

폰 카메라용 초소형 광학계의 온도보정 설계

박성찬[†] · 유병택

단국대학교 전자물리학과

Ⓞ 330-714 충청남도 천안시 동남구 안서동 산 29번지

이종웅

청주대학교 레이저광정보공학과

Ⓞ 360-764 충청북도 청주시 상당구 대성로 586

(2009년 4월 6일 받음, 2009년 5월 19일 수정본 받음, 2009년 5월 25일 게재 확정)

본 연구에서는 광학계의 굴절률, 중심두께 및 곡률반경에 대한 설계변수가 온도변화에 따라 1차 특성 및 결상성능에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고, 이로부터 온도보정 설계를 실시하였다. 광학설계 변수들을 각각의 사용온도에 해당되는 값으로 변경한 후, 기존의 coupling 및 ruler 설계 개념을 폰 카메라용 렌즈설계에 적용하여 온도보정을 고려한 설계방법을 제시하였다.

본 연구에서 제시한 온도보정 설계개념을 4매 구성의 1/3.2" 5M 렌즈계에 최초로 적용하여 최적 설계한 결과, 폰 카메라용 렌즈에 대한 일반사양을 만족시키는 동시에 사용온도 -10℃ ~ +60℃에서의 후초점거리 변화량에 대한 요구사항($\Delta BFL \leq 10 \mu m$)도 만족시켰다. 또한 최적 설계된 렌즈계의 전장(TTL)은 5.5 mm로 매우 컴팩트한 구성이다. 따라서 본 연구의 결과는 휴대폰 카메라 및 감시 카메라용 광학계 개발에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

주제어: Athermalized optical design, Zoom lens, Phone camera, Optimization, Aberrations

I. 서 론

많은 광학계들은 여러 가지의 모호한 환경 조건하에서 작동하게 된다. 사용 환경에서 온도변화는 광학 및 기구소자로 구성된 광학계의 특성을 크게 변화시킨다. 결과적으로 광학계의 구성변수와 더불어 결상성능을 변화시킨다. 지난 십 수년간 Perry 등은 IR 광학계에 대해 온도가 광학성능에 미치는 영향을 연구하였다.^[1] 또한 Jamieson, Friedman, Kurbitza, Rogers, Kanagawa, Tamagawa, Tajime 등도 온도변화에 따라 발생하는 문제점에 관한 연구 결과를 발표하였다.^[2-7] 이들 연구에서 광학계를 얇은 렌즈로 간주하여 단순한 접근방법으로 취급하였지만, 온도변화에 따른 광학계의 성능변화를 보상하는 방법에 대해 이론적인 근거를 제시하였다. 추가적으로 Jamieson, Friedman, Volosov 및 Slusarev은 온도변화에 따른 광학계의 수차특성 변화에 관하여 연구하였다.^[8-9]

일반적으로 광학계에 대해 온도 보정하는 방법은 크게 3가지로 나눌 수 있다.^[10]

- ① 기구적인 수동 시스템 : 렌즈소자들을 직접적으로 이동시켜서 온도변화에 의한 광학특성 변화를 보상해 준다. 또한 렌즈를 캡이나 손잡이 등을 이용하여 간접적으로 움직여서 보상하는 경우도 포함이 된다.

- ② 기구적 또는 전자적인 능동 시스템 : 온도센서, 포커싱 센서, 전자모터 및 회로를 이용하여 온도보정 소자의 위치를 반복적으로 조정하여 온도에 따른 광학특성 변화를 보정하는 방법이다.
- ③ 광학적인 수동 시스템 : 광학계를 구성하는 재질들의 온도에 대한 특성 차이를 이용하여 보상한다. 광학계에서 온도변화에 의한 포커싱 변화를 보상할 수 있는 광학재질들을 적절하게 선택하고 조합하여 제거할 수 있다. 또한 회절광학소자의 기본적인 특성을 이용하여 온도 변화에 따른 굴절광학소자의 광학특성 변화를 보정할 수 있다.

본 연구에서는 주변의 온도 변화에 의해 발생하는 초점거리 및 광학성능의 변화에 대해 이를 보정할 수 있는 광학계 설계 방법에 대해 논의하고자 한다. 많은 상업분야와 우주항공분야 제품들에서 온도 변화는 광학계에 환경적인 영향을 주는 중요한 요소들 중 하나이다. 주변 온도 변화가 폰 카메라용 광학계에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고, 더 나가서 기존의 coupling 및 ruler 설계 방법에 좀 개념을 도입하여 폰 카메라용 렌즈설계에 최초로 적용함으로써 온도보정을 고려한 설계방법을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 광학계 내의 국소적인 온도변화는 무시하고 광학계 내부 및 외부에서 온도변화가 균일한 것으로 가정했다.

[†]E-mail: scpark@dankook.ac.kr

II. 온도보정을 위한 컴퓨터 모델링

본 연구에서 온도보정을 위한 기본적인 설계 방법으로 광학계의 다중배치 구성을 표현하는 줌 개념을 이용하고자 한다. 줌 개념은 광학계를 멀티구성으로 설정하여 모든 줌 위치에서 성능을 최적화하고 정의할 수 있게 해준다.^[11] 따라서 본 설계개념을 일반적인 줌 광학계와의 관계로 비교 설명할 수 있다. 고전적인 줌 광학계는 일부의 소자들이 고정되어 있는 상태에서 다른 소자들을 이동시켜 연속적으로 다른 배율을 얻을 수 있도록 해준다. 각각의 온도에 따라 줌 위치를 갖는 멀티 구성으로 광학계를 설정하는 이러한 설계 개념은 폰 카메라용 광학계의 온도보정 설계에 확장적용이 가능하다. 즉, 온도보정 조건을 만족하도록 구속한 상태에서 각각의 줌 위치(또는 온도변화)에서 요구 성능을 만족하도록 광학계를 최적화 설계함으로써 가능하다.

