

렌즈모듈을 이용한 광학계 설계 I: 줌렌즈의 First Order 최적설계

박성찬 · 김영식

단국대학교 물리학과

(1996년 10월 21일 받음)

본 논문은 4군구성의 비디오 카메라용 줌광학계에 대해 렌즈모듈의 개념을 이용하여 1차량 및 3차 수차를 고려한 최적의 초기설계와 이로부터 실제 줌광학계를 설계하는 방법을 제안 하였다. 최적화 과정을 통해 각각의 렌즈모듈에 적절히 1차량과 3차 수차량을 설정함으로써 줌비 10배($f = 6.1693 \sim 58.4065$)를 갖고, 최적설계에 필요한 구속조건을 만족시키는 초기설계 줌광학계를 얻었다. 적절히 선정된 각각의 렌즈군의 초점거리가 렌즈모듈의 초점거리와 같도록 scaling 한후, 군사이의 공기간격을 조정함으로써 줌제적을 일치시켰다. 이러한 과정을 통해 독립적으로 설계된 군들을 결합시켜 얻은 줌광학계는 렌즈모듈로 구성된 원래의 초기설계된 줌광학계와 동일한 1차특성을 갖는다. 결과적으로 잔여수차 보정을 통해 후군초점조정방식을 이용하는 비디오 카메라 줌렌즈로서 유용한 줌광학계를 얻을 수 있었다.

I. 서 론

줌렌즈설계는 일반적으로 두 개의 과정으로 나눌 수 있다. 1차량(first order) 설계를 통한 줌광학계의 layout를 설정하는 초기설계와, 이로부터 수차보정을 행하는 과정으로 분류된다. 줌렌즈의 초기설계는 광학계의 구성 및 시스템의 특징을 나타내는 중요한 과정으로서 많은 연구가 이루어져 왔고, 그중에서도 얇은렌즈(thin lens)에 기초한 근축해석(paraxial analysis)에 관한 연구가 많이 발표되었고, 또한 널리 이용되고 있다.^[1-5] 얇은렌즈 이론으로부터 얻을 수 있는 줌렌즈의 초기설계치는 각 군(group)의 초점거리(focal length), 줌비(zoom ratio), 줌궤적(zooming locus) 등에 한정되며, 이과정에서 얻은 data는 수학적 해에 불과하므로 실제로 부품 또는 제품에서 요구되는 사양(specifications)을 충분히 만족시키는지를 판단하기 매우 어렵다. 또한 이러한 초기설계치는 수차가 보정되지 않았으므로, 모든 줌위치(zoom position) 및 field에서 수차보정하는 데는 많은 노력과 시간이 소요 된다.

본 논문에서는 렌즈모듈(lens modules) 개념을 이용하여 근축해석적인 접근방법의 단점을 해결 하고자 한다. 렌즈모듈은 곡률, 두께 및 굴절률과 같은 파라미터를 이용하여 구체적으로 광학계의 특성을 기술하는 대신에 임의의 conjugate에서 주어진 Eikonal 함수에 의해서 표현된 렌즈에 대한 광선추적을 행하는 mock ray tracing에 기초를 두고 있다.^[6,7] 따라서 상세한 설계 data 없이도 복잡한 광학계를 모델링하여 설계는 물론 평가하는 것이 가능하다. 즉, 렌즈모듈의 파라미터(parameter)는 초점거리, 후초점거리(back focal length), 전초점거리(front focal length), 배율(magnification) 및 3차 수차량으로 주어지므로, 이를 이용하여 대부분의 광학계를 설계 및 평가 할 수 있다.^[8]

광학계 설계에서 렌즈모듈은 초기설계 및 평가이외에도 다양하게 사용될 수 있으며, 특히 줌렌즈 설계에서 각각의 군은

모듈로서 대체가능하고, 제품에서 필요한 사양 또는 요구조건을 구속조건(constraints)으로 설정하여, 최적화 설계과정을 통해 이들을 만족시키는 초기설계치를 구할 수 있다.

본 논문에서는 렌즈모듈을 이용하여, 현재 널리 이용되고 있는 4군 구성의 후군초점조정 방식인 비디오 카메라용 줌렌즈에^[9,10] 대해 시스템의 특성을 만족시키는 최적의 초기설계를 행하고, 이를 통해 실제렌즈(real lens)를 설계 하고자 한다.

II. 렌즈모듈을 이용한 최적의 초기설계

그림 1은 4군 구성, 후군초점조정 방식의 비디오 카메라용 줌광학계이다. 물점(object point)으로 부터 본 광학계는 1군, 2군, 3군, 4군으로 구성되어 있으며, K_1, K_2, K_3, K_4 는 각 군의 굴절능(optical power)이다. 줌광과정에서 1군과 3군은 항상 고정되어 있고, 2군은 줌배율 변경, 4군은 상면을 항상 동일한 위치에 고정시키는 초점조정 기능을 한다. 그림 1에서 $Z_{11}, Z_{21}, Z_{31}, Z_{41}$ 는 초점거리가 가장 짧아 시야각이 큰 줌위치(wide position 또는 zoom position 1)에서의 이웃한 주요면(H, H') 간의 거리이다. 제 2군의 이동량이 최대일때, 즉 시야각이 가장 작은 줌위치(tele position 또는 zoom position 3)에서 광학계의 초점거리는 가장 길고, 줌위치 2는 wide 와 tele

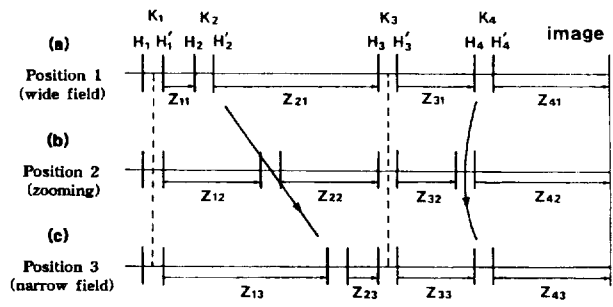


그림 1. 후군초점 조정방식인 4군 줌광학계의 구성도.

