

Optical Design of a Lister Objective Stable Against Chromatic Variation for 405-nm Wavelength

Jin-Hyung Kim and Jong-Ung Lee[†]

Department of Laser and Optical Information Engineering, Cheongju University,
298, Daeseong-ro, Cheongwon-gu, Cheongju 28503, Korea

(Received September 14, 2020; Revised October 8, 2020; Accepted October 12, 2020)

A Lister objective of NA 0.25 and 10 \times , stabilized against chromatic variation for a wavelength of 405 nm is designed. We develop a new solution for stabilizing a cemented doublet that has specified axial thicknesses. Using the new method, we can easily obtain a useful design for some practical purpose. At the initial design stage, two cemented doublets corrected independently are used. The stabilizing conditions for the whole system are maintained during optimization. The final design of the Lister objective shows that the chromatic variation of EFL, BFL, and RMS wavefront errors are very small at the 405-nm wavelength, as expected.

Keywords: Optical system design, Stabilized optical system, Microscope objective, Achromatization
OCIS codes: (080.2470) Geometric optical design; (080.3630) Lens; (080.3620) Lens system design

파장 405 nm에서 파장변화에 안정화된 Lister 대물렌즈 설계

김진형 · 이종웅[†]

청주대학교 레이저광정보공학과
☎ 28503 충청북도 청주시 청원구 대성로 298

(2020년 9월 14일 받음, 2020년 10월 8일 수정본 받음, 2020년 10월 12일 게재 확정)

NA 0.25, 10 \times 이고, 파장 405 nm에서 파장변화에 대하여 안정한 Lister 대물렌즈를 설계하였다. 이 연구에서는 2매 접합렌즈에서 주어진 축상두께를 가지면서 파장변화에 대한 안정화 조건을 만족시키는 해를 찾는 방법에 대하여 연구하였으며, 이를 통하여 보다 쉽게 사용목적에 유용한 설계를 얻을 수 있다. 초기설계에서는 각각 독립적으로 안정화된 2개의 접합렌즈가 사용되었으며, 최적화에서는 전체 광학계에서 안정화 조건이 유지되도록 하였다. 최종설계에서는 기대한 바와 같이 파장 405 nm에서 파장에 따른 EFL, BFL, RMS wavefront error가 매우 적음을 확인할 수 있었다.

Keywords: 광학계 설계, 안정화 광학계, 현미경 대물렌즈, 색수차 보정
OCIS codes: (080.2470) Geometric optical design; (080.3630) Lens; (080.3620) Lens system design

I. 서 론

광학유리의 굴절률은 파장에 따라 변화한다. 이에 따라 광학계는 사용하는 파장대역에서 파장변화에 따른 특성의 변화가 최소화되도록 설계될 필요가 있으며, 색수차가 보정된 일반적인 렌즈계로는 achromat와 apochromat가 있다. Achromat는 가시광선 대역에서 장파장과 단파장의 굴절능을 일치시켜 색수차의 발생을 억제하고 있으며, apochromat는 중심파장과 장파장, 단파장 3파장에서 굴절능을 일치시키고 있다

^[1-3]. 하지만 apochromat는 3종의 유리를 사용하는 3매의 렌즈가 조합이 되어야 하기 때문에 제작비용이 높다. 이 때문에 단순한 구조의 대물광학계에서는 2매의 렌즈로 구성되는 achromat가 주로 사용되고 있다. 광학유리는 가시광선 대역에서 파장이 긴 적색 영역에서는 굴절률의 변화가 적으나 400 nm 부근의 청색 대역에서는 파장이 짧아지면 굴절률이 급격히 증가하는 특성이 있다. 이로 인하여 가시광선 대역의 통상적인 achromat는 이 단파장 대역에서 결상성능의 저하가 크게 발생하며, 이를 줄이기 위하여 고가의 이상분산 유

[†]E-mail: julee@cju.ac.kr, ORCID: 0000-0001-8245-2278

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

리가 사용되고 있다³⁾.

광학계의 용도에 따라 가시광선 대역 전체가 아니라 특정한 기준파장 근처에서만 색수차가 보정되어도 충분히 사용할 수 있는 경우도 있다. 이러한 경우에 효율적으로 적용될 수 있도록 특정한 기준파장에서 파장에 대한 굴절능의 1차, 2차 미분을 보정하는 안정화 기법이 발표된 바 있다⁴⁾. 이 설계법은 굴절능을 안정화시키는 것에는 아주 효과적이거나 일반적인 achromat보다는 적지만 BFL의 변화가 아직도 남아있었다. 이를 보완하여 근축광선추적을 기반으로 상측에서 파장에 따른 주변광선의 높이 변화와 굴절후 근축각의 변화를 억제하여 EFL과 BFL 모두 파장변화에 안정화된 광학계를 설계하는 방법이 2020년에 발표되었다⁵⁾. 이 연구에서 제안된 안정화 기법은 원리적인 측면에서는 모든 광학설계에 적용될 수 있으나, 다수의 렌즈가 사용되는 경우에는 해를 찾기가 어렵기 때문에 공기 중의 접합 2매렌즈에 대한 일반적인 해법이 제시된 바 있다. 이 해법은 주변광선의 입사각을 입력 변수로 사용하기 때문에 축상두께가 너무 두꺼워 실용성이 없는 해가 얻어지는 경우가 많았다.

이 연구에서는 앞선 연구의 문제점을 해결하기 위하여 접합 2매렌즈에서 렌즈의 축상두께 d_1, d_2 를 입력 변수로 하는 안정화 조건의 해법을 개발하였다. 그리고 이를 2매의 접합 렌즈로 구성된 Lister type의 저배율 대물렌즈의 설계에 활용하였다. 설계된 Lister 대물렌즈는 10×, NA 0.25이고 EFL 20.00 mm인 광학계이며, 405 nm에서는 파장변화에 따른 EFL과 BFL의 변화가 없도록 설계하였다.

