

Optical Design of a Laser Scanning System Stable Against Wavelength and Temperature Variations

Da Ae Kim and Jong-Ung Lee[†]

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

(Received December 22, 2015; Revised manuscript January 25, 2016; Accepted January 25, 2016)

The characteristics of an optical system vary depending on wavelength and ambient temperature. Based on the thin-lens approximation, we investigate the conditions for stabilizing an optical system against wavelength and temperature variations at the same time. The conditions are applied to designing a laser scanning system consisting of two lenses. The change in the effective focal length of the scanning system against wavelength and temperature variations is very small, as expected.

Keywords: Optical system design, Stabilized optical system, Laser scanning system, Achromatization, Athermalization
OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (080.3630) Lenses; (220.3620) Lens system design

파장과 온도변화에 안정한 레이저 주사광학계 설계

김다애 · 이종웅[†]

청주대학교 레이저광정보공학과
☎ 28503 충북 청주시 청원구 대성로 298

(2015년 12월 22일 받음, 2016년 1월 25일 수정본 받음, 2016년 1월 25일 게재 확정)

광학계의 특성은 파장과 온도에 따라 변화한다. 이 연구에서는 얇은 렌즈 근사를 이용하여 특정한 기준파장과 기준온도에서 파장과 온도변화에 안정한 광학계를 설계하는 방법에 대하여 연구하고, 이를 기반으로 2매의 렌즈로 구성된 레이저 주사광학계를 설계하였다. 설계된 레이저 주사광학계는 기대한 바와 같이 파장과 온도 변화에 따른 유효초점거리의 변화가 매우 적음을 확인 할 수 있었다.

Keywords: 광학설계, 안정화 광학계, 레이저 주사광학계, 몰색화, 비열화
OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (080.3630) Lenses; (220.3620) Lens system design

I. 서 론

반도체 노광기술, diamond turning을 비롯한 초정밀 가공기술, 간섭계를 이용한 초정밀 측정기술의 발전에 따라 높은 분해능을 가지는 회절 한계의 초정밀 광학계가 산업 전반에 걸쳐 사용되고 있다. 현재의 과학과 기술수준에서 극한의 한계에 가까운 고성능이 요구되는 광학계는 색수차 보정과 열적 안정화를 위해 특정한 파장과 온도에 맞추어 설계, 제작되고 이러한 광학계를 사용하는 초정밀 광학 장비는 항온 항습의 청정실에서 운용되며 광원도 파장과 출력이 변화하지 않도록 엄격하게 관리되고 있다. 만약 광학계가 파장과 온도의 변화에 민감하지 않다면, 초정밀 장비의 운용에서 환경조

건의 관리가 보다 편리해질 수 있을 것으로 기대된다. 이 연구에서는 특정한 파장과 온도에서 사용하도록 설계되는 광학계에서 파장과 온도의 변화에 광학계의 굴절능의 변화가 최소화 되도록 하는 안정화 광학계의 설계방법에 대하여 연구하고 설계의 예를 제시하였다.

광학계가 특정한 범위를 가진 파장대역에서 사용되어야 하는 경우에는 파장변화에 따른 광학적 특성의 변화를 방지하기 위하여 achromat, apochromat와 같은 몰색화 광학계가 사용되고 있다. 이 몰색화 광학계는 사용하는 파장대역 내에서 광학적 특성의 변화에 따른 결상 성능의 저하를 가능한 줄여주는 것에 목적이 있으며 보통의 경우 중간 파장대역인 기준 파장(예시, d-선)에 맞추어 설계된 광학계가 단파장 대역(예

[†]E-mail: julee@cju.ac.kr

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

시, F-선)과 장파장 대역(예시, C-선)에서 광학적 특성의 변화와 결상 성능의 저하가 최소화 되도록 설계된다^{1,2)}. 하지만 이 연구에서 설계하고자 하는 파장 변화에 대하여 안정화된 광학계는 설계된 특정파장과 그 근처의 파장에서 광학적 특성변화가 없거나 최소화 되도록 설계한 광학계이다. 따라서 일반적인 물색화와 파장변화에 대한 안정화는 서로 설계의 취지가 다르다. 하지만 아주 좁은 파장대역에 대한 물색화라면 접근 방법은 다르지만 거의 같은 결과를 얻을 수 있을 것이므로 이 때는 유사하다고 볼 수도 있다.

이 연구에서 온도변화에 대한 안정화는 특정한 동작온도와 그 근처의 온도에서 온도변화에 따른 광학계의 광학적 특성변화가 없거나 최소화 되도록 하는 것을 의미한다. 광학설계에서 열특성 보정(athermalization)은 주어진 온도 범위에서 광학적 특성의 변화와 결상성능의 저하를 최소화하는 것에 목적이 있다. 따라서 파장 변화의 경우와 같이 온도 변화에 대한 안정화와 열특성 보정은 설계의 취지는 다르지만 아주 좁은 온도 범위에만 관심을 가진다면 거의 같은 결과를 얻을 수 있고 유사하다고 볼 수 있다.

광학계는 단렌즈 또는 단렌즈가 결합된 렌즈군의 조합으로 구성된다. 이 연구에는 얇은 렌즈로 근사된 단렌즈와 렌즈간의 간격이 0인 얇은 렌즈로 구성된 렌즈군에서 파장과 온도 변화에 대한 굴절능의 안정화조건에 대하여 연구하고³⁾, 이를 군간의 간격이 D 인 2군 광학계로 확대하여 파장 변화와 온도변화에 모두 안정화된 2군 광학계를 설계하였다. 이 연구에서 설계된 광학계는 파장 532 nm, 상온에서 사용되는 2군 2매 구성의 레이저 주사광학계이며, 유효초점거리 250 mm, 광속의 직경 10 mm, 주사각은 $\pm 6^\circ$ 이며, 회절한계 이내로 수차가 보정되었고 주사 높이의 오차는 0.018% 이하로 잘 보정되어 있다.

