

렌즈모듈을 이용한 컴팩트 디지털 카메라용 줌 렌즈 설계

박성찬[†] · 이상훈

단국대학교 첨단과학대학 전자물리학과
☎ 330-714 충남 천안시 안서동 산29번지

(2005년 1월 13일 받음, 2005년 2월 3일 수정본 받음)

본 논문은 3군 구성의 줌 광학계에 대해 렌즈모듈의 개념을 이용하여 1차량 및 3차 수차를 고려한 최적의 초기설계와 이로부터 실제 줌 광학계를 설계하는 방법을 제안 하였다. 각각의 렌즈모듈에 적절히 1차량과 3차 수차량을 설정함으로써 줌비 2배($f = 4.3 \sim 8.6 \text{ mm}$)를 갖고, 시스템에서 요구하는 구속조건을 만족시키는 초기설계 줌 광학계를 얻었다. 각 군의 역할에 따라 적절히 선정된 각각의 렌즈군의 초점거리 및 1차량이 렌즈모듈의 값과 같도록 독립적으로 설계한 후, 군사이의 공기간격을 조정하므로써 줌계적을 일치시켰다. 이러한 과정을 통해 설계된 줌 광학계는 렌즈모듈로 구성된 원래의 초기 설계된 줌 광학계와 동일한 1차 특성을 갖는다. 결과적으로 잔여수차 보정을 통해 후군초점조절방식을 이용하는 컴팩트 디지털 카메라 및 모바일 폰용 줌 렌즈로서 유용한 줌 광학계를 얻을 수 있었다.

주제어 : lens module, zoom lens, digital camera, optimization, aberrations.

I. 서 론

최근 모바일 폰 카메라(mobile phone camera)를 포함한 디지털 카메라 시장에서 화소수에 대한 경쟁과 더불어 초소형화를 추구하면서도 광학 줌, 동영상 촬영 등 다양한 부가 기능이 제품 선택의 중요한 기준이 되고 있다. 이러한 시장의 요구에 대응하고자 본 논문에서는 컴팩트한 디지털 카메라용 줌렌즈를 설계하려고 한다.

줌렌즈의 설계는 일반적으로 1차량(first orders)에 대한 설계를 통해 줌 광학계의 layout를 설정을 하는 초기설계 과정과 최적화를 통해 수차를 보정해가는 과정으로 크게 나눌 수 있다. 줌 광학계의 초기 설계에 관한 연구는 근축 광선추적을 통한 근축해석적인 방법에 대한 연구가 많이 이루어졌고, 또한 널리 사용이 되고 있다.^[1,2] 그러나 이러한 초기 설계과정을 통해 얻어진 해가 물리적으로 의미있는 광학계 인지 판단하기 어렵고, 또한 수차가 보정되지 않았으므로, 모든 줌 위치 및 field에 대해 수차를 보정하는데 대단히 많은 노력이 소요된다.

본 논문은 렌즈 모듈(lens modules)의 개념을 이용하여 3군 구성을 갖는 컴팩트 디지털 카메라용 줌 광학계의 초기 설계를 하고자 한다. 렌즈 모듈은 곡률, 두께, 및 굴절률과 같은 파라미터(parameters)를 사용하지 않고 광학계의 특성을 기술하기 때문에 상세한 설계 데이터 없이도 복잡한 광학계를 모델링하여 설계는 물론 평가하는 것이 가능하다.^[3] 따라서 렌즈 모듈은 줌 렌즈계처럼 복잡한 광학계를 설계할때 근축 해석적인 접근방법의 단점을 해결할 수 있다.

렌즈모듈의 파라미터는 초점거리(focal length), 후초점거리(back focal length), 전초점거리(front focal length), 배율(magnification) 및 3차 수차량으로 주어지므로, 이를 이용하여 대부분의 광학계를 초기 단계에서 설계 및 평가 할 수 있다. 특히 줌렌즈 설계에서 각각의 군은 모듈로 대체가 가능하고, 제품에서 필요한 사양 또는 요구 조건을 구속조건(constraints)으로 설정하여, 최적화 설계 과정을 통해 이들은 만족 시키는 초기 설계치를 구할 수 있다.

본 논문에서 설계하고자 하는 3군 줌 렌즈계는 1/4" CCD image sensor를 사용하며, 초점거리는 4.3 mm~8.6 mm로 2배의 줌비를 갖는다. 또한, F/수는 3.2~4.6이고, 1군과 2군은 각각 1매, 3군은 적외선 차단필터(IR cut filter)를 포함 5매로 구성하여 최근 시장에서 요구하는 모바일 폰 카메라 및 초소형 디지털 카메라에 응용을 목표로 하고 있다.

II. 3군 줌 렌즈계의 궤적 해석

2.1. 3군 줌 렌즈계의 분류

3군 구성의 줌 렌즈계에 대한 여러 가지 형태의 구성은 Yamaji^[1]에 의하여 분류 되었는데, 이 분류 방법은 줌 렌즈계의 기초설계와 줌 렌즈의 발전과정을 토대로 하고 있으며, 궤적 해석은 각군의 이동량을 구하는 방법을 택하였다. 그 후 Tanaka에 의해 새롭게 제안된 분류 방법이 표 1이며, 2가지의 광학 보정식과 4가지의 기계보정식으로 구분된다.^[4] 본 논문에서는 Tanaka에 의한 줌렌즈 분류 방법중 G_1 에서 상면까지의 거리가 고정되고, G_2 와 G_3 가 이동을 함으로써 초점거리의 변화가 발생하는 M_{3a} 형태의 구성으로 3군 줌 렌즈계를 설계하고자 한다.

[†] E-mail: scpark@dankook.ac.kr

표 1. 3군 구성 줌 렌즈계의 분류

구분		형태	Tanaka 분류
O_3 (광학 보정식)	a		
	b		$O_2P_1Q_2R_1$
M_3 (기계 보정식)	a		$O_2P_3Q_2R_1$
	b		$O_2P_1Q_2R_1$
	c		$O_2P_2Q_1R_1$
	d		$O_3P_1Q_2R_1$

그림 1은 M_{3a} 형태인 3군 구성 줌 렌즈의 개략도이다. Wide position은 줌광학계의 초점거리가 가장 짧고 화각(FOV : field of view)이 가장 넓은 경우이며, tele position은 초점거리가 가장 길고 화각이 가장 좁은 경우이다.

