     | BaK-2 | 18.00          |
| -30.895          |           |       |                |
| (d) Solution D   |           |       |                |
| curvature radius | thickness | glass | clear aperture |
| 37.731           | 0.000     | BaK-2 | 17.89          |
| -33.271          | 0.000     | SF-2  | 18.37          |
| -234.720         | 52.10     |       |                |
| 11.438           | 0.000     | BaK-2 | 14.15          |
| 8.854            |           |       |                |

의 곡률을 가지는 meniscus 형태를 가지고 있다. Fig. 7은 해 A, B의 유향광선수차를 나타내고 있으며, 상면만곡의 경우 해 B가 해 A보다 1/4 정도 발생하며 서로 부호가 반대이다. 왜곡수차의 경우 A, B 모두 큰 차이가 없음을 볼 수 있다.

Table 4는 제1군과 2군의 굴절능의 절대값이 같고,  $d=52.1$  mm인 해 C를 두꺼운 렌즈로 변환한 설계제원이다. 두꺼운 렌즈로 변환하는 과정에서  $\kappa$ 는 0.8에서 0.825로 변화하였다. Table 4의 해 D는 2군에서 필요한 유효구경에 비하여 곡률반경이 작아 실용성이 없다. Fig. 8(a)는 해 C의 형태이며, (b)는 유향광선수차이다. Fig. 3, 5에서 얇은렌즈 근사로 계산된 비점수차와 상면만곡은 해 C가 해 B에 비해 작은 것으로 계산되었지만, 유향광선수차에서는 해 B가 보다 좋은 수차특성을 가지고 있다.

3.3. 최적화

최적화 과정은 3종의 수차가 보정된 해 중에서 수차 특성이 상대적으로 우수한 해 B와 C를 초기 설계로 사용하였다. 최적화 조건으로는 이미 3차수차가 많이 보정되어 있으므로 고차수차를 줄이면서, over-all length의 증가를 감소하는 방향으로 진행하였다. Table 5와 Fig. 9, 10은 각각 해 B, C의 최적화된 설계제원과 형태이며, 최적화하는 과정에서  $\kappa$ 는 모두 0.86으로 변화하였다. 유향광선수차의 경우 비축수차를 줄이는

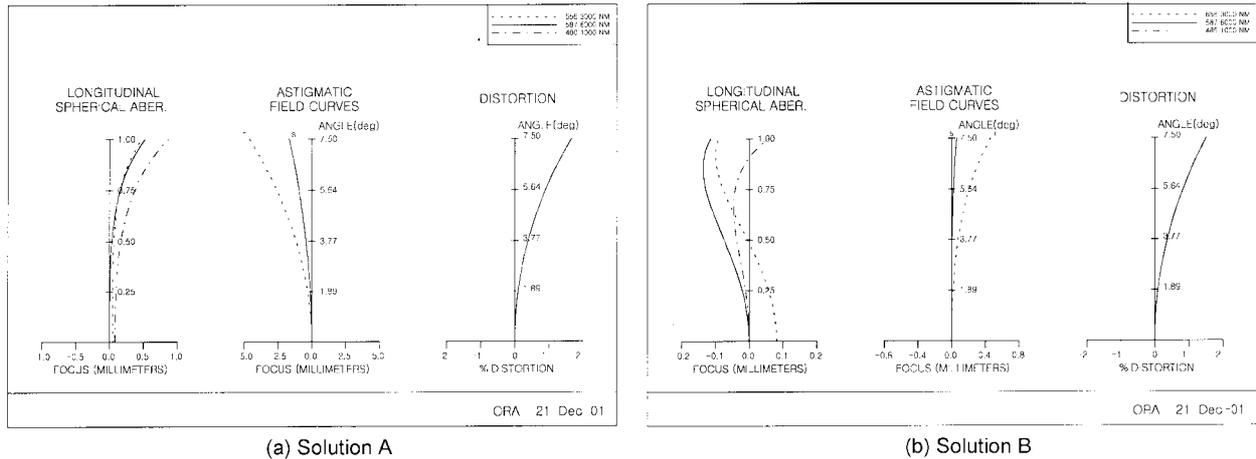


Fig. 7. Finite ray aberrations of the solution A and B.

