

Optical Design of a Collimator Lens That Is Very Stable Against Chromatic Variation

So-Young Lee and Jong-Ung Lee[†]

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

(Received December 9 2016; Revised manuscript February 11 2017; Accepted February 14 2017)

To minimize chromatic variations across a wavelength band, we suggest a new design that corrects the first- and second-order wavelength derivatives of the refractive power. Based on this method, a diffraction-limited collimator is designed. The design is very stable against wavelength change, as expected. The chromatic change of the effective focal length is less than 0.002% in the wavelength range from 360 to 410 nm.

Keywords: Optical system design, Stabilized optical system, Collimator lens, Achromatization

OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (080.3620) Lens system design; (080.3630) Lenses; (120.1680) Collimation

파장변화에 매우 안정한 시준렌즈 설계

이소영 · 이종웅[†]

청주대학교 레이저광정보공학과
Ⓣ 28503 충북 청주시 상당구 대성로 298

(2016년 12월 9일 받음, 2017년 2월 11일 수정본 받음, 2017년 2월 14일 게재 확정)

특정한 파장대역에서 파장변화에 따른 굴절능의 변화를 1차, 2차 미분까지 보정하여 기준파장과 그 인근 파장 대역에서 굴절능의 변화가 매우 적도록 안정화된 광학계를 설계하는 방법에 대하여 연구하고, 이를 적용하여 회절한계의 시준렌즈를 설계하였다. 설계된 광학계는 파장 변화에 대하여 매우 안정하였고, 파장 360~410 nm 대역에서 유효초점거리의 변화가 0.002% 이내로 매우 적었다.

Keywords: 광학설계, 안정화 광학계, 시준렌즈, 몰색화

OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (080.3620) Lens system design; (080.3630) Lenses; (120.1680) Collimation

I. 서 론

분광기나 쌍안경, 사격조준기, 측량카메라 등과 같은 광학 기기에서 광축 정렬을 검사하는데 많이 사용되는 시준기는 구면수차와 색수차가 충분히 보정된 렌즈를 사용하여 평행 광을 만들어 낸다^[1]. 특히 정밀도가 높은 시준기에는 3종의 광학유리를 조합하여 색수차를 보정한 apochromat이 이용되기도 한다.

이 연구에서는 3종 이상의 광학유리를 조합하지 않고도 2종의 광학유리로 특정한 범위의 파장 대역에서 종색수차가 매우 잘 보정된 렌즈를 설계하는 방법을 연구하였다.

광학계의 특성은 파장에 따라 변화하기 때문에 사용하는 파장 대역에 맞추어 몰색화 설계를 하게 된다. 2매 구성 광학계의 몰색화는 2개의 파장에 대하여 굴절능을 일치시키는

achromat이 일반적이며^[2-4], 용도에 따라 특정 파장을 기준으로 파장 변화에 따른 굴절능의 변화가 없도록 하는 안정화 광학설계도 발표된바 있다^[5]. Achromat은 가시광선 대역에서 적절한 수준으로 색수차를 보정하는 매우 유용한 설계이나 secondary spectrum을 줄이기 위하여서는 고가의 이상분산유리가 사용되어야 하는 문제점이 있다^[2]. 그리고 특정 파장에 대한 안정화 설계는 가격이 낮은 정상분산유리를 사용하여도 기준 파장과 그 인근에서는 색수차가 거의 없으나 색수차가 잘 보정된 파장 대역이 좁은 한계가 있다. 이 연구에서는 기존의 안정화 설계를 보다 개선하여 2매 구성 광학계에서 파장변화에 따른 굴절능의 변화를 1차, 2차 미분까지 보정하는 설계방법을 제안하고자 한다. 새로 제안된 설계 방법은 기준파장과 인근 대역에서 $\Delta\lambda$ 의 3제곱에 비례하여 굴절능이 변화하고 보통의 광학유리를 사용하면서도 기준파장과

[†]E-mail: julee@cju.ac.kr

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

인근대역에서 굴절능의 변화가 매우 적게 할 수 있다.

이 연구에서는 새로 제안된 설계법을 적용하여 380 nm 근처 대역에서 파장변화에 안정한 2매 구성 광학계의 시준렌즈를 설계하였다. 이 광학계의 기준파장은 380 nm, 유효초점거리는 100 mm, F-10.0이고 유효초점거리의 변화가 300~410 nm에서는 0.002% 이하이다. 파장대역 300~700 nm에서는 0.1% 이하로 파장변화에 따른 유효초점거리의 변화가 매우 적다.