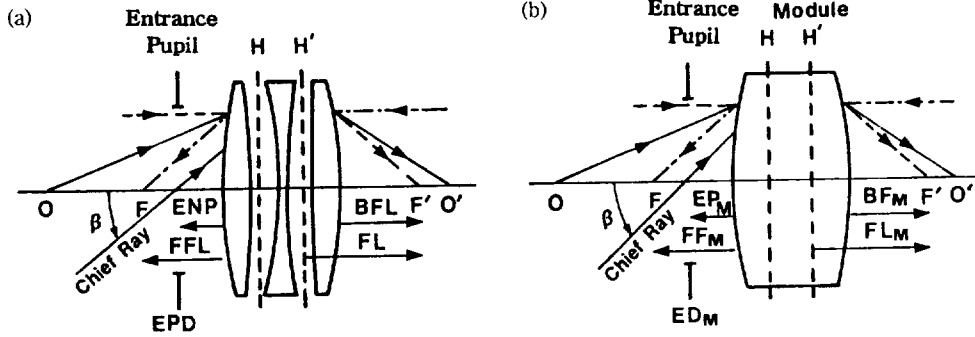


그림 2. 광학계의 1차특성을 나타내는 파라미터.

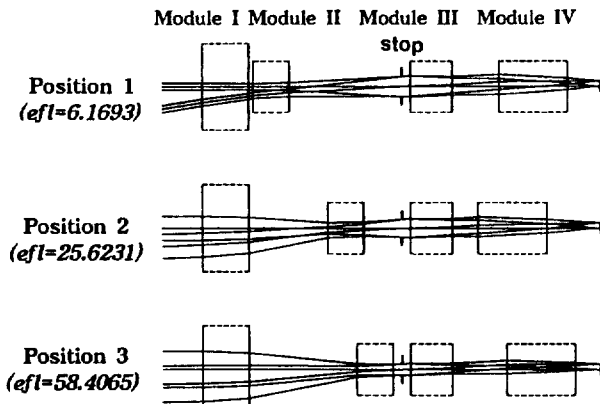


그림 3. 4군 구성의 최적화된 렌즈모듈 줌광학계.

position간의 중간위치에 해당된다. 각 군이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하면 거리는 양의 값을 갖고, 물점은 무한대에 위치하고 있다.

줌광학계의 군은 그림 2(a) 처럼 몇개의 렌즈로 구성되어 있다. 광학계의 고차수차를 무시한다면, 주어진 물상점(conjugate points)에서 광학계의 특성은 1차량과 3차 수차량으로 정확하게 표현될 수 있다. 다시말해서 렌즈모듈의 1차량과 3차 수차량을 실제 광학계에 일대일 대응 시키면, 두 광학계는 3차 특성내에서 서로 등가(equivalent)라는 관계가 성립된다. 따라서 줌광학계의 각 군은 그림 2에서 보여진 바와 같이 동일한 1차량 및 3차 수차 특성을 갖는 thick lens module로 대체시키는 것이 가능하다. 그림 2에서 FL_M , FF_M , BF_M , MG_M , EP_M , ED_M , β 는 렌즈모듈의 촛점거리, 전촛점거리, 후촛점거리, 배율, 입사동 위치, 입사동 크기 및 시야각 이다.

최적화 기법을 이용하여 초기설계를 행하기 위해서는 임의의 초기 layout을 설정 해야할 필요가 있다. 우선 줌광학계의 각 군을 일정한 두께를 갖는 모듈(thick lens module)로 대체시키고, 줌기능을 갖도록 각각의 모듈에 적절한 1차량을 대충 입력시킨다.^[11,12] 줌광학계에서 군은 되도록이면 독립적으로 색수차를 보정시키는 것이 필요하다. 그림1 에서 1군, 3군 및 4군은 양의 굴절능을, 2군은 음의 굴절능을 갖는다고 가정 하였다. 또한 줌광학계의 조리개(stop)는 3군, 즉 세번째 모듈앞에 설정하므로써, 조리개에 대하여 광학계가 대칭이 되도록 하였으며 이는 수차보정을 하는데 매우 효과적이다. 그리고 조리개