그림 1에서 볼 수 있듯이, 초점거리를 변화시키기 위해서 2군이 광축을 따라 뒤로 이동하면, 이에 따라 발생하는 초점의 변화로 인해 배율이 달라지는 효과는 있지만 상면의 위치가 변경되어 고정된 상면에 정확한 상을 맺힐 수 없게 된다. 이러한 현상을 보정하기 위해 3군이 광축을 따라 전진함으로써 상면의 위치가 변화하지 않고 고정이 될 수 있도록 한다. 군의 배열 순서는 광축을 따라 좌에서 우로 번호를 순차적으로 부여한다.

$k_i(i=1,2,3)$ 는 각 군의 굴절능(optical power)이고, z_{ji} 는 i 번째 줌위치에서 이웃한 두 주요면 사이의 거리를 나타내고, u 는 근축각을 나타낸다.

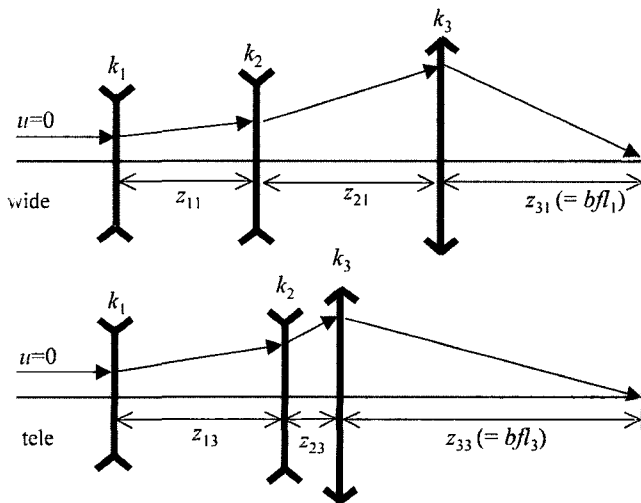


그림 1. 3군 구성 줌 렌즈의 개략도.

2.2. M_{3a} 계의 궤적 해석

M_{3a} 계의 궤적 해석을 위해 3군 줌 렌즈계의 초점거리($f=1/K$)와 후초점거리(bfl)에 대한 기본식을 Gaussian Brackets를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$K = 1/f = [k_1, -z_1, k_2, -z_2, k_3] \tag{1}$$

$$bfl = [k_1, -z_1, k_2, -z_2]/K \tag{2}$$

M_{3a} 계에 해당하는 조건식으로 G_1 에서 상면까지의 거리가 일정해야 하므로

$$z_1 + z_2 + bfl = T = \text{일정} \tag{3}$$

을 만족해야 한다. 위 식 (1)~(3)에서 z_1, z_2 는 그림 1에서 보듯이 1군과 2군 사이 및 2군과 3군 사이의 주요면 간의 거리이다. 각 군의 굴절능 k_1, k_2, k_3 와 T 는 고정된 값이므로 위의 3개의 방정식 중 4개의 미지수 z_1, z_2, bfl, K 가 존재한다. 따라서 줌(zooming)하는 동안 1개의 미지수를 연속적으로 변화시켜 주면서 나머지 3개의 미지수를 결정하는 방법은 다음과 같다.

① z_1 을 변화시키면서 z_2, bfl, K 를 구하는 방법, ② bfl 을 변화시키면서 z_1, z_2, K 를 구하는 방법, 마지막으로 ④ z_2 을 변화시키면서 z_1, bfl, K 를 구하는 방법이 있다. 본 연구에서는 첫번째 줌변수인 z_1 을 변화시키면서 나머지 줌 변수인 z_2, bfl, K 를 순차적으로 구하는 첫번째 방법에 대해 다루고자 한다.^{11,41}

그림 1에서 축상광선은 광축에 상점을 형성하므로 이에 해당하는 줌 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$[k_1, -z_1, k_2, -z_2, k_3, -bfl] = 0 \tag{4}$$

위 식을 bfl 에 대해 정리하면

$$-[k_1, -z_1, k_2]k_3(bfl)^2 - [k_1, -z_1, k_2, -(T-z_1)]k_3(bfl) + [k_1, -z_1, k_2, -(T-z_1)] = 0$$

이고, 이 식을 아래의 식과 같이 변형을 할수 있다.

$$A(bfl)^2 + B(bfl) + C = 0 \tag{5}$$

여기서

$$A = -[k_1, -z_1, k_2]k_3$$

$$B = -[k_1, -z_1, k_2, -(T-z_1)]k_3$$

$$C = [k_1, -z_1, k_2, -(T-z_1)]$$

이다. 식 (5)는 후초점거리(bfl)에 대한 2차 방정식이므로 bfl 을 쉽게 구할 수 있으며, 이어서 식 (4)와 식 (1)에서 나머지 변수인 z_2 와 K 를 각각 구할 수 있다.

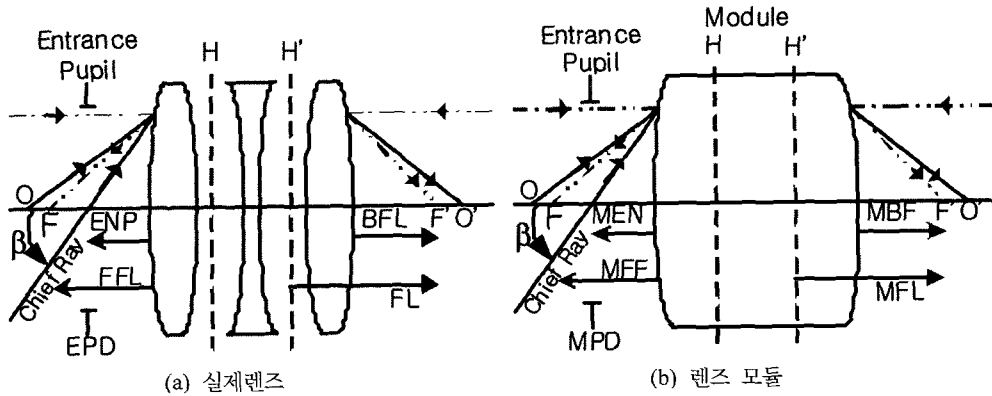


그림 2. 광학계의 1차 특성을 나타내는 파라미터.