II. 축상두께가 주어진 2매 접합렌즈의 안정화 조건

그림 1은 유한물체를 유한상으로 결상하는 접합 2매렌즈를 보여주고 있다. 이 그림에서 h_j 는 주변광선이 j 번째 면에 입사하는 높이이며, u_j 는 j 번째 면에서 굴절된 이후의 근축각이다. 또한, (d_0, d_1, d_2, d_3)는 면 간의 축상 거리, 그리고 (n_0, n_1, n_2, n_3)는 각 면에서 상측의 굴절률이며 공기 중에 있는 접합렌즈에서는 $n_0 = n_3 = 1$ 이 된다. 광학계의 마지막 면을 k 면이라고 하면, 그림 1의 광학계에서는 $k = 3$ 이 된다. 2020년에 발표된 논문에서 근축광선추적을 기반으로 하여 특정한 기준파장에서 파장변화에 대하여 광학계를 안정화시키는 조건은 다음과 같이 제안되었다⁵⁾.

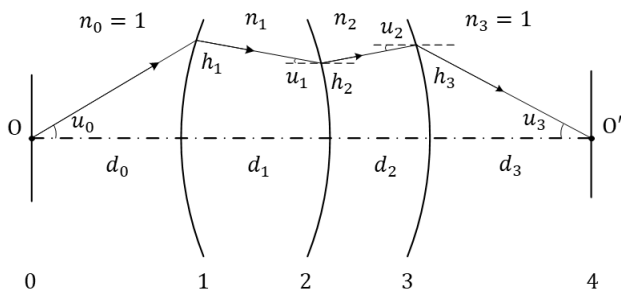


Fig. 1. Optical layout of a cemented doublet in the air.

$$\frac{dh_k}{d\lambda} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{du_k}{d\lambda} = 0 \quad (2)$$

식 (1), 식 (2)에서 k 는 광학계의 마지막 면의 면번호를 의미하며, h_k 는 k 면에서 주변광선의 높이, u_k 는 굴절후 근축각이다. 수식을 단순화시키기 위하여 j 면에서 굴절한 주변광선의 근축광학적 수치구경 α_j 를 다음과 같이 정의하자.

$$\alpha_j \equiv n_j u_j$$

광학계의 $j-1$ 면에서 j 면까지 주변광선의 이동과 j 면에서의 굴절은 다음과 같이 주어진다.

$$h_j = h_{j-1} + d_{j-1} u_{j-1} \quad (3)$$

$$\alpha_j = \alpha_{j-1} - h_j \psi_j \quad (4)$$

식 (3)은 주변광선의 면 간 이동을 나타내는 전환 방정식이며, 식 (4)는 j 번째 면에서 주변광선의 굴절을 나타내는 굴절방정식이고, ψ_j 는 j 면의 굴절능으로 다음과 같이 정의된다.

$$\psi_j \equiv \frac{n_j - n_{j-1}}{r_j}$$

위의 r_j 는 j 면에서의 곡률반경이다.

파장변화에 대한 안정화 조건인 식 (1)과 식 (2)를 얻기 위하여 식 (3)과 식 (4)를 파장 λ 에 대하여 미분하면

$$\frac{dh_j}{d\lambda} = \frac{dh_{j-1}}{d\lambda} + \left\{ \frac{1}{\alpha_{j-1}} \left(\frac{d\alpha_{j-1}}{d\lambda} \right) - \frac{1}{n_{j-1}} \left(\frac{dn_{j-1}}{d\lambda} \right) \right\} (a_{j-1} - 1) h_{j-1} \quad (5)$$

$$\frac{d\alpha_j}{d\lambda} = \frac{d\alpha_{j-1}}{d\lambda} + \left\{ \frac{1}{h_j} \left(\frac{dh_j}{d\lambda} \right) + \frac{1}{n_j - n_{j-1}} \left(\frac{dn_j}{d\lambda} - \frac{dn_{j-1}}{d\lambda} \right) \right\} (1 - m_j) \alpha_j \quad (6)$$

이 얻어지며, 식 (5)의 a_{j-1} 는 $j-1$ 면과 $j-2$ 면에서 주변광선 높이의 비이며, 식 (6)에서 m_j 는 j 면의 횡배율이다. a_j 와 m_j 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$a_j \equiv \frac{h_j}{h_{j-1}}$$

$$m_j \equiv \frac{\alpha_{j-1}}{\alpha_j} \equiv \frac{n_{j-1} u_{j-1}}{n_j u_j}$$

식 (5)와 식 (6)을 이용하면 식 (1)과 식 (2)의 안정화 조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dh_k}{d\lambda} = \frac{dh_{k-1}}{d\lambda} + \left\{ \frac{1}{\alpha_{k-1}} \left(\frac{d\alpha_{k-1}}{d\lambda} \right) - \frac{1}{n_{k-1}} \left(\frac{dn_{k-1}}{d\lambda} \right) \right\} (a_{k-1} - 1) h_{k-1} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{du_k}{d\lambda} = \frac{d\alpha_k}{d\lambda} = \frac{d\alpha_{k-1}}{d\lambda} + \left\{ \frac{1}{h_k} \left(\frac{dh_k}{d\lambda} \right) + \frac{1}{n_k - n_{k-1}} \left(\frac{dn_k}{d\lambda} - \frac{dn_{k-1}}{d\lambda} \right) \right\} (1 - m_k) \alpha_k = 0 \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)의 안정화 조건은 모든 광학계의 설계에 적용할 수 있으나 현실적으로 다수의 면이 있는 광학계의 경우에는 해석적인 해를 찾기가 쉽지 않다. 이 연구에서 공기 중의 2매 접합렌즈에서 식 (7)과 식 (8)에 대한 해석적인 해법을 연구하였으며, 실용성 있는 해를 얻을 수 있도록 렌즈의 축상두께 d_1 , d_2 를 입력 변수로 하는 설계법을 제안하였다.