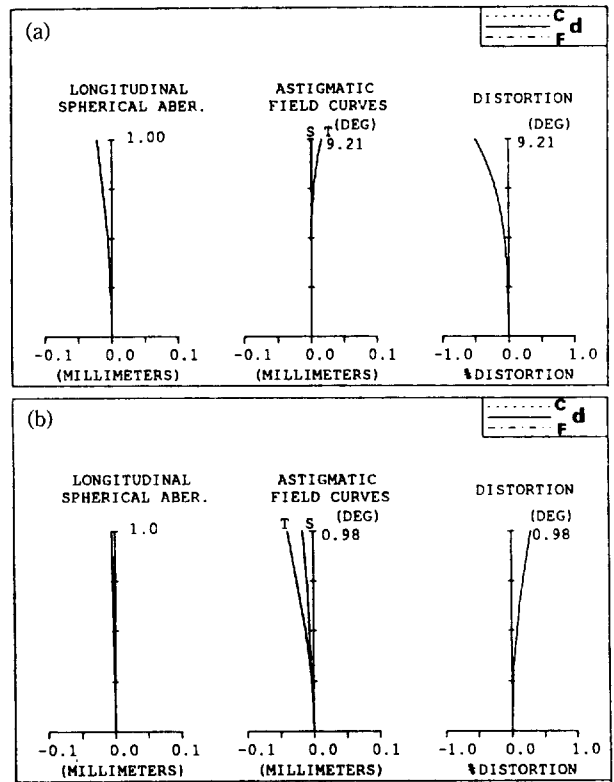


그림 4. 4군 구성인 렌즈모듈 줌광학계의 수차특성. (a) 줌위치 1, (b) 줌위치 3.

와 세번째 모듈간의 공기간격은 기구적인 결합에 필요한 공간이 충분히 확보되도록, 1.5 mm로 설정하였다. 본 연구에서의 렌즈모듈은 고차수차(higher order aberrations)를 무시하고, 1차량과 3차 수차만을 다루고 있고, 3차 수차는 근축영역에서 우세하므로 광학계의 구경(aperture)과 상크기(image field size)를 작게 설정하는 것이 바람직 하다. 본 연구에서는 half image size를 1 mm, 줌위치 1, 2, 3에서 구경비는 각각 F/5, F/6, F/9로 설정 하였다. 10배의 줌비를 갖는 최적의 줌광학계를 갖기 위해, 시스템에서 요구되는 조건을 constraints로 설정하고, 모듈의 파라미터 즉, 각군의 촛점거리(FL_M), 후촛점거리(BF_M), 전촛점거리(FF_M), 배율(MG_M), 줌계적(Z_M) 그리고 3차 수차량(W_{3M})을 변수로 하여, 최적화 S/W를 활용하여 초기설계를 행했다. 초기설계 과정에서 고려된 구속조건은 다음과 같다.

표 1. 렌즈모듈 줌광학계의 설계 Data.

	Module I	Module II	Module III	Module IV
FL _M	32.5364	-6.9987	23.9320	15.9632
FF _M	-30.4688	8.2646	-29.1932	-15.1853
BF _M	29.4469	-10.3432	15.5552	7.9257
MG _M	-0.1	-1.2621	0.1397	0.2579
ED _M	1.0	1.0	1.0	1.0
Field(β)	1.0°	1.0°	1.0°	1.0°
W ₀₄₀	0.00010	0.00832	0.00024	0.00511
W ₁₃₁	-0.00012	-0.00226	-0.00614	-0.01072
W ₂₂₂	0.00202	0.00857	0.00455	0.00161
W ₂₂₀	0.00195	0.00675	0.00275	0.00206
W ₃₁₁	0.00066	-0.00164	-0.00082	0.00094

표 2. 렌즈모듈 줌광학계의 1차량 및 줌계적.

	Position 1	Position 2	Position 3
<i>efl</i>	6.1693	25.6231	58.4065
<i>bfl</i>	5.9820	9.8136	4.6107
<i>ffl</i>	17.3451	62.5648	142.9176
<i>Z_{1i}</i>	5.1174	18.4594	23.6474
<i>Z_{2i}</i>	19.8017	6.4597	1.2717
<i>Z_{3i}</i>	17.5305	13.6989	18.9019
<i>Z_{4i}</i>	14.0195	17.8511	12.6481

첫째, 줌밍동안 각군들간에 충돌을 방지하고, 기구적인 결합공간(mounting space)을 적절히 확보하기 위해 모듈간의 거리는 최소 0.7 mm로 설정하였고, 둘째, 줌광학계의 크기를 작게 하기위해 전장(overall length)을 가능한한 최소가 되도록 구속 하였다. 세번째 구속조건으로서는, 줌비(10X)를 얻기위해 제 2군이 오른쪽으로 이동하는 동안, 촛점조절 렌즈인 4군의 이동량은 모든 줌영역에 걸쳐 최소가 되도록 하였다. 마지막으로, 필요한 주변광량비를 확보하기 위해 각각의 줌위치에서 vignetting이 최소가 되도록 구속조건을 설정하므로써, 본 과정을 통해 얻어진 초기설계치가 원하는 사양을 만족시키도록 하였다.

그림 3은 설계된 줌광학계의 layout 이며, 줌광학계의 촛점 거리는 줌위치 1에서 6.1693 mm, 촛점거리가 가장 긴 줌위치 3에서 58.4065 mm 로서 약 10배의 줌비를 갖는다. 그림 4는 초기설계된 광학계의 수차특성 이다. 표 1은 설계된 각 모듈의 data 이고, W₀₄₀, W₁₃₁, W₂₂₂, W₂₂₀, W₃₁₁은 중심 및 1.0 field에서 출발한 광에 대해 출사동의 끝단에서 계산된 3차 파면수차중 구면수차, 코마, 비점수차, Petzval curve, 왜곡수차이며, 단위는 d선(587.6 nm)의 파장 길이 이다. 표 2는 각 줌위치에서의 1차량 즉, 촛점거리(*efl*), 후촛점거리(*bfl*), 전촛점거리(*ffl*) 및 줌계적(*Z_{ij}*, *i*=1,2,3,4, *j*=1,2,3) 값을 보이고 있다.

