

복합렌즈계를 이용한 폰 카메라용 초소형 줌렌즈 설계

박성찬[†] · 유병택

단국대학교 첨단과학대학 전자물리학과
☎ 330-714 충청남도 천안시 안서동 산 29번지

(2008년 8월 7일 받음, 2008년 8월 19일 게재 확정)

본 논문은 이너 포커싱 3군 줌렌즈에 대해 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로의 변환과정을 줌렌즈계 내에서 실행하는 복합렌즈계(얇은 렌즈+두꺼운 렌즈)의 개념을 적용하여 효과적이면서 신속한 초기설계 방법을 제안하였다. 즉, 복합렌즈계란 줌렌즈계의 전체 굴절능 및 줌렌즈계 내에 각 군의 굴절능, 군과 군사이의 주요면 간의 거리를 일정하게 유지하면서 하나 이상의 군들을 얇은 렌즈로 구성하고 다른 군을 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환하는 과정을 갖는 반자동 최적화 설계방법이다. 순차적으로 얇은 렌즈로 구성된 다른 군들도 동일한 개념으로 두꺼운 렌즈로 변환이 가능하다.

결과적으로 본 개념을 적용하여 최적설계된 1/4" 5 M 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈는 폰 카메라용 줌렌즈로서 사양과 성능을 충분히 만족시켰다. 또한 렌즈를 비구면화하고, 렌즈의 형태에 따라 비구면 유리 및 플라스틱 재질을 적용하여 슬림화(전장 9.8 mm 이하) 및 고해상도 특성을 만족시키는 폰 카메라용 초소형 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈를 얻을 수 있었다.

주제어: Zoom lens, Hybrid lens system, Phone camera, Optimization, Aberrations.

I 서 론

줌렌즈란 어떤 수단에 의해서 상면을 안정적으로 유지한 채, 광축을 따라 일부의 렌즈군을 움직여서 광학계의 초점거리나 배율을 연속적으로 변화시킬 수 있는 광학계이다. 초기의 줌렌즈는 1차 세계대전 때 적기의 출현을 감지하기 위해 개발되었다. 목표물을 시야에서 놓치지 않기 위해 렌즈의 교체 없이 배율이 변하는 렌즈가 필요하여 개발된 것이 줌렌즈의 시초라 할 수 있다.

줌렌즈는 기구보정식, 광학보정식 및 전자보정식으로 나눌 수 있는데 고전적인 의미에서의 줌렌즈란 기구보정식을 의미한다. 이 기구보정식 줌렌즈는 다른 배율을 갖기 위해서 줌링 렌즈군(zooming lenses)을 이동시키면 상면의 위치변화가 발생하는데, 이때 발생하는 상면의 위치변화를 렌즈계 내부의 또 다른 렌즈군의 위치를 변화시켜 보정할 수 있다. 이런 역할을 하는 렌즈군을 보상 렌즈군(compensating lenses)이라 한다. 보상 렌즈군의 이동은 선형적으로 변화하지 않기 때문에 1970년대 이전의 줌렌즈 개발은 어려움이 있었다. 이후 비선형 캠(CAM)가공이 가능해지면서 기구보정식의 줌렌즈가 활성화 되었는데 이는 광학계 내부의 렌즈군을 비선형적으로 이동시켜서 상면을 정확하게 일치시킬 수 있게 되어, 광학계 설계상의 많은 제약조건을 해결하였기 때문이다. 최근에는 3차원 캠가공과 플라스틱 사출(plastic injection) 및 유리 압축성형(glass molding press; GMP)을 통한 비구면렌즈 가공 및 제작기술의 발달로 수차보정 및 소형화등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1]

줌렌즈 설계는 일반적으로 두 개의 과정으로 나눌 수 있다.

1차량 설계를 통한 줌렌즈계의 구성도를 설정하는 초기설계 과정과 이로부터 수차보정을 행하는 최적화과정으로 분류된다.^[2,3] 본 논문은 줌렌즈계의 내부에 위치한 렌즈군을 이동시켜서 초점을 조절하는 방식인 이너 포커싱(inner-focusing) 3군 구성의 줌렌즈에 대해 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로의 변환 과정을 줌렌즈계 내에서 진행하는 복합렌즈계(hybrid lens system)의 개념을 적용하여 효과적이면서 신속한 초기설계방법을 제안하고자 한다. 즉, 복합렌즈계란 줌렌즈계의 전체 굴절능과 줌렌즈계 내에 각 군의 굴절능, 군과 군사이의 주요면 사이의 거리를 일정하게 유지하면서 하나 이상의 군들을 얇은 렌즈로 구성하고 다른 군을 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환하는 과정을 갖는 반자동 설계방법이다. 얇은 렌즈로 구성된 다른 군들도 순차적으로 동일한 개념을 이용하여 두꺼운 렌즈로 변환이 가능하다. 또한 각 군의 초점거리 및 수차 의존도를 고려하여 각 군에 렌즈를 추가하는 과정에도 본 개념은 매우 유용하다.

본 논문에서 설계하고자 하는 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈계는 1/4" 5 M CMOS(complementary metal oxide semiconductor) 또는 CCD(charge coupled device)의 이미지 센서(image sensor)를 사용하며, 현재 시장에서 주목받고 있는 슬림형 폰 카메라의 두께가 14.0 mm 이하이므로 이를 고려하여 전장(TTL)을 10.0 mm 이하로 설정하였다. 또한 초점거리가 3.7~7.4 mm로 2배의 줌비(zoom ratio)를 가지며, F/수는 3.2~5.1이고, 1군과 2군은 각각 1매, 3군은 3매 구성이며, 이미지센서면 앞에 적외선 차단필터를 삽입하여 최근 시장에서 요구하는 휴대폰용 디지털 카메라에 응용을 목표로 하고 있다.

[†]E-mail: scpark@dankook.ac.kr

II. 3군 줌렌즈계의 근축설계 및 궤적특성

2.1. 근축설계

3군 줌렌즈계의 경우 초점보정방식 및 이동군의 위치에 따라 여러 형태로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 폰 카메라의 특징을 고려하여 2군과 3군이 이동하고 1군부터 상면까지의 거리가 모든 줌 위치에서 고정된 형태의 줌광학계를 선정하여 기초설계 및 궤적분석을 하려고 한다.^[4] 그림 1은 1군이 고정된 이너 포커싱 3군 줌 광학계의 개략도이다. 그림 1에서 k_1, k_2, k_3 는 각 군의 굴절능이고, z_{1w}, z_{2w}, bf_w 는 wide 위치에서 이웃한 군 간의 주요면 사이 거리이고, z_{1t}, z_{2t}, bf_t 는 tele 위치에서 이웃한 주요면 사이 거리이다. 광학계의 전체 굴절능을 K 라고 하고, 광학계의 전체길이는 T 로 규정할 때, 물체가 무한거리에 있으며 광학계의 1군이 고정되어 있고 2군과 3군이 이동하는 경우 미지수 $k_1, k_2, k_3, z_1, z_2, bf, K, T$ 에 대해 초점거리($efl = 1/K$), 후초점거리(bf) 및 광학계의 전장(T)에 대한 식은

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

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

$$T = z_1 + z_2 + bf \tag{3}$$

와 같이 주어지고, 위 식 (1), (2)를 가우스 괄호의 성질을 이용하여 풀고, 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 아래와 같이 두 개의 식으로 정리할 수 있다.

$$k_1 + k_2 - z_1 k_1 k_2 - (z_1 + z_2) K k_3 + K T k_3 = K \tag{4}$$

$$z_1 k_1 + K(z_1 + z_2) z_2 k_3 + K T - z_2 K T k_3 = 1 + z_1 K \tag{5}$$

위 식의 미지수 중 각 군의 굴절능(k_i), 광학계의 전체 굴절능(K) 및 광학계의 전장(T), 즉 k_1, k_2, k_3, K, T 를 알고 있다면, z_1, z_2 에 대한 전개로 z_1, z_2 를 구하고 식 (3)으로부터 bf 를 구할 수 있다. 따라서 식 (4)와 (5)를 이용하여 구하고자 하는 4개의 미지수 k_1, k_2, k_3 와 T 를 wide 위치와 tele 위치에 대한 식을 만들고 이를 연립방정식을 풀어 미지수 4개의 해를 얻을 수 있다. 식을 간단히 하기 위하여 행렬식을

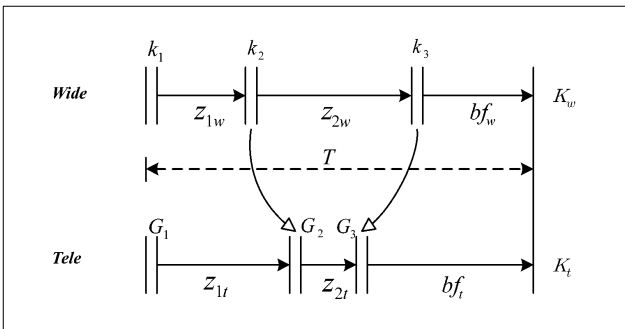


그림 1. 이너 포커싱 3군 줌렌즈계의 개략도.

