

가우스 괄호법을 이용한 유한 물점을 갖는 줌 렌즈에 대한 일반적인 수치해석적 근축광선 쥘 궤적 추적

이도경 · 유남준 · 조재홍[†]

한남대학교 이과대학 광·전자물리학과
Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

류재명 · 이해진 · 강건모

삼성 디지털이미징(주) 개발팀 렌즈개발그룹
Ⓣ 443-373 경기도 수원시 매탄3동 416번지

(2009년 4월 3일 받음, 2009년 4월 20일 수정본 받음, 2009년 4월 20일 게재 확정)

가우스 괄호법을 이용하여 무한 물점을 포함한 모든 유한 물점을 대상으로 하는 모든 복잡한 줌 렌즈에서 사용가능한 일반적인 근축광선 쥘 궤적 추적식을 유도하였다. 이를 Visual Basic으로 프로그램화하여 수치해석적으로 쥘 궤적을 구하였다. 이 결과 이 식의 해는 물체의 거리에 관계없이 모든 종류의 줌 렌즈에서 쥘 궤적에 대한 초기설계에 유연하면서 통합적으로 적용할 수 있다. 이 식의 유용성을 증명하기 위하여 M_{4a} 와 M_{4h} 형태의 4군 줌 렌즈들과 M_{5n} 형태의 5군 줌 렌즈의 쥘 궤적을 유한 물점에 대해서 빠르게 산출할 수 있음을 보였다.

주제어: Lens Design, Zoom Lens, Gaussian Barket Method, Finite Object Distance

II 서론

줌렌즈는 배율 또는 유효 초점 거리가 연속적으로 변해도 상면이 고정되는 광학계로 정의된다.^[1] 줌 렌즈의 발전사를 살펴보면 1차 대전시 적기의 출현을 감지하고자 하는 요구에서부터 시작되었다고 할 수 있다. 이런 줌 렌즈계는 일반적으로 카메라나 캠코더에 사용되는 광학계로 무한대 거리에 있는 물점에 대하여 설계를 한 후 근거리 물점에 대해서는 광학계의 일부 또는 전체를 이동하여 초점조절을 하는 경우^[2]와 현미경을 비롯하여 복사기, FAX, 현상기에 사용되는 광학계로 유한 거리에 있는 물체를 상면에 축소 및 확대 결상시키는 역할을 하는 경우로 나눌 수 있다. 이 외에도 줌렌즈는 아니지만 유한 물점 광학계에서 물체의 위치에 관계없이 일정한 배율로 관측하는 광학계도 있다.^[3-5] 이러한 광학계 역시 줌렌즈와 같이 변배자(variator)와 보상자(compensator)의 이동으로서 상면을 고정시킬 수 있다.^[4] 이런 줌렌즈의 설계는 크게 4단계로 나누어 기초설계, 초기설계, 최적설계, 공차해석으로 구분되고 그 후 전체 쥘 광학계의 각 군간 간격을 원하는 배율 또는 초점거리에 따라 거의 연속적으로 이동시키기 위해 쥘 궤적을 계산해야 한다.^[6]

기존의 쥘 궤적을 계산하는 방법^[7] 근축광선에서의 쥘 공식과 구속조건에 대한 연립방정식을 세운 후, 이 연립방정식에서 변수들을 소거함으로써 단일변수에 대한 단일 고차 방정식으로 변환한다. 이러한 고차방정식은 일반적으로 수치해석에 의한 방법으로 쥘 궤적을 구한다. 또한 이러한 방법들은 무한 물점의 경우와 유한거리에 있는 물체의 경우, 군

의 개수 및 구속조건이 달라질 때마다 각각의 해석적인 방정식을 따로 유도해야 하고, 특히 군이 많은 쥘 광학계들로 갈수록 식이 복잡해서 해를 구하기 어렵다.

본 논문에서는 이러한 기존의 줌 렌즈 궤적을 구하는 방법들이 갖는 번거로움을 줄이고자 줌렌즈 궤적을 구하기 위한 초점거리 식과 zooming 방정식^[7]과 광학계의 구속조건을 연립하여 해석적인 단일 변수 방정식을 구하지 않고 초기부터 수치해석을 이용한 쥘 궤적 계산 프로그램을 만들것자 한다. 앞서 본 연구팀에서 가우스 괄호법을 이용하여 카메라 줌 렌즈와 같은 무한 물점을 갖는 복잡한 줌렌즈의 근축광선 쥘 궤적을 수치해석적으로 구한 결과^[6]를 확장하여 일반적인 모든 유한한 물점거리(무한 물점거리 포함)와 모든 줌렌즈 형태에 대해서 유연하게 적용할 수 있는 새로운 근축광선 쥘 궤적 추적식을 유도하고, 이를 기존의 줌렌즈 특허에 적용하여 그 유용성을 증명하고자 한다.

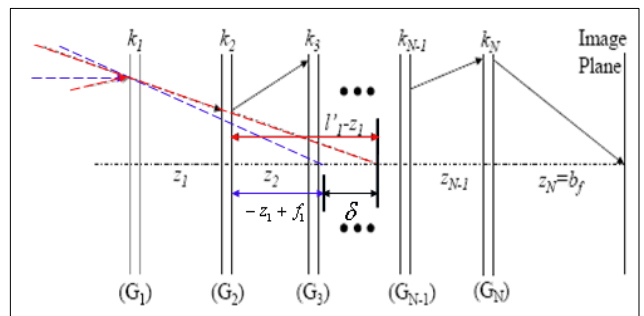


그림 1. 근축 광선 추적도.

[†]E-mail: jhjo@hnu.kr

II. 가우스 괄호법을 이용한 쥔 렌즈계의 쥔 궤적 추적식

2.1. 가우스 괄호법을 이용한 근축광선 추적법의 표현

일반적으로 사용하는 근축광선 추적식을 이용하여 각 렌즈에 대한 입사고(h_N)와 입사각(u_N)을 알 수 있는데, 그림 1과 같이 초기 입사고와 입사각을 각각 $h_1=1$, $u_1=0$ 으로 했을 경우, 즉 무한 물점에 대한 근축광선 추적식은 가우스 괄호법^[8]으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} h_1 &= [\quad] \\ u_1 &= [k_1] \\ h_2 &= [k_1, -\frac{z_1}{n_1}] \\ u_2 &= [k_1, -\frac{z_1}{n_1}, k_2] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 n_N 은 N 번째 렌즈의 굴절률이고, k_N 은 N 번째 렌즈의 굴절능이며, z_N 은 N 번째 렌즈와 $N+1$ 번째 렌즈 사이의 거리이다. 이와 같이 $h_3, u_3, \dots, h_N, u_N, \dots$ 를 계속해서 표기해 나갈 수 있으며, 이를 이용하여 근축광선 추적식을 간단하게 나타낼 수 있다. 다시 식(1)을 일반화하여 N 번째 면에서의 광선에 대한 입사고와 입사각인 h_N 와 $n_N u_N$ 를 가우스 괄호법의 규칙과 행렬식을 이용하여 기술하면 다음과 같다.^[6]

$$\begin{bmatrix} h_N \\ n_N u_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{d_{N-1}}{n_{N-1}} \\ -k_N & -\frac{d_{N-1}}{n_{N-1}}, k_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{N-1} \\ n_{N-1} u_{N-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)를 연속적으로 모든 면들에 적용하면 물체면인 0번째 면에서의 입사고(h_0)와 입사각($n_0 u_0$)과 N 번째 면에서의 입사고(h_N)와 입사각($n_N u_N$)사이의 관계를 구할 수 있으며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} h_N \\ n_N u_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1, \dots, -\frac{d_{N-1}}{n_{N-1}} \end{bmatrix} \\ -\begin{bmatrix} k_1, -\frac{d_1}{n_1}, \dots, k_N \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{d_0}{n_0}, k_1, \dots, -\frac{d_{N-1}}{n_{N-1}} \\ -\frac{d_0}{n_0}, k_1, \dots, -\frac{d_{N-1}}{n_{N-1}}, k_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ n_0 u_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