II. 파장변화에 대한 굴절능의 안정화

2.1. 물색화 설계

광학유리의 상대굴절률이 빛의 파장에 따라 변하기 때문에 광학소자들의 특성들 또한 변하여 색수차가 발생한다. 색수차를 감소시키는 방법 중 하나는 두 파장에 대하여 렌즈계의 굴절능을 일치시키는 것이다.

공기 중에서 거리가 D 만큼 떨어진 2개의 얇은 렌즈로 구성된 광학계의 전체 굴절능 K 는

$$K = k_1 + k_2 - Dk_1k_2 \quad (1)$$

이다. 식 (1)에서 k_1 과 k_2 는 1번 렌즈와 2번 렌즈의 굴절능이다. 가시광선 영역에서 Fraunhofer C-선(파장 656.3 nm)과 F-선(파장 486.1 nm)에 대하여 전체 굴절능이 같을 조건은

$$\delta K = \frac{k_1}{\nu_1} + \frac{k_2}{\nu_2} - Dk_1k_2 \left(\frac{1}{\nu_1} + \frac{1}{\nu_2} \right) = 0 \quad (2)$$

이다. 여기에서 ν_1 은 1번 렌즈 소재의 분산상수(Abbe 수, ν_d)이며, ν_2 는 2번 렌즈의 분산상수이다^[2]. 식 (2)에서 2매 구성 광학계의 achromat 조건을 만족시키는 방법은 2가지가 가능하다. 먼저 렌즈간의 간격 D 를 결정하고, 선정된 광학유리의 분산상수를 이용해 각 렌즈의 굴절능 k_1 , k_2 를 계산하여 색수차를 보정하는 방법이 있다. 식 (1)에서 k_2 를 k_1 에 관한 식으로 정리하면 식 (3)이 되고 이를 식 (2)에 대입하면 k_1 에 대한 2차 방정식 식 (4)로 나타내어 해를 구할 수 있다.

$$k_2 = \frac{K - k_1}{1 - Dk_1} \quad (3)$$

$$\nu_1 Dk_1^2 + (\nu_2 - \nu_1)(1 - DK)k_1 + \nu_1 K = 0 \quad (4)$$

통상적으로 2매 구성 렌즈의 색수차 보정에서는 렌즈간의 간격 D 를 0으로 근사하여 얇은 렌즈계에서 색수차를 보정하는 경우도 많다. 이 경우에서 종색수차가 보정되는 해는 다음과 같이 주어진다^[2].

$$k_1 = \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} K \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{-\nu_2}{\nu_1 - \nu_2} K \quad (6)$$

광학계의 achromat 조건을 만족시키는 두 번째 방법은 광학유리를 선정하고 렌즈간의 간격 D 를 조정하여 종색수차를 보정하는 것이다. 만약 두 렌즈가 동일한 광학유리를 사용한다면($\nu = \nu_1 = \nu_2$) 종색수차가 보정되는 렌즈간의 간격 D 와 이때의 전체 굴절능 K 는 다음과 같다^[6].

$$D = \frac{k_1 + k_2}{2k_1k_2} = \frac{f_1' + f_2'}{2} \quad (7)$$

$$K = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (8)$$

식 (7)에서 f_1' 과 f_2' 은 각 렌즈의 유효초점거리이다. 식 (7)은 특정한 기준파장 λ_0 에서 굴절능 K 의 변화가 없도록 하는 안정화 조건($\partial K / \partial \lambda = 0$)이며, F-선과 C-선의 굴절능이 같도록 하는 식 (2)의 물색화 조건과는 다르다. 따라서 식 (7)으로는 실제 렌즈(두꺼운 렌즈)의 종색수차를 보정할 수는 없으나 기준파장과 그 부근에서 종색수차의 발생을 줄이는 효과가 있으므로 Huygens type의 대물렌즈나 Petzval type의 렌즈 설계에 적용된 사례가 있다^[7].

2.2. 파장에 따른 굴절능의 변화

광학유리의 굴절률은 파장에 따라 변화한다. 이러한 관계를 나타내는 분산식은 여러 가지 형식이 있으나 광학유리 회사에서는 다음과 같은 Sellmeier 방정식을 주로 사용하고 있다.