Table 3. Design data of the achromatic aplanat A and B after thick lens conversion

| (a) Solution A                                |           |          |           |                |         |          |         |
|---|-----------|----------|-----------|----------------|---------|----------|---------|
| curvature radius                              | thickness |          | glass     | clear aperture |         |          |         |
| 45.356  | 3.500     |          | BaK-2     | 17.85          |         |          |         |
| -26.126                                       | 2.500     |          | SF-2      | 18.12          |         |          |         |
| -87.577                                       | 35.30     |          |           |                |         |          |         |
| 149.680                                       | 2.500     |          | BaK-2     | 17.67          |         |          |         |
| 33.326  |           |          |           |                |         |          |         |
| (b) Solution B                                |           |          |           |                |         |          |         |
| curvature radius                              | thickness |          | glass     | clear aperture |         |          |         |
| 27.379  | 3.500     |          | BaK-2     | 17.86          |         |          |         |
| -41.962                                       | 2.500     |          | SF-2      | 18.19          |         |          |         |
| 265.088                                       | 38.20     |          |           |                |         |          |         |
| -14.824                                       | 2.500     |          | BaK-2     | 16.81          |         |          |         |
| -23.904                                       |           |          |           |                |         |          |         |
| (c) the third-order aberrations of thick lens |           |          |           |                |         |          |         |
|   | $S_I$     | $S_{II}$ | $S_{III}$ | $S_{IV}$       | $S_V$   | $C_L$    | $C_T$   |
| Solution A                                    | -0.00014  | -0.00059 | 0.02225   | 0.00324        | 0.04248 | -0.00005 | 0.00338 |
| Solution B                                    | 0.00549   | 0.00250  | -0.00203  | 0.00183        | 0.03431 | 0.00062  | 0.00372 |

Table 4. Design data of the achromatic aplanat C and D after thick lens conversion.

| (a) Solution C                                |           |          |           |                |         |         |         |
|---|-----------|----------|-----------|----------------|---------|---------|---------|
| curvature radius                              | thickness |          | glass     | clear aperture |         |         |         |
| 32.719  | 3.500     |          | BaK-2     | 17.86          |         |         |         |
| -37.024                                       | 2.500     |          | SF-2      | 18.16          |         |         |         |
| -4693.869                                     | 50.40     |          |           |                |         |         |         |
| -15.192                                       | 2.500     |          | BaK-2     | 17.95          |         |         |         |
| -26.243                                       |           |          |           |                |         |         |         |
| (b) Solution D                                |           |          |           |                |         |         |         |
| curvature radius                              | thickness |          | glass     | clear aperture |         |         |         |
| 37.731  | 3.500     |          | BaK-2     | 15.47          |         |         |         |
| -32.168                                       | 2.500     |          | SF-2      | 15.72          |         |         |         |
| -222.242                                      | 42.31     |          |           |                |         |         |         |
| 15.036  | 2.500     |          | BaK-2     | 17.79          |         |         |         |
| 10.237  |           |          |           |                |         |         |         |
| (c) the third-order aberrations of thick lens |           |          |           |                |         |         |         |
|   | $S_I$     | $S_{II}$ | $S_{III}$ | $S_{IV}$       | $S_V$   | $C_L$   | $C_T$   |
| Solution C                                    | -0.00360  | 0.00134  | -0.00414  | 0.00105        | 0.04494 | 0.00067 | 0.00310 |
| Solution D                                    | 0.00017   | -0.00019 | -0.02451  | -0.00165       | 0.22597 | 0.00007 | 0.00331 |

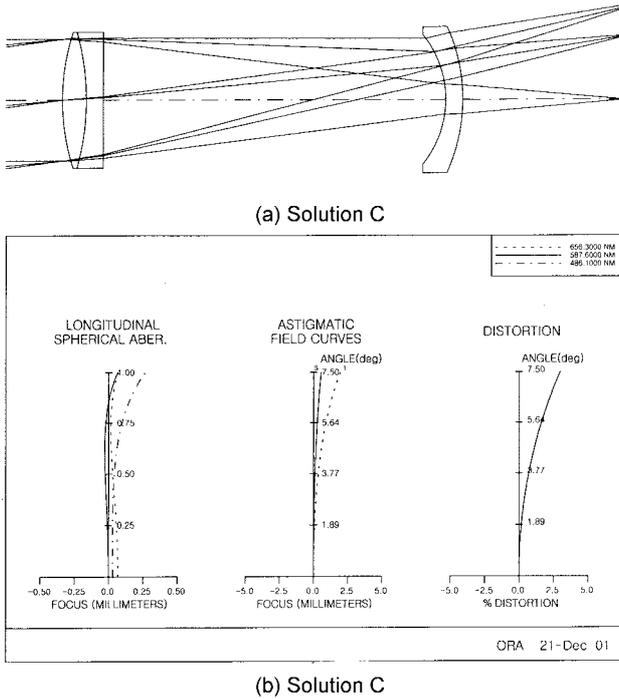


Fig. 8. Optical layout and finite ray aberrations of the solution C.