특히, 축상 물점의 경우 $h_0=0$ 이기 때문에 식(3)에서 입사고와 입사각에 대한 다음과 같은 식들을 구할 수 있다.

$$h_N = - \begin{bmatrix} -\frac{d_0}{n_0}, k_1, \dots, -\frac{d_{N-1}}{n_{N-1}} \end{bmatrix} n_0 u_0 \quad (4)$$

$$n_N u_N = \begin{bmatrix} -\frac{d_0}{n_0}, k_1, -\frac{d_1}{n_1}, \dots, k_N \end{bmatrix} n_0 u_0 \quad (5)$$

식(4)와 식(5)로부터 임의의 각을 가지고 입사한 광선의 각 면에서의 높이와 입사각을 알 수 있으며, 이 두 식은 임의의 각 u_0 로 출발한 광선의 $N-1$ 번째 면에서의 광선의 높이와 물체 면에서 N 번째 면까지의 굴절능 K 를 의미한다. 또한 식(3)을 사용하면 각 렌즈 또는 렌즈계의 주요면을 알아낼 수 있다. 즉, $u_0=0$ 이면 제 2 주요면의 위치가 되고, $u_N=0$ 이면 제 1 주요면의 위치가 된다. 이것을 식(3)에 대입하여 정리하면 제 1주요면(H_1)과 제 2주요면(H_2)의 위치는 다음과 같다.

$$H_1 = \frac{1 - \begin{bmatrix} -\frac{d_0}{n_0}, k_1, \dots, -\frac{d_{N-1}}{n_{N-1}}, k_N \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} k_1, -\frac{d_1}{n_1}, \dots, k_N \end{bmatrix}} \quad (6)$$

$$H_2 = \frac{\begin{bmatrix} k_1, \dots, -\frac{d_{N-1}}{n_{N-1}} \end{bmatrix} - 1}{\begin{bmatrix} k_1, \dots, -\frac{d_1}{n_1}, k_N \end{bmatrix}} \quad (7)$$

2.2. 가우스 괄호법을 이용한 쥔 렌즈 궤적 추적식의 표현

2.1절의 근축광선에 대한 가우스 괄호법 표기를 가지고 광선 추적을 하면 주요면 사이의 거리를 계산해 낼 수 있다. 앞 절까지는 렌즈면 단위로 광선 추적을 했는데 이 절에서는 쥔 궤적을 계산하기 위해서 렌즈군 단위로 광선 추적을 한다.

그림 2는 무한 물점 쥔렌즈에 대한 근축 광로도이다. 이러한 무한 물점 광학계에서 물체에서 출발한 광선이 1군에 의해 결상되고 이는 2군 이후의 광학계에 대한 물점이 된다. 따라서 이러한 광학계는 1군에 의한 결상점이 유한거리의 물체점이 되어 2군 이후의 유한 광학계에 대한 궤적을 구하는 문제로 바뀌 생각할 수 있다. 그림 2에서 보듯이 결상 광학계에 평행광이 입사한다면 마지막 상면에서의 h_N 은 0이 되는데 앞서 언급한 대로 1군에 의한 상을 물체로 가정하고 이 식을 가우스 괄호로 표현하면

$$[-z_1 + f_1 + \delta, k_2, -z_2, \dots, k_N - z_N] = 0 \quad (8)$$

와 같이 표현할 수 있다. 그리고 식(5)를 1군에 의한 상을 물

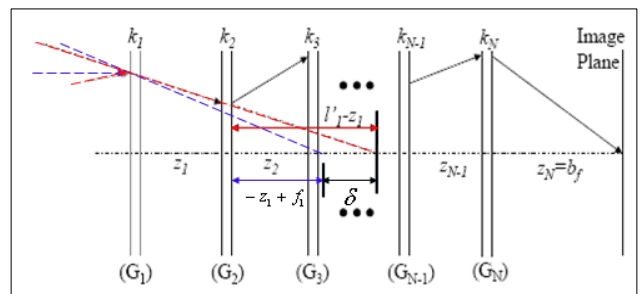


그림 2. 임의의 쥔 렌즈에서 렌즈군의 광선 추적도.

체로 가정하고 전개하면 $\frac{1}{\beta_{2N}}$ 이 되고, 이는 1군의 상에 의한 물체가 상점에 결상되는 배율의 역수가 된다는 의미이다. 다시 말해서 2군부터 N군까지의 결상배율의 역수가 된다는 뜻이다. 이를 전체 줌 광학계의 굴절능 K 에 관한 식으로 나타내면 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} [-z_1 + f_1 + \delta, k_2, -z_2, \dots, k_N] &= \frac{1}{\beta_{2N}} \\ &= \frac{n_N u_N}{n_1 u_1} = \frac{n_0 u_0 - h_1 K}{n_0 u_0 - h_1 k_1} = \frac{n_0/z_0 - K}{n_0/z_0 - k_1} \end{aligned} \quad (9)$$

식(8)과 식(9)에서 가우스 괄호 안에 들어가는 첫 번째 항의 δ 는 그림 2에서 보는 것과 같이 1군에 의한 상 거리와 초점거리의 차로써, $\frac{1}{z_0} + \frac{1}{l_1} = \frac{1}{f_1}$ 을 전개하여 $\delta = l_1 - f_1 = \frac{f_1^2}{z_0 - f_1}$ 로 구할 수 있다. 이때 평행광이 입사한다면 $\delta = 0$ 이 되고, 식(8)과 식(9)를 각각 homogeneous 방정식인 f_1 과 f_2 으로 쓰면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} f_1(k_1, k_2, \dots, k_{N-1}, k_N, K) \\ \equiv [-z_1 + f_1 + \delta, k_2, -z_2, \dots, k_N] - \frac{n_0/z_0 - K}{n_0/z_0 - k_1} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$f_2(k_1, k_2, \dots, k_{N-1}, k_N, K) = [k_1, -z_1, k_2, \dots, k_N, -z_N] = 0 \quad (11)$$

이렇게 구한 식(10)은 구한 궤적을 가우스 괄호에 대입했을 때 굴절능과 본래 굴절능의 일치정도를 판단하는데 사용하며, 식(11)은 상면까지 진행된 주광선의 상의 높이를 판단하여 일치정도에 따라 반복하여 계산하는데 사용한다.

위 식을 궤적 추적식에 편리하게 이용하기 위하여 각 군간 간격과 전체 굴절능으로 편미분하는데, 이를 다시 가우스 괄호의 형태로 단순화시켰다. 이렇게 f_1 과 f_2 를 각 변수들로 편미분한 값은 아래의 식(12)와 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial z_1} &= -[k_2, -z_2, \dots, k_N] \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_2} &= -[-z_1 + f_1 + \delta, k_2] [k_3, -z_3, \dots, k_N] \\ &\vdots \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_i} &= -[-z_1 + f_1 + \delta, k_2, \dots, k_i] [k_{i+1}, -z_{i+1}, \dots, k_N] \\ &\vdots \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_{N-1}} &= -[-z_1 + f_1 + \delta, k_2, z_2, \dots, k_{N-1}] k_N \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_N} &= 0 \\ \frac{\partial f_1}{\partial K} &= -\frac{1}{k_1} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{f_2}{z_1} &= -[k_2, -z_2, \dots, k_N, -z_N] \\ \frac{f_2}{z_2} &= -[-z_1 + f_1 + \delta, k_2] [k_3, -z_3, \dots, k_N, -z_N] \\ &\vdots \\ \frac{f_2}{z_i} &= -[-z_1 + f_1 + \delta, k_2, \dots, k_i] [k_{i+1}, -z_{i+1}, \dots, k_N, -z_N] \\ &\vdots \\ \frac{f_2}{z_{N-1}} &= -[-z_1 + f_1 + \delta, k_2, \dots, k_{N-1}] [k_N, -z_N] \\ \frac{f_2}{z_N} &= -[-z_1 + f_1 + \delta, k_2, -z_2, \dots, k_N] \\ \frac{f_2}{K} &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