III. Real Lens 설계

초기설계과정에서 얻은 각각의 모듈과 등가인^[12] 광학계를 구하기 위해서는 모듈의 1차량 및 3차 수차와 동일한 값을 갖는 real lens를 설계 해야 한다. 본 논문에서는 각 군의 구성을

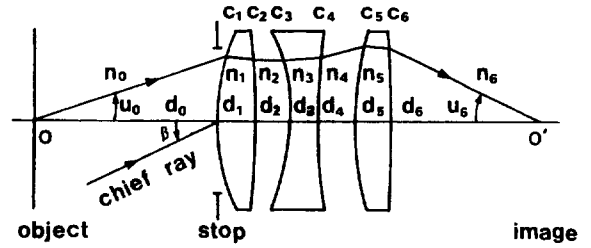


그림 5. 3매 구성 렌즈계의 schematic diagram.

그림 5와 같이 모든면이 구면인 3매 렌즈로 설정 하였다. 조리개는 첫번째 면(그림 5의 c1)에 위치하고, 주광선이 조리개 면에서 광축과 이루는 각도는 β이다. 따라서 주어진 물상점에서, 그림 5에서 보인 광학계의 촛점거리, 후촛점거리, 전촛점거리, 배율, 구면수차, 코마, 비점수차, Petzval 합, 왜곡수차, 종색수차 및 횡색수차는 다음의 식으로 표현된다.^[13]

$$\text{촛점거리 ; } f = 1/[k_1 \cdot -d_1/n_1, k_2 \cdot -d_2/n_2, k_3 \cdot -d_3/n_3, k_4 \cdot -d_4/n_4, k_5 \cdot -d_5/n_5, k_6] \quad (1)$$

$$\text{후촛점거리 ; } f' = [k_1 \cdot -d_1/n_1, k_2 \cdot -d_2/n_2, k_3 \cdot -d_3/n_3, k_4 \cdot -d_4/n_4, k_5 \cdot -d_5/n_5] \quad (2)$$

$$\text{전촛점거리 ; } -f \cdot [-d_1/n_1, k_2 \cdot -d_2/n_2, k_3 \cdot -d_3/n_3, k_4 \cdot -d_4/n_4, k_5 \cdot -d_5/n_5, k_6] \quad (3)$$

$$\text{배 율 ; } 1/[-d_0, k_1 \cdot -d_1/n_1, k_2 \cdot -d_2/n_2, k_3 \cdot -d_3/n_3, k_4 \cdot -d_4/n_4, k_5 \cdot -d_5/n_5, k_6] \quad (4)$$

$$\text{구면수차 ; } S_I = u_0^4 \sum a_j^2 g_{2j-1} W_j \quad (5)$$

$$\text{코 마 ; } S_{II} = u_0^3 \beta \sum a_j b_j g_{2j-1} W_j \quad (6)$$

$$\text{비점수차 ; } S_{III} = u_0^2 \beta^2 \sum b_j^2 g_{2j-1} W_j \quad (7)$$

$$\text{Petzval 합 ; } S_{IV} = H^2 \sum K_j / n_j n_{j-1} \quad (8)$$

$$\text{왜곡수차 ; } S_V = u_0 \beta^3 \sum b_j / a_j (b_j^2 g_{2j-1} W_j + d_0^2 k_j^2 / n_j n_{j-1}) \quad (9)$$

$$\text{종색수차 ; } S_L = -u_0^2 \sum a_j g_{2j-1} \Delta(\delta n / n) \quad (10)$$

$$\text{횡색수차 ; } S_T = -u_0 \beta \sum b_j g_{2j-1} \Delta(\delta n / n) \quad (11)$$

단, $a_j = [-d_0, k_1, \dots, -d_{j-1}/n_{j-1}, -c_j \cdot n_{j-1}]$,
 $b_j = [-d_1/n_1, k_2, \dots, -d_{j-1}/n_{j-1}, -c_j \cdot n_{j-1}]$,
 $W_j = g_{2j}/n_j^2 - g_{2j-2}/n_{j-1}^2$,
 $g_{2j} = [-d_0, k_1, \dots, -d_{j-1}/n_{j-1}, k_j]$,
 $g_{2j-1} = [-d_0, k_1, \dots, k_{j-1}, d_{j-1}/n_{j-1}]$,
 $g_{2j-2} = [-d_0, k_1, \dots, -d_{j-2}/n_{j-2}, k_{j-1}]$,
 $\Delta(\delta n / n)_j = \{(n_F - n_C) / n_d\}_j - \{(n_F - n_C) / n_d\}_{j-1}$.

위 식에서 $K_j(j=1, 2, \dots, 6)$ 는 굴절능이고, 기호 []는 Gaussian brackets를 나타낸다. 또한 $u_j(j=1, 2, \dots, 6)$ 는 축상광선의 convergence angle을, H는 Lagrangian invariant 이며, 굴절능 K_j 는 $c_j(n_j - n_{j-1})$ 로 주어지고, 여기서 c_j 및 n_j 는 각각 면의 곡률 및 굴절률을 나타낸다. 물체공간과 상공간에서의 굴절률은 모두 1.0으로 가정하였다. 본 렌즈가 모듈과 3차 수차내에서 완전한 등가를 이루기 위해서는 모든 1차량과 3차 수차가 서로 동일 하도록 해야 한다. 즉, 모듈의 1차량과 3차 수차량을 각군의

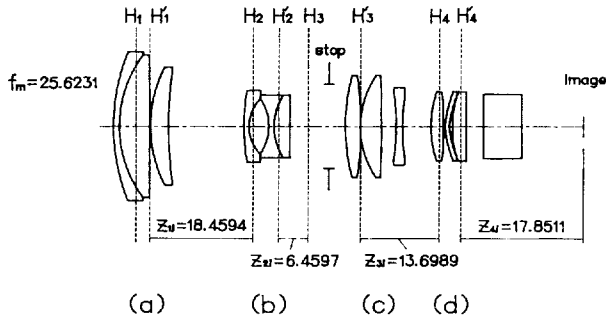


그림 6. 4군 줌광학계에서 군의 일반적인 형상 및 줌위치 2에서의 공기간격 조정(j=2). (a) 1군, (b) 2군, (c) 3군, (d) 4군.