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (9)$$

여기서 B_i 와 C_i 는 광학유리의 고유계수이며 파장 λ 는 μm 단위로 표시된다. Sellmeier 방정식은 약 0.365~2.325 μm 의 파장범위에서 약 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 정확도로 굴절률 값을 계산할 수 있는 것으로 알려져 있다^[8,9].

설계상의 기준파장 부근에서 초점거리 변화를 보정하기 위해 먼저 굴절률 분산식인 Sellmeier 방정식의 1차 미분과 2차 미분을 전개하여 파장 변화에 따른 굴절률의 변화량을 나타내면

$$n(\lambda) = n(\lambda_0) + \frac{\partial n(\lambda_0)}{\partial \lambda} (\lambda - \lambda_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n(\lambda_0)}{\partial \lambda^2} (\lambda - \lambda_0)^2 + \dots \quad (10)$$

$$\frac{\partial n(\lambda)}{\partial \lambda} = \left(1 + \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{-B_i C_i \lambda}{(\lambda^2 - C_i)^2} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 n(\lambda)}{\partial \lambda^2} = - \left(1 + \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i} \right)^{-\frac{3}{2}} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{-B_i C_i \lambda}{(\lambda^2 - C_i)^2} \right)^2 + \left(1 + \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{3B_i C_i \lambda^4 - 2B_i C_i^2 \lambda^2 - B_i C_i^3}{(\lambda^2 - C_i)^4} \right) \quad (12)$$

으로 주어진다.

다음으로 기준파장 λ_0 에서 앞면의 곡률이 c_1 , 뒷면의 곡률이 c_2 이고 축상두께가 d 인 단렌즈의 굴절능 $k(\lambda)$ 는

$$k(\lambda) = \left[c_1 - c_2 + \frac{d}{n(\lambda)} c_1 c_2 \{n(\lambda) - 1\} \right] \{n(\lambda) - 1\} \quad (13)$$

이며, 이를 d 가 0인 얇은 렌즈로 근사하여 전개하면 다음과 같다.

$$k(\lambda) = k(\lambda_0) + \frac{\partial k(\lambda_0)}{\partial \lambda} (\lambda - \lambda_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 k(\lambda_0)}{\partial \lambda^2} (\lambda - \lambda_0)^2 + \dots \approx k(\lambda_0) + (c_1 - c_2) \frac{\partial n(\lambda_0)}{\partial \lambda} (\lambda - \lambda_0) + \frac{1}{2} (c_1 - c_2) \frac{\partial^2 n(\lambda_0)}{\partial \lambda^2} (\lambda - \lambda_0)^2 + \dots \quad (14)$$

식 (14)에서 공기 중에 있는 얇은 렌즈의 굴절능 $k(\lambda)$ 의 파장에 대한 1차 미분과 2차 미분은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\partial k}{\partial \lambda} \equiv ak(\lambda), \quad a = \frac{1}{n-1} \frac{\partial n}{\partial \lambda} \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 k}{\partial \lambda^2} \equiv bk(\lambda), \quad b = \frac{1}{n-1} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} \quad (16)$$

2.3. 특정 파장에서의 안정화: 1차 미분의 보정

이번에는 공기 중에 있으며 렌즈간의 간격이 D , 각 렌즈의 굴절능이 k_1, k_2 인 2매 구성 광학계에 대하여 생각해 보자.

공기 중에 있는 2매 구성 광학계의 전체 굴절능 K 는

$$K = k_1 + k_2 - Dk_1k_2 \quad (17)$$

로 주어진다. 특정한 기준파장 λ 에서 파장변화에 따른 굴절능의 변화는 다음과 같다.

$$\frac{\partial K}{\partial \lambda} = \frac{\partial k_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial k_2}{\partial \lambda} - D \left(k_2 \frac{\partial k_1}{\partial \lambda} + k_1 \frac{\partial k_2}{\partial \lambda} \right) = a_1 k_1 + a_2 k_2 - D(a_1 + a_2) k_1 k_2 \quad (18)$$

식 (18)에서 기준파장 λ 에서 전체 굴절능 K 의 1차 미분이 0이 될 조건은

$$\frac{\partial K}{\partial \lambda} = a_1 k_1 + a_2 k_2 - D(a_1 + a_2) k_1 k_2 = 0 \quad (19)$$