그림 1의 접합렌즈계에서 마지막 면은 3면이므로 접합 2매 렌즈에 대하여 안정화 조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dh_3}{d\lambda} = \frac{dh_2}{d\lambda} + \left\{ \frac{1}{\alpha_2} \left(\frac{d\alpha_2}{d\lambda} \right) - \frac{1}{n_2} \left(\frac{dn_2}{d\lambda} \right) \right\} (a_2 - 1) h_2 = 0 \quad (9)$$

$$\frac{d\alpha_3}{d\lambda} = \frac{d\alpha_2}{d\lambda} + \left\{ \frac{1}{h_3} \left(\frac{dh_3}{d\lambda} \right) + \frac{1}{n_2 - 1} \left(\frac{dn_2}{d\lambda} \right) \right\} (1 - m_3) \alpha_3 = 0 \quad (10)$$

2매 접합렌즈의 축상두께인 d_1 , d_2 는 식 (3)에서 다음과 같이 주어진다.

$$q \equiv -\frac{h_1}{u_3} \quad (11)$$

$$d_1 = \frac{n_1(1-a_1)}{m_2 m_3} q \quad (12)$$

$$d_2 = \frac{n_2(1-a_2)a_1}{m_3} q \quad (13)$$

식 (11)의 q 는 물체가 무한대에 있다면 EFL에 해당하는 변수이나 물체가 유한점에 있다면 광학계의 상대적인 크기를 나타내는 scale factor이다. 계산의 편의를 위하여 식 (12)와 식 (13)에서 다음과 같이 z_1 , z_2 를 정의하자.

$$z_1 \equiv \frac{d_1}{n_1 q}, z_2 \equiv \frac{d_2}{n_2 q} \quad (14)$$

공기 중 접합 2매렌즈의 주변광선의 입사각 u_0 와 출사각 u_3 가 광학계의 기본사양으로 주어진다고 하면, 전체 횡배율 M 도 입력 변수로 주어진다.

$$M = \frac{n_0 u_0}{n_3 u_3} = \frac{\alpha_0}{\alpha_3} = m_1 m_2 m_3 \quad (15)$$

식 (12)-(15)를 사용하여 주변광선의 입사각 비인 a_1 , a_2 를 두께에 관련된 변수(z_1 , z_2)와 배율에 관한 변수(m_1 , m_2 , m_3)로 정리하면 다음과 같다.

$$a_1 = 1 - z_1 m_2 m_3 \quad (16)$$

$$a_2 = 1 - \frac{z_2 M}{1 - m_2 m_3 z_1} \quad (17)$$

식 (15)를 이용하여 식 (16)과 식 (17)에서 m_3 를 소거하면 a_1 , a_2 는 다음과 같이 표현된다.

$$m_3 = \frac{M}{m_1 m_2} \quad (18)$$

$$a_1 = 1 - \frac{z_1 M}{m_1} \quad (19)$$

$$a_2 = 1 - \frac{z_2 M}{m_1 m_2 - z_1 m_2 M} \quad (20)$$

공기 중에 있는 2매 접합렌즈에서 항상 성립하는 조건은 아래와 같다.

$$n_0 = 1, \frac{dn_0}{d\lambda} = 0$$

$$n_3 = 1, \frac{dn_3}{d\lambda} = 0$$

$$\frac{dh_1}{d\lambda} = 0, \frac{d\alpha_0}{d\lambda} = 0$$

식 (5)와 식 (6)의 점화식을 제 1면과 제 2면에서 파장에 따른 주변광선의 변화를 살펴보면

$$\frac{d\alpha_1}{d\lambda} = \frac{1 - m_1}{n_1 - 1} \left(\frac{dn_1}{d\lambda} \right) \alpha_1 \quad (21)$$

$$\frac{dh_2}{d\lambda} = \frac{1 - n_1 m_1}{n_1 (n_1 - 1)} \left(\frac{dn_1}{d\lambda} \right) (a_1 - 1) h_1 \quad (22)$$

$$\frac{d\alpha_2}{d\lambda} = \frac{d\alpha_1}{d\lambda} + \left\{ \frac{1}{h_2} \left(\frac{dh_2}{d\lambda} \right) + \frac{1}{n_2 - n_1} \left(\frac{dn_2}{d\lambda} - \frac{dn_1}{d\lambda} \right) \right\} (1 - m_2) \alpha_2 \quad (23)$$

으로 주어진다.

공기 중에 있는 2매 접합렌즈에는 렌즈계의 형상을 결정하는 5개의 구조변수(a_1, a_2, m_1, m_2, m_3)와 광학계의 상대적인 크기를 나타내는 scale factor (h_1, u_3)가 있다. 안정화 조건인 식 (9)와 식 (10)은 식 (18)과 식 (19), 식 (20)을 사용하면 m_1 과 m_2 에 대한 함수로 정리되며, 이로부터 유도된 2개의 비선형 방정식으로부터 (M, d_1, d_2)가 주어지면 m_1, m_2 를 결정할 수 있다. 수식 상의 편의를 위하여 5개의 상수 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 를 다음과 같이 정의하자.

$$c_1 = \frac{1}{n_1 - 1} \left(\frac{dn_1}{d\lambda} \right) \quad (24)$$

$$c_2 = \frac{1}{n_1(n_1 - 1)} \left(\frac{dn_1}{d\lambda} \right) \quad (25)$$

$$c_3 = \frac{1}{n_2 - n_1} \left(\frac{dn_2}{d\lambda} - \frac{dn_1}{d\lambda} \right) \quad (26)$$

$$c_4 = \frac{1}{n_2} \left(\frac{dn_2}{d\lambda} \right) \quad (27)$$

$$c_5 = \frac{1}{n_2 - 1} \left(\frac{dn_2}{d\lambda} \right) \quad (28)$$

이를 식 (24)-(28)을 이용하여 식 (21)-(23)을 다시 정리하면

$$\frac{1}{\alpha_1} \left(\frac{d\alpha_1}{d\lambda} \right) = c_1 - c_1 m_1 \quad (29)$$

$$\frac{1}{h_2} \left(\frac{dh_2}{d\lambda} \right) = \frac{c_1 z_1 M m_1 - c_2 z_1 M}{m_1 - z_1 M} \quad (30)$$

$$\frac{1}{\alpha_2} \left(\frac{d\alpha_2}{d\lambda} \right) = (c_1 - c_1 m_1) m_2 + \left(\frac{c_1 z_1 M m_1 - c_2 z_1 M}{m_1 - z_1 M} + c_3 \right) (1 - m_2) \quad (31)$$