렌즈계에 일대일 대응(assignment) 시키기 위해서는 식 (1)-(11)로 주어진 1차량과 3차 수차량에 관한 연립방정식을 모든 경우의 설계변수에 대해 풀고, 물리적으로 타당한 해를 선정해야 한다. 한편 수치해석적으로 렌즈모듈과 등가인 렌즈를 얻기 위해 식 (1)-(11)로 주어진 연립방정식을 동시에 다루는 것은 매우 복잡하며 많은 시간이 소요되므로, 식(1)-(4)로 주어진 1차량과 주요수차인 구면수차, 코마, 비점수차 및 색수차가 고려된 연구가 발표되었다.^[12] 좀더 부연하면 식(1)-(7)로 주어진 연립방정식을 풀어 1차량 및 구면수차, 코마, 비점수차내에서는 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 각군에 대해 적절한 구성을 선정하고, 각각의 렌즈모듈과 동일한 초점거리를 얻기 위해 선정된 렌즈의 각군을 초점거리에 대해 scaling 하고, 공기간격 조정을 함으로써 줌계적을 일치시키는 과정을 통해 얻은 초기 real lens 줌광학계를 얻고, 수차보정을 행해 최적의 광학계를 얻는 과정에 대해 다루고자 한다. 이러한 접근방법은 3차 수차를 해석적으로 다루지 않고, 최적설계된 초기설계치로부터 곧바로 줌광학계를 설정한후 잔여수차 보정을 행하므로, 과정이 매우 간단하고 빠른 시간내에 설계를 완성시킬 수 있는 것이 큰 장점이다.

각군이 독립적으로 색수차가 보정되거나 또는 최소의 값을 갖기 위해서는 광학유리를 적절히 선정해야 한다. 1군, 3군 및 4군의 초점거리는 표 1에서 보듯이 양의 값을 갖고 있으므로 이때의 광학유리 선택은 다음과 같이 crown glass는 양의 굴절능을 갖는 렌즈에, flint glass는 음의 굴절능을 갖는 렌즈에 적용 하였다. 한편, 제 2군처럼 초점거리가 음인 경우는 crown 및 flint glass는 각각 음 및 양의 굴절능을 갖는 렌즈에 사용 하였다. 이러한 광학유리 선택을 기초로 하고, 발표된 논문 또는 특허 및 앞서 설계된 자료로부터 각군의 특성을 파악하여 적절한 렌즈의 형태를 설정한다.

첫 번째 렌즈군은 그림 6(a)와 같이 doublet+single 렌즈 구성이 일반적이다. 제 1군에 사용된 doublet는 색수차와 코마 수차 보정에 매우 효과적이다. 이러한 형태를 갖는 렌즈군에 대해 표 1에서 주어진 렌즈모듈의 초점거리 $FL_{1j}=32.5364$

표 3. 초기설계된 real lens의 각군의 1차특성.

	1군	2군	3군	4군
FL_j	32.5364	-6.9987	23.9320	15.9632
FF_j	-29.9317	8.4719	-28.7872	-14.5791
BF_j	29.9257	-10.0902	15.8020	7.9257

mm와 동일 하도록 scaling 한다. 그림 6(b)는 2군의 일반적인 구성이며, single+doublet 형태로 주어지고, 특히 축상에서 앞·뒤로 이동하여 광학계의 초점거리를 변경시키므로 군의 초점거리를 작게해야 한다. 왜냐하면 2군의 굴절력이 크면 클수록 원하는 줌비를 얻기위해 군이 이동해야할 거리가 짧아지므로, 이는 곧 시스템의 길이 및 크기를 소형화시킬 수 있기 때문이다. 또한 2군은 강한 음의 굴절능을 갖어야 하며, 표 1에서 주어진 초점거리를 갖기 위해서는 그림 6(b)와 같은 구성이 바람직 하다. 제 3군은 2군에서 굴절된 광선을 4군에 relay하는 렌즈군으로서, 구면수차 보정 및 주변부의 밝기를 향상시키는 역할을 한다. 특히 조리개가 3군렌즈 앞단에 위치하고, 축상광선이 확장계 입사되므로 구면수차 보정에 매우 효과적이다. 본 연구에서는 설계 파라미터를 최대한 확보하고 색수차 보정을 위하여 그림 6(c)와 같이 접합렌즈가 아닌 단렌즈로 구성된 렌즈계를 설정 하였다. 제 4군은 초점조절렌즈로서, 2군의 이동에 따른 초점거리 변동시 상면을 항상 일정한 곳에 위치시키고, 또한 포커싱 시키는 역할을 한다. 따라서 초점거리가 짧아야 하고, 또한 잔여수차 보정을 위해서는 그림 6(d)와 같이 (+), (-), (+)의 렌즈구성이 효과적이다.