이렇게 나온 식(10)부터 식(13)까지와 여기에 구속 조건의 함수 f_3, \dots, f_{N+1} 를 같이 연립하여 풀 수 있다. 또 이 연립된 식들은 구해진 줌 궤적 값의 정확도를 판정하는 식으로 사용된다. 결국 최종적으로 구해진 줌 궤적의 해들은 이 방정식들을 만족해야만 한다. 만약 미지수가 많게 되면 연립방정식을 풀 수 없기 때문에 보간법을 사용하여 변수를 줄이는데 본 논문에서는 선형보간법과 곡선보간법인 라그랑주 보간법을 선택하였다.^[9] 이러한 보간법으로 초기설계에서 알고 있는 군의 이동점을 모두 지나는 방정식을 만들고, 이 방정식으로부터 알고 있는 군의 이동점들 사이의 중간값들을 구할 수 있다. 이렇게 선택적으로 보간된 값과 고정된 군을 제외하고 줌 궤적을 구하고자 하는 값만을 가지는 f_1, f_2, \dots, f_{N+1} 으로 다시 쓰고, 이를 2 변수에 대한 Taylor 급수 전개를 하여 1차 미분항까지만 정리하면

$$\begin{aligned} f_1(z_1, \dots, z_N, K) &\approx f_1(z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0) + \frac{\partial f_1}{\partial z_1} \Big|_{z_1=z_{10}} \\ &\cdot (z_1 - z_{10}) + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial z_N} \Big|_{z_N=z_{N0}} (z_N - z_{N0}) + \frac{\partial f_1}{\partial K} \Big|_{K=K_0} \\ &\cdot (K - K_0) = 0 \\ &\vdots \\ f_N(z_1, \dots, z_N, K) &\approx f_N(z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0) + \frac{\partial f_N}{\partial z_1} \Big|_{z_1=z_{10}} \\ &\cdot (z_1 - z_{10}) + \dots + \frac{\partial f_N}{\partial z_N} \Big|_{z_N=z_{N0}} (z_N - z_{N0}) + \frac{\partial f_N}{\partial K} \Big|_{K=K_0} \\ &\cdot (K - K_0) = 0 \\ &\vdots \\ f_{N+1}(z_1, \dots, z_N, K) &\approx f_{N+1}(z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0) + \frac{\partial f_{N+1}}{\partial z_1} \Big|_{z_1=z_{10}} \\ &\cdot (z_1 - z_{10}) + \dots + \frac{\partial f_{N+1}}{\partial z_N} \Big|_{z_N=z_{N0}} (z_N - z_{N0}) + \frac{\partial f_{N+1}}{\partial K} \Big|_{K=K_0} \\ &\cdot (K - K_0) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

이 된다. 단, 식(14)에서 1차 미분항까지만을 고려한다는 가정은 모든 N 에서 $(z_N - z_{N0})$ 의 값이 1보다 매우 작다는 것을 전제로 한다. 위 식(14)를 행렬로 정리하면 아래와 같이 편미분 요소로 이루어진 Jacobian 행렬이 만들어진다.

$$\begin{bmatrix} f_1(z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0) \\ \vdots \\ f_N(z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0) \\ f_{N+1}(z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial z_1} \Big|_{z_1=z_{10}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial z_N} \Big|_{z_N=z_{N0}} & \frac{\partial f_1}{\partial K} \Big|_{K=K_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial z_1} \Big|_{z_1=z_{10}} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial z_N} \Big|_{z_N=z_{N0}} & \frac{\partial f_N}{\partial K} \Big|_{K=K_0} \\ \frac{\partial f_{N+1}}{\partial z_1} \Big|_{z_1=z_{10}} & \dots & \frac{\partial f_{N+1}}{\partial z_N} \Big|_{z_N=z_{N0}} & \frac{\partial f_{N+1}}{\partial K} \Big|_{K=K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \vdots \\ \Delta z_N \\ \Delta K \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$

여기에서 $z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0$ 들은 각 군들 사이의 거리와 전체 줌 렌즈의 굴절능에 대한 초기값들이며, $\Delta z_1, \dots, \Delta z_N, \Delta K$ 는 이 초기값들에서 아주 작게 움직인 거리 혹은 작게 변화시킨 굴절능으로 본 식에서 구해야할 굴절능 변화에 따른 궤적의 변화값이다. 이 값들에 대한 표현을 구하기 위하여 식(15)를 다시 쓰면

$$\begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \vdots \\ \Delta z_N \\ \Delta K \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial z_1} \Big|_{z_1=z_{10}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial z_N} \Big|_{z_N=z_{N0}} & \frac{\partial f_1}{\partial K} \Big|_{K=K_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial z_1} \Big|_{z_1=z_{10}} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial z_N} \Big|_{z_N=z_{N0}} & \frac{\partial f_N}{\partial K} \Big|_{K=K_0} \\ \frac{\partial f_{N+1}}{\partial z_1} \Big|_{z_1=z_{10}} & \dots & \frac{\partial f_{N+1}}{\partial z_N} \Big|_{z_N=z_{N0}} & \frac{\partial f_{N+1}}{\partial K} \Big|_{K=K_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1(z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0) \\ \vdots \\ f_N(z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0) \\ f_{N+1}(z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0) \end{bmatrix} \quad (16)$$

과 같다. 마지막으로 식(16)에 식(12)와 식(13)에서 구한 편미분 값을 대입하면 각 군들의 움직인 거리 Δz_N 와 줌 렌즈의 변화된 총 굴절능 ΔK 를 구할 수 있다. 이렇게 구한 값들은 앞의 판별식인 식(10)과 식(11)에 대입하여 그 오차가 최소가 되도록 반복하는 최적화 과정을 진행한다. 실제로 작성한 프로그램에서는 이 오차값이 10-8 이하가 될 때까지 진행시킨다. 그리고 식(16)에서 역행렬의 행렬식(determinant) 값이 0이 되는 경우를 피하기 위하여 포커-슈트라센법[10,11]을 이용하여 역행렬을 구하였는데, 이 경우 역행렬을 구할 때 단위 행렬로 나누어 계산하기 때문에 계산이 간단해진다. 최종적으로 구해진 줌 궤적 값들에 초기값 $z_{10}, \dots, z_{N0}, K_0$ 을 더해주면 각 군들이 움직인 궤적을 구할 수 있다. 그리고 여기에 식(6)과 식(7)로 구한 주요면의 위치 값을 적용해주면 각 군들 사이의 거리를 렌즈들 간의 면과 면 사이의 거리로 환산할 수 있다. 이렇게 구한 줌 궤적 추적식에서 물체거리

를 무한대로 놓을 경우 식(8)과 식(9)에서 $\delta=0$ 이 되기 때문에, 이 결과는 앞서 발표된 무한 물점을 갖는 줌 렌즈의 궤적에 대한 참고문헌 [6]의 이론식과 일치하게 된다.

III. 줌 궤적 해석을 위한 프로그램

3.1. 줌 궤적 해석을 위한 프로그램

줌 렌즈계는 줌 렌즈가 작동(zooming)하는 동안 각 군의 이동이 상호 선형적으로 움직이면서 상면이 광학계의 초점심도 내에 형성되도록 하는 광학보정식^[12]과 상면을 안정되게 유지하기 위하여 각 군의 이동을 상호 비선형적으로 움직이도록 설계하는 기계보정식^[13,14]으로 구분된다. 현재는 정밀한 기계적 가공이 가능하기 때문에 줌 성능이 우수한 기계보정식 줌 렌즈만을 사용한다. 각 줌 렌즈계의 분류를 참고문헌 [7]에 따라서 보면 각 경우의 구속조건들은 표 1과 같다.