예를 들면 다음과 같이 설정할 수 있다. 실온도인 $T=25^{\circ}\text{C}$ 를 기준치로 잡고, 이를 줌 위치 2로 지정하여 광학계의 곡률반경(R), 중심두께(t), 굴절률(n) 및 비구면의 sag 값(Z) 등의 설계 변수들을 입력한다. 주변의 온도변화는 소자의 굴절률, 곡률반경, 중심두께 및 공기간격 등을 변화시킨다. 1차 근사에서 모든 선형치수들은 $(1+\alpha\Delta T)$ 에 준하여 변화된다. 여기서, α 는 각각의 재질이 갖고 있는 고유의 선팽창계수이고, dn/dT 는 온도에 대한 굴절률 변화를 나타낸다. 그림 1은 원추계수가 $k=0$ 인 비구면에 온도변화에 따른 렌즈면의 선형변화를 $(1+\alpha T)$ 을 이용하여 스케일링하는 것을 보여준다. 양 끝단의 온도에 대해서는 다른 줌 위치 1, 3으로 각각 설정한다. 각각의 줌 위치에 해당되는 온도에 대한 굴절률의 정보를 Code-V의 가상유리(fictitious glasses)를 이용하여 입력한다. 줌 광학계를 최적화하기 전에 모든 설계변수들에 대해 다음의 식으로 스케일링 한다.^[12]

$$\begin{aligned} \text{곡률반경 변화} & : R' = R(1+\alpha\Delta T) & (1) \\ \text{굴절률 변화} & : n' = n + dn/dT\Delta T & (2) \\ \text{중심두께 변화} & : t' = t(1+\alpha\Delta T) & (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{비구면계수 변화} : A' &= \frac{A}{(1+\alpha\Delta T)^3}, B' = \frac{B}{(1+\alpha\Delta T)^5}, \\ C' &= \frac{C}{(1+\alpha\Delta T)^7}, D' = \frac{D}{(1+\alpha\Delta T)^9} \end{aligned} \quad (4)$$

위 식(4)에서 언급된 비구면 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$Z = \frac{h^2/R}{1 + \sqrt{1 - (1+k)h^2/R^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + \dots,$$

단, $h^2 = x^2 + y^2$.

온도 변화에 대한 설계변수들의 변화량은 설계변수들에 $(1+\alpha\Delta T)$ 을 스케일링함으로써 얻을 수 있다.

본 절에서는 컴퓨터를 이용하여 온도보정을 고려한 설계 방법들에 대해 논의하고자 한다. 이 방법들을 명확하게 설명하기 위해서 특정 광학설계 S/W인 Code-V를 이용하였지만, 그 원리를 일반화하여 다른 광학설계 S/W에서도 실행할 수 있다.

2.1. Coupling 방법

Coupling 방법이란 온도 및 줌 위치에 대한 변수들을 상호 관계 함수로 규정하고 온도변화에 따른 변수들의 변화량을 일정한 비율로 제어하여 변화시키는 방법을 말한다. 그림 2는 커플링 방법을 이용하여 초점거리에 대해 온도보정 설계된 얇은 단 렌즈(F/1.4)의 구성도이다. 표 1은 최적화과정에서 만족시켜야 할 제한조건들을 목록으로 보여주고 있다. 그림 2와 표 1에서 주어진 singlet 렌즈의 재질은 플라스틱 계열인 E48R이고, 표 2에 재질의 물성특성을 표기하였다. 곡률반경에 대한 선형변화를 규정하는 제한조건을 @a ~ @d로 정의하였으며, 예를 들어 @a와 @b의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (rdy\ s1\ z1)/(rdy\ s1\ z2) &= (1+\alpha\Delta T) = 0.997795 & (5) \\ &= (\text{줌 위치 1에서 1면의 곡률반경}) / \\ &(\text{줌 위치 2에서 1면의 곡률반경})\text{이고,} \end{aligned}$$

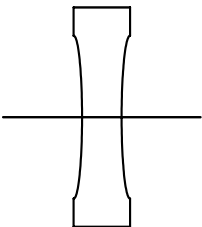
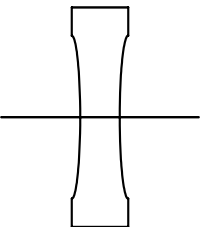
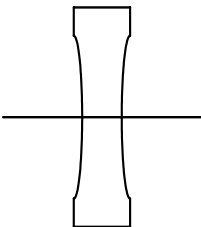
ZOOM_1 ($T=-10^{\circ}\text{C}$)	ZOOM_2 ($T=25^{\circ}\text{C}$)	ZOOM_3 ($T=60^{\circ}\text{C}$)
		
R'_1, R'_2, n', t', Z'_1	R_1, R_2, n, t, Z_1	$R''_1, R''_2, n'', t'', Z''_1$

그림 1. Singlet 렌즈의 온도보정을 위한 줌 모델링.

$$\begin{aligned} (rdy\ s1\ z3)/(rdy\ s1\ z2) &= (1 + \alpha\Delta T) = 1.002205 & (6) \\ &= (\text{줌 위치 3에서 1면의 곡률반경}) / \\ &(\text{줌 위치 2에서 1면의 곡률반경}) \end{aligned}$$

이므로, 이들에 대한 제한조건은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$@a \equiv (rdy\ s1\ z1)/(rdy\ s1\ z2) - 0.997795 \quad (7)$$

$$@b \equiv (rdy\ s1\ z3)/(rdy\ s1\ z2) - 1.002205 \quad (8)$$

따라서 위 식(7)~(8)로 주어진 제한조건들이 @a=0, @b=0을 만족하도록 설정하여, 온도변화에 대한 곡률반경의 선형변화를 규정한다. 온도가 감소할 때 곡률반경은 작아지고, 증가할 때 팽창한다. 몇 사이클 최적화하는 동안 곡률반경은 변화하지만 (1+αΔT)에 의해 지정된 비율은 항상 유지된다. 이런 방법으로 임의의 렌즈 면에 대한 온도의 영향을 적절히 설정할 수 있다.