로 표현할 수 있다^[5]. 위 식에서 a_1 과 a_2 는 각각 $1/\nu_1$ 과 $1/\nu_2$ 에 해당하는 물리량이며 식 (15)에서 정의되었다. 앞서 식 (2)는 F-선과 C-선의 굴절능을 일치시키는 것(몰색화)에 목적이 있다. 하지만 식 (19)는 특정한 기준파장 λ 에서 굴절능의 변화가 없도록 하는 것에 목적이 있으므로 식 (19)는 식 (2)의 몰색화 조건과 구별하여 파장 변화에 대한 굴절능의 안정화 조건(이하 안정화 조건)이라고 부르려고 한다. 식 (19)에서 렌즈간의 간격 D 는

$$D = \frac{a_1 k_1 + a_2 k_2}{(a_1 + a_2) k_1 k_2} \quad (20)$$

이 되고, 이를 식 (17)에 대입하면 안정화 조건을 만족하는 전체 굴절능 K 를 구할 수 있다.

$$K = \frac{1}{a_1 + a_2} (a_2 k_1 + a_1 k_2) \quad (21)$$

2매 구성 광학계의 설계에서 적절한 k_1 을 선택하면 식 (20)과 식 (21)로 안정화 조건을 만족하는 k_2 와 D 가 결정된다. 그리고 만약 접합렌즈에서 렌즈간의 간격 D 를 0으로 근사하면, 특정파장에서 굴절능의 변화가 없을 조건(안정화 조건)을 만족하는 k_1 과 k_2 는 다음과 같다.

$$k_1 = \frac{a_2}{a_2 - a_1} K \quad (22)$$

$$k_2 = \frac{-a_1}{a_2 - a_1} K \quad (23)$$

2.4. 기준파장과 인근 파장대역에서의 안정화

앞서 설명된 안정화 설계법은 기준 파장에서는 굴절능의 변화율이 0이지만, 색수차가 잘 보정된 파장 대역이 좁은 문제가 있다. 이 연구에서는 이를 개선하여 보다 넓은 파장 대역에서 파장변화에 대하여 굴절능의 변화가 적은 광학계를 설계하는 방법을 제안하고자 한다. 공기 중에 있고 렌즈간의 간격이 D , 굴절능이 k_1, k_2 인 2매 구성 광학계에서 파장변화에 따른 굴절능의 변화를 1차, 2차 미분까지 보정하면, 기준 파장과 그 인근대역에서 파장 변화에 보다 안정화 될 것으로 기대할 수 있으며, 이 연구에서는 이를 대역 안정화 설계라고 부르려고 한다.

파장 λ 에서 2매 광학계의 전체 굴절능 K 의 λ 의 변화에 대하여 2차 미분까지 전개하면 다음과 같다.

$$K(\lambda) = K(\lambda_0) + \frac{\partial K}{\partial \lambda} (\lambda - \lambda_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 K}{\partial \lambda^2} (\lambda - \lambda_0)^2 + \dots \quad (24)$$

전체 굴절능 K 의 1차 미분과 2차 미분은

$$\frac{\partial K}{\partial \lambda} = \frac{\partial k_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial k_2}{\partial \lambda} - D \left(k_2 \frac{\partial k_1}{\partial \lambda} + k_1 \frac{\partial k_2}{\partial \lambda} \right) \quad (25)$$

$$= a_1 k_1 + a_2 k_2 - D(a_1 + a_2) k_1 k_2$$

$$\frac{\partial^2 K}{\partial \lambda^2} = \frac{\partial^2 k_1}{\partial \lambda^2} + \frac{\partial^2 k_2}{\partial \lambda^2} - D k_2 \frac{\partial^2 k_1}{\partial \lambda^2} - 2D \frac{\partial k_1}{\partial \lambda} \frac{\partial k_2}{\partial \lambda} - D k_1 \frac{\partial^2 k_2}{\partial \lambda^2}$$

$$= b_1 k_1 + b_2 k_2 - D(b_1 + 2a_1 a_2 + b_2) k_1 k_2 \quad (26)$$

로 나타낼 수 있으며 1차 미분과 2차 미분이 보정될 조건은

$$\frac{\partial K}{\partial \lambda} = a_1 k_1 + a_2 k_2 - D(a_1 + a_2) k_1 k_2 = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 K}{\partial \lambda^2} = b_1 k_1 + b_2 k_2 - D(b_1 + 2a_1 a_2 + b_2) k_1 k_2 = 0 \quad (28)$$