초기 궤적설계시에 각 군의 굴절능 $k_1, k_2, k_3, \dots, k_N$ 과 물체거리 l 은 이미 정해져 있고, 알고자 하는 궤적의 미지수는 각 군 사이의 거리들인 $z_1, z_2, z_3, \dots, z_N$ 과 광학계의 총 굴절능인 K 이다. 따라서 N 군 광학계의 총 미지수는 $N+1$ 개이다. 그러나 궤적에 관련된 식은 식(8)과 (9) 두 개 뿐이므로 추가로 $N-1$ 개의 방정식이 필요하다. 여기서 구속조건의 개수가 $N-1$ 개보다 작다면 주어진 방정식보다 미지수가 많으므로 해를 구할 수가 없다. 이러한 경우에는 부족한 방정식의 수만큼 최종 설계된 광학계의 군간 간격 또는 광학계의 초점거리로부터 보간법을 이용하여 미지수를 결정한다. 이렇게 구성된 방정식들을 2절의 식(16)에 대입하여 2군에서 5군까지의 궤적 설계가 가능한 프로그램을 만들었다. 작성된 프로그램

표 1. 4군과 5군의 줌 렌즈계에 대한 구속조건에 따른 분류

	구속조건		구속조건
M_{3a}	$z_1 + z_2 + z_3 = T_{1i}$	M_{5c}	$z_1 + z_2 + z_3 = T_{14}$ $z_4 + z_5 = T_{4i}$
M_{3b}	$z_2 + z_3 = T_{2i}$	M_{5d}	$z_1 + z_2 + z_3 + z_4 = T_{15}$
M_{3c}	구속 조건 없음	M_{5e}	$z_1 + z_2 = T_{13}$ $z_3 + z_4 + z_5 = T_{3i}$
M_{4a}	$z_1 + z_2 + z_3 = T_{14}$	M_{5f}	$z_1 + z_2 + z_3 = T_{14}$
M_{4b}	$z_1 + z_2 = T_{13}$	M_{5g}	$z_2 + z_3 + z_4 + z_5 = T_{2i}$
M_{4c}	$z_2 + z_3 = T_{23}$	M_{5h}	$z_2 + z_3 = T_{24}$
M_{4d}	$z_1 + z_2 + z_3 + z_4 = T_{1i}$	M_{5i}	$z_2 + z_3 = T_{24}$ $z_4 + z_5 = T_{4i}$
M_{4e}	$z_2 + z_3 + z_4 = T_{2i}$	M_{5j}	$z_2 + z_3 + z_4 = T_{25}$
M_{4f}	$z_3 + z_4 = T_{3i}$	M_{5k}	$z_3 + z_4 + z_5 = T_{3i}$
M_{4g}	$z_1 + z_2 = T_{13}$ $z_3 + z_4 = T_{3i}$	M_{5l}	$z_3 + z_4 = T_{35}$
M_{4h}	구속조건 없음	M_{5m}	$z_4 + z_5 = T_{4i}$
M_{5a}	$z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 = T_{1i}$	M_{5n}	구속조건 없음
M_{5b}	$z_1 + z_2 = T_{13}$		

은 한 가지 형태의 궤적뿐만 아니라 군의 이동 형태에 대해서 해가 존재할 경우 이에 대응하는 줌 궤적을 구할 수 있다. 프로그램은 Visual Basic으로 작성하였으며, 각 군별로 이미 줌 궤적이 제시된 특허자료들을 활용하여 이 프로그램의 유효성을 검증하였다.

프로그램의 주 화면은 메뉴에서 원하는 기능을 선택하여 궤적을 구해나갈 수 있도록 하였으며, 이 주 화면은 열려있는 창을 나타내주는 탐색부와 에러를 알려는 에러 표시부 그리고 작업을 실행하는 작업부로 나누어 구성하였다. 탐색부는 입력하고자 하는 렌즈의 데이터를 입력하여 주거나 불러들인 렌즈의 데이터를 가져오도록 작성한 창이다. 여기에서 렌즈의 곡률과 굴절률 그리고 각 면들 사이의 데이터를 입력할 수 있다. 이 창의 주 기능은 입력한 렌즈의 데이터를 가지고 광학 데이터를 구하는 것으로 궤적을 구하기 위하여 필요한 각 군의 주요면 위치, 유효초점거리(EFL), 뒤초점거리(BFL), 그리고 각 군의 굴절능을 구할 수 있다. 여기서 얻어진 광학계의 자료는 줌 궤적 추적 창을 이용하여 궤적을 구할 때 사용한다.

그림 3은 궤적 추적을 위한 창으로 렌즈 데이터 입력창을 통해서 얻어진 결과를 이용하여 구할 수 있으며, 또는 직접 입력이 가능하도록 하였다. 입력해야 할 자료는 각 군의 굴절능, 각 군의 주요면 사이 거리 z이다. 그리고 추가적으로 줌 렌즈계가 이동하면서 움직이는 경로를 몇 구간으로 나누어 구할 것인지 입력해 주어야 한다. 또한 이 프로그램의 장점인 표 1의 줌 렌즈계의 형태를 지정할 수 있는데, 여러 가지 줌 렌즈 형태들에 따라서 미지수의 개수가 달라지고, 이로 인하여 보간법을 사용해야 할 군의 개수가 달라지기 때문에 선택해야 할 보간 구간의 개수를 알려 주도록 프로그램화 하였다. 또한 그림 4의 창에서 "LOCUS Option"은 궤적을 구하기 위한 보간의 형태를 선택하는 창이다. 즉 앞에서 설명한 것처럼 선형보간법과 곡선보간법, 그리고 위치이동 보간법으로 보간을 할 수 있도록 하였다. 특히 선형보간법이나 곡선보간법에서 사용한 줌 렌즈의 wide와 tele 상태의 중간

에 있는 줌의 구간을 똑같이 분배를 하여 중간 구간을 정했던 것을 위치이동 보간법에서는 이 중간 구간의 간격을 서로 다르게 보간함으로써 좀 더 유연하게 궤적을 구할 수 있도록 하였다. 그리고 구해진 궤적에 대해서 그래프를 보는 것과 이전에 구한 궤적과 새로 구해진 해가 얼마나 차이를 보이는가를 값으로 직접 볼 수 있도록 하였다. 줌 궤적과 필요한 데이터를 보여주는 그래프로는 면과 면 사이거리 그래프, 주요면 사이의 거리 z에 대한 그래프, 줌 렌즈의 EFL에 대한 그래프이다. 특히 EFL의 변화 그래프로는 배율의 변화를 알 수 있다.

IV. 줌 렌즈의 줌 궤적 계산

본 논문에서 구한 일반화된 근축광선의 줌 궤적공식을 이용한 알고리즘으로 작성한 줌 궤적 프로그램을 사용하여 비교적 복잡한 4군 줌렌즈와 5군 줌렌즈에서 기존에 특허로 발표된 자료들에 대한 줌 궤적을 구하여 비교해 봄으로써 본 프로그램의 타당성을 확인하고자 한다.

4.1. 4군 줌 렌즈

4군 줌 렌즈^[15]의 경우 표 1에서 보듯이 많은 형태가 존재하고, 줌 궤적을 구하기 위해서는 2군, 3군 줌 렌즈계보다 더 많은 방정식을 연립하여 풀어야 하는 문제가 생긴다. 특히 이 중에도 M_{4n} 형태와 같은 경우는 모든 군이 움직이는 경우로 직접 계산하여 풀어내기 매우 어렵지만 본 논문에서 제시한 2절의 가우스 괄호법을 이용한 이론식 및 이를 구현하는 알고리즘과 3절의 프로그램을 사용할 경우 매우 쉽게 구할 수 있다.