표 1에서 명령어 efl z2 = 50은 사용온도 T=25°C(줌 위치 2)에서의 초점거리(efl)를 50 mm로 설정한다. 명령어 @efl_z12와 @efl_z32는 T=-10°C(줌 위치 1) 및 T=60°C(줌 위치 3)에서 즉, 양 끝단 온도에서 만족해야 할 초점거리 변화 값이고, 이 값은 렌즈의 초점심도(δ) 이내이어야 한다. 구경비가 F/1.4인 렌즈의 최소 초점심도는 δ = ±0.002 mm이므로 양 끝단 온도에서 만족해야 할 초점거리 변화 값이 초점심도인 ±0.002 mm보다 작도록 설계하여 초점거리에 대한 온도보정을 수행하는 제한조건이다.

제한조건 @q~@r는 구면수차를 제어하는 설계 변수인 4차 비구면 계수에 대한 선형변화를 규정한다. 예를 들어, q=(a s1 z2)/(a s1 z1) = (1+αΔT)³ = 0.9933996이고, 이는 (줌 위치 2에서 1면의 4차 비구면 계수) / (줌 위치 1에서 1면의 4차 비구면 계수)에 해당되며, 또한 r=(a s1 z2)/(a s1 z3) = (1+αΔT)³ = 1.0066296은 (줌 위치 2에서 1면의 4차 비구면 계수) / (줌 위치 3에서 1면의 4차 비구면 계수)이다. 따라서 이들에 대한 제한 조건은 다음과 같다.

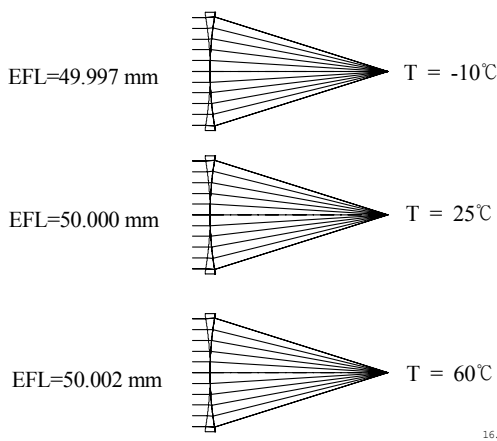


그림 2. 커플링 방법으로 온도 보정 설계된 얇은 singlet 렌즈의 구성도.

표 1. 온도변화에 따른 선형변화 (1+αΔT)를 적용한 설계변수에 대한 제한조건

초점거리 변화에 대한 제한조건	efl z2 = 50 @efl_z12 = ((efl z1)-(efl z2)) @efl_z12 > -0.002 < 0.002 @efl_z32 = ((efl z3)-(efl z2)) @efl_z32 > -0.002 < 0.002
곡률반경 변화에 대한 제한조건	@a = ((rdy s1 z1) / (rdy s1 z2)) - 0.997795 @a = 0 @b = ((rdy s1 z3) / (rdy s1 z2)) - 1.002205 @b = 0 @c = ((rdy s2 z1) / (rdy s2 z2)) - 0.997795 @c = 0 @d = ((rdy s2 z3) / (rdy s2 z2)) - 1.002205 @d = 0
비구면 계수 변화에 대한 제한조건	@q = ((a s1 z2) / (a s1 z1)) - 0.9933996 @q = 0 @r = ((a s1 z2) / (a s1 z3)) - 1.0066296 @r = 0

$$@q \equiv (a\ s1\ z2)/(a\ s1\ z1) - 0.9933996 \quad (9)$$

$$@r \equiv (a\ s1\ z2)/(a\ s1\ z3) - 1.0066296 \quad (10)$$

$$@q = 0$$

$$@r = 0$$

변수들의 개수는 적어도 제한조건과 같은 수를 가져야 하며, 특정 제한조건들을 효과적으로 만족시킬 수 있는 변수들을 가지고 있는 것이 중요하다. 어떤 광학계가 표 1의 제한조건들을 만족함에도 불구하고, 목표사양을 만족하는 해를 찾는 것은 쉬운 일이 아니다. 위에서 설명된 커플링 방법은 느리고 강제적인 측면이 있다.

2.2. Ruler 방법

커플링 방법을 이용하여 설계하는 경우, 각각의 온도에서 모든 설계변수들이 만족시켜야 할 제한조건들이 많고, 또한 설계과정이 복잡함에 따라 수치적인 부정확성을 종종 발생시킨다. 이러한 단점은 ruler 방법을 이용하여 보완할 수 있다. Ruler 방법은 온도변화에 대한 선형변화를 설계변수 값에 단순히 스케일링하여 계산한 값을 각각의 줌 위치에 입력하여 온도보정을 위한 줌 광학계를 설정한다. 이런 접근 방법이 사용온도 범위에서 수차 및 초점거리 계산에 작은 에러를 발생시킬지라도 그 값이 상당히 작기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 이 방법의 장점은 줌 설정할 변수와 제한조건의 개수를 최소화 할 수 있다는 것이다.

Ruler 방법은 세 가지 단계의 과정으로 처리된다. 첫 번째 단계에서, 기준온도인 T=25°C에서 얇은 단 렌즈의 제한조건인 EFL에 대해 온도보정을 만족하도록 수학적 해를 입력한다. 커플링 방법과 마찬가지로 줌 위치를 3개로 구성하고 각각 온도에 해당되는 굴절률 값을 Code-V의 가상유리 기능을 이용하여 데이터를 입력한다. 두 번째 단계에서는,

줌 설정된 가상의 유리를 이용하여 광학계를 최적화 설계를 하고 경우에 따라 곡률과 두께변수들에 대해 줌을 설정하지 않아도 된다. 최적화 과정을 통해 얻어진 광학계는 줌으로 설정된 온도에 대한 변화량을 갖고 있는 렌즈이다. 앞 단계에서 얻은 렌즈의 곡률반경, 중심두께 및 공기간격은 각각의 사용온도 (-10°C, -25°C, 60°C)에 대한 선형변화를 부여하지 않았기 때문에 마지막 단계에서는, 렌즈의 물리적인 변수를 $(1 + \alpha \Delta T)$ 으로 스케일링하여 온도 보정된 광학계에 대한 해를 얻을 수 있다.