II. 파장과 온도변화에 대한 안정화

2.1. 파장변화에 대한 안정화

2.1.1. 파장에 따른 굴절능의 변화

광학유리의 굴절률(상대굴절률)은 파장에 따라 변화하며, 이것이 파장의 변화에 따라 단렌즈의 광학적 특성과 결상특성을 변화시키는 근본적인 원인이 된다. 특정한 기준파장 λ_0 과 그 인근의 파장 λ 에서 광학유리의 굴절률 $n(\lambda)$ 과 렌즈의 굴절능 $k(\lambda)$ 는 다음과 같이 1차 함수로 근사 될 수 있다.

$$n(\lambda) = n(\lambda_0) + \left. \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} (\lambda - \lambda_0) + \dots \quad (1)$$

$$k(\lambda) = k(\lambda_0) + \left. \frac{\partial k}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} (\lambda - \lambda_0) + \dots \quad (2)$$

위의 식 (1)에서 $n(\lambda_0)$ 는 기준파장 λ_0 에서의 굴절률이며, 식 (2)에서 $k(\lambda_0)$ 는 기준파장에서 단렌즈의 굴절능이다. 단렌즈를 공기중에 있고 앞면의 곡률이 c_1 , 뒷면의 곡률이 c_2 인 얇은 렌즈로 근사하면 기준파장의 굴절능과 인근 파장 λ 에서의 굴절능은 다음과 같다.

$$k(\lambda_0) = (c_1 - c_2) \{n(\lambda_0) - 1\} \quad (3)$$

$$k(\lambda) = (c_1 - c_2) \{n(\lambda) - 1\} \approx k(\lambda_0) + (c_1 - c_2) \left. \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} (\lambda - \lambda_0) + \dots \quad (4)$$

따라서 파장 λ_0 에서 파장 변화에 따른 굴절능의 변화율은

$$\left. \frac{\partial k}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} = \frac{k(\lambda_0)}{n(\lambda_0) - 1} \left. \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} \quad (5)$$

이 되며, 식 (5)를 종색수차의 보정에서 Abbe 상수와 유사한 형식으로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left. \frac{\partial k}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} = \frac{k(\lambda_0)}{V^*} \quad (6)$$

$$\frac{1}{V^*} = \frac{1}{n(\lambda_0) - 1} \left. \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} \quad (7)$$

식 (7)의 V^* 는 Abbe 상수와 동일한 형식으로 정의되어 있다. 하지만 Abbe 상수는 단파장 대역의 파장과 장파장 대역의 파장 간의 굴절능 차이를 나타내는 상수이나 V^* 는 기준파장 λ_0 에서 파장변화에 따른 굴절능의 변화를 나타내는 상수이다.

다음에는 렌즈간의 간격이 0이고 공기중에 있는 m 개의 얇은 렌즈로 구성된 렌즈군에 대하여 생각해보자. 기준파장 λ_0 에서 렌즈군의 굴절능 $K(\lambda_0)$ 와 인근 파장 λ 에서 렌즈군의 굴절능 $K(\lambda)$ 은 다음과 같다.

$$K(\lambda_0) = \sum_{i=1}^m k_i(\lambda_0) \quad (8)$$

$$K(\lambda) = \sum_{i=1}^m k_i(\lambda) \approx K(\lambda_0) + \sum_{i=1}^m \frac{k_i(\lambda_0)}{V_i^*} (\lambda - \lambda_0) + \dots \quad (9)$$

식 (8)에서 기준파장 λ_0 에서 파장변화에 따른 렌즈군의 굴절능의 변화량은

$$\left. \frac{\partial K}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} = \sum_{i=1}^m \frac{k_i(\lambda_0)}{V_i^*} \quad (10)$$

로 주어지고, 식 (10)은 렌즈군 전체에서 파장변화에 따른 굴절능의 변화를 나타내는 상수 V^* 를 도입하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left. \frac{\partial K}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} = \frac{K(\lambda_0)}{V^*} = \sum_{i=1}^m \frac{k_i(\lambda_0)}{V_i^*} \quad (11)$$

$$\frac{1}{V^*} = \frac{1}{K(\lambda_0)} \sum_{i=1}^m \frac{k_i(\lambda_0)}{V_i^*} \quad (12)$$

Figure 1과 Table 1에는 이 연구에서 제시한 파장변화에 대한 안정화 설계와 일반적인 물색화 설계의 차이를 보여주는 예를 제시하였다. Figure 1(a)와 Table 1(a)는 식(11)을 사

용하여 d-선(587.6 nm)에 대하여 안정화한 예이며, Fig. 1(b)와 Table 1(b)는 F-선(486.1 nm)과 C-선(656.3 nm)의 굴절능이 같도록 설계한 물색화 렌즈이다. Figure 1과 Table 1에서 파장에 대한 안정화와 일반적인 물색화는 뚜렷한 차이가 있음을 알 수 있다.

2.1.2. 2군 광학계의 파장변화에 대한 안정화 조건

앞에서는 공기중에 있는 얇은 렌즈로 구성된 렌즈군에서 파장변화에 대한 굴절능의 변화를 살펴보았다. 이번에는 실질적인 광학설계를 위하여 공기중에 있고 렌즈 군간의 간격이 D , 굴절능이 K_1, K_2 인 2개의 렌즈군으로 구성된 2군 광학계에 대하여 생각해보자.