표 2는 4군 줌 렌즈계로 제시한 16매의 렌즈로 구성된 참고 문헌 [16]의 예제 2의 사양이며, 줌 렌즈의 wide 상태(Position 1), middle 상태(Position 2), tele 상태(Position 3)에서 유효초점거리(F), f#, 배율(M), 줌 형태(Type)를 각각 나타내었다. 줌 렌즈 형태에서 P는 수렴렌즈군을 의미하고 N은 발산렌즈군을 의미하며, 각 군의 형태가 발산렌즈군-수렴렌즈군-발산렌즈군-수렴렌즈군(NPNP)이라는 것을 의미한다.

표 3에서 주어진 4군 특허 줌 렌즈계의 자료를 가지고 프로그램으로 구한 4군 줌 렌즈의 1군(group 1), 2군(group 2), 3군(group 3), 4군(group 4)의 광학계 속성이 표 3이다. 표 3에서 보듯이 각 군의 두 주요면의 거리(H1과 H2), 유효초점거리(EFL), 굴절능(K)을 알 수 있고 wide 상태(position 1), middle 상태(position 2), tele 상태(position 3)에서 그림 1에서 나타난 것과 같은 각 군들 간의 거리 z와 이 각각의 상태들에서의 총 굴절능(Total K), EFL, BFL들도 계산하여 알 수 있다. 이들을

표 2. 4군 줌렌즈인 특허 JP 特開平6-153829^[16] 예제 2의 렌즈계 사양

Position	1	2	3
F	39.5	55.7	93.7
f#	5.6	6.4	8.4
M	-1/10	-1/6.8	-1/3.2
Type	NPNP		

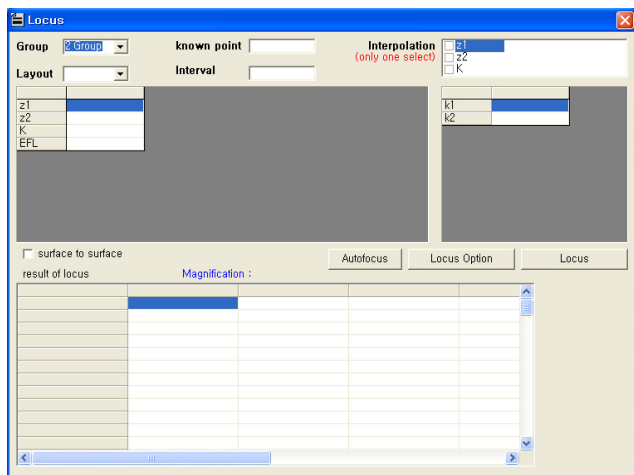


그림 3. 줌 렌즈의 근축광선을 이용한 유한물점 줌 궤적 계산을 위한 프로그램에서의 데이터 입력 창과 선택 창.

표 3. 표 2의 줌 렌즈 사양을 이용하여 줌 궤적 프로그램으로 구한 광학계와 줌 위치별 속성

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
H1	11.8492	2.8463	2.9788	12.8144
H2	-8.1262	-4.7035	-2.4666	1.4232
EFL	-45.8004	61.8481	-66.5285	65.7824
K	-0.0218	0.0162	-0.015	0.0152
Position 1				
z	58.3126	10.6823	39.6509	113.9768
Total K	0.0305			
EFL	32.7767			
BFL	110.7843			
Position 2				
z	43.4326	18.7523	31.5909	136.2768
Total K	0.0222			
EFL	45.0285			
BFL	128.6641			
Position 3				
z	30.3726	30.0523	20.2809	204.5768
Total K	0.0144			
EFL	69.3807			
BFL	175.1721			

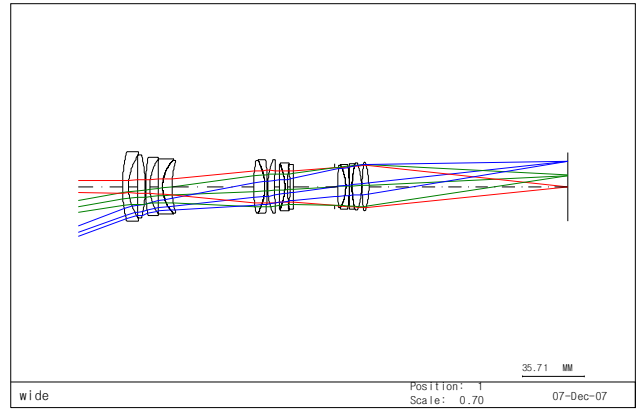
이용하여 4군 줌 렌즈 광학계의 줌 궤적을 구한다.

그림 4는 4군 줌 렌즈계의 여러 가지 줌 상태에서 축상광선과 비축광선을 추적하여 구한 결상점들을 보여주는 결과로 4군 줌 상태의 렌즈 군들의 배치를 직접적으로 보여준다. 여기서 각 줌 상태란 줌 렌즈의 초기 설계에서 설계된 줌 상태를 나타내는 각 렌즈의 지점을 의미한다. 그림 4(a), (b), (c)는 줌 상태가 각각 wide, middle, tele 상태이다.

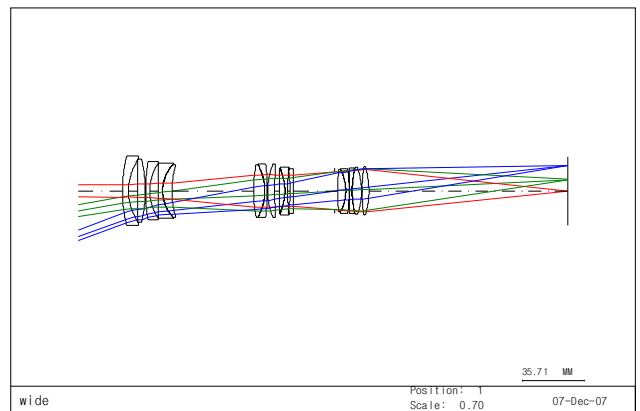
그림 5는 4개의 군으로 이루어진 줌 렌즈계의 줌 궤적 그래프를 구한 결과로 4군 줌 렌즈의 경우에 wide에서 tele까지 구간을 50개로 나누어 구하였다. 우선 첫 번째 구한 (a)는 4군 줌 렌즈의 M_{4a} 형태로 물체거리 300 mm인 유한 물점 일 때 z_3 을 곡선보간하고 k 를 선형보간하여 구한 줌 궤적 그래프이다. 그리고 (c)는 M_{4b} 의 2가지 형태 중 앞에서 말한 바와 같이 4군 줌 렌즈의 형태 중에서 가장 복잡한 줌 궤적으로 z_1, z_2, k 를 곡선보간하여 구한 줌 궤적 그래프이다. (b)와 (d)는 (a)와 (c)에 대한 EFL 그래프이다.

4.2. 5군 줌 렌즈

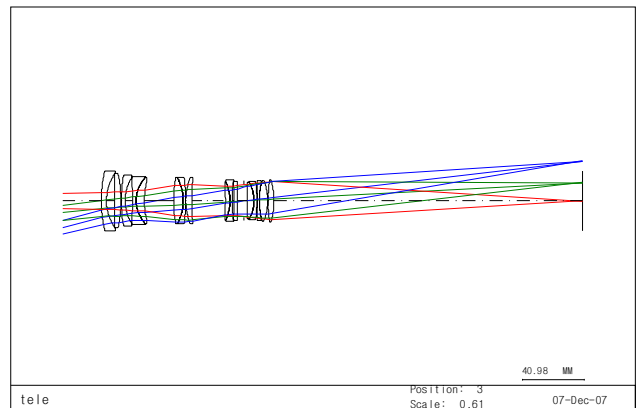
표 4는 12매 렌즈로 구성된 5군 줌 렌즈계인 참고문헌 [17]의 예제 2를 정리한 렌즈계 사양에 대한 것으로 줌 렌즈의 4가지 줌 위치에서 유효 초점거리, F-수($f/\#$), 반화각(FOV(semi)), 줌비 (Zoom Ratio), 줌 형태(Type)를 정리한 것이다.