도입하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -z_{1w} & -(z_{1w} + z_{2w})K_w & 0 & K_w \\ z_w & 0 & 0 & (z_{1w} + z_{2w})z_{2w}K_w & K_w & -z_{2w}K_w \\ 1 & 1 & -z_{1t} & -(z_{1t} + z_{2t})K_t & 0 & K_t \\ z_{1t} & 0 & 0 & (z_{1t} + z_{2t})z_{2t}K_t & K_t & -z_{2t}K_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_1 k_2 \\ k_3 \\ T \\ k_3 T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_w \\ 1 + z_{1w}K_w \\ K_t \\ 1 + z_{1t}K_t \end{pmatrix}$$

위 연립방정식의 해를 구하기 위하여 Gauss-Jordan 소거법을 적용하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & a_{15} & a_{16} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & a_{25} & a_{26} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & a_{35} & a_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a_{45} & a_{46} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_1 k_2 \\ k_3 \\ T \\ k_3 T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{17} \\ a_{27} \\ a_{37} \\ a_{47} \end{pmatrix} \tag{6}$$

위의 식 (6)에서 행렬의 원소들은 다음과 같이 주어진다.

$$a_{15} = (K_t K_w z_{1t} z_{2t} + K_t K_w z_{2t}^2 - K_t K_w z_{1w} z_{2w} - K_t K_w z_{2w}^2) / x$$

$$a_{16} = (-K_t K_w z_{1t} z_{2t} z_{2w} + K_t K_w z_{1w} z_{2t} z_{2w} - K_t K_w z_{2t}^2 z_{2w} + K_t K_w z_{2t} z_{2w}^2) / x$$

$$a_{17} = (1 + K_t z_{1t}) / z_{1t} + K_t z_{2t} y (z_{1t} + z_{2t}) / (z_{1t} x)$$

$$a_{25} = -K_t / z_{1t} + z_{1t} (K_w z_{1t} - K_t z_{1w}) / \{(z_{1t} - z_{1w}) x\} - (K_w z_{1t} - K_t z_{1w}) (K_t z_{1t}^2 + 2K_t z_{1t} + K_t z_{2t}^2) / (z_{1t} x)$$

$$a_{26} = (K_t K_w z_{1t}^2 z_{1w} z_{2t} - K_t K_w z_{1t} z_{1w}^2 z_{2t} + K_t K_w z_{1t} z_{1w} z_{2t}^2 - K_t K_w z_{1t}^2 z_{1w} z_{2w} + K_t K_w z_{1t} z_{1w}^2 z_{2w} + K_t K_w z_{1t}^2 z_{2t} z_{2w} - 4K_t K_w z_{1t} z_{1w} z_{2t} z_{2w} + K_t K_w z_{1w}^2 z_{2t} z_{2w} + K_t K_w z_{1t} z_{2t} z_{2w}^2 - K_t K_w z_{1w} z_{2t}^2 z_{2w} + K_t K_w z_{1t} z_{1w} z_{2w}^2 - K_t K_w z_{1t} z_{2t} z_{2w}^2 + K_t K_w z_{1w} z_{2t} z_{2w}^2) / \{(z_{1t} - z_{1w}) x\}$$

$$a_{27} = -1 / z_{1t} - y (K_t z_{1t}^2 + 2K_t z_{1t} + K_t z_{2t}^2) / (z_{1t} x) - z_{1t} (K_t - K_w) / (z_{1t} - z_{1w}) + y \{K_t z_{1t}^2 + 2K_t z_{1t} - K_t z_{2t} z_{1t} - K_w z_{1t} (z_{1w} + z_{2w})\} / \{(z_{1t} - z_{1w}) x\}$$

$$a_{35} = (K_w z_{1t} - K_t z_{1w}) (K_t z_{1t} - K_w z_{1w} + K_t z_{2t} - K_w z_{2w}) / \{(z_{1t} - z_{1w}) x\}$$

$$a_{36} = (K_t K_w z_{1t} z_{1w} z_{2t} - K_t K_w z_{1w}^2 z_{2t} + K_t K_w z_{1w} z_{2t}^2 - K_t K_w z_{1t} z_{2w}^2 + K_t K_w z_{1t} z_{1w} z_{2w} - K_t K_w z_{1t} z_{2t} z_{2w} - K_t K_w z_{1w} z_{2t} z_{2w} + K_t K_w z_{1t} z_{2w}^2) / \{(z_{1t} - z_{1w}) x\}$$

$$a_{37} = (-K_t + K_w) / (z_{1t} - z_{1w}) + y \{K_t z_{1t}^2 + 2K_t z_{1t} - K_t z_{2t} z_{1t} - K_w z_{1t} (z_{1w} + z_{2w})\} / \{z_{1t} (z_{1t} - z_{1w}) x\}$$

$$a_{45} = (-K_w z_{1t} + K_t z_{1w}) / x$$

$$a_{46} = (-K_t z_{1w} z_{2t} + K_w z_{1t} z_{2w}) / x$$

$$a_{47} = -y / x$$

여기서,

$$x = K_t z_{1t} z_{1w} z_{2t} + K_t z_{1w} z_{2t}^2 - K_w z_{1t} z_{1w} z_{2w} - K_w z_{1t} z_{2w}^2,$$

$$y = z_{1t} - z_{1w} - K_i z_{1t} z_{1w} + K_w z_{1t} z_{1w}$$

이다.

또한, 식 (6)을 행 별로 풀어 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$k_1 + a_{15}T + a_{16}k_3T = a_{17} \quad (7)$$

$$k_2 + a_{25}T + a_{26}k_3T = a_{27} \quad (8)$$

$$k_1k_2 + a_{35}T + a_{36}k_3T = a_{37} \quad (9)$$

$$k_3 + a_{45}T + a_{46}k_3T = a_{47} \quad (10)$$

식 (7), (8), (10)을 각각 T , k_1 , k_2 에 대해 정리하면, 다음과 같다.

$$T = \frac{a_{47} - k_3}{a_{45} + a_{46}k_3}, \quad k_1 = a_{17} - a_{15}T - a_{16}Tk_3, \quad (11)$$

$$k_2 = a_{27} - a_{25}T - a_{26}Tk_3$$

위에 식 (11)들을 식 (9)에 순차적으로 대입하면, k_3 에 대한 4차 방정식이 다음과 같이 주어진다.

$$\therefore C_1k_3^4 + C_2k_3^3 + C_3k_3^2 + C_4k_3 + C_5 = 0 \quad (12)$$

여기서, $C_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 항에 관한 값은 다음과 같다.