두 방법은 상호 보완적이다. Coupling 방법으로 설계할 경우 제한조건의 개수가 많아 최적화과정에서 원하는 해를 찾지 못하고, 반복루프에서 이탈하는 경우가 종종 발생한다. 이런 경우 ruler 방법을 이용하여, 사용온도에 대해 민감한 영향을 받는 변수들에 대한 제한조건만을 설정하고, 이들을 제외한 나머지 변수들을 자유변수로 설정함으로써 제한조건 개수를 최소화하여 최적화과정을 효과적으로 진행할 수 있다.

III. 온도변화에 따른 굴절률, 곡률반경, 중심두께 변화를 고려한 폰 카메라용 광학계 설계

3.1. 목표사양 및 초기설계

본 연구에서는 휴대폰용 카메라모듈 제조공정 및 사용환경

에서 흔히 발생하는 온도변화에 따른 카메라모듈의 문제점을 논하고 해결방법을 찾고자 한다. 카메라모듈 부품들 중에서 렌즈 및 기구부품이 온도변화에 대해 가장 민감하다. 왜냐하면 대부분의 렌즈 및 기구부품들은 플라스틱 재질로 만들어져 있어 온도변화에 대해 물성특성이 크게 변하여 렌즈의 광학적인 특성을 변화시킨다. 또한 폰 카메라에서 많이 사용하는 Piezo 및 VCM 방식의 자동초점조절기능은 소비전력을 최소화하기 위해서 초기 설정 값을 기구적인 부품으로 고정하고 있다. 따라서 사용온도에 따라 렌즈의 1차 특성이 변하고, 그 변화된 값은 초기 값과 다르기 때문에 초점위치 및 광학성능이 변하게 된다. 그러므로 고화소가 될수록 렌즈의 온도보정 설계가 더욱더 필요하다.

표 2는 폰 카메라용 광학재질의 물성특성을 보여주고 있다. 온도에 대해 플라스틱 재질의 굴절률 변화(dn/dT)는 유리 재질보다 약 20~50배 크고, 선팽창계수(dl/dT)는 유리 재질보다 약 10배 정도 크를 알 수 있다. 표 3은 광기구 부품용 재질의 물성표 및 온도에 따른 간격변화를 정리한 것이다. 본 재질로 홀더(holder) 및 간격링(spacer) 부품을 제작시 사용온도 범위인 -10°C ~ +60°C에서 수축팽창하는 최대 변화량은 $\pm 2.0 \mu\text{m}$ 이다. 즉, FBL(Flange Back Length)을 확보하기 위해 홀더를 사용하는데 폰 카메라용 렌즈에서 홀더의 길이가 최대 1.5 mm 넘는 경우가 거의 없다. 따라서 온도변화에 따른 홀더의 길이 변화량(ΔFBL)은 최대 $\pm 2.0 \mu\text{m}$ 으로서, 이는

표 2. 폰 카메라용 광학재질의 물성표(굴절률, 분산상수, dn/dT , dl/dT)

구분 재질명	굴절률(n_d)					분산상수 (ν_d)	$\frac{dn}{dT} \times 10^{-6}$	$\frac{dl}{dT} \times 10^{-6}$
	-10°C	0°C	25°C	45°C	60°C			
광학용 유리 소재								
L-BAL35	1.58884	1.58889	1.58900	1.58909	1.58916	61.2	4.6	6.6
L-BAL42	1.58288	1.58292	1.58300	1.58307	1.58312	59.4	3.3	7.2
D263T	1.52292	1.52295	1.52300	1.52304	1.52308	54.5	2.2	7.2
광학용 플라스틱 소재								
E48R	1.53460	1.53360	1.53110	1.52910	1.52760	55.7	-100	63
SP1516	1.61770	1.61670	1.61420	1.61220	1.61070	26.0	-100	70

표 3. 광기구 부품용 재질의 물성과 온도에 따른 간격변화(ΔFBL , ΔTHI , 단위: mm)

부품명: Holder		재질: PA6T				선팽창 계수: $\alpha = 40 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$	
온도	-10°C	0°C	25°C	45°C	60°C		
FBL	1.4979	1.4985	1.5000	1.5012	1.5021		
ΔFBL	-0.0021	-0.0015	0.0000	0.0012	0.0021		
부품명: Spacer		재질: PC				선팽창계수: $\alpha = 19 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$	
온도	-10°C	0°C	25°C	45°C	60°C		
THI	0.4997	0.4998	0.5000	0.5002	0.5003		
ΔTHI	-0.0003	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003		

공차보다 작아 광학특성에 미치는 영향은 매우 미미하다. 또한 간격링의 두께는 대부분이 0.5 mm 이하이고, 이로 인한 공기간격 변화(ΔTHI)도 $\pm 0.3 \mu m$ 이내로 매우 작아 무시할 수 있다.

본 연구에서는 온도보정을 고려하지 않고 설계된 광학계에 대해 온도에 따른 굴절률, 곡률반경, 중심두께 변화가 광학계의 성능에 미치는 영향을 분석한 후, 그 광학계를 온도보정 설계를 위한 초기설계 렌즈제원 및 목표 사양으로 설정하였다. 홀더 및 간격링과 같은 광기구적인 부품과 관계가 있는 공기간격의 변화는 허용공차 이내로 매우 작으므로 이들에 대한 온도보정은 여기서 다루지 않았다. 제 2절에서 자세히 언급한 컴퓨터 모델링 개념을 이용하여 렌즈설계를 진행하고 광학성능을 분석하고자 한다.