(a)



(b)

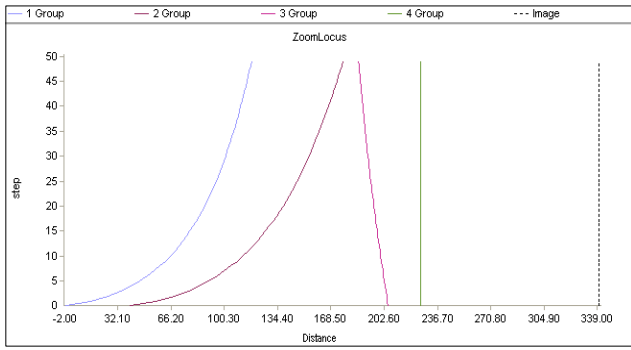


(c)

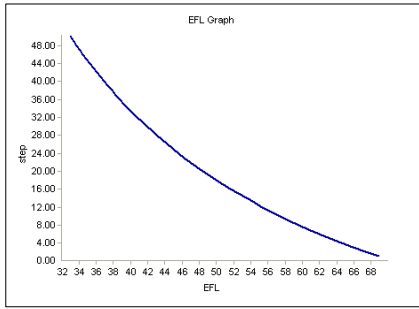
그림 4. 4군 줌 렌즈계의 각 위치에서의 광선 추적. (a) wide에서의 광선추적, (b) middle에서의 광선추적, (d) tele에서의 광선추적.

표 4. 5군 줌렌즈인 특허 US 6,002,527^[17] 예제 2의 렌즈계 사양

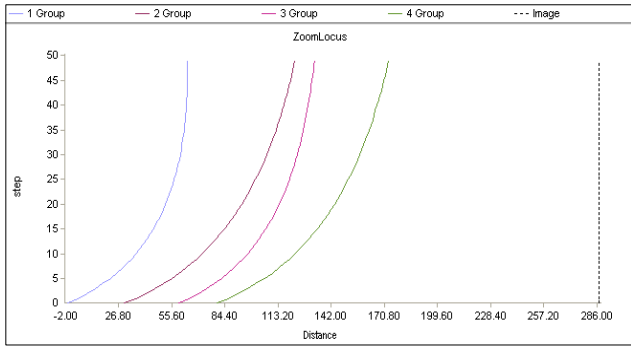
Position	1	2	3	4
f	36.00	75.00	112.50	171.25
f/#	3.9	5.02	5.50	5.87
FOV	63.83	31.40	21.12	13.92
Zoom Ratio	4.75 X			
Type	PNNPP			



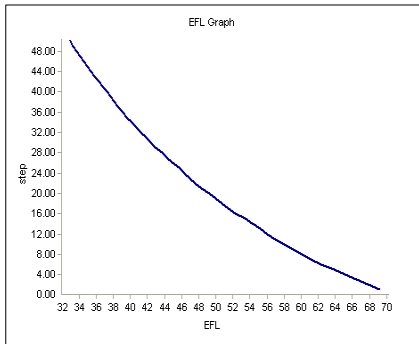
(a)



(b)



(c)



(d)

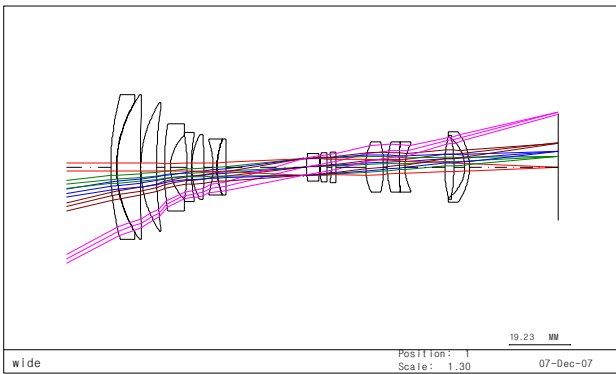
그림 5. 물체거리가 300 mm인 경우 4군 줌 렌즈에서 각 군의 주요면에 대한 줌 궤적 그래프. (a) z_3 을 곡선보간하고 k 를 선형보간한 M_{4a} 줌 렌즈계의 각 군의 주요면들에 대한 줌 궤적 그래프, (b) (a)의 경우에 대한 EFL 변화 그래프, (c) z_1, z_2, k 를 곡선보간한 M_{4b} 줌 렌즈계의 각 군의 주요면들에 대한 줌 궤적 그래프 (d) (c)의 경우에 대한 EFL 변화 그래프.

표 5는 위 표 4의 자료를 프로그램에 입력하여 구한 각 군의 광학계 속성으로 이 결과를 3절에서 만든 프로그램의 “LOCUS” 창에 입력하여 줌 궤적을 추적 할 수 있다.

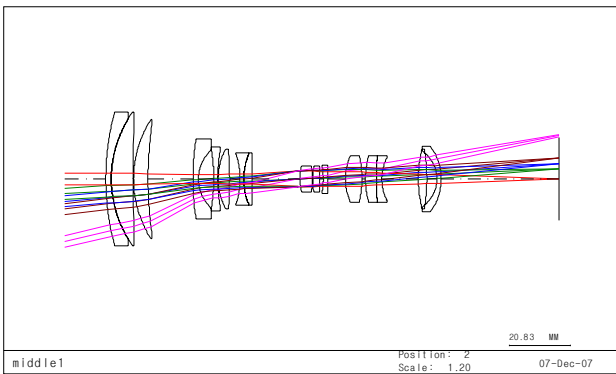
이 렌즈의 사양들을 입력하여서 구한 5군의 궤적은 표 1에서 보듯이 4군 줌렌즈보다 4가지 더 많은 궤적이 가능하나 일부의 형태에서는 해가 존재하지 않는다. 그림 6은 5군 줌 렌즈계의 여러 가지 줌 상태에서 축상광선과 비축광선을 추적하여 구한 결상점들을 보여주는 결과로 5군 줌 상태의 렌즈 군들의 배치를 직접적으로 보여준다. 그림 6(a)와 (d)의 상태가 각각 wide 상태와 tele 상태이며, 이들의 중간지점들인 그림 6(b)와 (c)는 middle 상태이다.

표 5. 표 4의 줌 렌즈 사양을 이용하여 줌 궤적 프로그램으로 구한 광학계와 줌 위치별 속성

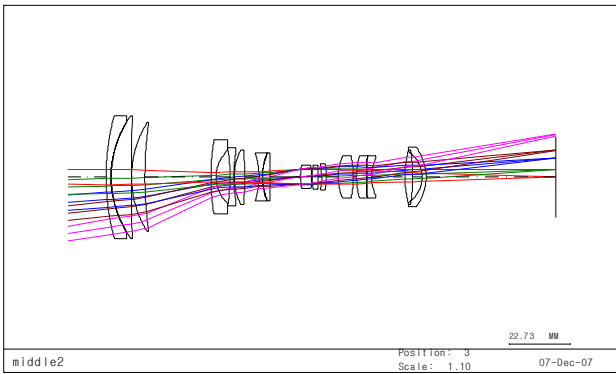
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
H1	3.1918	-2.2519	0.2871	-3.3985	-7.9969
H2	-5.3806	-12.6342	-1.869	-10.057	-31.9292
EFL	76.0886	-43.9713	-38.7994	54.1057	57.7422
K	0.0131	-0.0227	-0.0258	0.0185	0.0173
Position 1	-0.030941				
z	5.6287	15.7495	23.0873	11.3623	66.6823
Total K	0.0333				
EFL	30.012				
BFL	26.9877				
Position 2	-0.060245				
z	19.6706	16.6713	13.3652	7.905	82.5239
Total K	0.0179				
EFL	55.8199				
BFL	38.2079				
Position 3	-0.091059				
z	28.6204	18.5493	8.6461	6.628	88.7104
Total K	0.0123				
EFL	81.0689				
BFL	40.8685				
Position 4	-0.145348				
z	34.3523	20.4213	2.8456	5.9853	93.592
Total K	0.0082				
EFL	122.501				
BFL	45.0476				