2군 광학계 전체의 굴절능 $K(\lambda_0)$ 와 $K(\lambda)$ 는 기준파장 λ_0 와 인근파장 λ 에서

$$K(\lambda) = K_1(\lambda) + K_2(\lambda) - DK_1(\lambda)K_2(\lambda) \quad (13)$$

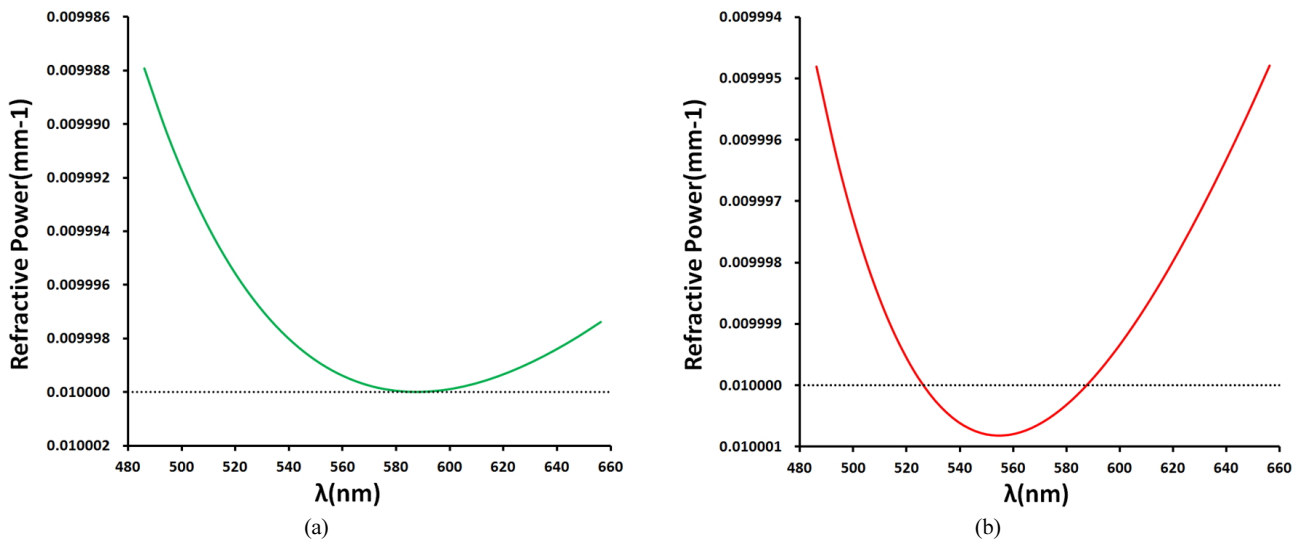


FIG. 1. Chromatic variations of total refractive power of a doublet(thin lens design). (a) Stable doublet against wavelength variation, (b) Achromatic doublet.

TABLE 1. Design examples of a doublet. (a) Stable doublet against wavelength variation, (b) Achromatic doublet.

(a) Stable doublet against wavelength variation

#	$k(\text{mm}^{-1})$	glass	n_d	V^*
1	0.02182	NBK7	1.5168	-12.3638
2	-0.01182	NSF2	1.6477	-6.6978

(b) Achromatic doublet

#	$k(\text{mm}^{-1})$	glass	n_d	V_d
1	0.02114	NBK7	1.5168	64.17
2	-0.01114	NSF2	1.6477	33.84

$$\begin{aligned}
 K(\lambda) &= K_1(\lambda) + K_2(\lambda) - DK_1(\lambda)K_2(\lambda) \\
 &\approx K(\lambda_0) + \left[\{1 - DK_2(\lambda_0)\} \frac{K_1(\lambda_0)}{V_1^*} \right. \\
 &\quad \left. + \{1 - DK_1(\lambda_0)\} \frac{K_2(\lambda_0)}{V_2^*} \right] (\lambda - \lambda_0)
 \end{aligned} \tag{14}$$

로 주어진다. 따라서 2군 광학계 전체의 굴절능이 파장에 따른 변화가 없는 안정화 조건은 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial K}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} = \{1 - DK_2(\lambda_0)\} \frac{K_1(\lambda_0)}{V_1^*} + \{1 - DK_1(\lambda_0)\} \frac{K_2(\lambda_0)}{V_2^*} = 0 \tag{15}$$

2.2. 온도변화에 대한 안정화

2.2.1. 온도에 따른 굴절능의 변화

단렌즈에서 온도에 따라 굴절능이 변화하는 요인은 광학유리의 굴절률(상대굴절률) 변화와 열팽창이다¹⁴⁾. 앞의 파장변화의 경우와 마찬가지로 기준온도 T_0 인근의 온도 T 에서 광학유리의 굴절률 $n(T)$, 렌즈의 곡률반경 $r(T)$, 그리고 렌즈의 굴절능 $k(T)$ 는 다음과 같이 1차 함수로 근사될 수 있다^{15,6)}.

$$n(T) = n(T_0) + \left. \frac{\partial n}{\partial T} \right|_{T=T_0} (T - T_0) + \dots \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 r(T) &= r(T_0) + \left. \frac{\partial r}{\partial T} \right|_{T=T_0} (T - T_0) + \dots \\
 &= r(T_0) \{1 + \alpha_{T_0} (T - T_0)\} + \dots
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$k(T) = k(T_0) + \left. \frac{\partial k}{\partial T} \right|_{T=T_0} (T - T_0) + \dots \tag{18}$$