이 된다. 이로부터 파장에 따른 상의 높이의 변화가 없을 조건인 식 (9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{h_3} \left(\frac{dh_3}{d\lambda} \right) &= \frac{c_1 z_1 M m_1 - c_2 z_1 M}{m_1 - z_1 M} + \\ &\left\{ (c_1 - c_1 m_1) m_2 - \left(\frac{c_1 z_1 M m_1 - c_2 z_1 M}{m_1 - z_1 M} + c_3 \right) (1 - m_2) - c_4 \right\} \\ &\left(\frac{-z_2 M}{m_1 m_2 - z_1 M m_2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

그리고 파장에 따른 굴절 후의 근축각 변화가 없을 조건인 식 (10)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_3} \left(\frac{d\alpha_3}{d\lambda} \right) &= \left\{ (c_1 - c_1 m_1) m_2 - \left(\frac{c_1 z_1 M m_1 - c_2 z_1 M}{m_1 - z_1 M} + c_3 \right) (1 - m_2) - c_4 \right\} \\ &\left(\frac{M}{m_1 m_2} \right) + c_5 \left(1 - \frac{M}{m_1 m_2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (33)$$

이상과 같은 논의를 통하여 공기 중에 있고 2매 접합렌즈에서 (M, d_1, d_2)이 주어지면 식 (9)와 식 (10)의 파장변화에 대한 안정화 조건은 식 (32)와 식 (33)에서 m_1 과 m_2 만의 비선형 연립방정식으로 주어진다.

위의 식 (32)와 식 (33)에서 m_2 를 m_1 으로 치환하면, 연립방정식은 m_1 의 3차 방정식으로 변환되고, 주어진 조건 (M, d_1, d_2)을 만족하는 3개의 수치적인 해가 존재하게 된다. 식 (33)은 m_2 에 대하여 정리하면, m_1 과 m_2 의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$m_2 = \frac{\{(c_1 z_1 M + c_3 - c_5) \times M\} m_1 + \{(-c_2 - c_3 + c_5) \times (z_1 M^2)\}}{\{c_1 M - c_3\} m_1^2 + \{(-c_1 + c_3 + c_5 z_1) \times M\} m_1 + \{(c_1 - c_2 - c_3) \times (z_1 M^2)\}} \quad (34)$$

위의 식 (34)를 사용하여 식 (32)에 대입하면 식 (32)의 안정화 조건은 m_1 에 대한 3차 방정식으로 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$A_1 m_1^3 + B_1 m_1^2 + C_1 m_1 + D_1 = 0 \quad (35)$$

식 (35)에서 계수 A_1, B_1, C_1, D_1 은 다음과 같이 주어진다.

$$A_1 = \{(c_3 - c_4 + c_1 z_1 M) \times z_2 \times (c_1 M - c_5)\} - \{(c_1 z_1 M + c_3 - c_5) \times M \times (c_1 z_1 + c_1 z_2)\} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= \{(-c_2 - c_3 + c_4) \times (z_1 z_2 M) \times (c_1 M - c_5)\} \\ &+ \{(-c_1 + c_3 + c_5 z_1) \times M \times (c_3 - c_4 + c_1 z_1 M) \times z_2\} \\ &- \{(c_1 z_1 M + c_3 - c_5) \times M \times (-c_2 z_1 - c_1 z_1^2 M - c_1 z_2 + c_3 z_2)\} \\ &- \{(-c_2 - c_3 + c_5) \times (z_1 M^2) \times (c_1 z_1 + c_1 z_2)\} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= \{(-c_2 - c_3 + c_4) \times (z_1 z_2 M) \times (-c_1 + c_3 + c_5 z_1) \times M\} \\ &+ \{(c_1 - c_2 - c_3) \times (z_1 M^2) \times (c_3 - c_4 + c_1 z_1 M) \times z_2\} \\ &- \{(c_2 z_1 + c_1 z_2 - c_2 z_2 - c_3 z_2) \times (c_1 z_1 M + c_3 - c_5) \times M\} \\ &- \{(-c_2 z_1 - c_1 z_1^2 M - c_1 z_2 + c_3 z_2) \times (-c_2 - c_3 + c_5) \times (z_1 M^2)\} \end{aligned} \quad (38)$$

$$D_1 = \{(c_1 - c_2 - c_3) \times (z_1 M^2) \times (-c_2 - c_3 + c_4) \times (z_1 z_2 M)\} - \{(c_2 z_1 + c_1 z_2 - c_2 z_2 - c_3 z_2) \times (z_1 M) \times (-c_2 - c_3 + c_5) \times (z_1 M^2)\} \quad (39)$$

수치해법을 통하여 식 (35)에서 m_1 을 구하면, 식 (34), 식 (18), 그리고 식 (16), 식 (17)에서 5개의 구조변수가 모두 결정되며, 여기에 scale factor를 적용하면 2매 접합렌즈계의 곡률반경 r_1, r_2, r_3 는 다음과 같이 주어진다.

$$r_1 = \frac{n_1 - n_0}{(1 - m_1)m_2 m_3} q \quad (40)$$

$$r_2 = \frac{(n_2 - n_1)a_1}{(1 - m_2)m_3} q \quad (41)$$

$$r_3 = \frac{(n_3 - n_2)a_1 a_2}{1 - m_3} q \quad (42)$$

위의 식 (40)-(42)에서 q 는 광학계의 scale factor로서 식 (11)에 정의되어 있다.

III. 안정화 조건을 적용한 Lister 대물렌즈 설계

3.1. Lister 대물렌즈의 구성과 기초설계

현미경의 대물광학계는 일반적으로 상거리가 유한한 유한 공액 대물렌즈와 상거리가 무한대인 무한보정 대물렌즈로 분류된다. 상이 무한대에 존재하는 무한보정 대물렌즈는 대물렌즈와 접안렌즈 사이에 있는 tube lens가 접안렌즈의 물체면에 대물렌즈의 실상을 결상한다^[6-8].

대물광학계는 배율에 따라 광학계의 구성과 수차를 보정하는 수준이 달라진다. 저배율용 대물렌즈는 achromat나 apochromat을 조합하여 2군의 간단한 구성으로 색수차, 구면수차, 코마를 보정한다. 고배율용 대물렌즈는 복잡한 구성을 가지는 반면, 보다 고차의 수차까지도 보정하고 있다.