그림 3의 초기설계 광학계에서 조리개를 기준으로 물체측 근의 초점거리는 +3.1045 mm, 상측 근의 초점거리는 -7.4117 mm인 tele-photo형 광학계의 특징을 갖고 있으며, 각 렌즈군의 초점거리는 $f_1 = +3.1045 \text{ mm}$, $f_2 = -4.7678 \text{ mm}$, $f_3 = +3.0034 \text{ mm}$ 및 $f_4 = -3.3915 \text{ mm}$ 이다. 그림 4는 초기설계 렌즈의 사용 온도 -10°C, +25°C 및 +60°C에서 MTF 대 defocus 특성을 나타낸다. 사용온도 범위 내에서 후초점거리 변화량(ΔBFL)은 최대 $\pm 0.0162 \text{ mm}$ 로서 폰 카메라용 광학계에서 허용 가능한 초점심도 범위($\pm 0.01 \text{ mm}$)를 벗어난다. 따라서 카메라 모듈에서 영상을 본다면, 초점이 벗어난 것을 확인할 수 있을 것이다. 표 4는 초기설계 렌즈의 온도변화에 따른 1차 특성 변화량이고, 표 4에서 알 수 있듯이 광학계의 설계제원 중 굴절률, 중심두께, 곡률반경 순으로 온도에 민감하다.

폰 카메라용 렌즈는 사용온도 +25°C에서 제한조건 및 성능을 만족시키는 동시에 사용온도 전체 영역에 대해 주어진 공간주파수에서 MTF가 30% 이상, 초점심도는 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 이내를 만족해야 한다. 사용온도 -10°C ~ +60°C 범위에서 1/3.2"

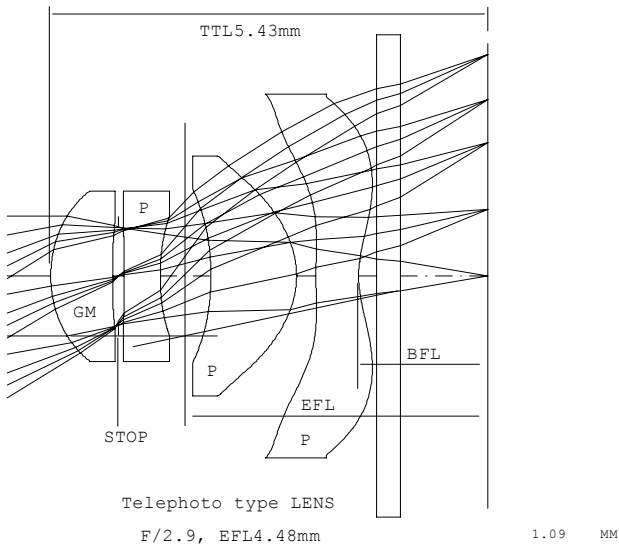
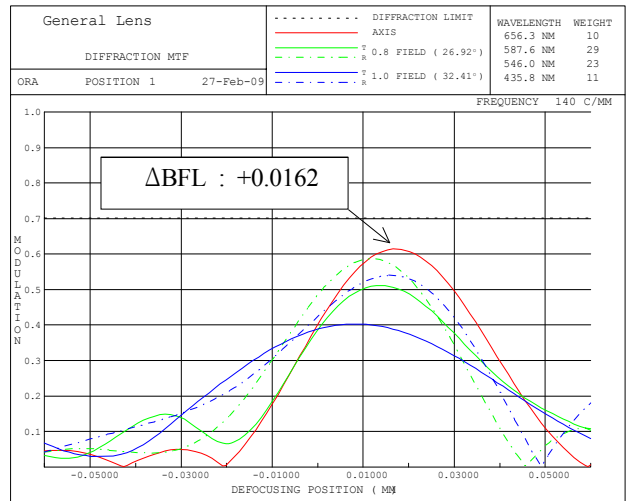
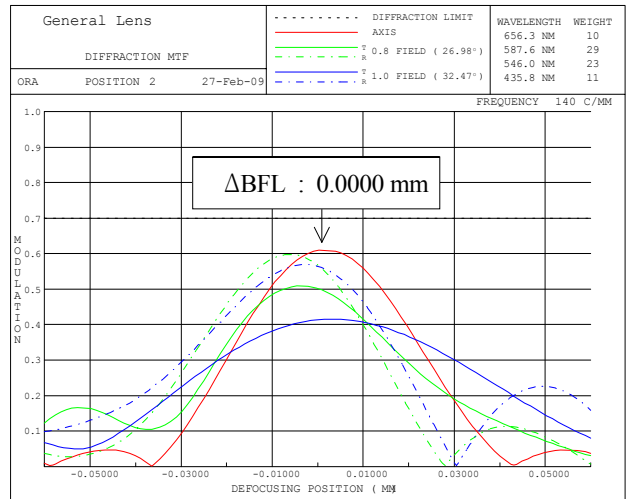


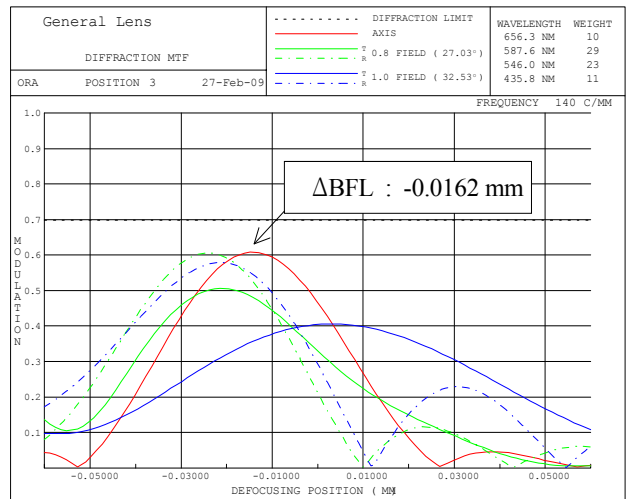
그림 3. 온도보정을 고려하지 않은 초기설계 렌즈의 구성도 (GM: glass mold, P: plastic lens).