식 (17)에서 α_{T_0} 는 기준온도에서 광학유리의 열팽창률이다. 단렌즈를 공기중에 있는 얇은 렌즈로 근사하면 기준온도의 굴절능과 인근 온도 T 에서의 굴절능은 다음과 같이 주어진다.

$$k(T_0) = \{c_1(T_0) - c_2(T_0)\} \{n(T_0) - 1\} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 k(T) &= \{c_1(T) - c_2(T)\} \{n(T) - 1\} \\
 &\approx k(T_0) + \{c_1(T) - c_2(T)\} \left\{ \left. \frac{\partial n}{\partial T} \right|_{T=T_0} - \alpha_{T_0} n(T_0) \right\} (T - T_0) \dots
 \end{aligned} \tag{20}$$

식 (20)으로부터 기준온도 T_0 에서 온도변화에 따른 굴절능의 변화율은

$$\left. \frac{\partial k}{\partial T} \right|_{T=T_0} = \frac{k(T_0)}{n(\lambda_0) - 1} \left\{ \left. \frac{\partial n}{\partial T} \right|_{T=T_0} - \alpha_{T_0} n(T_0) \right\} \tag{21}$$

이 되며, 식 (21)은 glass thermal constant와 유사한 형식으로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left. \frac{\partial k}{\partial T} \right|_{T=T_0} = \gamma^* k(T_0) \tag{22}$$

$$\gamma^* = \frac{1}{n(\lambda_0) - 1} \left\{ \left. \frac{\partial n}{\partial T} \right|_{T=T_0} - \alpha_{T_0} n(T_0) \right\} \tag{23}$$

식 (23)의 γ^* 는 glass thermal constant와 동일한 형식으로 정의되어 있지만, γ^* 는 기준온도 T_0 에서 온도변화에 따른 굴절능의 변화를 나타내는 상수라면, 일반적인 glass thermal constant γ 는 특정한 온도구간에서 평균한 굴절률 온도변화와 열팽창률로 정의되는 것이 다르다.

다음에는 렌즈간의 간격이 0이고 공기중에 있는 m개의 얇은 렌즈로 구성된 렌즈군에 대하여 생각해보자. 기준온도 T_0 에서 렌즈군의 굴절능 $K(T_0)$ 와 인근 온도 T 에서 렌즈군의 굴절능 $K(T)$ 은 다음과 같다.

$$K(T_0) = \sum_{i=1}^m k_i(T_0) \tag{24}$$

$$K(T) = \sum_{i=1}^m k_i(T) \approx K(T_0) + \left\{ \sum_{i=1}^m \gamma_i^* k_i(T_0) \right\} (T - T_0) + \dots \tag{25}$$

따라서 기준온도에서 온도변화에 따른 렌즈군의 굴절능 변화량은

$$\left. \frac{\partial K}{\partial T} \right|_{T=T_0} = \sum_{i=1}^m \gamma_i^* k_i(T_0) \tag{26}$$

로 주어지고, 식 (26)은 렌즈군 전체에서 온도에 따른 굴절능의 변화를 나타내는 상수 γ^* 를 도입하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left. \frac{\partial K}{\partial T} \right|_{T=T_0} = \gamma^* K(T_0) = \sum_{i=1}^m \gamma_i^* k_i(T_0) \tag{27}$$

$$\gamma^* = \frac{1}{K(T_0)} \sum_{i=1}^m \gamma_i^* k_i(T_0) \quad (28)$$

2.2.2. 2군 광학계의 온도변화에 대한 안정화 조건

공기중에 있고, 렌즈 군간의 간격이 D , 굴절능이 K_1, K_2 인 2개의 렌즈군으로 구성된 2군 광학계에 대하여 생각해보자. 기준온도 T_0 의 굴절능 $K(T_0)$ 는 다음과 같다.

$$K(T_0) = K_1(T_0) + K_2(T_0) - D(T_0)K_1(T_0)K_2(T_0) \quad (29)$$

이번에는 렌즈군간의 간격 D 도 기구물(spacer 또는 렌즈 경통)의 열팽창에 따라 변화한다.^[7,8] 기준온도 T_0 에서 기구물의 열팽창률을 α_{M,T_0} 라 하면, 온도 T 의 굴절능 $K(T)$ 는

$$\begin{aligned} K(T) &= K_1(T) + K_2(T) - D(T)K_1(T)K_2(T) \\ &\approx K(T_0) + \{1 - D(T_0)K_2(T_0)\} \gamma_1^* K_1(T_0)(T - T_0) \\ &\quad + \{1 - D(T_0)K_1(T_0)\} \gamma_2^* K_2(T_0)(T - T_0) \\ &\quad - \alpha_{M,T_0} D(T_0)K_1(T_0)K_2(T_0)(T - T_0) \end{aligned}$$

로 주어지며, 공기 중에 있는 2군 광학계가 온도변화에 대하여 안정할 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial K}{\partial T} \right|_{T=T_0} &= \{1 - D(T_0)K_2(T_0)\} \gamma_1^* K_1(T_0) + \{1 - D(T_0)K_1(T_0)\} \gamma_2^* K_2(T_0) \\ &\quad - \alpha_{M,T_0} D(T_0)K_1(T_0)K_2(T_0) = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