III. 렌즈 모듈을 이용한 줌 렌즈의 초기 설계

줌 렌즈계의 각 군(group)은 그림 2(a)처럼 몇 개의 렌즈로 구성되어 있다. 광학계의 고차수차를 무시한다면, 주어진 물상점(conjugate points)에서 광학계의 특성은 1차량과 3차 수차량으로 정확하게 표현될 수 있다. 다시 말해서 렌즈모듈의 1차량과 3차 수차량을 실제 광학계에 일대일 대응시키면, 두 광학계는 3차 특성내에서 서로 등가(equivalent)라는 관계가 성립된다. 따라서 줌 렌즈계의 각 군은 그림 2에서 보여진 바와 같이 동일한 1차량 및 3차 특성을 갖는 thick lens module로 대체시키는 것이 가능하다. 그림 2(b)에서 MFL, MFF, MBF, MRD, MEN, MPD, β 는 렌즈 모듈의 초점거리, 전초점거리, 후초점거리, 배율, 입사동 위치, 입사동 크기 및 시야 각 이다.

렌즈모듈을 이용하여 줌 렌즈에 대한 초기 설계를 행하기 위해서는 임의의 초기 layout을 설정 해야 한다. 우선 비슷한 사양의 특허나 자료를 찾아 요구 사양에 맞게 초점거리를 scaling을 하고, 렌즈 모듈로 대체 시키기 위해 적절한 1차량을 입력한다.^[5,6] 본 연구에서는 디지털 카메라 및 모바일 폰용 카메라 등과 같이 고성능을 유지하면서 초점거리가 매우 짧고, 화각을 크게 하여 초소형으로 제작할 수 있는 retro-focus형의 렌즈 구성으로 3군 줌 광학계를 설계하고자 한다. 3군 줌 광학계에서 retro-focus형은 각각의 렌즈군이 (-), (-), (+) 렌즈군으로 구성되므로, 이런 형태는 렌즈의 초점거리가 짧고 화각이 큰 광각렌즈를 설계하는데 적절하다.^[1,7]

줌 광학계의 대칭성을 확보하기 위해 조리개는 2군과 3군 사이에 위치를 시켰다. 또한, 본 논문에서의 렌즈 모듈은 고차수차를 무시하고, 1차량과 3차 수차만을 다루고 있고, 3차 수차는 근축영역에서 우세하므로 광학계의 구경(aperture)과 상크기(image field size)를 작게 설정하는 것이 바람직하므로, half image size를 1 mm, 줌위치 1, 2, 3에서 구경비를 F/5, F/6, F/7으로 설정하였다.

2배의 줌비를 갖는 최적의 줌 광학계를 초기 설계하기 위해, 시스템에서 요구하는 목표사양을 구속조건으로 설정을 하고 모듈 각군의 초점거리(MFL), 후초점거리(MBF), 전초

점거리(MFF), 배율(MRD), 줌 궤적(z_{ij}) 그리고 3차 수차량(W_{ijk})을 변수로 하여 최적화 프로그램을 이용하여 초기 설계를 시행하였다.

목표 사양을 만족하기 위해 설정된 구속조건은 첫째, 줌링 과정에서 각 군들간의 충돌을 방지하기 위해 군사이의 공기 간격을 최소 0.6 mm 이상이 되도록 설정을 하였으며, 둘째, 줌 렌즈계가 2배의 줌 배율을 갖기 위해 초점거리를 4.3 mm ~ 8.6 mm로 유지하도록 하였다. 셋째로는 카메라에 장착시 부피를 최소화하기 위해 줌광학계의 전장을 13.5 mm로 최소화 하였다. 마지막으로 렌즈 모듈의 크기를 제한하였다.

그림 3은 초기 설계된 2배 3군 구성의 렌즈모듈 줌 광학계를 나타낸다. 표 2는 최적화 과정을 통해 설계된 렌즈 모듈 줌 광학계의 설계 데이터를 나타낸다. 표 2에서 W_{040} , W_{131} , W_{222} , W_{220} , W_{311} 은 축상 및 1.0 field에서 출발한 광선에 대해 출사동에서 계산된 3차 수차 중 구면수차, 코마, 비점수차, 상면만곡수차, 왜곡수차에 해당하며, 단위는 d선(587.6 nm)의 파장 길이 이다. 표 3은 각각의 줌 위치에서 최적 설계된 렌즈 모듈 줌 광학계의 1차량 및 줌 궤적 값을 보이고 있다. 표 3에서 ($i=1,2,3$)는 i 번째 줌위치에서 이웃한 모듈간의 실제 거리를 나타낸다.

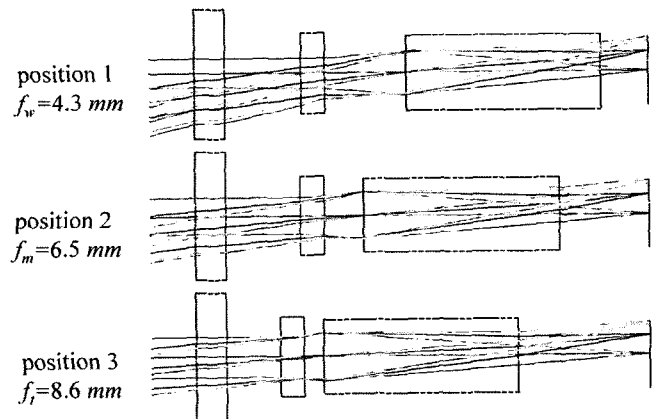


그림 3. 초기 설계된 2배 3군 구성의 렌즈모듈 줌 광학계.