(a) 온도 -10°C에서 MTF 특성



(b) 온도 +25°C에서 MTF 특성



(c) 온도 +60°C에서 MTF 특성

그림 4. 초기설계 렌즈의 사용온도에 따른 MTF 대 defocus 특성.

표 4. 초기설계 렌즈의 온도변화에 따른 1차 특성 변화량 (ΔEFL , ΔBFL , 단위: mm)

사용온도		-10°C	+25°C	+60°C
굴절률변화 ($\frac{dn}{dT}$)에 의한 EFL, BFL 변화	EFL	4.4862	4.4790	4.4718
	ΔEFL	+0.0072	0.0000	-0.0072
	BFL	1.6027	1.5920	1.5813
ΔBFL		+0.0107	0.0000	-0.0107
중심두께변화 ($\frac{dt}{dT}$)에 의한 EFL, BFL 변화	EFL	4.4811	4.4790	4.4770
	ΔEFL	+0.0021	0.0000	-0.0020
	BFL	1.6026	1.5990	1.5954
ΔBFL		+0.0036	0.0000	-0.0036
곡률반경변화 ($\frac{dR}{dT}$)에 의한 EFL, BFL 변화	EFL	4.4804	4.4790	4.4777
	ΔEFL	+0.0014	0.0000	-0.0013
	BFL	1.6009	1.5990	1.5971
ΔBFL		+0.0019	0.0000	-0.0019
$\frac{dn}{dT}, \frac{dt}{dT}, \frac{dR}{dT}$ 에 의한 EFL, BFL 변화	EFL	4.4896	4.4790	4.4684
	ΔEFL	+0.0106	0.0000	-0.0106
	BFL	1.6032	1.5870	1.5708
ΔBFL		+0.0162	0.0000	-0.0162

표 5. 1/3.2" 5M 폰 카메라용 렌즈의 목표사양 및 최적설계 사양

항목	목표사양	최적설계 사양
	1/3.2" 5M Image Sensor($\Phi 5.67$ mm)	
최대상크기	$\Phi 5.9$ mm	$\Phi 5.9$ mm
전장(TT)	5.5 mm	5.49 mm
F/수	F/2.8 ~ 3.0	F/2.9
초점거리	4.32 ~ 4.66 mm	4.39 mm
시야각	63 ~ 67 deg.	65.9 deg.
후초점거리	1.3 mm 이상	1.631 mm
렌즈구성	4매(비구면)	1GM+3P
주변광량비	45% 이상	44.1%
TV-왜곡수차	-1.0 ~ +0.5%	-0.70%
MTF	0.0F	40% 이상 @180 lp/mm R : 47.3% T : 47.3%
	0.8F	40% 이상 @160 lp/mm R : 54.7% T : 43.3%
	1.0F	40% 이상 @140 lp/mm R : 52.4% T : 30.9%

5M 폰 카메라용 렌즈의 목표사양을 정리한 것이 표 5의 좌측 열이다.

3.2 수차 및 온도보정 최적설계

온도변화는 설계변수 값을 변화시키므로 이를 공차개념으로 본다면 보다 큰 공차에서도 안정적인 성능을 유지하는 광학계를 설계하는 것과 비슷한 맥락에서 이해할 수 있다. 따라서 온도보정 설계의 초기 단계에서 렌즈의 제조 및 조립공

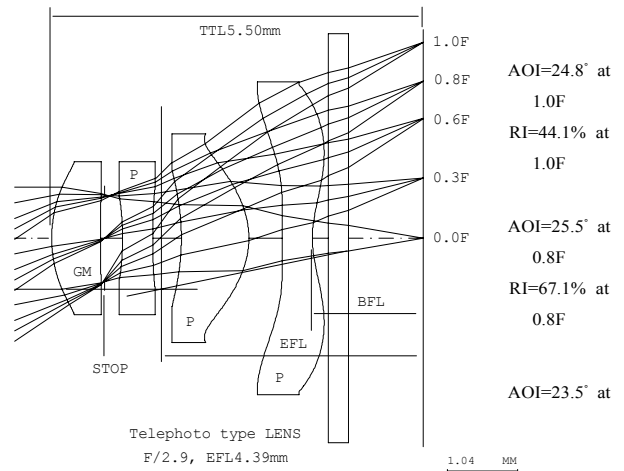


그림 5. 온도보정 설계된 1/3.2" 5M 폰 카메라용 렌즈의 구성도 (AOI : 주광선의 상면 입사각도, RI : 주변광량비).

표 6. 온도보정 설계된 1/3.2" 5M 폰 카메라용 렌즈의 설계제원 (-10°C/25°C/60°C)

면번호	곡률반경(mm)	두께(mm)	광학재질
물체면	평면	무한거리	
1	+1.85193/+1.85236/+1.85279	0.72383/0.72400/0.72417	L-BAL35
2	+23.13308/+23.13842/+23.14376	0.056	
조리개	평면	0.271	
4	-3.90112/-3.91070/-3.92028	0.44890/0.45000/0.45110	SP1516
5	+22.07077/+22.12498/+22.17919	0.422	
6	-3.15036/-3.15732/-3.16428	0.99780/1.00000/1.00221	E48R
7	-1.18018/-1.18279/-1.18540	0.490	
8	+7.20448/+7.22040/+7.23632	0.44901/0.45000/0.45099	E48R
9	+1.42768/+1.43084/+1.43400	0.235	
10	평면	0.300	D263T
11	평면	1.100	
상면	평면	0.005	(defocus)

차를 적절하게 분산시키는 작업이 필요하다. 그리고 이미지 센서에 입사하는 주광선의 입사각도 및 왜곡수차를 작게 하기 위해 네 번째 렌즈에 메니스커스형 비구면을 적용하여 요구사양을 만족하도록 하였다. 또한 온도에 대한 굴절률, 곡률반경 및 중심두께 변화를 최소화 하고 결상성능을 확보할 수 있도록 첫 번째 렌즈에 비구면 유리를 적용하였다. 제 2 절에서 연구한 온도보정설계 방법을 적용하여 온도변화에 따른 광학특성 변화를 최소화하였다. 즉, 커플링 및 ruler 방법을 선택적으로 적용하고 최적화를 진행하여 렌즈의 BFL 및 결상성능 변화에 대한 온도보정 설계를 하였다.