$$C_1 = a_{16}a_{26}$$

$$C_2 = a_{17}a_{26}a_{46} + a_{15}a_{26} + a_{16}a_{27}a_{46} + a_{16}a_{25} - 2a_{16}a_{26}a_{47} - a_{36}a_{46}$$

$$C_3 = a_{17}a_{27}a_{46}^2 + a_{17}a_{25}a_{46} - a_{17}a_{26}a_{47}a_{46} + a_{17}a_{26}a_{45} + a_{15}a_{27}a_{46} + a_{15}a_{25} - 2a_{15}a_{26}a_{47} - a_{16}a_{27}a_{47}a_{46} + a_{16}a_{27}a_{45} - 2a_{16}a_{25}a_{47} + a_{16}a_{26}a_{47}^2 - a_{35}a_{46} + a_{36}a_{47}a_{46} - a_{36}a_{45} - a_{37}a_{46}^2$$

$$C_4 = 2a_{17}a_{27}a_{45}a_{46} - a_{17}a_{25}a_{47}a_{46} + a_{17}a_{25}a_{45} - a_{17}a_{26}a_{47}a_{45} - a_{15}a_{27}a_{47}a_{46} + a_{15}a_{27}a_{45} - 2a_{15}a_{25}a_{47} + a_{15}a_{26}a_{47}^2 - a_{16}a_{27}a_{47}a_{45} + a_{16}a_{25}a_{47}^2 + a_{35}a_{47}a_{46} - a_{35}a_{45} + a_{36}a_{47}a_{45} - 2a_{37}a_{45}a_{46}$$

$$C_5 = a_{17}a_{27}a_{45}^2 - a_{17}a_{25}a_{47}a_{45} - a_{15}a_{27}a_{47}a_{45} + a_{15}a_{25}a_{47}^2 + a_{35}a_{47}a_{45} - a_{37}a_{45}^2$$

결과적으로 k_3 에 대한 4차 방정식을 Bairstow's method를 이용하여 해를 구하고, 이를 식 (11)의 T , k_1 , k_2 에 대입하여 해당되는 값을 차례로 구할 수 있다.

2.2. 궤적분석

각 군의 굴절능 k_1 , k_2 , k_3 와 광학계의 전체 길이 T 를 식 (11)과 식 (12)에서 주어진 근축 설계과정을 통해 얻었을 경우 z_1 , z_2 , bf , K 가 미지수로 남게 된다. 그러나 이들 미지수 중 하나를 변화시킴으로써 다른 미지수들을 구할 수가 있다. 본 논문에서 설계하고자 하는 3군 줌렌즈는 1군이 고정되어 있고

2군과 3군이 움직이고, 광학계의 전체 길이가 고정된 구조로 설정하고 줌 궤적을 분석할 때, 조건식 $T = z_1 + z_2 + bf$ 와 1) z_1 을 변화시키면서 나머지 항 z_2 , bf , K 를 구하는 방법, 2) z_2 을 변화시키면서 나머지 항 z_1 , bf , K 를 구하는 방법, 3) bf 를 변화시키면서 나머지 항 z_1 , z_2 , K 를 구하는 방법, 4) K 를 변화시키면서 나머지 항 z_1 , z_2 , bf 를 구하는 방법 등 여러 가지 경우에 대해 궤적을 계산 할 수 있다.

본 연구의 경우 z_1 과 z_2 의 변화량이 비선형적인 궤적을 그리기 때문에 위에서 네번째 방법인 K 를 변화시키면서 나머지 변수들을 구하는 방법을 사용하고자 한다.

식 (4)의 양변에 z_2 곱하고 식 (4) 및 식 (5)의 z_1 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$z_1k_1 + k_1z_2 + k_2z_2 + KT - z_1z_2k_1k_2 = 1 + (z_1 + z_2)K$$

$$z_1 = \frac{KT - 1 - z_2K + k_1z_2 + k_2z_2}{K - k_1 + z_2k_1k_2} \quad (13)$$

위의 z_1 을 식 (4)에 대입하여 z_2 에 대해 정리하면, z_2 에 대한 2차 방정식은 다음과 같다.

$$\therefore Az_2^2 + Bz_2 + C = 0 \quad (14)$$

여기서,

$$A = -k_1k_2k_3K,$$

$$B = -Kk_2k_3 + KTk_1k_2k_3,$$

$$C = 2Kk_1 - k_1^2 + Kk_2 - KTk_1k_2 + Kk_3 - KTk_1k_3 - K^2,$$

이다. z_2 에 대한 2차 방정식을 근의 공식을 이용하여 해를 구하고, 이를 각각 식 (13), 식 (3)에 대입하여 z_1 , bf 값을 구할 수 있다.

2.3. 3군 줌렌즈에서 파워구성 및 궤적특성

표 1은 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈의 근축설계에서 앞 절에서 기술된 과정을 통해 얻은 파워구성에 대한 해이다. 여기서 제한조건은 $1/K_w = 3.7 \text{ mm}$, $1/K_t = 7.4 \text{ mm}$, $|1/k_1| \& |1/k_2| \& |1/k_3| > 3.0 \text{ mm}$, $9.5 \text{ mm} < TTL < 10.5 \text{ mm}$, $bf_w \& bf_t > 2.5 \text{ mm}$ 이고, 또한 물리적인 의미를 갖는 해만을 선별하였다. 그림 2~5는 근축설계에서 얻어진 파워구성에 대한 가동 군인 2군, 3군 렌즈의 궤적특성을 보여주고 있다. 특히 3군 줌렌즈의 궤적은 그림 2~4에 비해 그림 5에서와 같이 3군 렌즈의 파워 부호에 따라 다른 특성을 갖는다. 본 논문에서는 표 1의 case 4에 해당되는 negative, negative, positive 파워구성의 retro-focus 형 근축설계 데이터를 이용하여 초기 설계과정에 대해 연구하고, 이 줌렌즈계를 최적화 설계하고자 한다. 이러한 파워구성은 광각화에 매우 유리하여 결과적으로 슬림형 폰 카메라용 줌렌즈에 적절하다.

표 1. 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈에 대한 근축 해로 얻을 수 있는 파워구성

경우의 수	$1/k_1$	$1/k_2$	$1/k_3$	해 존재여부
Case 1	Negative	Positive	Positive	○
	-4.201 mm	4.284 mm	14.396 mm	
Case 2	Positive	Negative	Positive	○
	12.231 mm	-3.205 mm	3.012 mm	
Case 3	Positive	Positive	Negative	제한조건을 만족한 해 없음
Case 4	Negative	Negative	Positive	○
	-41.881 mm	-5.855 mm	3.382 mm	
Case 5	Negative	Positive	Negative	○
	-4.021 mm	3.036 mm	-8.581 mm	
Case 6	Positive	Negative	Negative	제한조건을 만족한 해 없음

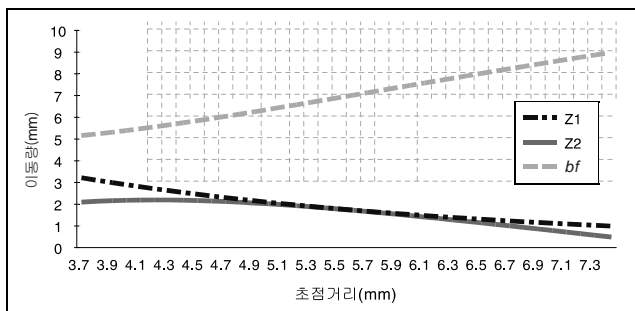


그림 2. 파워구성 NPP에서의 궤적특성(Case 1).

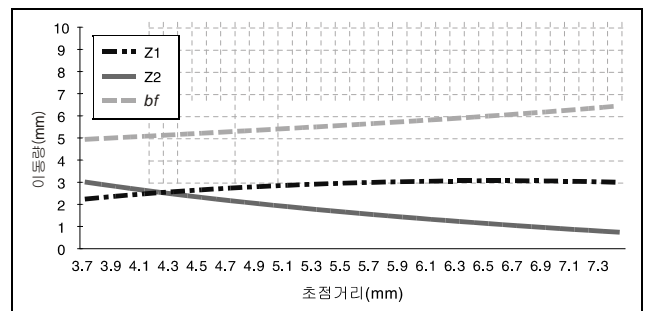


그림 3. 파워구성 PNP에서의 궤적특성(Case 2).

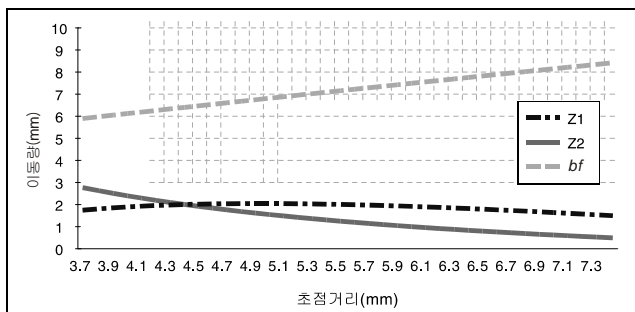


그림 4. 파워구성 NNP에서의 궤적특성(Case 4).