표 2. 렌즈 모듈 줌 광학계의 설계 데이터

	module 1	module 2	module 3
MFL	-1501.4733	-5.2012	3.0137
MFF	1501.8177	5.3830	-4.2448
MBF	-1501.7167	-5.4673	-1.0894
MRD	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10
두께	0.9	0.7	5.7912
MED	1.0	1.0	1.0
MFD	1.0°	1.0°	1.0°
W_{040}	0.0007	0.0029	-0.2699
W_{131}	0.0007	0.0008	0.1215
W_{222}	-0.0019	0.0028	-0.0040
W_{220}	-0.0012	-0.0013	-0.0023
W_{311}	0.0029	-0.0034	-0.0014

표 3. 렌즈 모듈 줌 광학계의 1차량 및 줌 궤적

	position 1	position 2	position 3
EFL	4.3001	6.5	8.6000
BFL	1.4152	2.6965	3.9176
FFL	0.8101	-3.0123	-7.2508
d_{1i}	2.2629	2.2174	1.5843
d_{2i}	2.4216	1.1944	0.6094
d_{3i}	1.4153	2.6965	3.9176

IV. 실제 렌즈 설계

초기 설계과정에서 얻은 각각의 모듈과 등가인^[6] 광학계를 구하기 위해서는 모듈의 1차량 및 3차 수차와 동일한 값을 갖는 실제 렌즈를 설계 해야 한다. 본 논문에서는 광학계의 렌즈 매수를 줄이기 위하여 1군 및 2군은 각각 1매로 구성된 (-)렌즈를 사용하고, 1군과 2군에서 발생한 수차를 보정하기 위해 3군은 적외선 차단필터를 포함하여 5매 구성으로 줌 광학계를 설계하고자 한다.

1군과 2군은 단일 렌즈이므로 간단하여 언급하지 않고, 그림 4와 같이 5매 구성의 3군에 대한 수차해석을 다루면 다음과 같다. 조리개는 첫번째 면(그림 4의 C_1)에 위치하고, 주광선이 조리개 면에서 광축과 이루는 각도는 β 이다. 따라서 주어진 물상점에서, 그림 4에서 보인 광학계의 초점거리, 후 초점거리, 전초점거리, 배율, 구면수차, 코마, 비점수차, Petzval Sum, 왜곡수차, 종색수차 및 횡색수차는 다음의 식으로 표현된다.^[8,9,10]

초점거리 : $f = 1/[k_1, -d_1/m_1, k_2, \dots, -d_9/n_9, k_{10}]$ (6)

후초점거리 : $bfl = f [k_1, -d_1/m_1, k_2, \dots, -d_9/n_9]$ (7)

전초점거리 : $ffl = -f [-d_1/m_1, k_2, -d_2/m_2, \dots, -d_9/n_9, k_{10}]$ (8)

배율 : $M_t = 1/[-d_0, k_1, -d_1/m_1, \dots, -d_9/n_9, k_{10}]$ (9)

구면수차 : $S_I = u_0^4 \sum a_k^2 g_{2k-1} W_k$ (10)

코마 : $S_{II} = u_0^3 \beta \sum a_k b_k g_{2k-1} W_k$ (11)

비점수차 : $S_{III} = u_0^2 \beta^2 \sum b_k^2 g_{2k-1} W_k$ (12)

Petzval Sum : $S_{IV} = \sum k_k / n_k n_{k-1}$ (13)

왜곡수차 : $S_V = u_0 \beta^3 \sum b_k / a_k (b_k^2 g_{2k-1} W_k + d_0^2 k_k^2 / n_k n_{k-1})$ (14)

종색수차 : $S_L = u_0^2 \sum a_k g_{2k-1} \Delta(\delta n/n)_k$ (15)

횡색수차 : $S_T = -u_0 \beta \sum b_k g_{2k-1} \Delta(\delta n/n)_k$ (16)

단, $a_k = [-d_0, k_1, \dots, -d_{k-1} / n_{k-1}, -c_k \cdot n_{k-1}]$
 $b_k = [-d_1 / n_1, k_2, \dots, -d_{k-1} / n_{k-1}, -c_k \cdot n_{k-1}]$
 $W_k = g_{2k} / n_k^2 - g_{2k-2} n_{k-1}^2$
 $g_{2k} = [-d_0, k_1, \dots, -d_{k-1} / n_{k-1}, k_k]$
 $g_{2k-1} = [-d_0, k_1, \dots, -k_{k-1}, d_{k-1} / n_{k-1}]$
 $g_{2k-2} = [-d_0, k_1, \dots, -k_{k-2} / n_{k-2}, k_{k-1}]$
 $\Delta(\delta n/n)_k = \{(n_f - n_c) / n_d\}_k - \{(n_f - n_c) / n_d\}_{k-1}$

위 식에서 $k_k(k=1,2,\dots,10)$ 는 굴절능이고, 기호 []는 Gaussian Brackets를 나타낸다. 또한 $u_k(k=1,2,\dots,10)$ 는 축상광선의 근축각을, 굴절능 k_k 는 $c_k(n_k - n_{k-1})$ 로 주어지고, 여기서 c_k 및 n_k 는 각각 면의 곡률 및 굴절률을 나타낸다. 물체공간과 상공간에서의 굴절률은 모두 1.0으로 가정하였다.

본 렌즈가 모듈과 3차 수차 이내에서 완전한 등가를 이루기 위해서는 모든 1차량과 3차 수차가 서로 동일하도록 해야 한다. 즉, 모듈의 1차량과 3차 수차량을 각군의 렌즈계에 일대일 대응시키기 위해서는 식 (6)~(16)으로 주어진 1차량과 3차 수차량에 관한 연립방정식을 모든 경우의 설계변수에 대해 푸는 무리처럼 보인다. 다다하 체르 서저체아 하다 하퍼 스치해석적으로 렌즈 모듈과 등가인 렌즈를 얻기 위해 (6)~(16)으로 주어진 연립방정식을 동시에 다루는 것은 매우 복잡하며 많은 시간이 소요되므로, 식 (6)~(9)로 주어진 1차량과 주요수차인 구면수차, 코마, 비점수차 및 색수차가 고려된 연구가 발표되었다.^[6] 좀더 부연 설명하면 식 (6)~(12)로 주어진 연립방정식을 풀어 1차량 및 구면수차, 코마, 비점수

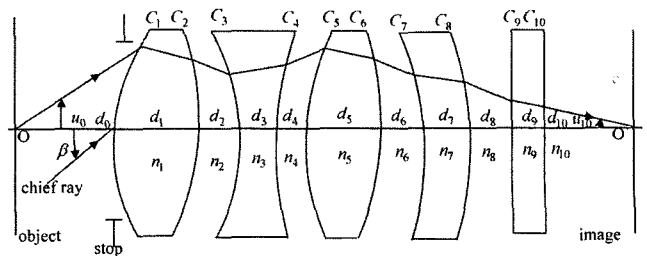


그림 4. 5매로 구성된 3군 렌즈의 schematic diagram.