이다. 식 (17)에서

$$D k_1 k_2 = k_1 + k_2 - K \quad (29)$$

이므로 이를 식 (27), 식 (28)에 대입하면 1차, 2차 미분이 보정되는 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial K}{\partial \lambda} = a_1 k_1 + a_2 k_2 - (a_1 + a_2)(k_1 + k_2 - K) = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial^2 K}{\partial \lambda^2} = b_1 k_1 + b_2 k_2 - (b_1 + 2a_1 a_2 + b_2)(k_1 + k_2 - K) = 0 \quad (31)$$

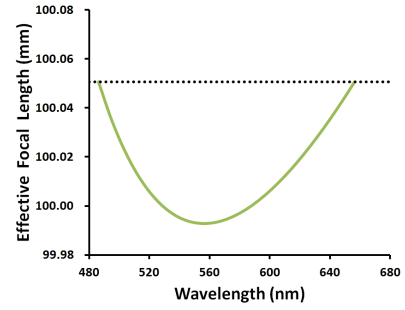
식 (30)과 식 (31)은 k_1, k_2 에 대한 선형방정식이므로, 두 식을 연립하여 풀어내면 기준파장과 인근 파장 대역에서 파장변화에 매우 안정한 설계의 해를 얻을 수 있다.

$$k_1 = \frac{K \{ (a_1 + a_2)(2a_1 a_2 + b_1) - a_1(b_1 + 2a_1 a_2 + b_2) \}}{a_2(2a_1 a_2 + b_1) - a_1(2a_1 a_2 + b_2)} \quad (32)$$

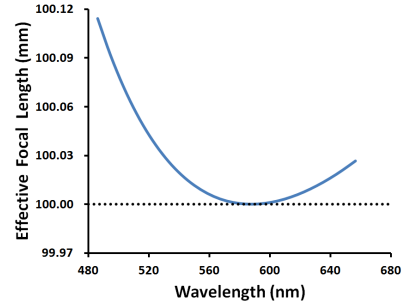
$$k_2 = - \frac{K \{ (a_1 + a_2)(2a_1 a_2 + b_2) - a_2(b_1 + 2a_1 a_2 + b_2) \}}{a_2(2a_1 a_2 + b_1) - a_1(2a_1 a_2 + b_2)} \quad (33)$$

렌즈간의 간격 D 는 식 (29)에서 다음과 같이 주어진다.

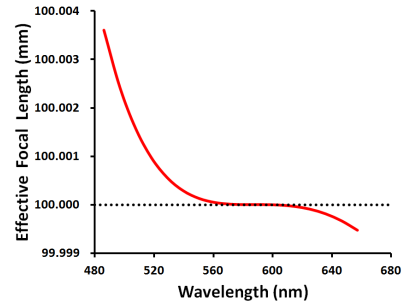
$$D = \frac{k_1 + k_2 - K}{k_1 k_2} = \frac{\{ a_2(2a_1 a_2 + b_1) - a_1(2a_1 a_2 + b_2) \} (a_1 b_2 - a_2 b_1)}{(2a_1 a_2^2 + a_2 b_1 - a_1 b_2) (2a_1^2 a_2 + a_1 b_2 - a_2 b_1) K} \quad (34)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. Chromatic variation of effective focal length. (a) Achromatic doublet, (b) Stabilized for a wavelength, (c) Stabilized for a wavelength band.

그림 1은 일반적인 몰색화 설계, 안정화 설계 그리고 본 논문에서 제시한 대역 안정화 설계를 비교한 사례가 제시되어 있으며, 가시광선 대역에서 2매 렌즈의 파장변화에 따른 초점거리 변화를 보여주고 있다. 그림 1(a)는 Fraunhofer F-선(486.1 nm)와 C-선(656.3 nm)의 굴절능을 일치시킨 색차용 렌즈 이고 (b)는 식 (22), 식 (23)을 이용하여 d-선(587.6 nm)을 기준파장으로 한 안정화한 예이며, (c)는 식 (32)~(34)를 이용하여 d-선을 기준파장으로 1차 미분, 2차 미분 모두 보정한 대역 안정화 설계의 예이다. 이 중 대역 안정화 설계인 (c)에서 파장에 대한 굴절능의 변화가 가장 적음을 볼 수 있다.