2.3. 2군 광학계의 파장과 온도변화에 대한 안정화

본 절에서는 주어진 굴절능에서 파장과 온도변화를 동시에 만족하는 안정화 조건을 구하고자 한다. 2개의 렌즈군이 간격 D 만큼 떨어져 있다고 가정했을 때, 굴절능 K_T 를 가지면서 파장과 온도변화에 모두 안정화되기 위해서는 다음의 식 (31)과 식 (15), 식 (30)을 만족시켜야 한다.

$$K_T = K_1 + K_2 - DK_1K_2 \quad (31)$$

식 (31)은 2군 광학계의 전체 굴절능이며, 이 식에서

$$D = \frac{K_1 + K_2 - K_T}{K_1K_2} \quad (32)$$

이므로, 식 (32)를 식 (15)와 식 (30)에 대입하면, 파장변화에 대한 안정화 조건과 온도 변화에 대한 안정화 조건은 다음과

같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial K_T}{\partial \lambda} = \frac{1}{V_1^*} (K_T - K_2) + \frac{1}{V_2^*} (K_T - K_1) = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial K_T}{\partial T} = \alpha_m (K_T - K_1 - K_2) + \gamma_1^* (K_T - K_2) + \gamma_2^* (K_T - K_1) = 0 \quad (34)$$

식 (33)과 식 (34)는 K_1, K_2 에 대한 선형 방정식이므로, 연립하여 풀면 주어진 굴절능을 가지면서 파장과 온도 변화에 대하여 안정한 해가 다음과 같이 주어진다.

$$K_1 = \frac{V_2^* \gamma_2^* K_T - V_1^* (K_T \alpha_m + K_T \gamma_1^*)}{V_2^* (\alpha_m + \gamma_2^*) - V_1^* (\alpha_m + \gamma_1^*)} \quad (35)$$

$$K_2 = \frac{V_1^* \gamma_1^* K_T - V_2^* (K_T \alpha_m + K_T \gamma_2^*)}{V_1^* (\alpha_m + \gamma_1^*) - V_2^* (\alpha_m + \gamma_2^*)} \quad (36)$$

그리고 K_1, K_2 이 얻어지면, 렌즈군간의 거리 D 는 식 (32)에서 주어진다.

III. 안정화 조건을 적용한 레이저 주사광학계 설계

3.1. 레이저 주사광학계의 초기설계

이 연구에서 제안한 안정화 설계법을 적용하여 간단한 2군 2매 구성의 레이저 주사광학계를 설계하고 파장과 온도변화에 따른 굴절능의 변화를 살펴보고자 한다. 간단한 2군 2매 구성의 광학계에서 선택한 것은 안정화 조건이 얇은 렌즈 근사에서 유도 되었기 때문에 복잡한 구성의 광학계의 경우에는 두꺼운 렌즈로 변환하는 과정에서 기초설계의 특성을 그대로 유지시키기 어렵기 때문이며, 이 부분은 향후 계속적으로 연구되어야 할 과제이다.

Table 2는 설계하고자 하는 레이저 주사광학계의 사양이며, 출사동이 무한대에 있는 image space telecentric 구성이고, 초점거리는 250 mm, 주사거리는 52.36 mm 이고 입사 광속의 직경은 10 mm, 기준파장은 532 nm, 기준온도는 20°C 이다. Glass catalogue 에는 광학유리의 분산식이 주어지므로 기초설계에 필요한 V^* 는 알 수 있으나, 광학유리의 굴절률 온도변화와 열팽창은 특정한 온도 구간의 평균만 주어지므로 상대굴절률의 온도변화율은 +20°C~30°C 구간의 평균, 열팽창률은 -30°C~70°C 구간의 평균을 사용하였다.^[9,10] 이 때문에 온도변화에 대한 안정화는 굴절률의 변화가 상당히 적음을 확인하는 수준으로 이루어졌다.

설계에 사용된 광학유리는 미국 Schott 사의 NBK7과 SF2이며, 고출력 레이저용 광학계에서 자주 사용되고 있다. 렌

스 spacer의 재질은 알루미늄으로 가정하였다. Table 2의 설계사양에 따라 얻어진 2군 2매 광학계의 기초설계는 Table 3과 같다. Figure 2는 기초설계에서 파장과 온도 변화에 따른 EFL (effective focal length)과 BFL(back focal length)의 변화를 보여주고 있다. 이 연구에서 제안된 안정화 설계는 EFL

의 변화가 없도록 한 것이므로, BFL의 변화에 따른 초점의 조정은 필요할 수 있다. 하지만 BFL의 변화가 초점심도 (depth of focus) 이내이면 초점의 조정이 필요가 없으며, 본 설계의 예에서는 BFL의 변화가 초점심도 보다 아주 작으므로 초점 조정이 필요없다. F-theta 렌즈계에서 주사하는 높이 (상 높이)는 렌즈의 EFL에 비례한다. 따라서 본 설계의 예에서 안정화는 주사 높이가 항상 일정하게 유지되도록 하는 것이 실질적인 효과이다.

Table 4는 Table 3의 기초설계를 적절한 축상 두께를 주어 두꺼운 렌즈로 변환한 것이며, 최적화를 위한 초기설계이다. 얇은 렌즈를 두꺼운 렌즈로 변환하는 과정에는 가능한 근축광학적 특성의 변화가 없도록 등가렌즈 변환법^[11,12]을 적용하였다. Figure 3은 두꺼운 렌즈로 변환된 초기설계에서 파장과 온도 변화에 따른 굴절능의 변화를 보여주고 있다.