차 에서는 등가이고, 색수차에 대해서는 각군에서 최소가 되는 해를 해석적으로 구하는 방법이다. 그러나 이러한 접근은 거의 등가인 각군의 렌즈계를 얻을 수 있지만, 7개의 연립방정식을 풀고 해석하는 과정 또한 많은 노력을 필요로 한다.

본 연구에서는 복잡하고 시간이 많이 소요되는 수치해석적인 방법에 의한 실제렌즈 설계보다는 각 군에 대해 적절한 구성을 선정하고, 각각의 렌즈모듈과 동일한 1차량을 갖는 실제 렌즈를 최적 설계법을 이용해 구하고, 이로부터 각 렌즈군에 대한 공기 간격을 조정함으로써 줌 궤적을 일치시키는 과정을 통해 초기 실제 렌즈 줌 광학계를 얻고, 수차보정을 통해 최적의 광학계를 얻는 과정에 대해 다루고자 한다. 이러한 접근방법은 3차 수차를 해석적으로 다루지 않고, 각군에 대해 독립적으로 설계된 초기 설계치로부터 곧바로 줌 광학계를 설정한 후 잔여 수차 보정을 행하므로, 과정이 매우 간단하고 빠른 시간내에 설계를 완성시킬 수 있는 것이 큰 장점이다.

줌 광학계에서 요구하는 각 군이 독립적으로 색수차가 보정되거나 또는 최소의 값을 갖기 위해서는 광학유리를 적절히 선정해야 한다. 1군 및 2군의 초점거리는 표 2에서 보듯이 음(-)의 값을 갖고 있으므로, 이때의 광학유리 선택을 crown glass는 음(-)의 굴절능을 갖는 렌즈에, flint glass는 양(+)의 굴절능을 갖는 렌즈에 적용하였다. 한편, 제 3군처럼 군 전체의 초점거리가 양인 경우는 crown 및 flint glass는 각각 양 및 음의 굴절능을 갖는 렌즈에 사용 하였다.^[11,12] 이러한 광학 유리 선택을 기초로 하고, 각군의 특성을 파악하여 적절한 렌즈의 형태를 설정한다.

고정군인 1군은 단일렌즈 구성으로 하였다. Meniscus형태의 렌즈 모양으로 왜곡수차 보정이 용이하도록 하였다. 이러한 형태를 갖는 렌즈군에 대해 표 2에서 주어진 렌즈 모듈의 초점거리 MFL=-1501.4733 mm와 동일하도록 scaling을 한다. 2군도 역시 단일렌즈 구성으로 설정하였으며, 특히 축상에서 앞 뒤로 이동하여 광학계의 초점거리를 변경시키므로 2군의 초점거리를 짧게 해야 한다. 왜냐하면 굴절력을 크게 하면 원하는 줌비를 얻기 위해 이동해야 할 거리가 짧아지므로 광학계의 길이 및 크기를 소형화시킬 수 있기 때문이다.

3군은 상면의 위치를 고정시키는 역할을 하므로 전체적인 군의 굴절능은 (+)가 되는 것이 일반적이다. 렌즈 구성은 적외선 차단 필터를 포함하여 총 5매 구성이며 특히 조리개가 3군 렌즈 앞에 위치하고, 축상광선이 렌즈의 제 1면에 꼭차게 입사되므로 구면수차 보정에 매우 효과적이다. 본 논문에서는 설계 파라미터를 충분히 확보하기 위하여 3군의 렌즈

표 4. 초기 설계된 실제 줌 렌즈계의 각 군의 1차 특성

	1군	2군	3군
MFL	-1501.4733	-5.2012	3.0137
MFF	1501.818	5.3830	-4.2448
MBF	-1501.7167	-5.4673	-1.0894
두께	0.9	0.7	5.7912

를 접합렌즈가 아닌 단렌즈로 렌즈계를 구성하여 수차 보정에 용이 하도록 하였다.^[13]

위 과정을 통하여 각군의 역할에 따라 구성을 대략 결정한 후 표 2에서 주어진 모듈의 초점거리와 일치하도록 각군의 초점거리를 scaling한다. 그리고 scaling된 렌즈 각군의 주요면(H, H')을 계산한 후, 후초점거리, 전초점거리 및 군의 두께가 렌즈 모듈의 값과 동일하도록 구속조건을 설정하여 독립적으로 각 군을 설계한다.

이때 사용한 프로그램은 Code-V의 자동설계 옵션이며, 해석적인 방법을 통하지 않고 매우 빠르게 각 군의 실제렌즈를 설계 할 수 있다.^[14]

표 4는 초기 설계된 실제 렌즈의 각 군의 1차량을 나타낸다. 그림 3의 렌즈 모듈 줌 광학계와 동일한 1차 특성을 갖기 위해 표 3에서 주어진 렌즈모듈의 줌 궤적과 일치하도록 공기 간격을 조절함으로써 두 줌 광학계는 1차량 내에서 등가인 관계가 성립한다. 그림 5와 표 5는 초기 설계된 실제렌즈 줌 광학계의 구성도 및 1차량이며, 이는 그림 3 및 표 3의 렌즈 모듈로 구성된 줌 광학계와 동일한 특성을 보이고 있다.

V. 수차 보정 및 최적설계

줌 렌즈계를 설계하기 위해 우선 독립적으로 설계된 각각의 군을 표 5에서 주어진대로 공기간격을 설정하면 줌궤적

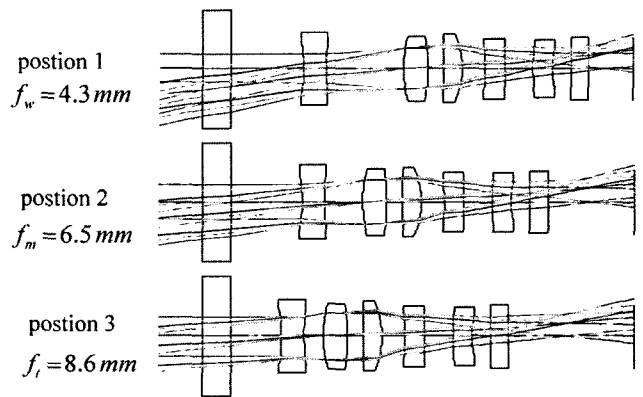


그림 5. 독립적으로 설계된 각 군을 결합시켜 얻은 초기 실제렌즈 줌 광학계.