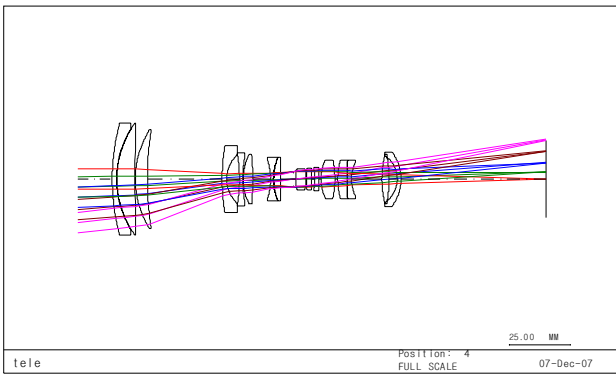
(a)



(b)

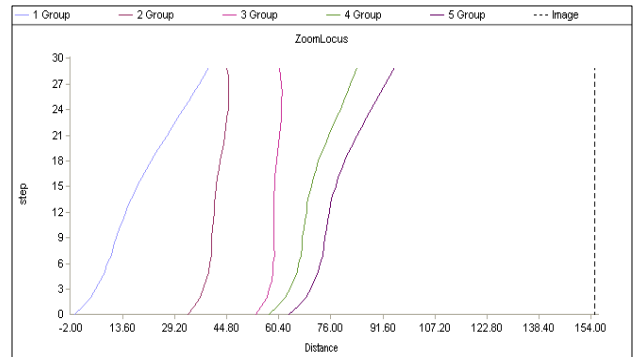


(c)

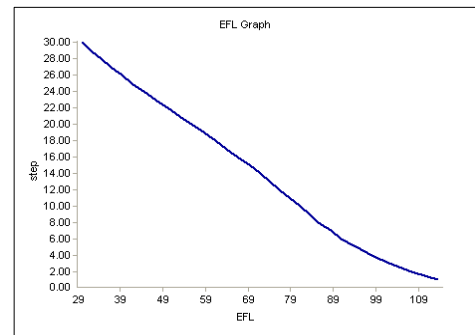


(d)

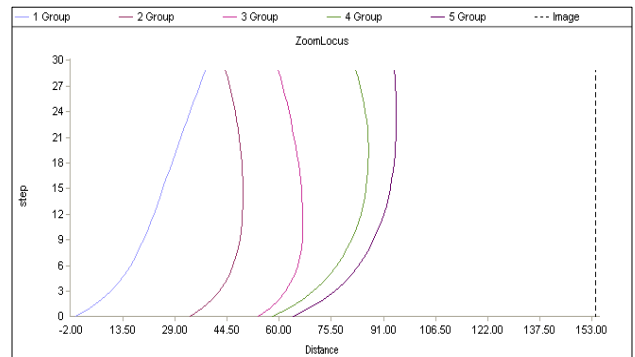
그림 6. 5군 줌 렌즈계의 각 위치에서의 광선 추적. (a) wide에서의 광선추적, (b) middle에서의 첫 번째 광선추적, (c) middle에서의 두 번째 광선추적, (d) tele에서의 광선추적.



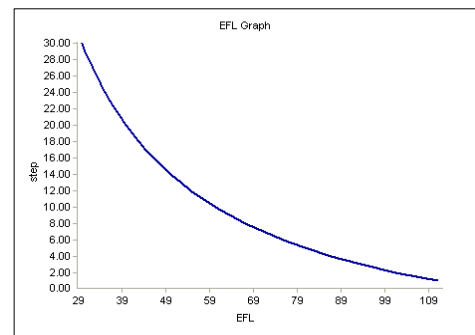
(a)



(b)



(c)

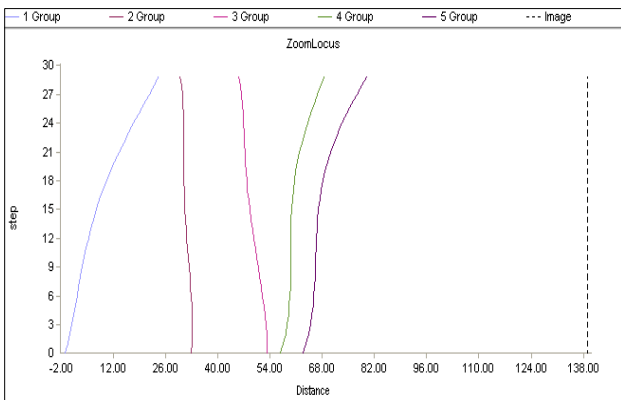


(d)

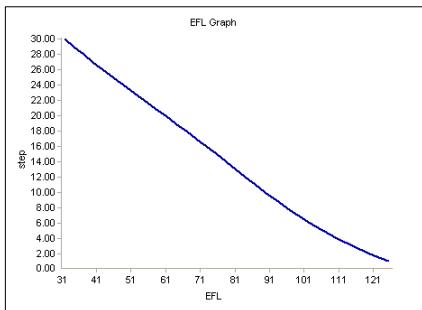
그림 7. 유한 물점(물체거리 = 1000 mm)인 경우 5군 줌 렌즈계 (M_{5n})에서 각 군의 주요면에 대한 줌 궤적 그래프 (a) z_1, z_2, z_4, k 를 곡선보간하여 구한 줌 궤적 그래프, (b) (a)의 경우에 대한 EFL 변화 그래프, (c) (a)의 경우에서 k 를 선형보간한 경우의 줌 궤적 그래프, (d) (c)의 경우에 대한 EFL 변화 그래프.

그림 7은 표 5의 내용을 사용하여 구한 5군 줌 렌즈의 형태에 따른 궤적을 보간법을 이용하여 30개의 구간으로 나누어 구한 각 군의 주요면에 대한 줌 궤적 (a)와 (c)를 그래프로 나타낸 것이다. 이때 가로축의 단위는 mm이고 세로축은 줌의 wide와 tele 사이의 구간을 나눈 횟수이다. 이 때 사용한 줌 궤적은 특허에 명시되어 있는 궤적인 M_{5n} 형태로 구했으며, 서로 다른 보간법을 사용하여 궤적을 산출하였다. 즉, 그림 7 (a)는 M_{5n} 에 대한 줌 궤적으로 물체거리가 1000 mm일 경우 z_1, z_2, z_4, k 를 곡선보간하여 구한 각 군의 주요면 들에 대한 줌 궤적 그래프 이다. 그림 7(c)는 (a)에서 구한 궤적에 k 를 선형보간 했을 경우로 각각 z_1, z_2, z_4 를 곡선보간 하고 k 를 선형보간하여 구한 궤적이다. 앞의 결과와 비교해 보면 궤적이 좀 더 부드럽게 나오는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 원하는 군의 줌 궤적 또는 k 를 선형으로 선택함으로써 곡선보간과 또 다른 궤적을 구할 수 있으며, 때에 따라서 더욱 간소화된 움직임 보이는 줌 궤적을 구할 수 있다. (b)와 (d)는 (a)와 (c) 경우의 EFL 그래프이다.