TABLE 2. Design specifications of the laser scanning system

Telecentric F-theta lens	
effective focal length	250 mm
design wavelength	532 nm
beam diameter	10 mm
scan length	52.36 mm
glass	SF2 - NBK7

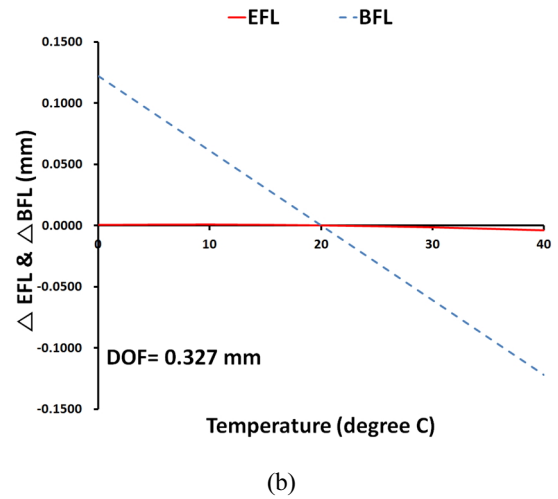
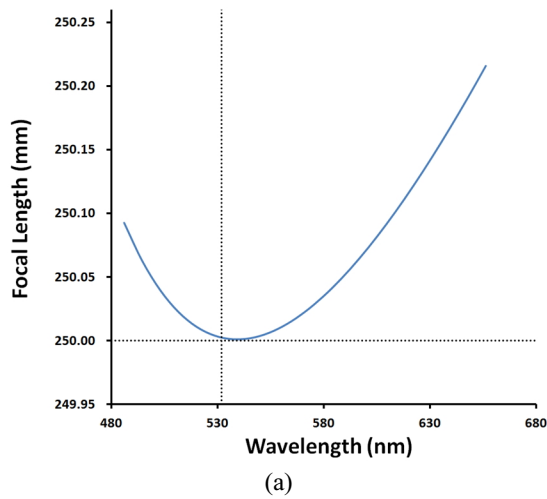


FIG. 2. Variations of EFL and BFL of the thin lens design. (a) Variation against wavelength change, (b) Variation against temperature change.

TABLE 3. Thin lens design of the laser scanning system

Lens	refractive power $K(\text{mm}^{-1})$	distance $D(\text{mm})$	n_{532}	V^*	γ^*
(stop)	-	234.597	-	-	-
L1	-0.00497	7.052	1.6477	-5.0693	-2.0853E-06
L2	0.00867	258.808	1.5168	-9.7436	-1.6879E-06

$EFL = 250 \text{ mm}, BFL = 259 \text{ mm}, \lambda_0 = 532 \text{ nm}, T_0 = 20^\circ\text{C}$

TABLE 4. Initial design of the laser scanning system before optimization

Surface #	curvature radius (mm)	thickness (mm)	n_{532}	Remark (glass)	γ^*
(stop)	-	215.444			
1	-239.3479	6.500	1.6477	NSF2	-2.0853E-06
2	246.2821	7.052			
3	113.1141	18.000	1.5168	NBK7	-1.6879E-06
4	-119.2470	263.948			

$EFL = 250 \text{ mm}, BFL = 264 \text{ mm}, \lambda_0 = 532 \text{ nm}, T_0 = 20^\circ\text{C}$

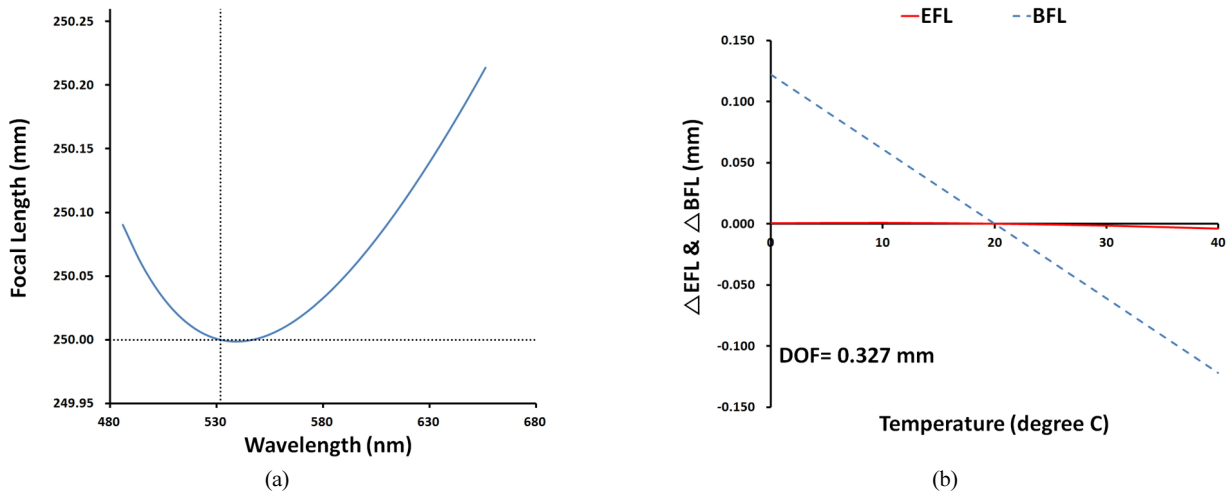


FIG. 3. Variations of EFL and BFL the initial design before optimization. (a) Variation against wavelength change, (b) Variation against temperature change.