표 5. 초기 설계된 실제 줌 렌즈계의 1차량 및 공기간격

	position 1	position 2	position 3
EFL	4.3	6.4999	8.5999
BFL	1.4152	2.6965	3.9176
FFL	0.8103	-3.012	-7.2504
	2.2629	2.2174	1.5843
	2.4216	1.1944	0.6094
	1.4153	2.6965	3.9176

을 포함해 모든 1차 특성내에서 렌즈모듈 줌 광학계와 동일한 초기 설계 렌즈를 얻을 수 있다. 여기서 고려되지 않은 수차값은 일치하지 않지만, 빠른 시간에 초기 설계 작업을 수행할 수 있는 장점이 있다.

이렇게 해서 얻어진 초기 줌 광학계는 렌즈모듈로 구성된 줌 광학계와 같은 크기의 구경 및 상 크기를 갖게 되므로, 표 6에서 주어진 것처럼 본 논문에서 요구하는 설계목표에 비해 작게 설정이 되어 있다. 따라서 목표사양에 맞추기 위해서 1/4" CCD image sensor의 크기에 맞도록 상의 크기를 + 2.5 mm로 설정 하고, 구경비를 줌 위치에 따라 F/3.2~F/4.6으로 키우게 되면 추가로 고차수차가 발생을 하게 된다. 이때 발생하는 수차 보정 및 광학계의 전체적인 성능을 향상시키기 위해 광학계의 1차량, 줌궤적 및 전장을 구속조건으로 설정을 하고 최적화를 행한다. 상 크기 및 구경의 크기를 조금씩 확대해 가면서 설계하는 과정에서 발생하는 고차 수차를 보정하기 위해 1군 및 2군 렌즈, 3군의 첫번째 렌즈와 4번째 렌즈를 비구면화를 하였다. 비구면화를 위해 사용한 지질은 플라스틱으로 ZEONEX사의 E48R이다.

비구면 방정식의 conic 상수 p 에 의해 원추곡면의 형태가 결정되고, h^4 의 비구면 계수 A 는 Seidel 수차 중 구면수차, 코마, 비점수차, 그리고 왜곡수차에 영향을 줌으로써 3차 수차를 보정할 수 있다.^{[15],[16]} 그리고 h^6 이상의 비구면 계수 $B, C, D, E \dots$ 는 고차 수차를 보정하는데 유용하다. 최적화 과정에서 사용한 비구면 방정식은 다음과 같다.

$$z = \frac{h^2/r}{1 + \sqrt{1 - (1+p)h^2/r^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12} \dots \quad (17)$$

여기서, $h = \sqrt{x^2 + y^2}$ 는 $x-y$ 좌표계에서 광축으로부터

표 6. 3군 줌 렌즈계의 설계 목표사양

	설계 목표사양
Image format	CCD image sensor
Unit Pixel size	3.25 μm X 3.25 μm
Sensor size	4.5 (D) \times 3.6 (H) \times 2.7 (V)
Effective focal length	wide : 4.3 mm, tele : 8.6 mm
F/#	wide : 3.2, tele : 4.6
Max. lens diameter	$\phi = 7$ mm 이하
Wavelength (nm)	656.3 587.6 572.6 546.0 435.8
Distortion	+ 3% 미만
Angle of incidence	28 Deg 이하
Relative illumination	50% 이상
MTF 특성	전 영역에서 30% 이상
Total track length	14 mm 이하
Lens structure	plastic(4매) + glass(2매)

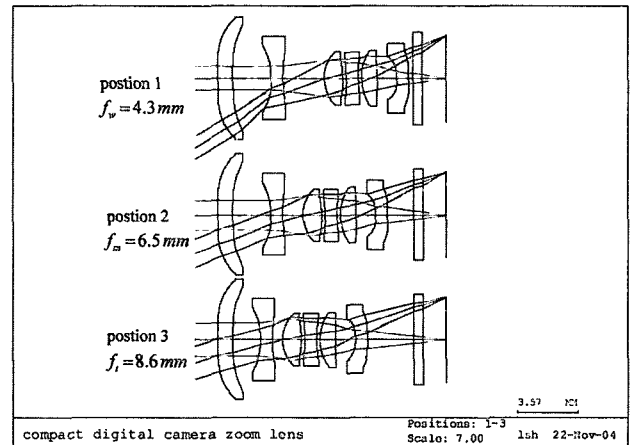
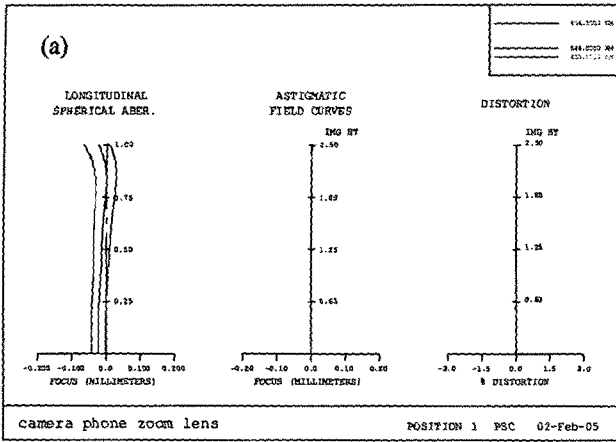


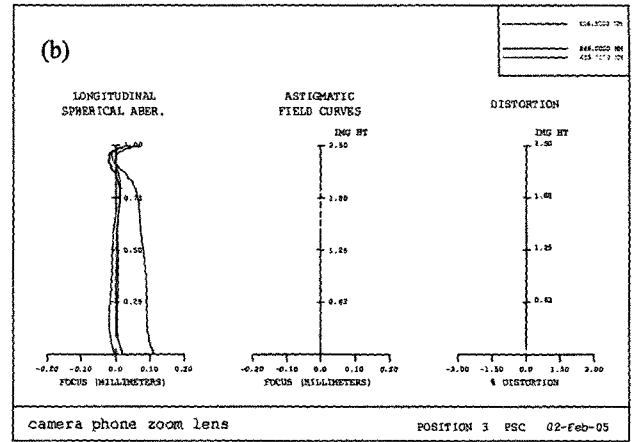
그림 6. 최적 설계된 3군 줌 렌즈계.