표 5의 우측 열은 위의 과정을 통해 온도보정 설계된 렌즈의 설계사양이다. 렌즈의 구경비 F/2.9이고, 렌즈의 구성은 glass mold(1) + plastics(3) 이다. 그림 5는 온도보정 설계된 1/3.2" 5M 폰 카메라용 렌즈의 구성도이며, 표 6은 렌즈의 설계제원을 나타낸다. 표 6에 주어진 렌즈의 곡률반경 및 중심두께는 사용온도 -10°C ~ +60°C에서 dl/dT 으로 스케일링

한 값과 일치함을 알 수 있다.

3.3 성능 및 온도보정 결과 분석

그림 6은 온도보정 설계된 렌즈의 공간주파수 대비 MTF 특성을 보여준다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 1.0 Field에서 자오광선의 MTF 값이 공간주파수 180 lp/mm에서 20%이지만 이는 센서의 모서리에 해당됨으로 카메라 영상에서 문제가 되지 않는다. 온도보정 설계된 렌즈의 수차 특성을 분석한 결과, 수차는 잘 보정되었으며 특히 왜곡수차는 -1.7% 이내로 보정되었으며, 사람의 시각적인 효과를 나타내는 TV-왜곡수차는 최대 -0.7%으로서 매우 작다. 그림 5에서 보듯이 이미지 센서에 입사하는 주광선의 입사각도(AOI)는 25.5도 이하이고, 주변광량비(RI)는 최소 44.1% 이상이다. 따라서 AOI 및 주변광량비는 요구조건을 모두 만족시킨다. 그림 7은 온도보정 설계된 렌즈의 사용온도에 따른 MTF 대 defocus 특성이다. 사용온도 -10°C ~ +60°C에서 BFL 변화량은 최대 ±0.0094 mm로서 허용공차 이내로 작고, 또한 1.0 Field의 자오광선을 제외하고 공간주파수 140 lp/mm에서 MTF는 50% 이상, 그리고 초점심도 ±0.01 mm를 만족하고 있다. 표 7은 각각의 온도에서 렌즈의 1차 특성을 보여 준다. 따라서 온도보정 설계된 광학계는 표 5에서 언급된 요구조건을 모두 만족시키고 있다. 앞 절에서 언급한 온도보정을 고려하지 않은 설계결과와 비교하면 사용온도 -10°C ~ +60°C에서 BFL 변화량은 ±0.007 mm 정도의 개선 효과를 보였다.

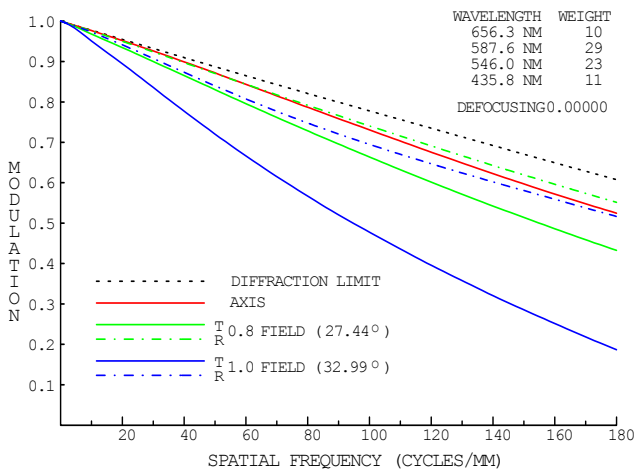
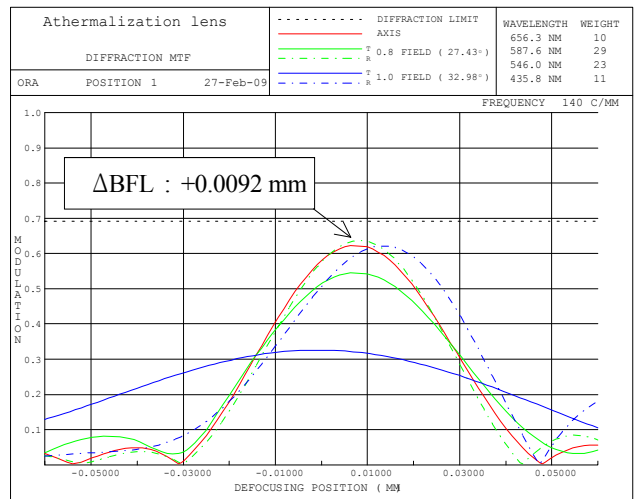


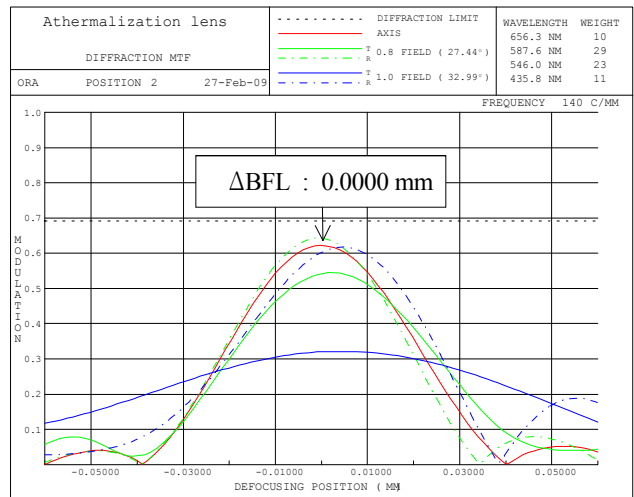
그림 6. 온도보정 설계된 1/3.2" 5M 폰 카메라용 렌즈의 MTF 특성.