위 과정을 통해 각군의 구성을 대략 결정한후 표 1에서 주어진 모듈의 초점거리와 동일하도록 각각의 군의 초점거리를 scaling 한다. 그리고 scaling된 렌즈 각군의 주요면(H, H')을 계산한후, 후초점거리, 전초점거리를 구한다. 표 3은 위에서 선정된 군의 초점거리(FL_j), 전초점거리(FF_j) 및 후초점거리(BF_j) 이다. 현재의 줌광학계가 그림 3에서 주어진 렌즈모듈 줌광학계와 동일한 1차특성을 갖기 위해서는 표 2에서 주어진 줌계적과 일치하도록 공기간격을 조절 해야한다. 예를들면, 그림 6 및 표 3의 광학계에서 1군의 제 2주요면(H₁')으로부터 2군의 제 1주요면(H₂) 까지의 거리는 줌위치 2에서(j=2) 표 2에서 보듯이 $Z_{12}=18.4594$ 이므로, 1군과 2군사이의 공기간격(d_{12})는 다음과 같이 주어진다.

$$d_{12} = Z_{12} - (FL_1 - BF_1) - (FL_2 + FF_2) = 14.3755. \quad (12)$$

이와같은 방법으로 모든 줌위치에 대해서 이웃한 군간의 공기간격을 계산할 수 있으며, 계산된 결과를 표 4에 정리하였다.

IV. 줌광학계의 고차수차 보정

앞 절에서 독립적으로 설계된 각각의 군을 표 4에서 주어진 줌계적에 따라 결합시키고, 광학계의 구경 및 field 크기를 요구되는 사양을 만족시키도록 적절히 확대하면 그림 7과 같다. 표 4에 정리된 1차량은 줌위치에 따른 광학계의 초점거리(eff), 후초점거리(bff) 및 전초점거리(fff)에 해당되며, fff 를 제외하고, 줌계적을 포함한 모든 1차특성은 렌즈모듈로 구성된 줌광

표 4. 초기설계된 real lens 줌광학계의 1차량 및 공기간격.

	Position 1	Position 2	Position 3
<i>efl</i>	6.1693	25.6231	58.4066
<i>bfl</i>	5.9821	9.8137	4.6108
<i>ffl</i>	17.8822	63.1021	143.4562
<i>d_{1i}</i>	1.0335	14.3755	19.5634
<i>d_{2i}</i>	20.4713	7.1293	1.9413
<i>d_{3i}</i>	8.0164	4.1848	9.3878
<i>d_{4i}</i>	5.9821	9.8137	4.6108

표 5. 최적화된 real lens 줌광학계의 1차량 및 줌 계적.

	Position 1	Position 2	Position 3
<i>efl</i>	6.1694	25.6232	58.4068
<i>bfl</i>	5.9819	9.8135	4.6107
<i>ffl</i>	17.3451	62.5654	142.9202
<i>Z_{1i}</i>	5.1174	18.4594	23.6474
<i>Z_{2i}</i>	19.8017	6.4597	1.2717
<i>Z_{3i}</i>	17.5305	13.6989	18.9019
<i>Z_{4i}</i>	14.0194	17.8510	12.6480

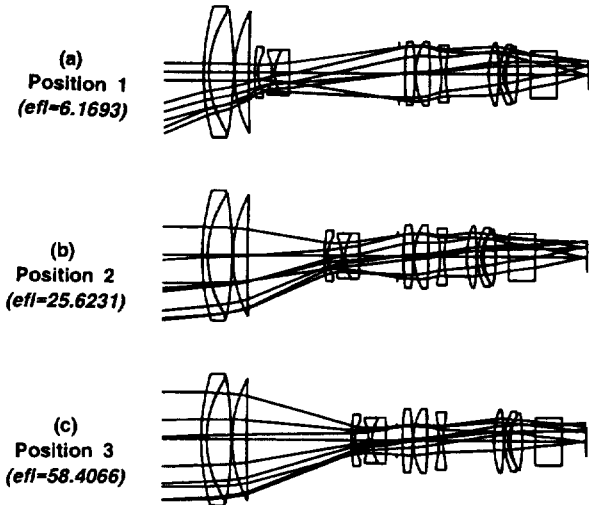


그림 7. 독립적으로 설계된 군을 결합시켜 얻은 초기 real lens 줌광학계. 상크기는 1/3" CCD 대응임. (a) 줌위치 1 (F/1.7), (b) 줌위치 2 (F/2.1), (c) 줌위치 3 (F/2.95).

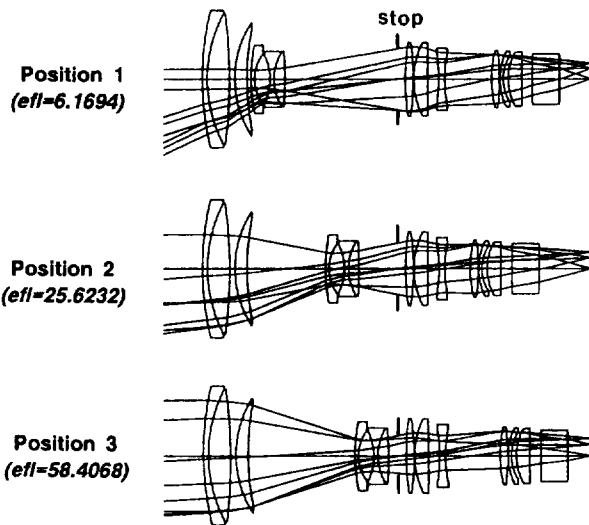


그림 8. 최적설계된 줌광학계

학계와 완벽하게 일치한다. 따라서 처음부터 고려되지 않은 고차수차 및 3차 수차량은 일치하지 않지만, 1차특성내에서 거의 등가인 관계가 성립한다.