저배율에 사용되는 대표적인 대물렌즈는 Lister 대물렌즈로서 두 개의 achromatic lens로 구성되어 있으며 조리개의 위치를 제외하면 Petzval type 렌즈와 유사한 구성을 갖는다^[3-10].

이 연구에서는 물체측 수치구경(NA)가 0.25이고 횡배율 10배이며 파장 405 nm에서 파장변화에 안정화된 Lister type 대물렌즈를 설계하였다. Lister 대물렌즈에서 전형적인 기초 설계법에서는 첫 번째 achromatic lens의 마지막 면의 곡률과

두 번째 achromatic lens의 첫 번째 곡률을 변형하여 첫 번째 렌즈의 상이 두 번째 렌즈의 앞면의 aplanatic point에 위치시킨다^[11]. 두 렌즈 간격 D 는 얇은 렌즈 근사에서 종색수차가 보정되는 조건에서 결정된다. 첫 번째 렌즈군의 초점거리를 f_1' , 두 번째 렌즈군의 초점거리를 f_2' 라 할 때,

$$D = \frac{f_1' + f_2'}{2}$$

로 주어진다. 위 식은 색수차의 발생을 감소시키는 효과가 있어 Petzval type 렌즈 설계 예로 활용되고 있다^[9]. 이후에 조리개를 광학계의 상측 초점에 위치시키면, 입사동이 무한대에 있는 object side telecentric system을 얻을 수 있다^[6-8].

3.2. 안정화 조건을 적용한 Lister 대물렌즈의 초기설계

이 연구에서는 새로 고안된 안정화 조건의 해를 이용하여 405 nm 대역에서 파장변화에 따른 광학적인 특성의 변화가 최소화된 무한보정 Lister 대물렌즈를 설계하였다.

Lister 대물렌즈는 2군으로 구성되며 각 군에는 2매 접합렌즈가 사용되고 있다. 설계의 편의를 위하여 원래 현미경에서의 사용 방향과는 반대로 하여, 물체가 무한대에 있고 제 2 초점에 실상을 결상하는 대물광학계로 설계하였다. Lister 대물렌즈에서 무한대의 물체에서 보아 첫 번째 접합렌즈를 DBL1, 두 번째 접합렌즈를 DBL2로 명명하였다. DBL1의 물체는 무한대에 있으므로 $m_1 = 0, M_{DBL1} = 0$ 이 되지만 앞절에서 유도된 안정화 조건은 $M = 0$ 인 경우에는 사용할 수 없다. 하지만 이 경우 M 은 0이 아닌 충분히 작은 값(예: 0.1×10^{-15})으로 설정하면 물체가 무한대에 있는 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다.

전체 광학계의 설계사양은 파장 405 nm에서 유효초점거리는 20 mm, 상측 수치구경(NA)은 0.25이다. DBL1과 DBL2의 광학유리는 모두 동일하게 미국 Schott사의 NBAK2와 NF2를 사용하였고, 파장 385~425 nm에서 이들 광학유리의 굴절률과 기준파장 405 nm에 대한 1차 미분이 표 1에 정리되어 있다^[12]. 광학유리는 Schott사의 친환경 유리에서 가격이 저렴하고, 3차 구면수차와 코마가 잘 보정되는 조합을 선택하였다.

DBL1의 설계에서는 물체가 무한대에 있으므로 주변광선의 입사각 u_0 를 아주 작은 값으로 설정하였다. DBL1의 설계에서 1면에 입사하는 근축각은 u_0 , 3면에서 출사하는 근축각은 u_3 , 1면에 입사한 높이는 h_1 이며, 설계에서는 다음과 같은 값이 사용되었다.

Table 1. Refractive indices and the first order derivatives

Glass (Schott)	Wavelength (nm)					$dn/d\lambda$ @405 nm
	385	395	405	415	425	
NBAK2	1.558403	1.556734	1.555200	1.553786	1.552478	-1.472028E-04
NF2	1.657996	1.654184	1.650759	1.647664	1.644853	-3.251850E-04

$$h_1 = 5.00 \text{ mm}$$

$$u_0 = 0.1 \times 10^{-15}$$

$$u_3 = -0.1$$

이 경우 DBL1의 횡배율은 다음과 같이 아주 작은 값이 된다.

$$M_{DBL1} = -0.1 \times 10^{-14}$$

이 연구에서의 안정화 조건은 특정파장을 기준으로 파장변화에 따른 EFL과 BFL의 변화를 보정하므로 다른 수차들은 고려되지 않는다. 이를 고려하여 입력 변수인 첫 번째 렌즈의 축상두께 d_1 은 6.0~2.1 mm, 두 번째 렌즈의 축상두께 d_2 는 4.0~0.1 mm의 범위에서 변화시키면서, 렌즈의 형상을 고려하면서 3차 구면수차와 코마가 최소가 되는 해를 찾았다. 그림 2는 DBL1에서 d_1 과 d_2 에 따른 3차 구면수차와 코마의

변화를 보여준다. 그림 2(a)를 살펴보면 DBL1의 3차 구면수차는 모두 음의 값을 가지며, 0이 되는 해는 존재하지 않는다. 이 때문에 DBL1의 설계는 구면수차가 작으면서 코마가 최소가 되는 $d_1 = 3.3 \text{ mm}$, $d_2 = 1.8 \text{ mm}$ 인 해를 초기설계로 선정하였다.

DBL2의 설계에서는 앞의 DBL1과 마찬가지로 파장 405 nm에서 자체적으로 EFL과 BFL이 안정화되도록 설계하였다. DBL2에서 주변광선의 입사각 u_3 는 DBL1의 설계에서 -0.1로 주어져 있으므로 전체 광학계의 상측 NA가 0.25가 되기 위해서는 DBL2의 횡배율 M_{DBL2} 는 0.4가 되어야 한다.