III. 대역 안정화 조건을 적용한 시준렌즈 설계

3.1. 안정화 조건의 해석

본 연구에서는 단파장 근처에서 분산이 커지는 광학 유리의 특성을 고려하여 Schott사에서 생산되는 광학유리 중 파

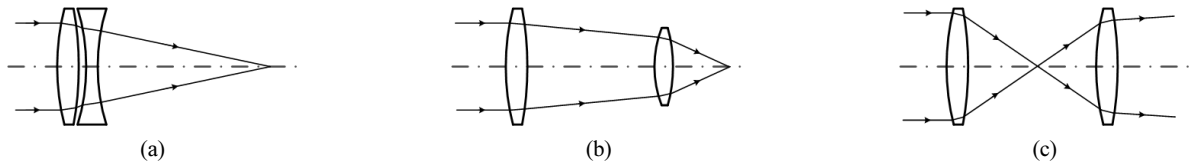


Fig. 2. Optical layouts of doublets stabilized for a wavelength band. (a) Positive-negative type, (b) Positive-positive type I, (c) Positive-positive type II.

장 380 nm에서 투과율이 우수한 유리^[10]를 조합하여 380 nm와 그 인근 파장 대역에서 유효초점거리의 변화가 적은 안정한 광학계를 설계하였다. 식 (32)~식 (34)의 조건을 만족하는 해는 유리의 조합에 따라 달라지며 그림 2에서 보여주는 것과 같이 세 가지 형태의 구성이 가능한 해가 존재한다. 먼저 그림 2(a)의 PN형은 렌즈 사이의 거리 D 가 짧은 air-spaced doublet이며, 통상적인 achromat과 유사한 형태이다. 그림 2(b)의 PP Type I은 D 가 첫 번째 렌즈의 초점거리 보다 짧아 상측 초점이 두 번째 렌즈 뒤에 있다. 마지막으로 그림 2(c)의 PP Type II는 렌즈간의 간격 D 가 첫 번째 렌즈의 초점거리 보다 긴 경우이다. 여기에서 P는 양의 굴절능(볼록렌즈), N은 음의 굴절능(오목렌즈)를 나타낸다. 그림 2의 세 가지 경우에서 모두 k_1 과 k_2 를 바꾸어도 대역 안정화 조건은 동일하게 성립한다. 그리고 그림 2의 세 가지 경우 외에도 D 가 음수인 PN형의 수학적 해도 존재한다.

3.2. 시준렌즈의 초기설계

이 절에서는 앞서 소개한 대역 안정화 설계법을 이용하여 2매 구성의 시준렌즈를 설계하고 파장변화에 따른 굴절능의

Table 1. Design specification of the collimator lens

Collimator lens	
effective focal length	100 mm
f-number	10
reference wavelength (λ_0)	380 nm
field of view	1.4°

변화를 확인하고자 한다.

표 1은 설계할 시준렌즈에 대한 사양이며, 초점거리는 100 mm, F-number가 10, 파장 380 nm를 기준으로 인근 대역에서 굴절능 변화가 적은 광학계를 설계하였다. 설계에 사용된 광학 유리는 미국 Schott 사의 NFK58과 NFK5이다.

표 1의 설계사양에 따라 얻어진 광학계의 기초설계는 표 2의 case 3을 선택하였다. 그림 3은 기초설계에서 파장변화에 따른 초점거리 변화를 나타낸다.

3.3. 최적화와 최종설계의 평가

앞에서 얻어진 기초설계는 의도대로 파장에 따른 굴절능

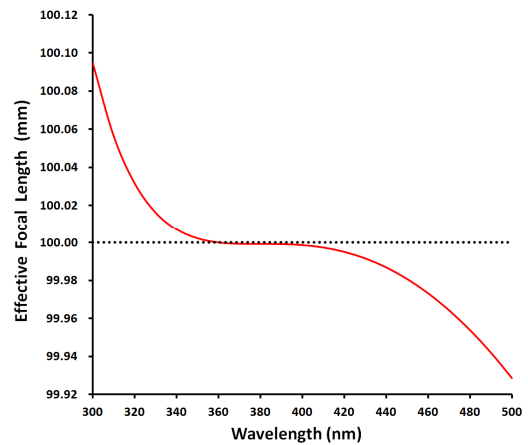


Fig. 3. Variation of EFL of the initial design against wavelength change.