표 7. 최적 설계된 3군 줌 렌즈계의 설계 데이터

No.	곡률반경(mm)	두께(mm)	광학 재질
물체면	평면	무한 거리	E48R
1	-898.2051(비구면)	0.9	$n_d = 1.5299$ $n_F = 1.5365$ $n_C = 1.5270$
2	3098.5057(비구면)	2.2667	
3	-4.7364(비구면)	0.7	E48R
4	7.0716(비구면)	2.4356	
Stop	2.0479(비구면)	1.1127	E48R
6	-4.6037(비구면)	0.2	
7	-12.797	0.7	FD4
8	5.7122	0.2	
9	2.8	0.9047	FC5
10	-157.2187	1.1796	
11	-3.0812(비구면)	0.7030	E48R
12	428.1398(비구면)	0.2412	
13	평면	0.55	BK7
14	평면	1.4	
상면	평면	0.007(defocus)	

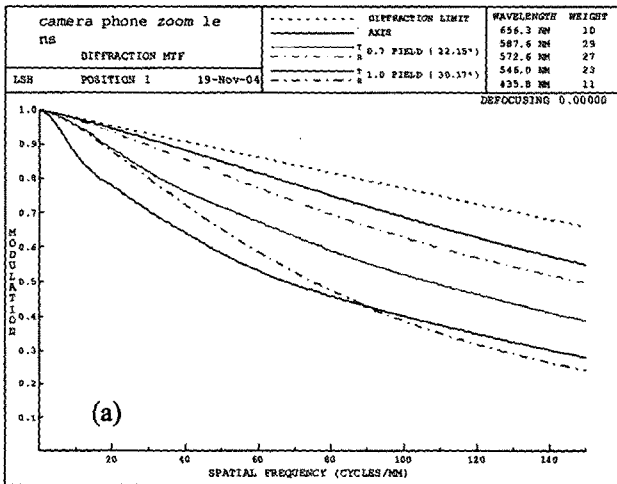


(a) 줌위치 1

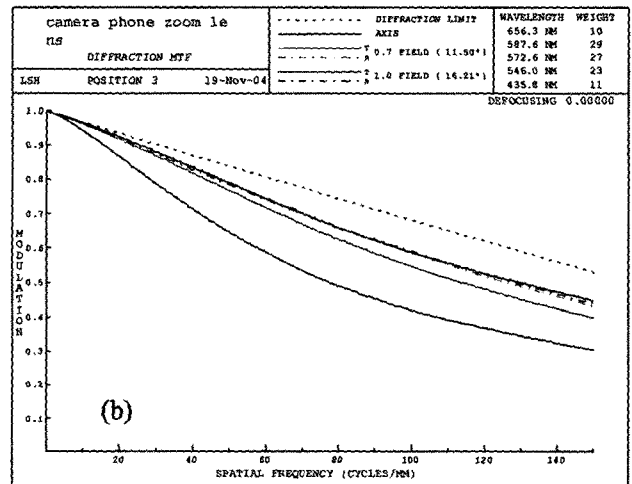


(b) 줌위치 3

그림 7. 최적 설계된 3군 줌 렌즈계의 수차 특성.



(a) 줌위치 1



(b) 줌위치 3

그림 8. 최적 설계된 3군 줌 렌즈계의 MTF 특성.

광선의 입사각까지의 수직거리이고, $p = -e^2$ 는 conic 상수, 그리고 e 는 이심률(eccentricity)이다.

그림 6은 위와 같은 방법을 통하여 최적 설계된 3군 2배 줌 광학계의 구성도이고, 표 7은 최적 설계된 줌 렌즈계의 설계 데이터이다. 그림 7은 각각의 줌 위치에서 줌 렌즈계의 수차 특성을 나타내며, 그림 8은 각각의 줌 위치에서 MTF 특성을 나타낸다. 그림 7에서 왜곡수차는 모든 영역에서 3% 이내로 보정되어 있고, 이를 사용자가 인지하는 TV-Distortion으로 평가하면 0.9% 이내에 해당된다. 그림 8에서 MTF 특성은 30% 이상이므로 본 광학계는 목표 성능을 만족시킨다. 그림 9는 주변광량비를 나타내며, field의 크기가 커짐에 따라 주변광량비는 감소하지만 요구하는 설계 목표값인 50% 이상을 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 각각의 줌 위치에서 주광선이 상면에 입사하는 각도(angle of incidence)를 나타낸다. 이 값은 주변 광량비와 image sensor의

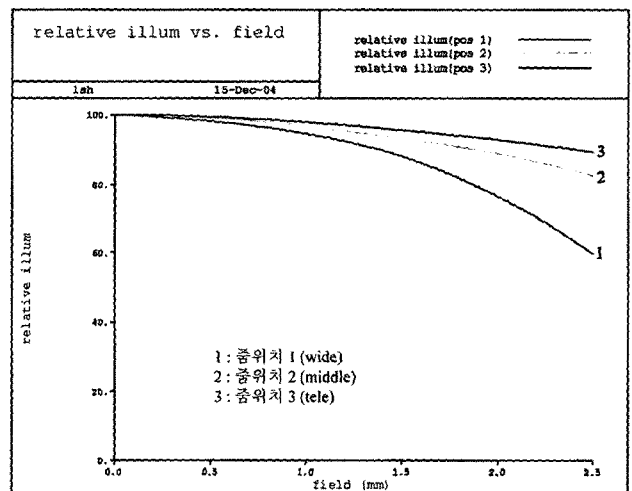


그림 9. 줌 위치별 주변광량비.

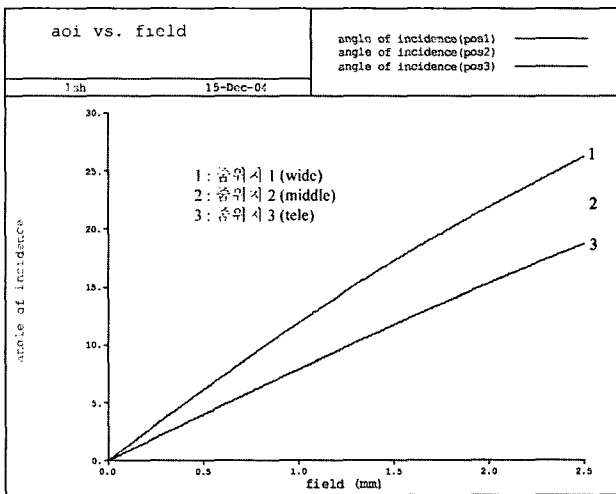


그림 10. 줌 위치별 상면에서의 주광선 입사각.