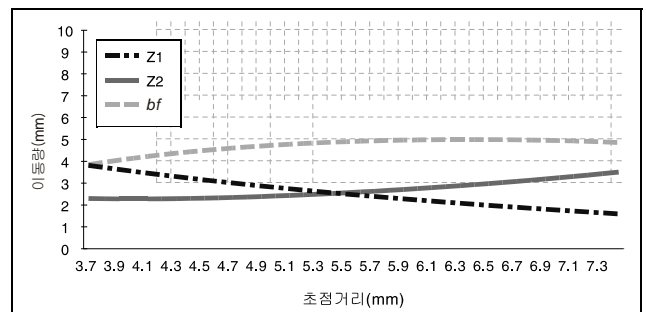


그림 5. 파워구성 NNP에서의 궤적특성(Case 5).

III. 복합렌즈계를 이용한 줌렌즈 군의 설계 개념

줌렌즈 설계는 일반적으로 두 개의 과정으로 나눌 수 있다. 이는 1차량 설계를 통해 줌렌즈계의 구성도를 설정하는 초기설계과정과 이로부터 수차보정을 행하는 최적화과정으로 분류된다. 과거의 초기설계과정은 수치해석방법을 통해 각 군의 파워구성을 얻고 그 파워구성에 맞는 렌즈를 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환해 가는 bending 과정이 일반적이었다. 이 변환 과정에서 각 군을 개별적으로 분리하여 변환한 후, 그 결과를 갖고 줌렌즈계를 재구성하였다. 따라서 과정이 복잡하고 많은 시간이 필요하였다. 그러나 본 연구에서는 이너 포커싱 3군 줌렌즈에 대해 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로의 변환 과정을 줌광학계 내에서 실행하는 복합렌즈계의 개념을 적용하여 신속하면서 효과적인 설계방법을 제안하고

자 한다. 즉, 복합렌즈계 개념을 이용한 설계란 줌렌즈계의 전체 굴절능과 줌렌즈계 내에 각 군의 굴절능, 이웃한 군 간의 주요면 사이의 거리를 일정하게 유지하면서 순차적으로 각 군을 얇은 렌즈에서 적절한 두꺼운 렌즈군으로 변환하는 설계방법이다. 그림 6은 근축설계된 줌렌즈계로부터 얇은 렌즈를 두꺼운 렌즈로 순차적으로 변환시키는 과정이다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 우선 1) 2군, 3군은 얇은 렌즈로 구성하고 1군을 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환한 다음, 2) 1군은 두꺼운 렌즈, 3군은 얇은 렌즈로 구성하고 2군을 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환하고, 마지막으로 3) 1군, 2군은 두꺼운 렌즈로 구성하고 3군을 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환하는 반자동 설계과정이다. 또한 이러한 설계방법은 각 군의 초점거리 및 수차 의존도를 고려하여 각 군에 렌즈를 추가하는 과정에도 본 개념의 적용이 가능하다.

그림 6에서 H 와 H' 는 렌즈군의 주요면이고, 검은 점은 렌즈군의 정점이며, (v) 표시는 변환하고자 하는 렌즈군의 변수들을 가변상태로 설정한 것을 의미한다. 얇은 렌즈에서는 정점과 주요점이 일치하며, 두꺼운 렌즈에서는 정점과 주요점 사이에 거리차가 발생한다.^[5,6] 따라서 줌렌즈계의 전체 굴절능과 각 군의 굴절능을 고정시킨 상태에서, 이웃한 군 간의 주요면 사이의 거리를 일정하게 유지하기 위해서는 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환시 발생하는 두 점사이의 거리차만큼 군 사이의 공기간격을 보상해 주어야 한다.

광학계 설계프로그램인 Code-V를 이용하여 1단계에서는 줌렌즈계의 전체 굴절능과 2군과 3군의 변수들을 고정상태로 설정하고, 1군 렌즈의 두께, 곡률반경, 굴절률 및 1군과 2군 사이에 공기간격 등의 변수들을 가변상태로 설정하여, 반자동 최적화 설계를 실시한다.^[7] 이러 방법을 통해 1군을 두꺼운 렌즈로 변환한 후 2단계, 3단계에서도 동일한 방법으로 2군 및 3군을 두꺼운 렌즈로 변환시키면 최종적으로 초기설계된 줌렌즈계를 얻을 수 있다.

IV. 이너 포커싱형 3군 2배 줌렌즈의 최적설계

4.1. 목표사양 및 초기설계

폰 카메라용 초소형 줌렌즈계 설계시 고려해야 하는 3가지

요소를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 휴대폰에는 점차적으로 고해상도의 카메라가 장착되어 디지털 카메라를 별도로 마련하지 않아도 될 정도의 성능을 시장에서 요구하고 있다. 또한 슬림화 및 경량화를 위해 비구면 렌즈를 적극적으로 사용하는 추세이다. 둘째, CMOS 및 CCD와 같은 이미지센서를 사용하는 휴대폰 및 디지털 스틸 카메라용 광학계는 센서의 밝기를 증가시키기 위해 이미지 센서에 마이크로렌즈 어레이(micro-lens array)를 적용하고 있지만 광선다발의 수렴각이 작아지는 문제점이 발생한다. 따라서 마이크로렌즈 어레이의 쉬프트량을 고려하여 센서의 입사각에 대한 허용공차범위 내에서 설계해야 한다. 특히 줌렌즈의 경우에는 wide 위치와 tele 위치 사이에서 주광선의 입사각 변화를 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 이하로 설계해야 한다. 셋째, 폰 카메라용 렌즈계 설계시 적외선 차단 필터, 광 지역 통과 필터 또는 자동 초점 구동 장치를 삽입할 공간을 확보하기 위해서는 플렌지백(flange back)을 최소 1.2 mm 정도를 확보해야 하는데, 이를 만족시키기 위해서는 광각이면서도 후 초점거리(bf)가 긴 retro-focus 형 렌즈계가 필요하다.

위에서 언급한 기본 개념을 근거로 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈계의 목표사양을 표 2와 같이 설정하였다. 목표사양을 자세히 언급하면, 이너 포커싱 3군 줌렌즈계는 1/4" 5 M CMOS 또는 CCD의 이미지 센서를 사용하고, 직선형 줌렌즈

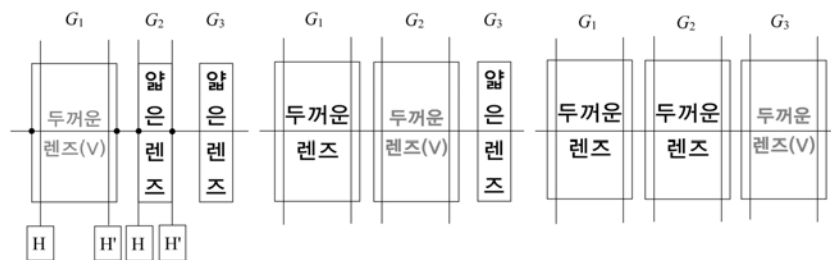


그림 6. 근축설계된 줌렌즈계로부터 얇은 렌즈를 두꺼운 렌즈로 순차적으로 변환시키는 과정(G_1 : 1군, G_2 : 2군, G_3 : 3군).