전체 광학계의 길이가 너무 길어지지 않도록 DBL1의 마지막 면(광학계의 3면)에서 DBL2의 첫 면(광학계의 4면)까지의 거리 d_3 은 4.5 mm로 하였다. 이에 따라 DBL2의 설계에 필요한 입력 parameter는 다음과 같이 주어진다.

$$h_4 = 4.28751 \text{ mm}$$

$$u_3 = -0.1$$

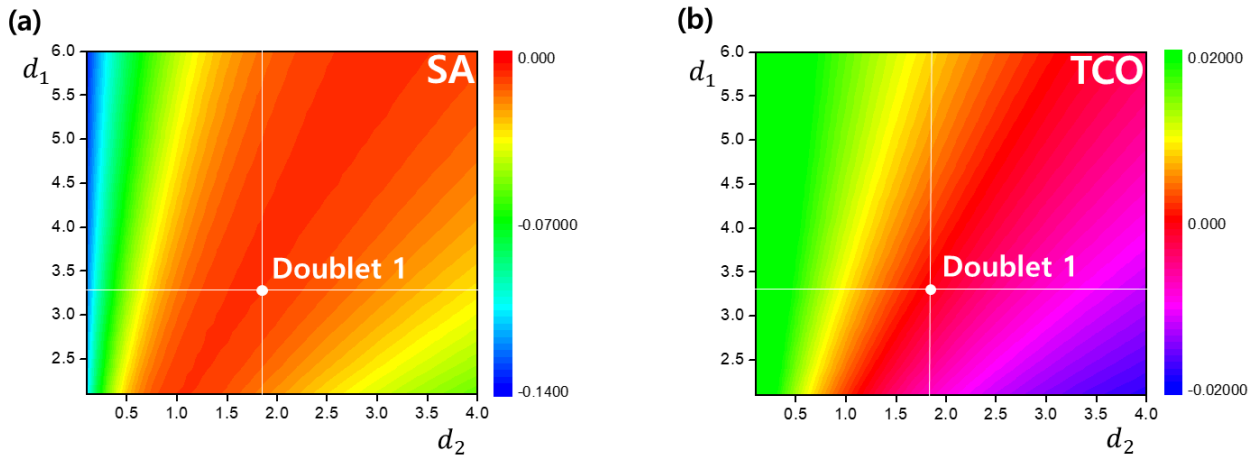


Fig. 2. Distribution of spherical aberration and tangential coma of the first doublet (DBL1). (a) Spherical aberration. (b) Tangential coma.

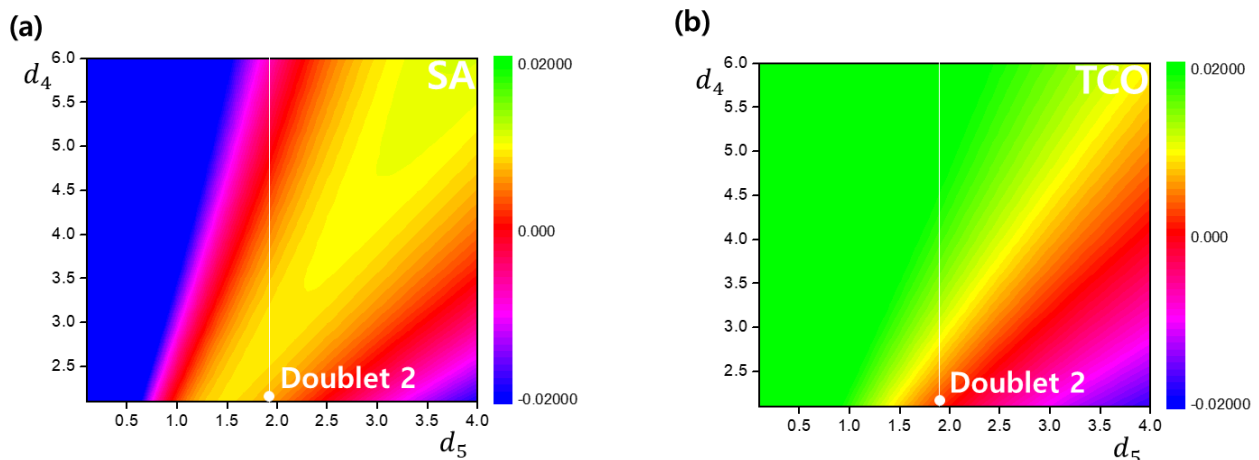


Fig. 3. Distribution of spherical aberration and tangential coma of the second doublet (DBL2). (a) Spherical aberration. (b) Tangential coma.

$$u_6 = -0.25$$

$$M_{DBL2} = 0.4$$

DBL2의 설계에서도 안정화 이외의 다른 수차들은 고려되지 않았다. 따라서 DBL2의 설계에서도 첫 번째 렌즈의 축상 두께 d_4 는 6.0~2.1 mm, 두 번째 렌즈의 축상두께 d_5 는 4.0~0.1 mm인 범위에서 구면수차와 코마가 최소화될 수 있는 해를 조사하였다. 그림 3은 DBL2에서 d_4 와 d_5 에 따른 3차 구면수차와 코마의 변화를 보여준다. 원칙적으로는 별도로 설계된 DBL1과 DBL2의 구면수차와 코마가 서로 상쇄되도록 조합하여야 한다. 하지만 그림 2(a)에서 DBL1의 구면수차는 모두 음의 값을 가지고 있고, 그림 3(a)에서 DBL2의 구면수차가 +가 되려면 두께가 너무 두꺼워져 실용성이 없는 해가 되어 버린다. 또한 이 경우 코마의 부호가 같아져 코마가 크게 증가하는 문제점이 함께 발생한다. 이를 고려하여 DBL2의 설계에서는 구면수차가 너무 커지지 않으며, 코마가 최소가 될 수 있고, 렌즈의 두께가 사용에 적절한 수준인 해를 선택하였다. 선택된 해는 d_4 가 2.1 mm, d_5 가 1.9 mm인 해이다.