Table 2. Typical design examples of the P-N type solution

Case	Material	Refractive power k (mm^{-1})	Distance d (mm)	$\lambda_0=380 \text{ nm}$		
				n_{380}	$\frac{1}{n-1} \frac{\partial n}{\partial \lambda}, a$	$\frac{1}{n-1} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2}, b$
1	PSK60	2.28239	0.005	1.63286	-0.33534	1.28220
	NBAK1	-2.30082		1.59391	-0.34101	1.88816
2	NFK58	1.47788	0.170	1.46652	-0.20733	1.73937
	NBK10	-1.96058		1.51333	-0.27833	1.58078
3	NFK58	0.17413	0.998	1.46652	-0.20733	1.73937
	NFK5	-0.19867		1.50189	-0.26358	2.23433
4	NFK58	0.15312	1.087	1.46652	-0.20733	1.73937
	FK5HTi	-0.17168		1.50186	-0.26319	1.61689

Table 3. Final design data of the collimator lens

Surface #	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass
STOP	25.164	2.390	NFK58
2	-13.597	0.500	
3	-13.032	0.950	NFK5
4	85.811	93.410	

EFL=100 mm, F-10.0, $\lambda_0=380$ nm

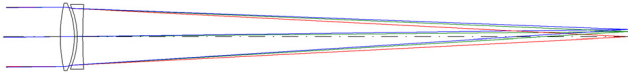


Fig. 4. Optical layout of the collimator design.

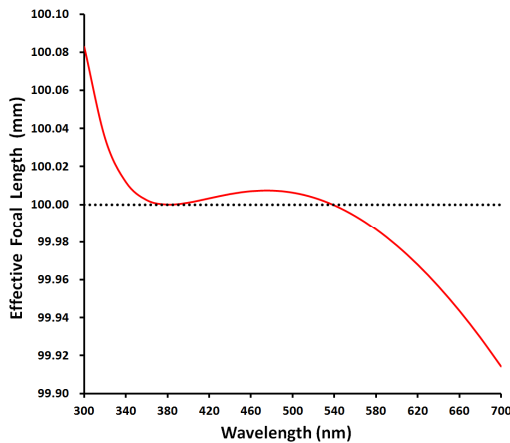


Fig. 5. Variation of EFL of the final design.

변화가 적게 하는 설계의 요구를 따르고 있다. 하지만 다른 광학수차들이 보정되지 않았으므로 최적화를 통하여 광학수차를 보정하였다. 최적화는 파장에 따른 굴절능 변화가 최소화 되도록 제한조건을 설정하였다. 최적화를 통하여 최종적으로 설계된 시준렌즈의 설계 데이터는 표 3에, 광학계의 형상은 그림 4에 나타나 있다.

그림 5는 최종 설계된 시준렌즈의 파장변화에 따른 유효초점거리 변화를 나타낸 그래프이다. 최종 설계에서 파장변화에 따른 초점거리 변화를 분석한 결과 기준파장 380 nm에서 유효초점거리는 100 mm를 유지하고 있으며, 380 nm를 포함하면서 초기설계보다 더 넓은 영역인 가시광선 대역에 걸친 약 300~700 nm 영역에서 시준렌즈의 유효초점거리 변화가 약 ± 0.1 mm ($\pm 0.1\%$) 이하로 파장변화에 대하여 안정하다. 특히 360~410 nm 대역에서는 유효초점거리의 변화가 0.002% 이하로 매우 적다.

RMS wavefront error는 파장 300~700 nm구간에서 모든 값이 0.07λ 이하의 값을 가진다. 그림 6에는 파장과 따른 RMS wavefront error가 나타나 있고, 0.064λ 수준으로 회절한계 이하이다. 표 4는 파장과 시야에 따른 RMS spot diameter이며 파장 300~700 nm구간에서 Airy disk의 직경인 $9.3 \mu\text{m}$ 보다 작음을 알 수 있다.

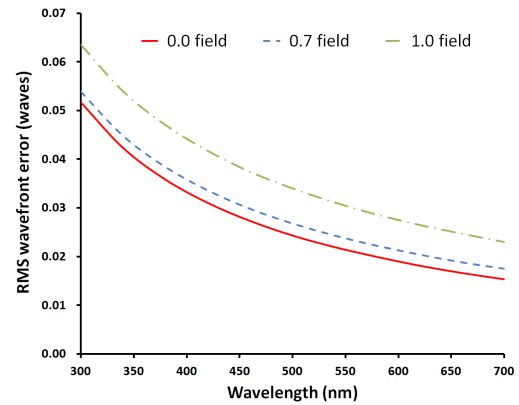


Fig. 6. Variation of RMS wavefront error against wavelength change.