TABLE 5. Final design of the laser scanning system

(a) Design data

Surface #	curvature radius (mm)	thickness (mm)	n_{532}	Remark (glass)	γ^*
(stop)	-	220.092	-		
1	-70.4218	6.500	1.6477	NSF2	-2.0853E-06
2	-175.0817	0.100	-		
3	312.7226	15.000	1.5168	NBK7	-1.6879E-06
4	-72.4903	268.373	-		

EFL = 250 mm, BFL = 269 mm, $\lambda_0 = 532$ nm, $T_0 = 20^\circ\text{C}$

(b) Aspheric surfaces

surface #	r (mm)	(conic 상수)	4th order coefficient (A)	6th order coefficient (B)
3	312.7226	0.000	-1.703e-07	1.626e-07
4	-72.4903	0.000	-2.374e-12	8.025e-12

이 그림에서 광학계의 구성이 간단하고 등가렌즈 변환이 적용되었기에 기초설계의 특성이 거의 그대로 유지됨을 볼 수 있다.

3.2. 최적화와 최종설계의 평가

앞에서 얻어진 2군 2매 구성의 주사광학계 초기설계는 근축 물리량과 파장과 온도 변화에 대한 설계의 요구를 만족시키고 있다. 하지만 광학수차가 보정되지 않았고 f-theta 렌즈에서 요구되는 등속주사성이 고려되지 않았으므로 최적화를 통하여 수차를 보정하고 등속주사성을 확보하였다.

이 광학계를 구면만으로 설계한다면 4개의 곡률변수와 4개의 거리변수가 있다. 이 중에서 렌즈의 중심 두께는 수차 보정 보다는 제작에 적절한 수준으로 부여하여야 하고, 조리개의 위치는 상측 telecentric 조건을 만족시키기 위하여 물체 측 초점에 위치하여야 하므로 실제 유효한 변수는 5개 정도

가 된다. 또한 최적화 과정에서 광학계 전체의 굴절능, 각 단 렌즈의 굴절능, 렌즈군간의 거리가 기초설계와 동일하게 유지되어야 하므로 구면 렌즈로는 수차 보정과 등속주사성의 확보가 불가능하다.

위와 같은 사유로 인하여 두 번째 렌즈의 앞면과 뒷면을 비구면으로 설계하였으며, 이것은 2개소에 비구면을 적용하였을 때 이 경우에서 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었기 때문이다. 최적화를 통하여 최종적으로 설계된 레이저 주사광학계의 제원과 형상은 각각 Table 5와 Fig. 4에 나타나 있다.

Figure 5는 최종 설계된 레이저 주사광학계의 파장 변화와 온도 변화에 대한 EFL과 BFL의 변화를 보여주고 있다. 최종설계에서 파장에 따른 EFL의 변화를 분석한 결과 파장 532 nm 부근에서 EFL의 변화율이 0이 되었으며(Fig. 5(a)), $0^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ 범위에서 온도 변화에 따른 EFL의 변화는 ± 0.011 mm 이하(0.005% 이하), BFL의 변화는 ± 0.015 mm 이내로

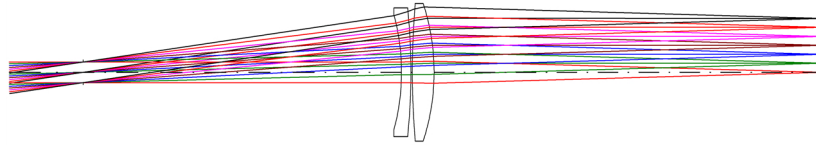


FIG. 4. Optical layout of the final design of laser scanning system.

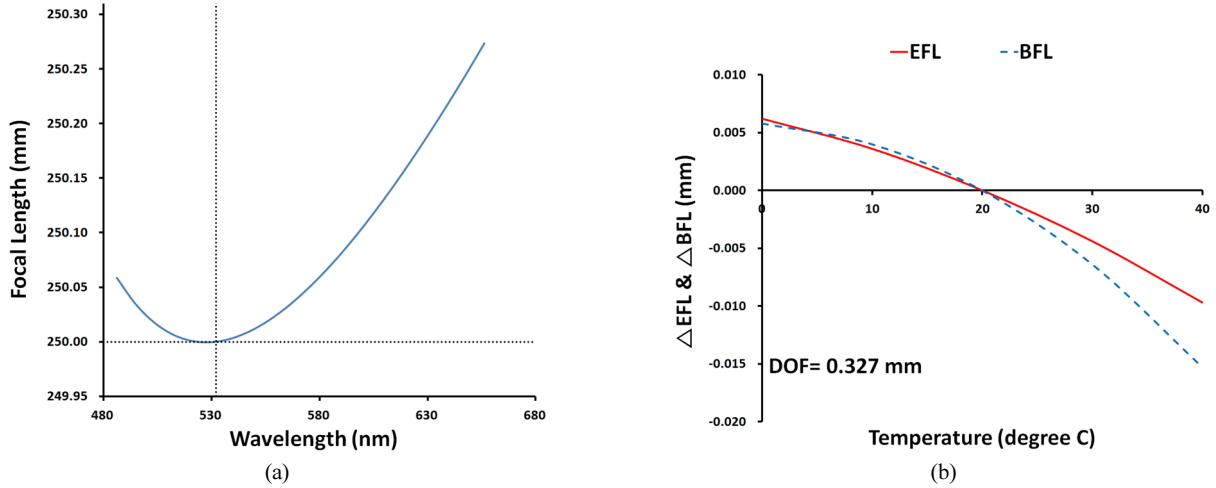


FIG. 5. Variations of EFL and BFL the final design of laser scanning system. (a) Variation against wavelength change, (b) Variation against temperature change.