한편 그림 3의 렌즈모듈 줌광학계의 구경(F/수) 및 상크기는 작게 설정되어 있으므로 현재의 제품사양을^[14] 만족시키기

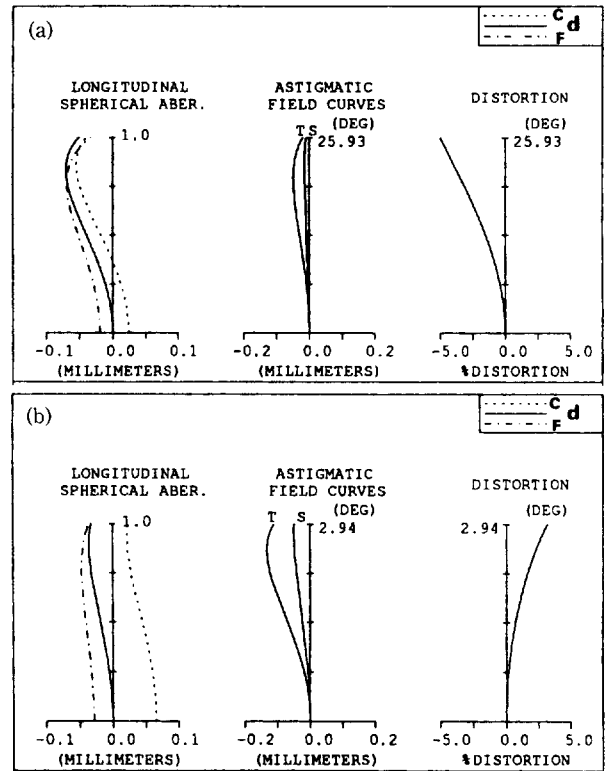


그림 9. 최적설계된 줌광학계의 수차특성. (a) 줌위치 1, (b) 줌위치 3.

위해 줌위치 1, 2, 3에서의 F/수는 각각 F/1.7, F/2.1, F/2.95로 설정하였으며, 모든 줌위치에서의 상크기는 detector로서 1/3인치 CCD를 적용할 수 있도록 반경 3 mm로 확대하였다. 그러나 큰 구경비 및 상크기를 갖는 광학계는 그림 7의 광선도에서 볼 수 있듯이 고차수차가 추가로 발생한다. 고차수차 보정 및 광학계의 전체적인 성능을 향상시키기 위하여 그림 7의 줌광학계를 초기 data로 잡고 최적화를 행했다. 이 과정에서 1차량, 즉 모든 군의 초점거리, 줌계적 및 전장(OAL)을 고정시켰다. 그림 8은 최적화 및 수차보정 과정을 통해 얻은 줌광학계의 layout 이고, 표 5는 위 광학계의 1차량 및 줌계적이다. 최적설계된 줌광학계의 1차량은 렌즈모듈 줌광학계 및 표 4의 초기설계된 줌광학계와 동일함을 알 수 있다. 그림 9는 최적설계된 광학계의 수차특성이고, 고차수차가 잘 보정되어 있으며, 그림 10은 공간주파수 50 lp/mm에서 MTF(Modulation Transfer Function)를 계산한 결과이다. 그림 10에서 보

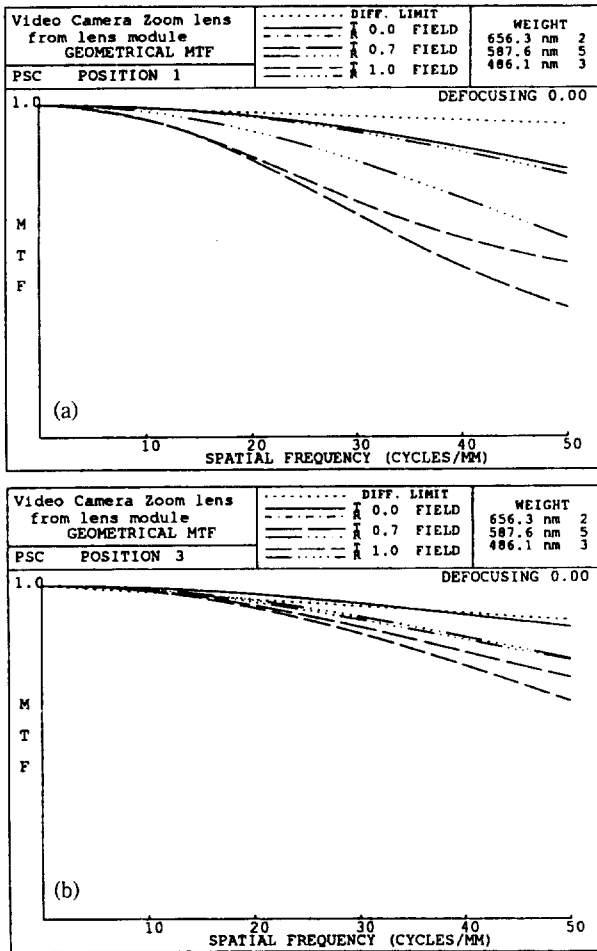


그림 10. 최적설계된 줌광학계의 MTF 특성. (a) 줌위치 1, (b) 줌위치 3.