Table 5. Optimized design data of the solution B and C in Fig. 3.

| (a) Solution B   |           |       |                |
|------------------|-----------|-------|----------------|
| curvature radius | thickness | glass | clear aperture |
| 28.875           | 3.400     | BaK-2 | 17.86          |
| -45.211          | 2.500     | SF-2  | 18.18          |
| 245.852          | 40.10     |       |                |
| -15.991          | 3.000     | BaK-2 | 17.62          |
| -23.119          |           |       |                |
| (b) Solution C   |           |       |                |
| curvature radius | thickness | glass | clear aperture |
| 31.751           | 3.500     | BaK-2 | 17.90          |
| -42.470          | 2.500     | SF-2  | 18.20          |
| 556.932          | 45.50     |       |                |
| -17.005          | 2.500     | BaK-2 | 18.18          |
| -25.195          |           |       |                |

과정에서 구면수차는 조금 증가하였다. 최적화된 해 B, C를 비교하면, 해 C가 B에 비하여 구면수차가 작고, zonal focus에서 C선과 F선의 LSA가 보정되어 있으므로 수차의 균형이 잘 이루어진 것으로 생각된다.

## V. 결 론

본 연구에서는 제 1군이 2매 접합렌즈, 제 2군이 단렌즈로 구성된 telephoto 렌즈계를 얇은 렌즈계로 가정하여 구면수차, 코마, 종색수차를 보정한후, 이를 등가렌즈 변환법을 통해 두꺼운 렌즈계로 변환하여 3차수차가 근사적으로 보정된 광학계를 설계하는 방법을 연구하였다. 설계의 예로서 초점거리 100 mm, F/5.6인 telephoto 렌즈를 설계하였다. 이 렌즈계의 조리

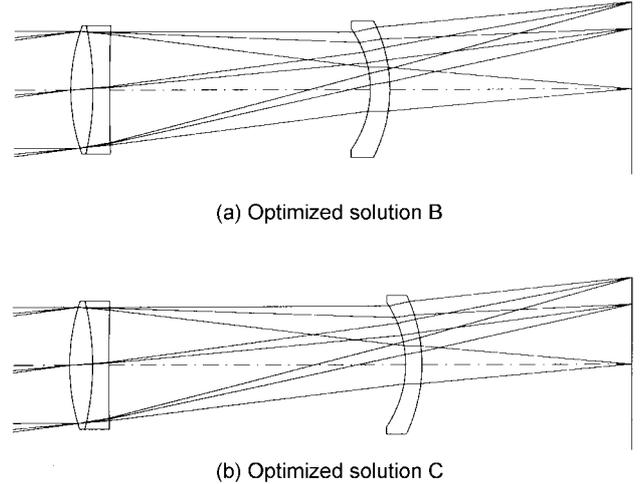
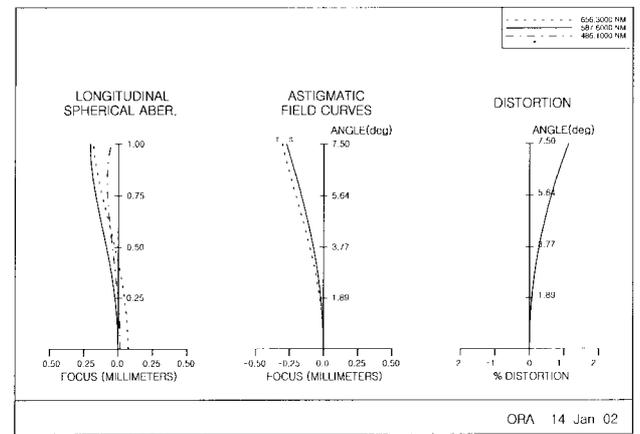
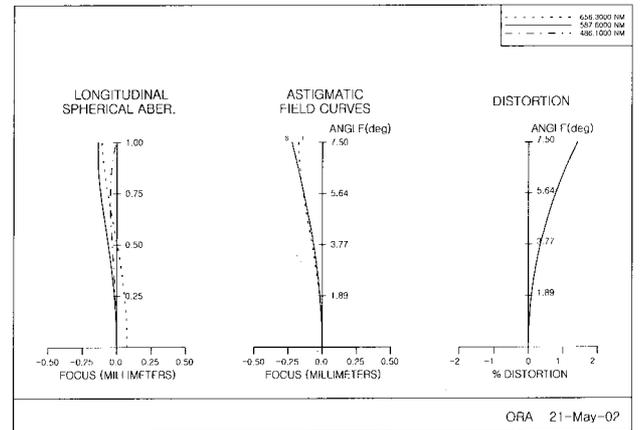


Fig. 9. Optical layout of the optimized solution B and C.