표 2. 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈의 목표사양 및 최적설계된 사양

NO.	항목	목표사양		최적설계된 사양		
		Wide	Tele	Wide	Tele	
1	Max. Image Circle	Φ 4.8 mm		Φ 4.8 mm		
2	Total Track Length	10.0 mm (Lens Top ~ Sensor)		9.8 mm		
3	F/no.	F/3.2~5.0		F/3.2~5.1		
4	Effective Focal Length	3.7 mm	7.4 mm	3.7 mm	7.4 mm	
5	Full Field of View	60~65 deg. at Wide		62.5 deg. at Wide		
6	Back Focal Length	Over 1.5 mm		1.5 mm	3.4 mm	
7	Lens Construction	5~6 pcs, Aspheric Surfaces		5 pcs (Aspheric Surfaces)		
8	Relative Illumination	50% at Wide		59.5%	88.2%	
9	TV-Distortion	-2.0 ~ +1.0%	-1.0 ~ +0.5%	-0.30%	-0.56%	
10	(MTF) Modulation Transfer Function (Φ 4.8 mm)	Y=0.0F	180 lp/mm Over 40%	180 lp/mm Over 30%	R : 53% T : 53%	R : 32% T : 32%
		Y=0.6F	160 lp/mm Over 40%	160 lp/mm Over 30%	R : 53% T : 41%	R : 36% T : 31%
		Y=1.0F	140 lp/mm Over 40%	140 lp/mm Over 30%	R : 46% T : 38%	R : 30% T : 24%

에서 시스템의 슬림화를 만족시키기 위해서 줌비를 2배로 제한하였다. 따라서 최근의 슬림형 휴대폰의 두께가 14 mm 이하 인점을 고려하여 줌렌즈계 전장을 10 mm이하로 하고, 소형화 및 고해상도를 만족시키기 위해서 플라스틱 및 유리 비구면 렌즈를 적용하였다. 단일픽셀 크기가 1.4 μm 인 1/4" 이미지센서는 총 5 M의 화소를 구현하며, 컬러 이미지센서는 2x2픽셀이 하나의 정보를 결정해 주기 때문에 요구되는 줌렌즈의 해상력은 공간주파수 180 lp/mm에서 30% 정도의 MTF 특성을 확보하는 것으로 기준을 정할 수 있다. 이미지 센서의 가장자리 부근(0.8F~1.0F)에서는 해상도가 다소 낮아도 문제되지 않는다.

2.3절에서 근축설계이론을 바탕으로 수치해석방법을 이용하여 얻은 retro-focus 형의 파워구성, 즉 negative 파워를 갖는 1군과 2군, positive 파워를 갖는 3군, 그리고 줌비 2배 ($e\text{fl} = 3.7\sim 7.4 \text{ mm}$)를 만족시키는 적절한 해를 이너 포커싱 3군 줌렌즈의 초기설계 데이터로 선정하였다. 표 3은 초기 설계된 이너 포커싱 3군 줌렌즈의 1차 특성이고, 그림 7은 근축설계 데이터를 얇은 렌즈에 적용하여 구성한 줌렌즈를

나타내고 있다. 이 줌렌즈계는 물체측에서부터 1군, 2군 및 3군은 얇은 렌즈로 구성되어 있다. 얇은 렌즈 범주에서는 렌즈의 주요점과 정점이 일치함으로 각 군 사이에 공기간격 그 자체가 주요면 사이의 거리가 된다. 그림 8은 복합렌즈계의 개념을 이용한 초기설계 줌렌즈의 구성도이다. 즉, 1군과 2군은 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환된 군이고, 3군은 아직 얇은 렌즈로 남아있다. 그림 9는 두꺼운 렌즈로 모두 변환된 초기설계 줌렌즈의 구성도이다. 3장에서 언급한 복합렌즈계의 개념을 이용하여 각 렌즈군을 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환시켜 이너 포커싱 3군 2배 초기설계 줌렌즈계를 얻었다. 슬림형의 줌렌즈를 구현하기 위해 초점거리가 긴 1군과 2군은 각각 1매로 구성하고, 초점거리가 짧은 3군은 단색수차와 색수차를 보정하기 위해 3매의 렌즈로 구성으로 하였다.

4.2. 수차보정 및 최적설계

초기 설계에서는 실제 사양보다 구경 및 상 크기는 작게 설정되어 있기 때문에 목표 사양에 맞게 구경은 wide 위치에

표 3. 초기 설계된 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈의 1차 특성

각 군의 초점거리	$1/k_1$	$1/k_2$	$1/k_3$
		-41.881 mm	-5.855 mm
줌 위치선	Wide position		Tele position
$e\text{fl} (1/K)$	3.70 mm		7.40 mm
G1~G2 주요면 간격	1.752 mm		1.501 mm
G2~G3 주요면 간격	2.749 mm		0.499 mm
bf	5.907 mm		8.408 mm

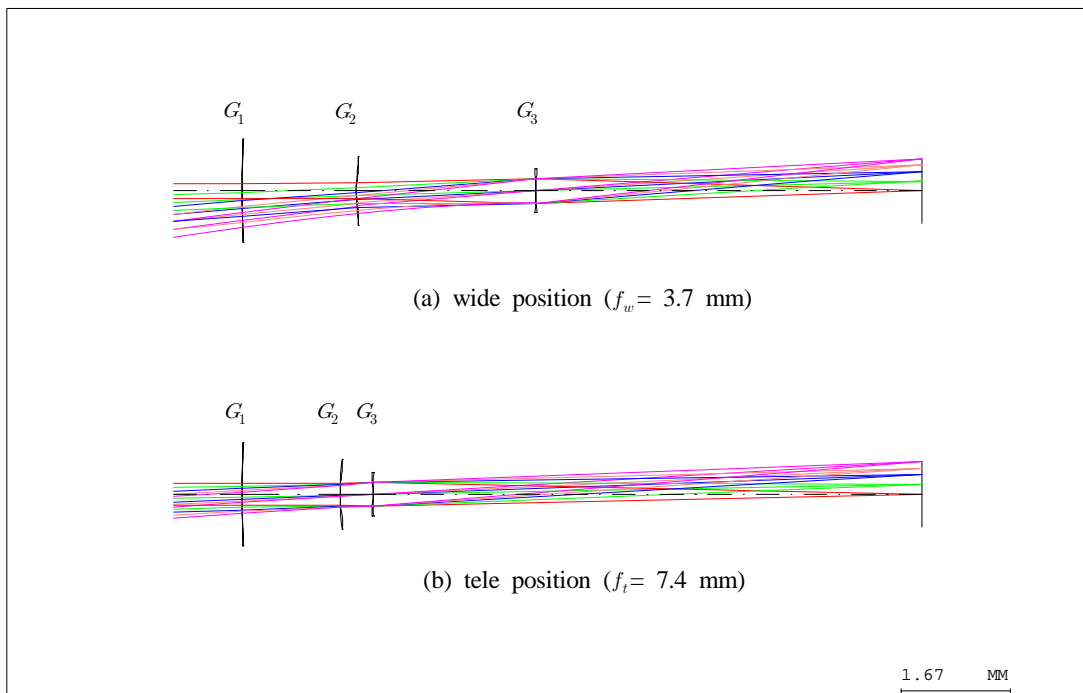


그림 7. 근축설계과정을 통해 얻은 얇은 렌즈로 구성된 초기설계 줌렌즈.

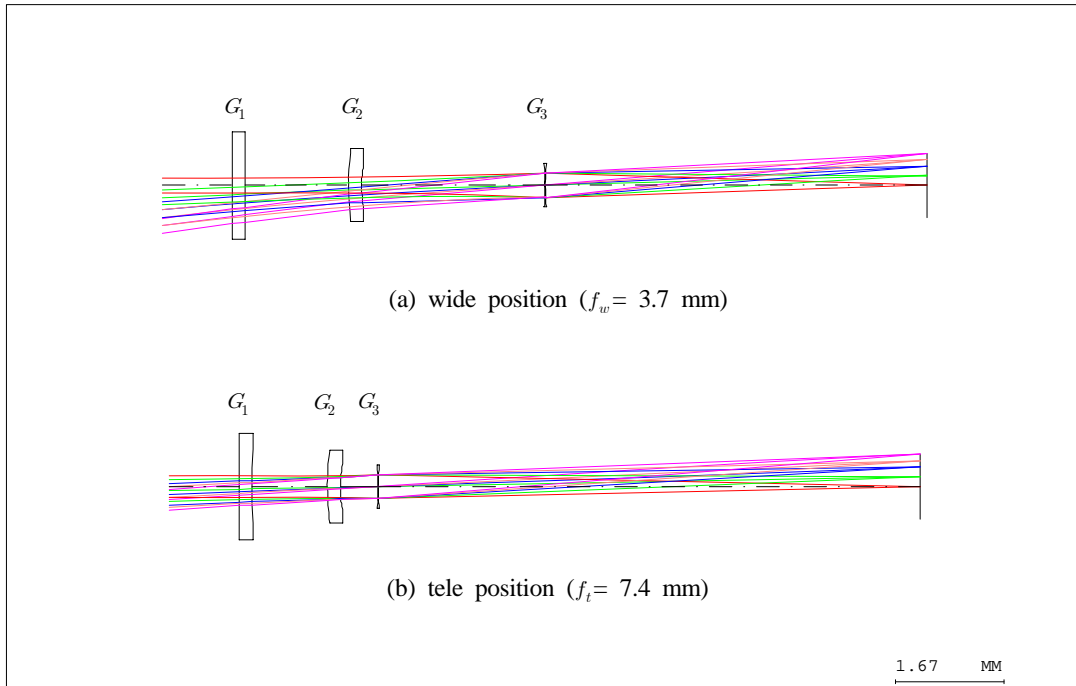


그림 8. 복합렌즈계를 이용하여 각 군을 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로 변환하는 과정(G_1, G_2 : 두꺼운 렌즈, G_3 : 얇은 렌즈).