효율과 밀접한 관계를 갖고 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 렌즈 모듈의 개념을 이용하여 콤팩트한 디지털 카메라용 줌 렌즈계를 설계하였다. 무엇보다도 렌즈 모듈의 개념을 이용하여 복잡한 계산이 없이 빠른 시간에 초기 설계를 행하고, 이로부터 최적 설계된 3군 2배의 줌 렌즈계를 얻을 수 있었다.

렌즈 모듈과 동일한 1차 특성을 갖는 실제 렌즈를 얻기 위해 각각의 군의 역할 및 특성을 고려하여 렌즈 형태를 적절히 구성하였다. 렌즈 모듈의 각각의 군과 실제 렌즈의 각군 간의 1차량이 일치하도록 구속조건을 사용하여 독립적으로 설계한 후, 군 사이의 공기간격을 조절하여 렌즈모듈의 줌 궤적과 일치시킴으로써 초기 실제 줌 렌즈계로의 변환을 하였다. 이렇게 해서 얻어진 초기 실제 렌즈는 렌즈 모듈과 1차 특성내에서 동일한 값을 갖는다.

원하는 설계목표와 일치하도록 구경 및 상의 크기를 조금씩 키워가면서 최적화를 시행함과 동시에 추가적으로 발생하는 고차 수차를 보정하기 위해 비구면을 사용하였다. 이 과정에서 모든 군의 초점거리, 줌궤적, 줌비, 전장을 구속조건으로 설정하고, 최적화된 3군 2배 줌 렌즈계는 초기 설계된 줌 렌즈계와 동일한 1차 특성을 갖는다. 설계목표 사양을 만족하도록 상의 크기를 1/4" CCD에 적합하도록 2.5 mm로 설정을 하였으며, 줌위치에 따라 F/수를 3.2~4.6으로, 초점거리는 4.3 mm~8.6 mm로 설계하였다.

본 논문에서 설계한 콤팩트 디지털 카메라용 줌 렌즈계는 시스템에 장착이 용이하도록 1군을 고정시켰으며, 모든 줌 위치에 걸쳐 전장길이를 13.5 mm 이하로 하여 콤팩트하게

설계를 하였다. 또한 렌즈의 직경을 제한하여 소형화하였다. 향후 초소형 디지털 카메라뿐만 아니라 모바일 폰용 줌 카메라에도 응용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2003년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참고문헌

- [1] K. Yamaji, "Design of zoom lenses," in *Progress in Optics VI*, E. Wolf, ed., pp. 105-170, 1967.
- [2] M. S. Yeh, S. G. Shiue, and M. H. Lu, "Two optical component method for designing zoom system," *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 6, pp. 1826-1834, 1995.
- [3] T. G. Kuper and M. P. Rimmer, "Lens modules in optical design," *Proc. SPIE 892*, pp. 142-151, 1988.
- [4] 정진호, 줌 렌즈계의 근축설계와 궤적해석, 경남대학교 박사학위논문, 1994, pp. 32-48.
- [5] S. C. Park and K. B. Kim, "Video camera zoom lens design using lens modules," *Proc. SPIE 2539*, pp. 192-199, 1995.
- [6] S. C. Park and R. R. Shannon, "Zoom lens design using lens modules," *Opt. Eng.*, vol. 35, no. 6, pp. 1668-1676, 1996.
- [7] 박성찬, 김영식, "렌즈모듈을 이용한 광학계 설계 I : 줌렌즈의 First Order 최적 설계," *한국광학회지*, vol. 8, no. 2, pp. 81-87, 1997.
- [8] W. T. Welford, *Aberration of Optical Systems*, Adams Hilger Ltd, Bristol and Boston, 1986, pp. 130-158.
- [9] 장대식, 렌즈모듈을 이용한 CCD 카메라용 2군 줌렌즈 설계, 단국대학교 석사학위논문, 2003.
- [10] 박성찬, 안현경, "정밀모형안을 이용한 Head Mounted Display용 렌즈계 설계," *한국광학회지*, vol. 14, no. 3, pp. 236-243, 2003.
- [11] 이상수, *기하광학*, 교학연구사, 서울, 1985.
- [12] Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering : The design of optical systems*, McGraw-Hill, 1990.
- [13] Robert E. Fischer and Biljana Tadic-Galeb, *Optical System Design*, McGraw-Hill, 2000.
- [14] *Optical Research Associates*, "CODE V Reference Manuals," Ver. 9.5, 2004.
- [15] Jin Seon Yoon and Nam Kim, "Optimization of Diffractive Optical Elements by Genetic Algorithm," *JOSK*, vol. 4, no. 1, pp. 30-36, 2000.
- [16] Young Ghi Hong, Sun Il Kim, Wan Gu Yoo, and Chul Koo Lee, "Telephotolens Design with Refractive/Diffractive Hybrid Lens," *JOSK*, vol. 1, no. 2, pp. 74-80, 1997.

Zoom lens design for compact digital camera using lens modules

Sung Chan Park[†] and Sang Hun Lee

Electro Physics Major, School of Advanced Sciences, Dankook University, Cheonan 330-714, KOREA

[†]*E-mail: scpark@dankook.ac.kr*

(Received January 13, 2005, Revised manuscript February 3, 2005)

This paper presents the optimum initial design containing the first and third order properties of the three-group zoom system using lens modules, and the real lens design of the system. The optimum initial design with focal length range of 4.3 mm to 8.6 mm is derived by assigning appropriate first and third order quantities to each module along with the specific constraints required for the system. An initial real lens selected for each group has been designed to match its focal length and the first orders into those of the each lens modules, and then combined to establish an actual zoom system by adjusting the air space between the groups at all zoom positions. The combination of the separately designed groups results in a system which satisfies the first order properties of the zoom system composed of the original lens modules. As a result, by residual aberration correction, we could obtain a zoom system useful in compact digital zoom cameras and mobile phone cameras employing the rear focus method.

OCIS Codes : 080.2740, 080.3620, 220.2740, 220.4830.