Table 4. RMS spot diameters of the final design

Wavelength (nm)	RMS spot diameter (μm)		
	0.0 field	0.7 field	1.0 field
300	6.13	6.12	6.55
340	5.63	6.20	6.95
380	5.08	5.23	6.07
420	5.07	5.06	5.34
460	5.42	5.24	5.23
500	5.71	5.40	5.27
540	5.68	5.34	5.21
580	5.32	5.05	5.02
620	4.77	4.66	4.91
660	4.28	4.37	4.89
700	4.33	5.01	5.86

IV. 결 론

광학계의 특성은 파장이 변화함에 따라 같이 변화한다. 본 연구에서는 얇은 렌즈 근사법을 이용하여 기준파장과 그 인 근 파장 대역에서 파장변화에 안정한 광학계를 설계하는 방법에 대해 연구하고, 이를 이용하여 2매 구성의 시준렌즈를 설계하였다.

새로 제안된 대역 안정화 설계법은 파장변화에 따른 굴절능의 변화를 1차, 2차 미분까지 보정하여 기준 파장과 인 근 대역에서 $\Delta\lambda$ 의 3제곱에 비례하게 설계하는 방법으로써 기존의 두 파장에 대해서만 굴절능을 일치시키는 achromat 과는 설계의 접근방법에 차이가 있다. 또한 1차 미분만 보정하여 특정한 기준파장과 그 부근에서만 파장 변화에 따른 굴절능 변화가 적도록 하는 안정화 광학설계 보다 훨씬 더 넓은 파장영역에서 굴절능의 변화를 적게 할 수 있다.

본 연구에서는 대역 안정화 설계법으로 굴절률의 변화가 단파장대역에서도 매우 안정한 시준렌즈를 설계하였다. 설계된 시준렌즈는 기준파장 380 nm에서 유효초점거리 100 mm, f-10, FOV 1.4° 인 2매 구성의 렌즈계이다. Schott 사의 생산

되는 유리 중 380 nm 인근 대역에서 투과율이 우수한 유리를 조사하고, 적당한 굴절능과 렌즈간의 간격을 갖는 렌즈 조합을 선정하여 기초설계로 활용하였다. 최종 설계된 시준렌즈는 기대한 파장 380 nm 인근대역은 물론이고 더 넓은 가시광선 영역까지 안정하게 설계되었으며 파장 대역 300~700 nm에서 유효초점거리의 변화는 ± 0.1 mm ($\pm 0.1\%$) 이하이다. 특히 360~410 nm 대역에서는 유효초점거리의 변화가 0.002% 이하로 매우 적다. 또한 RMS wavefront error는 0.064λ 수준, RMS spot diameter는 $5.6 \mu\text{m}$ 이하이며 회절한계의 결상 특성을 가진다.

본 연구에서 제안된 대역 안정화 광학계의 설계기법은 특정한 파장 대역 내에서는 파장의 제약 없이 여러 용도로 사용할 수 있는 범용 렌즈의 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

References

1. Pierre Y. Bely, *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* (Springer-Verlag, New York, 2003),

Appendix F.
2. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, 4th ed (McGraw Hill Co., USA, 2008), Chapter 5.
3. R. B. Johnson, "Achromatic Doublets" in *Handbook of Optics*, 2nd ed (McGraw Hill, USA, 1995), Vol. 2, Chapter 1.
4. R. Kingslake and R. B. Johnson, *Lens Design Fundamentals*, 2nd ed (Elsevier Co., USA, 2010), Chapter 5.
5. D. A. Kim and J. U. Lee, "Optical design of a laser scanning system stable against wavelength and temperature variations," *Korean J. Opt. Photon.* **27**, 32-40 (2016).
6. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 7th ed (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999), Chapter 4.
7. W. J. Smith, *Modern Lens Design*, 2nd ed (Book's Hill Publishing Co., USA, 2007), Chapter 7, Chapter 16.
8. Schott, "TIE-29: Refractive Index and Dispersion," in Proc. Schott Technical Information (Schott Inc., Germany, February 2016).
9. T. Y. Lim, Master Thesis, Dankook University, Cheonan (2016), p. 8.
10. Schott, *Optical Glass Catalogue Excel* (Schott Inc., Germany, July, 2015).