표 2는 초기설계로 선정된 DBL1과 DBL2를 사용하여 구성된 Lister 대물렌즈의 초기설계이다. 표 3은 초기설계된 Lister 대물렌즈의 주변광선, 구조변수(a_1, a_2, m_1, m_2, m_3)

Table 2. Initial design data of the Lister objective

#	Design data			
	r (mm)	d (mm)	Glass	Remark
0		Infinity		Object
1	31.19241	3.3000	NBAK2	Stop
2	-21.42933	1.8000	NF2	
3	-94.98370	4.5000		
4	10.78505	2.1000	NBAK2	
5	-21.48718	1.9000	NF2	
6	42.57544	14.0201		
7		0.00000		Image

Table 3. Paraxial ray tracing of the marginal ray and its chromatic variation

#	Ray data		Design parameters		Chromatic variations	
	h (mm)	u	a	m	$dh/d\lambda$	$du/d\lambda$
0		0.000000			0.00000E+00	0.00000E+00
1	5.000000	-0.057225	0.962232	0.000000	0.00000E+00	9.75580E-06
2	4.811158	-0.040916	0.909349	1.317641	3.21942E-05	-1.78858E-05
3	4.737510	-0.100000	0.905013	0.675420	0.00000E+00	-5.00000E-10
4	4.287510	-0.206221	0.898994	0.311803	-2.30000E-09	1.81086E-05
5	3.854445	-0.183900	0.909349	1.056466	3.80259E-05	-2.00155E-05
6	3.505036	-0.250000		1.214296	-3.20000E-09	-1.00000E-08
7	0.000000	-0.250000				

그리고 안정화 조건을 보여주고 있다.

3.3. 최적화를 통한 최종설계 및 성능 평가

파장 405 nm에 대하여 초기설계된 Lister 대물렌즈는 파장에 따른 변화에 대하여 안정화되어 있고, SA는 적은 수준으로 억제되고 있으며, TCO는 어느 정도 보정되어 있다. 하지만 3차 수차의 보정이 충분한 것은 아니며, image side telecentric 구조를 고려하지 않았으므로 최적화를 통하여 잔류 수차들을 보정하고 조리개를 Lister 대물렌즈의 물체측 초점으로 이동시켜 image side telecentric 구조로 최종 설계하였다. 최적화 과정에서 근축주변광선을 추적하고 안정화 조건인 식 (32)와 식 (33)이 유지되도록 제한조건을 설정하였다. 최적화를 통하여 최종 설계된 Lister 대물렌즈의 설계 데이터는 표 4에 나타나 있으며, 그림 4는 광학계의 형상을 보여주고 있다.

Table 4. Final design of the Lister objective

#	Design data			
	r (mm)	d (mm)	Glass	Remark
0		Infinity		Object
1	Infinity	16.04320		Stop
2	29.90350	6.50038	NBAK2	
3	-14.88192	1.20007	NF2	
4	-115.50669	2.18652		
5	12.26162	6.50038	NBAK2	
6	-24.62484	1.20007	NF2	
7	78.72633	11.89132		
8		-0.00828		Image

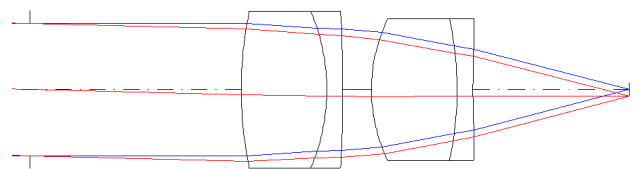


Fig. 4. Optical layout of the final design of the Lister objective.

최종 설계된 광학계는 기준파장 405 nm에서 상측 수치구경이 0.25, 유효초점거리 20.000 mm, 후초점거리는 11.891 mm의 설계 사양을 갖는다. 표 5에서 최적화 진행 후에도 광학계의 마지막 면인 7면에서 높이 h_7 와 굴절각 u_7 의 파장에 대한 미분이 아주 작은 값으로 유지되어 주변광선에 대한 안정화 조건이 여전히 만족되고 있음을 보여준다. 그림 5에서

Table 5. Final design of marginal ray data and its chromatic variation

#	Ray data			
	h (mm)	u	dh/dλ	du/dλ
0		0.00000	0.00000E+00	0.00000E+00
1	5.00000	0.00000	0.00000E+00	0.00000E+00
2	5.00000	-0.05969	0.00000E+00	1.01763E-05
3	4.61198	-0.03830	6.61500E-05	-2.57901E-05
4	4.56603	-0.08894	3.52001E-05	-1.74635E-05
5	4.37155	-0.18447	-2.98430E-06	5.14310E-06
6	3.17244	-0.16633	3.04481E-05	-2.52897E-05
7	2.97283	-0.25000	9.87000E-08	6.27000E-08
8	0.00313			

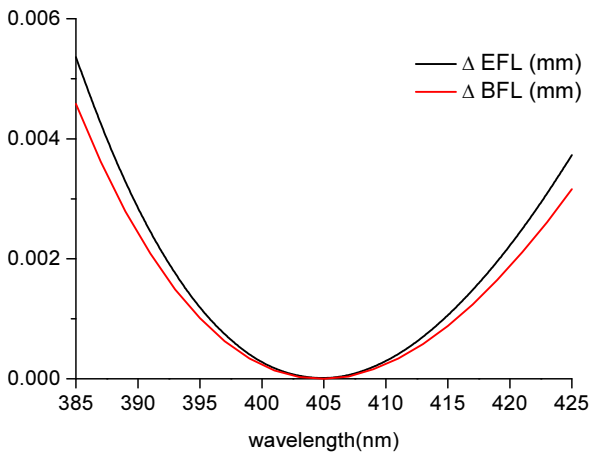


Fig. 5. Chromatic variation of the effective focal length and back focal length.

는 405 nm 부근의 파장대역에서 파장에 따른 유효초점거리 (EFL)와 후초점거리(BFL)의 변화가 0.006 mm 이내의 값으로 매우 작은 것을 볼 수 있다.

표 6은 최종 설계된 광학계의 3차 수차 값을 보여주며 파장 385~425 nm에서 종색수차와 횡색수차가 보정되었음을 확인할 수 있다. 그림 6은 상높이에 따른 RMS wavefront error를 보여주고 있으며 파면수차가 최소가 되도록 best focus를 설정하였다. 405 nm 대역에서 상의 중심부로부터 직경 0.5 mm 영역까지 0.07λ 이하의 값으로 파면수차가 회절한계로 보정된 것을 볼 수 있다. 표 7은 파장과 상의 높이에 따른 RMS spot diameter를 보여주고 있으며, 이 경우는 spot size를 기준으로 하는 최적상면에서 분석되었다. 표 7에서 상의 중심에서 직경 0.5 mm인 영역까지 기준파장 405 nm와 인근 파장에서 Airy disk의 직경보다 작음을 볼 수 있다.