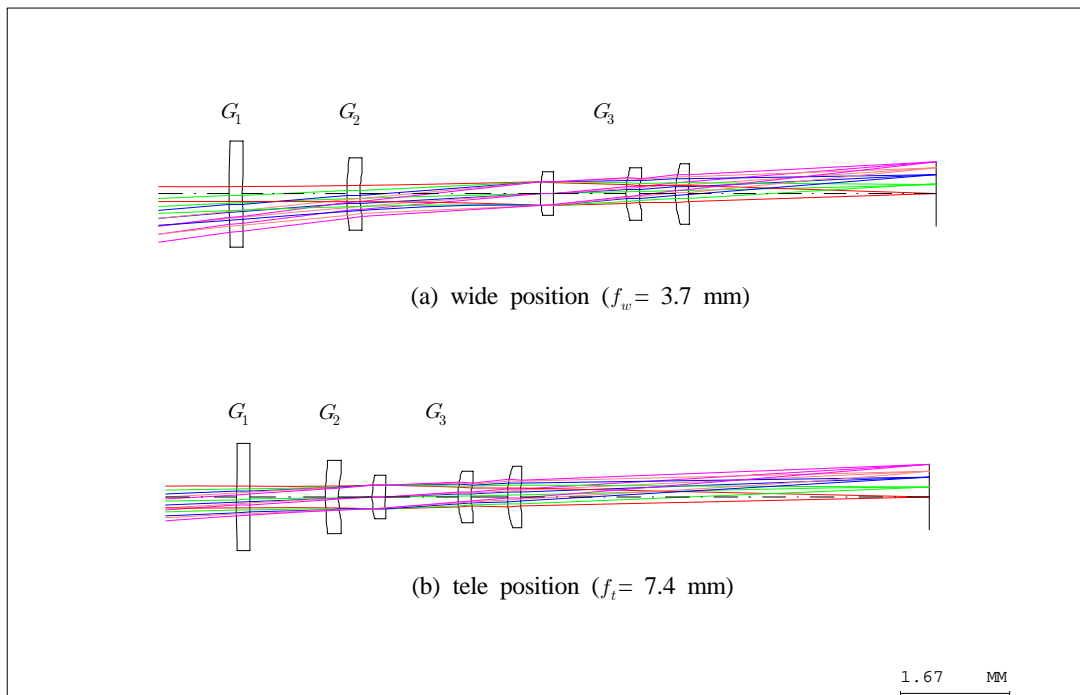


그림 9. 두꺼운 렌즈로 모두 변환된 초기설계 줌렌즈의 구성도.

서 F/3.2, tele 위치에서 F/5.1로 변경하였고, 상의 크기 또한 1/4인치 이미지 센서에 맞게 상 크기를 $\pm 2.4 \text{ mm}$ 로 확장하였다. 그러나 확장된 구경과 상 크기로 인하여 고차수차가 발생하게 됨으로 최적화 과정을 통하여 추가적으로 발생된 수차를 보정한다. 고차수차 보정을 위해서 초기 설계된 구면렌즈에 비구면면을 적용하였다.^[8] 본 연구에서 사용된 비구면의

방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$Z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)c^2h^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12} + \dots,$$

여기서 c 는 굴절면의 곡률, $h = \sqrt{x^2 + y^2}$ 는 $x-y$ 좌표계에서 광축으로부터의 광선 높이, K 는 원추(conic)상수, 그리고 A, B, C, D, E 는 비구면 계수이다.

표 4는 최적설계된 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈의 설계 제원을 나타내며, 그림 10은 최적설계된 줌렌즈계의 구성도이다. 설계된 줌렌즈의 재질은 물체측으로부터 E48R(P), E48R(P), L-BAL42(GM), OKP4HT(P) 및 E48R(P)로 구성하였다.

각각 1매로 구성된 1군과 2군은 분산이 작은 crown 계열의 플라스틱 재질을 사용하였으며, 또한 1군 렌즈는 왜곡수차를 보정하기 위해서 매니스커스(meniscus) 형태의 렌즈로 비구면화 하였다. 양의 굴절능을 갖는 3군 렌즈는 색수차 보정을 위해 crown, flint, crown 계열의 재질로 구성하였다.¹⁹⁻¹¹¹ 3군 렌즈 중에서 가장 큰 굴절능을 갖는 첫 번째 양볼록 렌즈는 온도변화에 따른 초점이동 및 성능저하를 최소화하기 위해

표 4. 최적설계된 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈의 설계 제원

면번호	곡률반경(mm)	두께(mm)	광학재질
0(물체면)	평면	무한거리	
1	5.8428(비구면)	0.500	E48R
2	3.3153(비구면)	1.998~1.422	
3	54.5888(비구면)	0.380	E48R
4	3.3440(비구면)	1.624~0.300	
5(STOP)	1.3428(비구면)	0.787	L-BAL42
6	-4.3752(비구면)	0.253	
7	5.9224(비구면)	0.380	OKP4HT
8	2.6276(D O E)	1.776	
9	-98.2869(비구면)	0.603	E48R
10	4.3324(비구면)	0.543~2.387	
11	평면	0.300	D263T
12	평면	0.707	
13(상면)	평면	-0.050~0.006	(defocus)

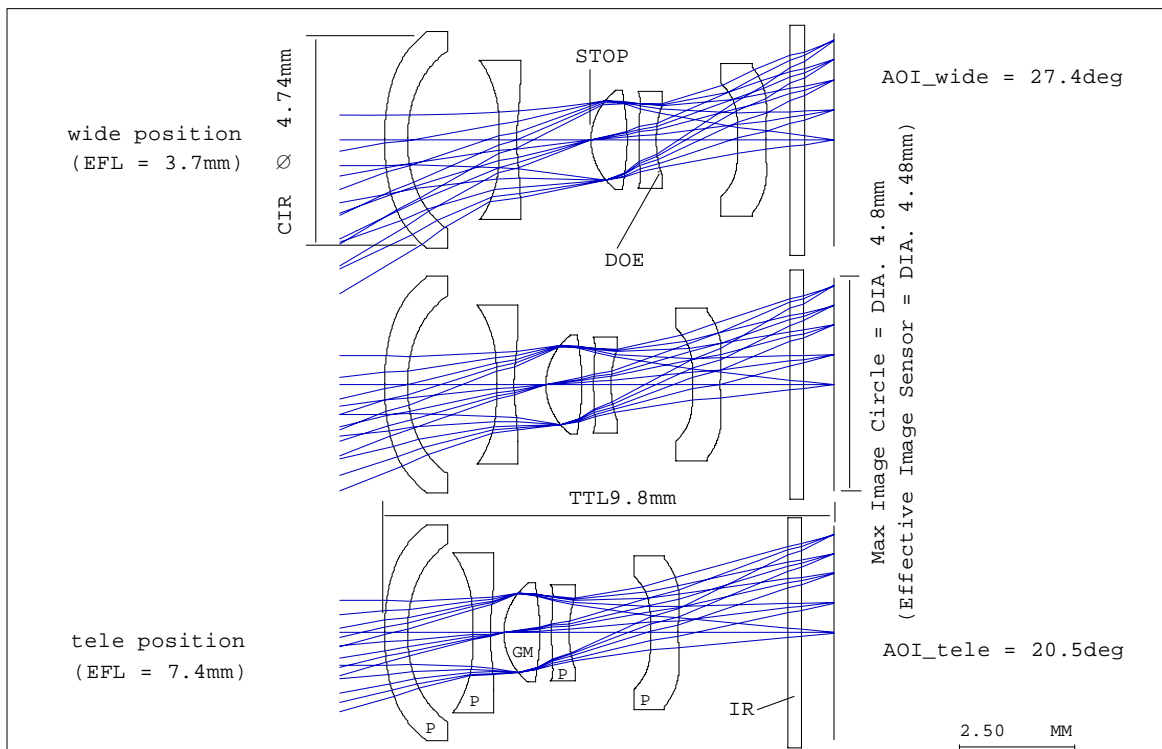


그림 10. 최적설계된 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈의 구성도.