TABLE 6. Imaging performance of the final design of laser scanning system

Relative field	scan angle (degree)	wavefront error (rms, λ)	spot size (rms, μm)	error of linearity (%)
0.00	0.00	0.0074	0.487	-0.0004
0.17	1.00	0.0081	0.605	-0.0004
0.33	2.00	0.0122	1.586	-0.0003
0.50	3.00	0.0213	3.416	0.0007
0.67	4.00	0.0339	5.770	0.0019
0.83	5.00	0.0461	8.123	0.0012
1.00	6.00	0.0517	10.398	-0.0167

매우 변화가 적음을 알 수 있다. 파장 532 nm에서 f-25 광학계의 이론적 초점심도는 +/- 0.327 mm이며, 현 설계의 BFL 변화는 초점심도의 4.6% 수준에 불과하다.

Table 6은 최종설계된 레이저 주사광학계의 결상 특성을 보여주고 있다. 전체 주사 구간에서 rms wavefront error는 0.0517 λ 이하, rms spot diameter는 10.398 μm 이하이며, 회절한계(rms wavefront error 0.07 λ , rms spot diameter 32.5 μm)보다 작게 잘 보정되어 있다. 등속주사성(f-theta linearity)에 대한 오차는 0.018%이며, 이것 또한 매우 우수하다.

IV. 결 론

광학계의 특성은 파장과 온도에 따라 변화한다. 이 연구에

서는 얇은 렌즈근사를 이용하여 특정한 기준파장과 기준온도에서 파장과 온도 변화에 안정한 광학계를 설계하는 방법에 대하여 연구하고, 이를 이용하여 2군 2매 구성의 레이저 주사광학계를 설계하였다.

파장의 변화에 대한 안정화는 얇은 렌즈 근사를 적용하여 기준파장에서 파장에 대한 굴절능의 변화가 0이 되도록 하였다. 이는 특정한 파장대역에서 굴절능의 변화를 최소화하는 몰색화와는 설계의 취지가 다르며, 같은 유리를 사용하여 d-선(587.6 nm)에 대하여 안정화시킨 광학계와 F-선(486.1 nm)과 C-선(656.3 nm)에 대하여 몰색화한 광학계는 기본적인 굴절능 배치가 다를 수 있음을 확인할 수 있었다. 온도 변화에 대한 안정화는 파장의 변화와 마찬가지로 얇은 렌즈로 근사된 광학계에서 온도에 대한 굴절능의 변화가 0이 되도록 하였다.

얇은 렌즈로 구성되고 렌즈간의 간격이 0인 2매 구성 렌즈계에서는 설계의 자유도가 부족하여 파장과 온도 변화 모두에 대한 안정화를 할 수 없으므로, 이 연구에서는 렌즈 근간의 간격이 D 인 2군 광학계에서 파장과 온도변화에 모두 안정화 시키는 방법에 대하여 연구하고, 이를 이용하여 2군 2매 구성의 레이저 주사광학계를 설계하였다. 최종 설계된 주사광학계는 당초 의도한 파장과 온도 변화에 대한 안정화 조건이 잘 유지되고 있었으며, 2면의 비구면을 사용하여 EFL 250 mm, f-25, 주사거리 52.36 mm 이고 회절한계의 결상 성능을 가지도록 설계되었다.

이 연구의 안정화 조건은 얇은 렌즈 근사가 사용되어 설계의 예와 같이 단순한 구성의 광학계에는 매우 유용할 것으로 본다. 하지만 여러 매의 렌즈로 구성되는 복합 광학계에서는 기초 설계의 특성을 최종설계까지 유지시키는 것에 상당한 어려움이 따를 것으로 예상되므로 이 부분은 향후 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도 청주대학교 연구장학의 지원에 의해 연구되었습니다.

References

1. Mouroulis and J. Macdonald, "Geometrical optics and optical design," Oxford University Press (1997).
2. H. Kang, "Chromatic Aberration Correction Method by Considering Local Properties of the Image," Korean J. IEIE.

- 50, no. 9, 119-126 (2013).
3. Y. J. Kim, Y. S. Kim, and S. C. Park, "Simple graphical selection of optical materials for an athermal and achromatic design using equivalent abbe number and thermal glass constant," J. Opt. Soc. Korea **19**, 182-187 (2015).
4. H. Jamieson, "Thermal effects in optical systems," Opt. Eng. **20**, 156-160 (1981).
5. P. J. Rogers, "Athermalized FLIR optics," Proc SPIE **1354**, 742-751 (1990).
6. G. Kurbitz, "Automatic active athermalization of infrared optical systems," Proc. SPIE **1540**, 612-621 (1991).
7. Y. Tamagawa, S. Wakabayashi, T. Tajime, and T. Hashimoto, "Multilens system design with an athermal chart," Appl. Opt. **33**, 8009-8013 (1994).
8. K. Schwertz, D. Dillon, and S. Sparrold, "Graphically selecting optical components and housing material for color correction and passive athermalization," Proc. SPIE **8486**, 84860E (2012).
9. Schott, "Optical glass catalogue excel," (Schott Inc., Germany, June, 2012).
10. Schott, "TIE-19: Temperature coefficient of the refractive index," in Proc. Schott Technical Information (Schott Inc., Germany, July 2008).
11. J. U. Lee, "A study for an analytic conversion between equivalent lenses," Korean J. Opt. Photon (Hankook Kwanghak Hoeji) **23**, 17-22 (2012).
12. J. U. Lee and K. S. Kim, "Generalization of equivalent lens conversion and third order aberration formulae of the generalized equivalent lens system," Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji) **7**, 305-313 (1996).