그림 8은 표 4의 자료를 프로그램에 입력하고 물체거리가 10^{11} mm인 경우에 얻은 각 군의 광학계 속성을 이용하여 줌 궤적을 추적한 것이다. 그림 8(a)는 M_{5n} 에 대한 줌 궤적으로 z_1, z_2, z_3, z_4 를 곡선보간하여 구한 줌 궤적 그래프이며, (b)는 (a)의 EFL 그래프이다. 이렇게 구한 줌 궤적은 앞서 발표된 무한 물점을 갖는 줌 렌즈의 궤적에 대한 참고문헌 [6]의 그



(a)



(b)

그림 8. 무한 물점인 경우 5군 줌 렌즈계(M_{5n})에서 각 군의 주요면에 대한 줌 궤적 그래프 (a) z_1, z_2, z_3, z_4 를 곡선보간하여 구한 줌 궤적 그래프, (b) (a)의 경우에 대한 EFL 변화 그래프.

림 6(a)와 정확히 일치함을 확인하였다.

V. 결 론

줌 렌즈 궤적을 구하는 것은 앞서 설명한 것처럼 상면이 고정된 광학계에서 렌즈군이 이동하면서 zooming하는 경우에도 상면의 위치변화 없이 이동하기 위한 렌즈 군들의 이동 변화량을 구하는 것이다. 이전의 방식은 연립방정식을 풀어 해석적인 해를 구하였으나 계산이 매우 복잡하고 시간이 많이 걸리며 서로 다른 줌 렌즈마다 프로그램을 달리 해야 하는 문제가 있었다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해서 본 논문에서는 참고문헌 [6]에서와 같이 반복적이고 체계적인 광선추적에 매우 편리한 가우스 팔호법을 이용하여 유한 물점에 대한 N군 줌 렌즈들에 대한 근축광선 줌 궤적을 수치해석적으로 구하였다. 그리고 이 계산방법을 프로그램화하여 줌 궤적을 빠르게 구하는 것이 가능해지도록 하였으며, 작성한 프로그램을 사용하여 기존에 특허로 발표된 4군 줌 렌즈와 5군 줌 렌즈 자료들에 대한 줌 궤적을 구하여 보았다.

또한 본 프로그램에서는 초기 줌 궤적이 나쁘더라도 서로 다른 보간법을 이용하여 다양한 방법으로 변화를 주면 또 다른 줌 궤적을 구할 수 있기 때문에 훨씬 다양한 줌 궤적을 구하여 비교가 가능하다. 이렇게 비교를 할 경우 제작에 가장 알맞은 군의 이동형태를 선택할 수 있는 장점이 있다. 즉 본 논문의 방법 및 이를 구현한 프로그램을 사용할 경우 초기 설계시 사용자가 매우 쉽고 다양하게 일반적으로 줌 궤적 설계에 접근할 수 있다.

본 논문에서는 아직 4군, 5군 줌 궤적만을 해석해 놓았으나 이 계산방법을 도입하면 N군까지의 궤적 해석이 가능하다. 그러나 이것은 초기 설계에 이용이 가능한 궤적으로 공차를 고려한 줌 궤적 분석이나 마지막 전체수차를 고려한 설계는 하지 않았다. 본 논문은 좋은 줌 렌즈를 설계하는 것이 목적이 아니라 무한 물점과 유한 물점에 대한 모든 줌 렌즈 형태에 대해서 일관된 줌 궤적 공식과 이를 이용한 프로그램을 제시하고 이 방법의 유효성을 검증하는 것이다. 비록 본 논문에서는 4군과 5군의 각각 한 가지씩의 형태만을 시도하였지만 모든 형태와 모든 보간법을 쉽게 적용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] K. Yamaji, "Design of Zoom Lenses," in *Progress in optics* *V*, edited by E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1971), Chapter. 4.

- [2] 류재명, 이혁기, 이해진, 강건모, 조재홍, “디지털 카메라용 줌렌즈에서 대칭성 오차요인에 의한 상면변화의 보정과 이에 따른 불량률 예측,” *한국광학회지*, 제 17권 5호, pp. 420-429, 2006.
- [3] J. M. Ryu, J. H. Jo, J. H. Jung, Y. S. Chun, and G. M. Kang, “Design of microscopic system using zoom structure with a fixed magnification and the independency on the vibration of object distance,” *Proc. SPIE*, vol. 5523, pp. 352-362, 2004.
- [4] 류재명, 임천석, 조재홍, 정진호, 전영세, 이강배, “와이어 본딩(wire-bonding) 검사용 현미경 광학계의 설계,” *한국광학회지*, 제 14권 6호, pp. 613-622, 2003.
- [5] 류재명, 김재범, 강건모, 조재홍, 백승선, 정진호, “반도체 부품 검사용 다중배치 현미경 광학계의 공차분석,” *한국광학회지*, 제 17권 2호, pp. 149-158, 2006.
- [6] 유남준, 김원섭, 조재홍, 류재명, 이해진, 강건모, “가우스 괄호법을 이용한 무한 물점을 갖는 복잡한 줌 렌즈의 수치해석적인 근축광선 줌 궤적 추적법,” *한국광학회지*, 제 18권 6호, pp. 410-420, 2007.
- [7] 정진호, *줌 렌즈계의 근축설계와 궤적해석*(영남대학교, 대구, 1994) 박사학위 청구논문, pp. 3.
- [8] 정진호, 정해빈, 이상수, “초점거리, 뒷초점거리, 앞초점거리를 만족하는 근축광학적 렌즈설계,” *새물리*, 제 27권 6호, pp. 576-582, 1987.
- [9] J.-P. Berrut and L. N. Trefethen, “Barycentric lagrange interpolation,” *Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol 86, no 3, pp 501-517, 2004.
- [10] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 2nd ed. (MIT Press and McGraw-Hill, New York, 2001), pp. 735-741.
- [11] D. H. Bailey, K. L. Horst, and D. Simon, “Using strassen's algorithm to accelerate the solution of linear systems,” *The Journal of Supercomputing*, vol. 4, pp. 357-371, 1990.
- [12] W. J. Smith, *Modern Optics Engineering*, 3rd ed. (McGraw-Hill, New York, 2000) pp. 291-296.
- [13] K. Tanaka, “Zooming components loci of typical types of mechanically compensated zoom lens - Afocal converter, basic type and standard type,” *Optik* vol. 111, no. 4, pp. 149-156, 2000.
- [14] K. Tanaka, “Zooming components loci of a generally constructed mechanically compensated zoom lens,” *Optik*, vol. 112, no. 6, pp. 232-238, 2001.
- [15] 정진호, 정해빈, “4군 줌 렌즈계 1:(분류와 궤적해석),” *응용물리*, 제 3권 1호, pp. 29-38, 1990.
- [16] 佐藏 正江, “有限距離用 ズムレンズ”, 1994, JP 特開平 8-21952.
- [17] M. Ohtake, Kawasaki, “Compact High-Zoom-Ratio Zoom Lens,” U.S. Patent 6,002,527, 1999.

General Numerical Calculation Method for Paraxial Zoom Loci of Zoom Lenses with Finite Object Distance by Using Gaussian Bracket Method

Do Kyung Lee, Nam Jun Yoo, and Jae Heung Jo[†]

Dept. of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

[†]*E-mail: jhjo@hnu.kr*

Jae Myung Ryu, Geon Mo Kang, and Hae Jin Lee

Lens Development Group, Samsung Digital Imaging Co. Ltd., Suwon 443-373, Korea

(Received April 3, 2009; Revised manuscript April 20, 2009; Accepted April 20, 2009)

We theoretically derive the set of general paraxial zoom locus equations for all zoom lens systems with finite object distance, including the infinite object distance case, by using the Gaussian bracket method and matrix representation of paraxial ray tracing. We make the zoom locus program by means of a numerical calculation method according to these equations in Visual Basic Language. Consequently, the solutions of this method can be consistently and flexibly used in all types of zoom lens in the step of initial design about zoom loci. Finally, in order to verify the justification and usefulness of this method, we show that two examples, such as M_{4a} and M_{4b} types of 4 groups, and one example, M_{5n} type of 5 groups, which are very complicated zoom lens systems, can be rapidly and diversely traced through various interpolations by using this program.