듯이 모든 줌영역에서 줌광학계는 40% 이상의 MTF를 확보하고 있음을 알 수 있다. 또한 주변광량비도 최소 30% 이상을 유지하고 있으므로, 결과적으로 본 줌광학계는 현재의 제품사양을 충분히 만족시키는 성능을 갖는다.

V. 결 론

렌즈모듈의 개념을 이용하여 줌광학계를 설정하고, 줌광학계가 주어진 구속조건을 만족시키고, 줌비 10X를 갖도록 각 모듈의 1차량 및 3차 수차량을 최적화 과정을 통해 적절히 할당하였다. 이과정을 통해 얻은 초기줌광학계는 제품의 요구조건을 만족시키도록 설계되었고, 무엇보다도 별도의 수치계산 없이 원하는 초기설계치를 빠른 시간내에 얻을 수 있었다.

렌즈모듈로 구성된 초기설계된 줌광학계와 동일한 1차특성을 갖는 실제 줌광학계를 얻기위해 각각의 군에대해 적절한 구성을 선정하고, 각각의 군의 초점거리가 렌즈모듈의 초점거리와 같도록 scaling 한후, 군사이의 공기간격을 조정하므로써 줌계적을 일치시켰다. 이러한 과정을 통해 독립적으로 설계된 군들을 결합시켜 얻은 줌광학계는 렌즈모듈로 구성된

초기설계 줌광학계와 거의 동일한 1차특성을 갖는다.

현재의 제품특성 및 성능을 만족시키는 광학계를 얻기위해 구경 및 상크기를 적절히 확대하였고, 이때 발생하는 고차수차를 보정하기위해 그림 7에서 주어진 초기설계된 real lens를 최적화 하였다. 최적화 과정에서 각군의 초점거리, 줌계적, 줌비 및 전장을 고정 시켰으며, 최종적으로 얻어진 줌광학계는 초기설계 줌광학계와 동일한 1차특성을 갖는다. 또한 줌위치 1, 2, 3에서 F/수는 각각 F/1.7, F/2.1, F/2.95이며, 그리고 1/3" CCD에 해당되는 half image size 3mm에서 비디오 카메라 줌렌즈로서 충분한 성능을 보유하고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제안된 줌광학계 설계는 무엇보다도 빠른 시간내에 시스템의 특성을 만족시키는 최적의 초기설계를 행할 수 있으며, 초기설계된 광학계로부터 실제 줌광학계설계 또한 쉽게 접근할 수 있다는 것이 큰 장점이다.

참 고 문 헌

- [1] K. Tanaka, "Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 1: Four-component type," *Appl. Opt.* **21**(12), 2174-2183 (1982).
- [2] K. Tanaka, "Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 2: Generalization of Yamaji type V," *Appl. Opt.* **21**(22), 4045-4053 (1982).
- [3] L. Bergstein and L. Motz, "Four-component optically compensated varifocal system," *J. Opt. Soc. Am* **52**(4), 376-388 (1962).
- [4] K. Yamaji, "Design of zoom lenses," in *Progress in Optics VI*, E. Wolf, ed., pp. 105-170, North-Holland, Amsterdam (1967).
- [5] M. S. Yeh, S. G. Shiue, and M. H. Lu, "Two-optical-component method for designing zoom system," *Opt. Eng.* **34**(6), 1826-1834 (1995).
- [6] O. N. Stavroudis and R. I. Mercado, "Canonical properties of optical design modules," *J. Opt. Soc. Am* **65**(5), 509-517 (1975).
- [7] R. I. Mercado and O. N. Stavroudis, "Multimodule optical systems," *J. Opt. Soc. Am* **65**(10), 1133-1140 (1975).
- [8] T. G. Kuper and M. P. Rimmer, "Lens modules in optical design," *Proc. SPIE* **892**, 140-151 (1988).
- [9] K. Tanaka, "A novel configuration of zoom lens," *Optik* **73**(4), 157-159 (1986).
- [10] K. Tanaka, "Zoom lens," U. S. Patent No. 4,859,042 (1989).
- [11] S. C. Park and K. B. Kim, "Video camera zoom lens design using lens modules," *Proc. SPIE* **2539**, 192-199 (1995).
- [12] S. C. Park and R. R. Shannon, "Zoom lens design using lens modules," *Opt. Eng.* **35**(6), 1668-1676 (1996).
- [13] W. T. Welford, *Aberrations of the Optical Systems*, pp. 130-158, Adam Hilger Ltd., Bristol (1986).
- [14] J. Nakagawa, "Recent development of the photographic and video lens," *Optics (in Japanese)*, **20**(2), 52-57 (1991).

Optical system design using lens modules I : optimum first order design in zoom lens

Sung Chan Park and Yeong Sik Kim

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

(Received : October 21, 1996)

This paper presents the optimum initial design containing the first and third order properties of the four-group video camera zoom system using lens modules, and its real lens design. The optimum initial design with focal length range of 6.1693 to 58.4065 mm is derived by assigning appropriate first order quantities and third order aberrations to each module along with the specific constraints required for optimization. By scaling the focal length of each lens group, an initial real lens selected for each group has been designed to match its focal length into that of the each lens module, 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 consisting of original lens modules. As a result, by residual aberration correction, we could obtain a zoom system useful in video zoom camera employing the rear focus method.