플라스틱 재질 대신 비구면 유리렌즈를 적용하였다. 그리고 조리개가 3군 앞에 위치해 있기 때문에 모든 줌 위치에서 축상광선의 높이가 가장 높게 된다. 따라서 3군은 구면수차를 크게 발생시키므로 양면의 비구면화를 통해 구면수차를 보정하였다.^[8] 또한 폰 카메라의 슬림화를 피하고 5 M 픽셀 카메라용 줌렌즈의 해상력을 만족시키기 위해 3군 렌즈의 특정 면에 부피가 없는 DOE(diffractive optical element)를 적용하여 고차수차를 추가적으로 보정하였다.

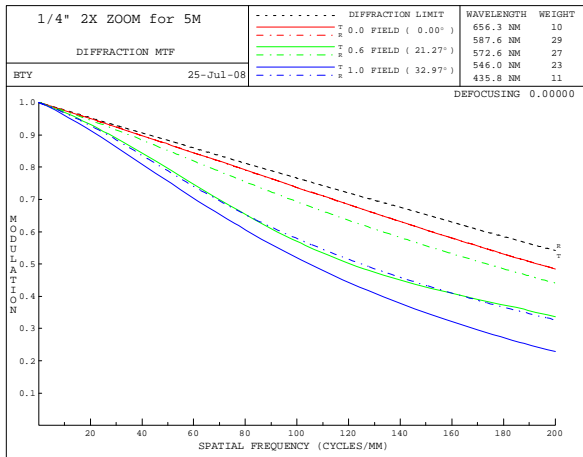
4.3. 성능분석 및 제작특성

표 2의 오른쪽 열은 최적설계된 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈의 설계사양을 보여준다. 처음 제시한 목표사양 및 제한조건을 모두 만족시킨다. 그림 11은 최적설계된 줌렌즈의 MTF 특성이고, 그림 12는 초점면 이동에 따른 MTF 특성을 보여준다. 그림 12에서 볼 수 있듯이, 모든 field에서의 MTF가 최적상점을 기준으로 좌우대칭이 되도록 설계하여 궁극적으로

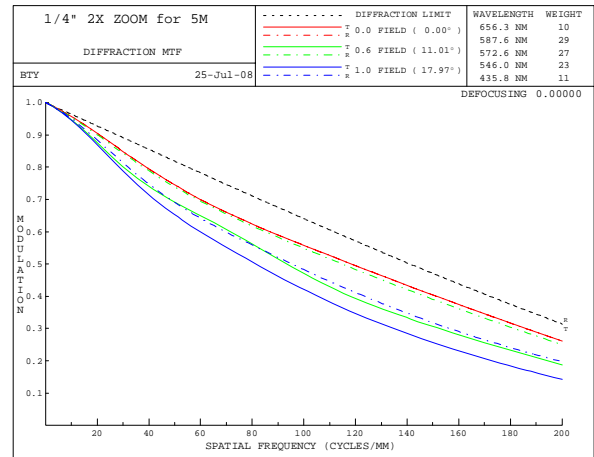
로 초점심도를 깊게 확보하였다.

그림 13(a)은 최적설계된 줌렌즈에서 주광선이 센서에 입사하는 각도(AOI)를, 그리고 그림 13(b)는 주변광량비 특성을 보여주고 있다. 주변광량비는 상 크기가 커짐에 따라 감소하지만 주변인 1.0 field에서 59.5% 이상 확보하였으며, AOI도 27.4° 이하를 얻었다. 또한 그림 13(a)에서 보듯이 wide와 tele 위치 사이에서 주광선의 입사각 차이를 7° 이하로 충분히 작게 확보하여 줌 위치에 따른 상의 밝기 변화를 최소화하였다. 비축수차 특성을 평가한 결과, 왜곡수차는 모든 영역에서 2.0% 이내로 보정되어 있고, 이를 사용자가 인지하는 TV-distortion으로 계산하면 wide 위치에서 -0.30%이고, tele 위치에서 -0.56% 이내에 해당된다.

그림 14는 최적설계된 줌렌즈의 제작특성을 보여주고 있다. 최적설계된 줌렌즈의 파워구성은 $f_1 = -15.525$ mm, $f_2 = -6.739$ mm, $f_3 = +2.392$ mm로서 retro-focus 형태이고, 2배 ($efl = 3.7\sim 7.4$ mm)의 줌비를 갖는다. $G_1\sim G_2$ 사이의 공기간

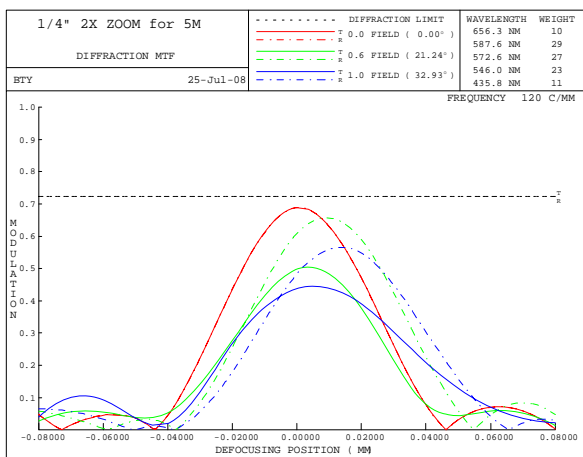


(a) wide position

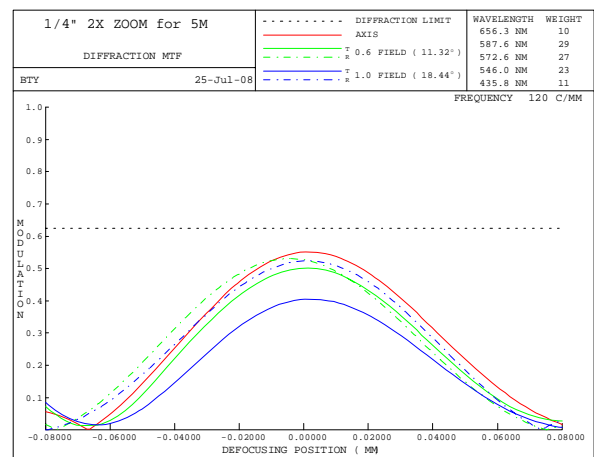


(b) tele position

그림 11. 최적설계된 줌렌즈의 MTF 특성.