표 7. 온도보정 설계된 렌즈의 1차 특성 변화량 (단위: mm)

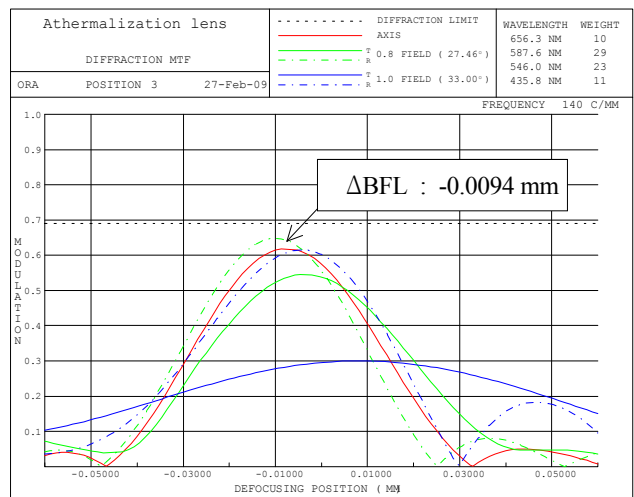
사용온도	-10°C	+25°C	+60°C
EFL	+4.3921	4.3902	+4.3882
ΔEFL	+0.0019	0.0000	-0.0002
BFL	+1.6403	1.6311	+1.6217
ΔBFL	+0.0092	0.0000	-0.0094



(a) 온도 -10°C에서 MTF



(b) 온도 +25°C에서 MTF



(c) 온도 +60°C에서 MTF

그림 7. 온도보정 설계된 렌즈의 사용온도에 따른 MTF 대 defocus 특성.

IV. 결 론

본 연구에서는 온도보정을 고려한 최적화 설계방법인 coupling 및 ruler 방법을 기본 설계개념으로 설정하고, 이를 광학설계 S/W에 적용하여 온도보정을 고려한 설계방법을 제시하였다. 사용온도 각각에 해당되는 설계변수 값을 줌으로 설정하여 데이터터를 입력하고 이러한 멀티구성에서 최적화를 진행하였다. 두 방법을 적절히 이용하여 온도보정 최적설계된 렌즈의 결상 성능 및 BFL 변화량 개선효과가 뚜렷하게 있음을 확인하였다.

본 개념을 4매 구성의 1/3.2" 5M 렌즈계에 적용하여 최적 설계한 결과, 5M 고정초점용 렌즈의 사양과 성능을 만족시키는 동시에 사용온도 $-10^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ 에서의 후초점거리 변화량 (ΔBFL)과 결상성능에 대한 요구사항을 충족하는 광학계를 얻었다. 또한 설계된 렌즈계의 전장은 5.5 mm로서 매우 컴팩트하다. 본 연구에서 제시된 설계개념은 휴대폰 카메라 및 감시 카메라용 광학계 개발에 활용 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] J. W. Perry, J. Johnson, J. H. Jeffree, D. S. Grey, and D. S. Volosov, "Fundamentals, Techniques and design," in *Handbook of Optics*, vol. 1 (McGraw-Hill, New York, 1995).
- [2] H. Jamieson, "Thermal effects in optical systems," *Opt.*

- Eng.*, vol. 20, no. 2, pp. 156-160, 1981.
- [3] L. Friedman, "Thermo-optical analysis of two long-focal-length aerial reconnaissance lenses," *Opt. Eng.*, vol. 20, no. 2, pp. 161-165, 1981.
- [4] G. Kurbitz, "Automatic active athermalization of infrared optical systems," in *Infrared Technology X VII*, Proc. SPIE, vol. 1520, pp. 612-621, 1991.
- [5] P. J. Rogers, "Optics in hostile environments," Proc. SPIE, vol. 1781, pp. 37-48, 1992.
- [6] Y. Kanagawa, S. Wakabayashi, T. Tajime and T. Hashimoto, "Multilens system design with an athermal chart," *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 34, pp. 8009-8013, 1994.
- [7] Y. Tamagawa and T. Tajime, "Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart," *Opt. Eng.*, vol. 35, no. 10, pp. 3001-3006, 1996.
- [8] D. S. Volosov, *Photografic Optics* (Iskustvo, Moskva, 1971).
- [9] G. G. Sljusarev, *Optical System Design* (Mashinostroenie, Leningrad, 1969).
- [10] V. Povey, "Athermalization Techniques in Infrared Systems," Proc. SPIE, vol. 655, pp. 142-153, 1986.
- [11] R. Kingslake, *Lens Design Fundamentals* (Academic Press, London 1978), pp. 60-71.
- [12] C. Londono, *Design and Fabrication of the Surface Relief* (Tufts University, Dissertation Paper for Ph.D, 1992), Chapter 3.

Athermalized Design of Compact Optical System for Phone Camera

Sung Chan Park[†] and Byoung Taek You

Department of Electro-Physics, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea.

[†]*E-mail: scpark@dankook.ac.kr*

Jong Ung Lee

Department of Laser and Optical Information Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea.

(Received April 6, 2009; Revised manuscript May 19, 2009; Accepted May 25, 2009)

In this paper, we analysed what effect the design variables, such as refractive index, central thickness and radius of curvature, had on the first order properties and image quality of optical systems when temperature changed. The optical parameters were varied at each temperature, then the coupling and ruler methods were used to design an athermalized lens for a phone camera.

This concept was first used to design the lens for a 1/3.2" 5M phone camera. The designed lens satisfies all the specifications for a phone camera, and the variations of the back focal length (ΔBFL) are reduced to $10\mu\text{m}$ for a temperature range of -10°C to $+60^{\circ}\text{C}$. Also, the TTL of 5.5 mm results in a compact system. All design concepts and results discussed in this paper are expected to be useful in development for the phone and CCTV camera.