(a) Optimized solution B



(b) Optimized solution C

Fig. 10. Finite ray aberrations of the optimized solution B and C.

개는 제 1면에 있는 것으로 가정하였고, 반시계각은 7.5°로 하였다.

3차수차의 보정에 대한 연구에서는 구면수차, 코마, 종색수차를 보정하는 방법이 연구되었고, 설계에 사용된 광학유리의 조합에 따른 해의 영역을 조사하였다. 재질의 조합에 따른 해

의 존재 영역은 crown-flint-crown 조합이 flint-crown-flint 조합보다 더 넓은 해의 영역을 갖고 있음을 확인하였다. 따라서 crown-flint-crown 조합이 좀더 설계의 자유도가 높다고 판단된다. Crown 유리로는 BaK-2가 사용되었고, flint 유리는 SF-2를 사용하였다. 설계의 예로서 제 2군의 초점거리가 가장 길 때와 1, 2군의 초점거리의 절대값이 같을 때의 해에 대하여 3차수차를 비교하였다. 2가지 경우에 있어 모두 각각 2개의 수학적 해가 존재한다. 이중 2개의 해가 다른 해보다 잔류수차(비점수차, 상면만곡)가 작으며 실용적인 형태를 가지고 있다. 유용한 2가지 형태의 해에 대하여 최적화한 결과, telephoto-ratio가 조금 커졌으나 초기설계제원과 유사한 형태를 지니고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 제안된 얇은렌즈 근사를 통한 3차수차의 보정이 매우 효과적이며, 전체적으로 3차수차의 변화 특성이 잘 반영됨을 볼 수 있었고, 응용분야로는 렌즈매수가 적은 망원경 대물렌즈나 사진렌즈계의 초기설계에 유용하게 활용될 수 있다고 생각된다.

**참고문헌**

[1] Sidney F. Ray, *Applied Photographic Optics* (Focal Press, London, 1994). pp. 273-277.

[2] T. Dallmeyer, *Telephotography* (Heinemann, London, 1899).  
 [3] H. Lee, "The development of the telephotographic objective," *Proc. Opt. Conv.* 868 (1926).  
 [4] A. E. Conrady, *Applied Optics and Optical Design* (Dover Publications, New York, 1957).  
 [5] S. Matsui, "Telephoto lens system," U.S. Pat. 4338001, 1926.  
 [6] 임천석, 석사학위 청구논문, "색수차가 보정되고 aplanat 조건을 만족하는 telephoto형 망원경 대물렌즈의 설계 및 수차해석," 한국과학기술원(1993).  
 [7] 임천석, 조영민, 김종태, 이상수, "Aplanat조건과 Achromat 조건인 Gauss광학 표현과 Telephoto형 망원경 대물렌즈의 설계," 4권 3호, 243, 1993.  
 [8] D. Malacara, *Geometrical and Instrumental Optics* (Academic Press, London, 1998), pp. 86-89.  
 [9] D. Weiner, "Telephoto Attachments for Telecentric Lenses," *SPIE vol. 2537*, pp. 39-46, 1995.  
 [10] 이종웅, 김건수, "등가렌즈 변환의 일반화와 일반화된 등가렌즈의 3차수차식," 한국광학회지, 7권 4호, 305, 1996.  
 [11] 이종웅, 박성찬, 렌즈군의 일반화된 등가렌즈 변환, 한국광학회지, 7권 4호, 251, 1998.  
 [12] 전영세, 김형수, 이종웅, 박성찬, "등가렌즈를 이용한 2매 접합렌즈계의 설계," 한국광학회지, 9권 5호, 282, 1998.  
 [13] 이상수, 기하광학(교학연구사, 서울, 1985) Chap. 4.

**Aberration analysis of telephoto lens system by using thin lens approximation**

Joon Seok Moon<sup>†</sup> and Jong Ung Lee

*Division of Information Technology, Chongju University, Chongju 360-764, KOREA*  
<sup>†</sup>E-mail: julee@chongju.ac.kr

Sung Chan Park

*Department of Electric Physics, School of Advanced Sciences, Dankook University, Cheonan 330-714, KOREA*

(Received April 4, 2002; Revised manuscript received June 26, 2002)

We derived analytic formulae for the correction of spherical aberration, coma, and axial color of a two-components lens system consisted of a cemented doublet and a singlet by using the thin lens approximation. The correction formulae were applied to design a telephoto lens system. We examined two kinds of glass combinations in the design, one was crown-flint-crown combination and the other was flint-crown-flint combination. We found two kinds of achromatic aplanat solutions in the crown-flint-crown combination. For the case of flint-crown-flint combination, there were also two kinds of solutions, but their configurations are not useful in practice.

Classification code : SM.010.