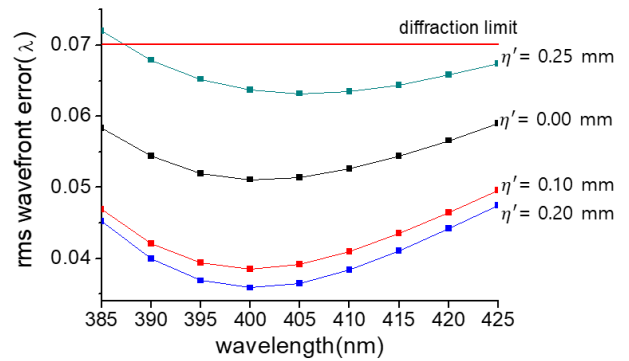


Fig. 6. RMS wavefront errors of the final design (units in λ).

Table 7. RMS spot diameters of the final design (units in μm)

Wave-length (nm)	Diffraction limit (μm)	RMS spot diameter (μm)					
		Image height (mm)					
		0.00	0.10	0.20	0.25	0.40	0.50
385	1.88	1.44	1.34	1.29	1.51	3.43	5.52
395	1.93	0.85	0.80	1.00	1.40	3.61	5.75
405	1.98	0.48	0.53	1.04	1.54	3.84	6.00
415	2.03	0.60	0.72	1.30	1.80	4.09	6.25
425	2.07	0.93	1.06	1.62	2.11	4.38	6.53

Table 6. The third order aberration of the final design (units in mm, calculated by Code V)

#	SA	TCO	TAS	SAS	PTB	DST	AX	LAT	PTZ
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	-0.0107	-0.0074	-0.0021	-0.0009	-0.0004	-0.0002	-0.0127	-0.0029	-0.0119
3	0.0463	0.0077	0.0005	0.0002	0.0001	0.0000	0.0440	0.0025	0.0025
4	-0.0099	0.0032	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	-0.0187	0.0020	-0.0034
5	-0.0186	-0.0127	-0.0038	-0.0019	-0.0009	-0.0004	-0.0178	-0.0041	-0.0291
6	0.0269	0.0063	0.0005	0.0002	0.0000	0.0000	0.0257	0.0020	0.0015
7	-0.0400	0.0036	0.0000	0.0001	0.0002	0.0000	-0.0201	0.0006	0.0050
SUM	-0.0060	0.0007	-0.0052	-0.0025	-0.0011	-0.0006	0.0004	0.0000	-0.0354

IV. 결 론

이 연구에서는 두께 측면에서 실용성 있는 해를 얻을 수 있도록 렌즈의 축상두께를 입력 변수로 하여 파장변화에 대한 안정화된 광학계를 실용적으로 설계하는 방법에 대하여 연구하였다. 이 설계법을 이용하여 405 nm의 파장대역에서 안정화된 2매의 접합렌즈를 설계하고, 이를 기반으로 광학적 특성의 변화가 적은 무한보정 Lister 대물렌즈를 설계하였다.

Lister 대물렌즈의 설계에서는 미국 Schott사의 NBAK2와 NF2로 구성된 접합 2매렌즈를 주어진 배율에 맞추어 설계하고, 3차 구면수차와 코마를 고려하여 최적의 조합을 선택하였다. 설계된 무한보정 Lister 대물렌즈는 image side telecentric 구조를 가지며 기준파장 405 nm와 그 부근에서 EFL 20.00 mm, BFL 11.89 mm이며, 상측 NA가 0.25이며 회절한계 성능을 가지는 상의 직경은 1 mm이다. 이 렌즈는 초점거리 200.00 mm의 tube lens 사용 시 전체 대물부의 배율은 10×가 된다. 이 대물렌즈의 EFL과 BFL 변화는 기준파장을 중심으로 인근파장 영역에서 0.006 mm 이하의 매우 작은 값을 가지며, RMS wavefront error도 상의 중심에서 반 직경 0.5 mm까지는 파장에 따른 변화가 잘 억제되고 있다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 청주대학교 연구장학의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. M. Laikin, *Lens Design*, 4th Ed. (CRC Press, NY, USA, 2006), Chapter 2.

2. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, 3rd Ed. (McGraw-Hill Professional, NY, USA, 2000), Chapter 12.
3. R. Kingslake and R. B. Johnson, *Lens Design Fundamentals*, 2nd Ed. (Academic Press, MA, USA, 2010), Chapter 5-10.
4. S.-Y. Lee and J.-U. Lee, "Optical design of a collimator lens that is very stable against chromatic variation," *Korean J. Opt. Photon.* **28**, 68-74 (2017).
5. J.-U. Lee, "New design method of stable lens system against chromatic variation based on paraxial ray tracing," *Curr. Opt. Photon.* **4**, 23-30 (2020).
6. H. Gross, F. Blechinger, and B. Achter, *Handbook of Optical Systems: Survey of Optical Instruments* (Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2008), Vol. 4, Chapter 42.
7. Nikon, "Microscope components for fluorescence illumination and transmitted light applications," (Nikon Co., Jun. 2019), <https://www.nikon.com/products/microscope-solutions/support/download/brochures/pdf/2ce-muzh-6.pdf> (Accessed Date: January 7, 2020).
8. Mitutoyo, "MICROSCOPE UNITS AND OBJECTIVES (UV, NUV, VISIBLE & NIR REGION)," (Mitutoyo, Optical Measuring, Catalog No. E14020) <https://www.mitutoyo.co.jp/eng/support/service/catalog/04/E14020.pdf>. (Accessed Date: January 7, 2020).
9. W. J. Smith, *Modern Lens Design: A Resource Manual* (McGraw-Hill Professional, NY, USA, 1992), Chapter 7-16.
10. K. D. Sharma, "Low power microobjective: a new design," *Appl. Opt.* **23**, 2715-2717 (1984).
11. A. E. Conrady, *Applied Optics and Optical design Part 2* (Dover Publications, NY, USA, 1960), pp. 379-401.
12. Schott, "Optical Glass-Overview (Excel Table)," (Schott Inc., January 2018), https://www.schott.com/advanced_optics/english/download/index.html?wss_setorigin=1&wss_iso=ko-KR (Accessed Date: January 18, 2020).