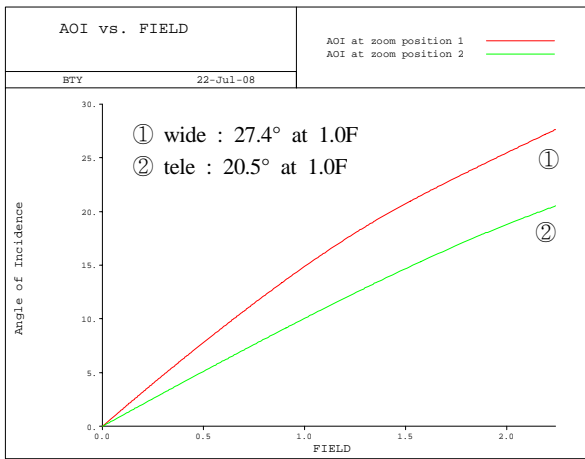


(a) wide position

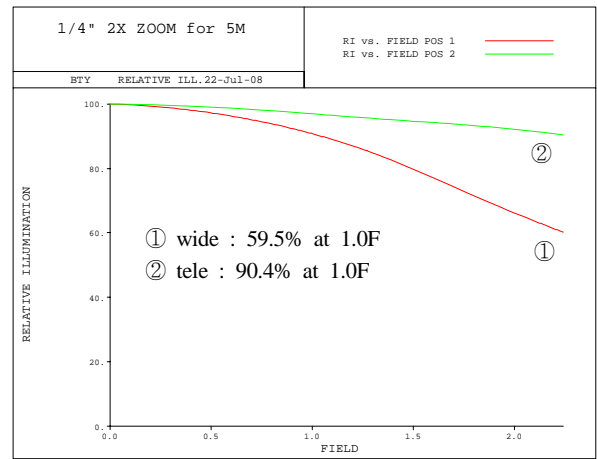


(b) tele position

그림 12. 최적설계된 줌렌즈의 through-focus MTF 특성.



(a) Angle of Incidence



(b) Relative Illumination

그림 13. 최적설계된 줌렌즈에서 주광선의 입사각도(a) 및 주변광량비(b) 특성.

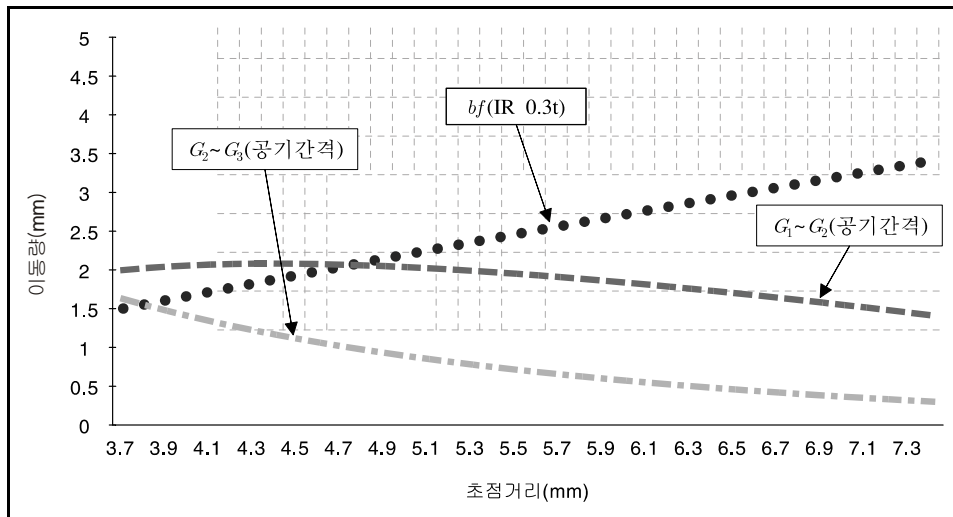


그림 14. 최적설계된 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈의 궤적특성.

격과 $G_2 \sim G_3$ 사이의 공기간격은 비선형적인 곡선형태로 이동하고, 후초점거리에 해당되는 bf 은 1.5~3.41 mm범위에서 직선형태로 이동함으로 충분한 공간을 확보하고 있다. 본 연구에서 설계된 이너 포커싱 줌렌즈의 2군은 포커싱 렌즈군의 역할을 하고, 3군은 줌 렌즈군의 역할을 한다.

V. 결 론

본 논문에서는 각 군의 파워를 결정하는 근축설계과정과 주어진 파워에 따라 군의 이동량을 결정하는 궤적해석과정을 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈 설계에 적용하여 줌 광학계의 초기설계과정에 대해 논의하였다. 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈에 대해 구현 가능한 파워구성과 궤적특성에 대해 심도 있게 분석하였다. 또한 수치해석방법을 적용하여 얻은 근축설계로부터 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈를 구성하고, 얇은 렌즈에서 두꺼운 렌즈로의 변환 과정을 줌렌즈계 내에서 실

행하는 복합렌즈계의 개념을 적용하여 효과적이면서 신속한 초기설계 방법을 제안하였다. 추가적으로 군의 초점거리 및 수차 특성에 따라 렌즈를 삽입하는 경우에도 본 개념이 효과적임을 확인하였다. 향후에 복합렌즈계를 적용하여 초기설계하는 과정에서 수차 제어에 관한 연구를 추가하여 본 연구결과가 더욱더 실용적인 방법이 되도록 할 예정이다.

결과적으로 본 개념을 적용하여 최적 설계된 1/4" 5 M 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈는 폰 카메라용 줌렌즈의 사양과 성능을 충분히 만족시켰다. 또한 줌렌즈계의 전장을 9.8 mm로 매우 짧게 구성하여 프리즘 렌즈의 삽입 없이 줌 카메라의 슬림화를 구현하였으며, 렌즈의 형태에 따라 비구면 유리 및 플라스틱 재질을 적용하여 고해상도를 갖는 폰 카메라용 초소형 이너 포커싱 3군 2배 줌렌즈를 얻을 수 있었다. 이러한 설계 방법은 폰 카메라, 디지털 카메라, 감시 카메라 및 캠코더용 줌 광학계의 개발에 활용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2008년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었음.

참고문헌

- [1] 이상수 외 5명, “최적화 방법에 의한 렌즈설계와 회절 광학을 이용한 상 평가”, 한국과학기술원보고서, 1983.
- [2] K. Tanaka, “Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses.2: Generalization of Yamaji type V,” *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 22, pp. 4045-4053, 1982.
- [3] K. Yamaji, *Progress in Optics VI* ed. by E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1967) pp. 105-170.
- [4] 정진호, 줌렌즈계의 근축설계와 궤적해석(경남대학교, 박사학위논문, 1994), pp. 32-48.
- [5] Rudolf Kingslake, *Optical System Design* (Academic Press, New York, 1983), pp. 77-80.
- [6] Richard Dittion, *Modern Geometrical Optics* (John Wiley&Sons Inc, New York, 1998), pp. 167-202.
- [7] Optical Research Associates, *CODE-V Reference Manuals* ver. 9.80 (ORA, Pasadena, 2008), chap. 17.
- [8] J. Choi, T. H. Kim, H. J. Kong, and J. U. Lee, *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 47, no. 4, pp. 631-635, 2005.
- [9] S. C. Park and Y. S. Kim, *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 41, no. 2, pp. 205-211, 2002.
- [10] Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering: The design of Optical Systems* (McGraw-Hill, New York, 1990), pp. 365-402.
- [11] Warren J. Smith, *Modern Lens Design* (McGraw-Hill, New York, 1992), pp. 63-86.

Ultra-Compact Zoom Lens Design for Phone Camera Using Hybrid Lens System

Sung Chan Park[†] and Byoung Taek You

Department of Electro-Physics, School of Advanced Sciences, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea

[†]*E-mail: scpark@dankook.ac.kr*

(Received August 7, 2008; Accepted August 19, 2008)

For an inner-focusing 3-groups zoom lens system, this study suggests a new initial design method which applies the process that changes thin lenses into thick ones effectively and quickly, using the hybrid lens system(thin lens+thick lens). In other words, the hybrid lens system is the semi-automatic design process that makes the thin lens of one group change into a thick one while the other groups are composed of thin lenses. Keeping the total power of the system fixed, the power of each group and the distance between principal planes can be fixed. Of course, the other groups composed of thin lenses could be changed into thick lenses sequentially by this process.

This design conception results in the 1/4" 5 M inner-focusing 3-groups 2x zoom lens system satisfying the specifications and performances of zoom lens for phone cameras. Also aspherization on lens elements of glass and plastic material enhanced the resolution and reduced the lens size. As a result, we have an ultra-compact inner-focusing 3-groups 2x zoom lens system for a phone camera, with a slim size with TTL of 9.8 mm.

OCIS codes: (080.2740) Geometrical optics, optical design; (080.3620) Lens design; (220.2740) Geometrical optics, optical design, (220.4830) Optical systems design.