

가우스 괄호법을 이용한 무한 물점을 갖는 복잡한 줌 렌즈의 수치해석적인 근축광선 줌 궤적 추적법

유남준 · 김원섭 · 조재홍[†]

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

류재명 · 이해진 · 강건모

삼성테크윈(주) 광디지털사업부 선도기술팀
☎ 369-841 경상남도 창원시 성주동 42번지

(2007년 10월 23일 받음, 2007년 11월 7일 수정본 받음)

가우스 괄호법을 이용하여 카메라 렌즈와 같이 무한 물점을 대상으로 하는 모든 복잡한 줌 렌즈에서 사용가능한 근축광선 줌 궤적 추적식을 이론적으로 유도하였다. 그리고 이를 Visual Basic으로 프로그래밍하여 수치해석적으로 줌 궤적을 구하였다. 이 방법은 근축광선 추적식을 가우스 괄호법에 적용시켰기 때문에 다양한 줌 형태에 따른 구속조건의 공식을 매우 간편하고 알기 쉽게 단순화시켜 준다. 이 결과 이 식의 해는 모든 종류의 줌 렌즈에서 줌 궤적에 대한 초기설계에 유연하면서 통합적으로 적용할 수 있다. 이 식의 유용성을 증명하기 위하여 4군과 5군의 매우 복잡한 줌 렌즈계의 줌 궤적을 다양한 보간법으로 빠르게 산출해 낼 수 있음을 보였다.

주제어 : 기하광학, 렌즈설계, 줌 렌즈, 가우스 괄호법

I 서 론

줌 렌즈는 배율 또는 유효초점거리가 연속적으로 변해도 상면이 고정되는 광학계로 정의 한다.^[1-3] 줌 렌즈의 설계는 크게 4단계로 나누어 기초설계, 초기설계, 최적설계, 공차해석으로 구분되는데, 기초설계 단계는 가우스 광학에 의거 각 군의 굴절능과 군 간의 간격을 설정하고 각 렌즈군의 구경 및 렌즈군의 수, 초점조절 방법선정을 하는 단계이고, 초기설계 단계는 자이텔 수치이론을 적용, 특성행렬과 고유계수로부터 렌즈의 수차를 보정하여 각 군의 형상을 결정하는 단계이며, 최적설계는 함수의 1계 미분이 영이 되는 해를 구함으로써 렌즈의 성능평가함수(merit function)을 최소화시켜서 광학성능을 극대화하는 단계이다. 그리고 공차해석은 렌즈계의 사용조건 및 성능에 따라 렌즈계의 제작시 설계값의 한계 공차를 설정하여 주는 것, 즉 제작오차의 허용한도를 설정하여 주는 단계이다.^[4-5] 각 군의 공차해석까지 완료한 후에는 전체 줌 광학계의 각 구간 간격 이동을 원하는 배율에 따라 거의 연속적으로 바꾸어주는 줌 궤적을 계산해야 한다.

이 과정 중에서 기존의 줌 궤적을 계산하는 방법^[6]은 각 군의 굴절능과 각 zoom 위치에서의 간격과 구속조건을 이용하여 줌 궤적을 해석적으로 구하는 방법이다. 이러한 방법은 줌 렌즈에서 군의 개수나 이동하는 군이 많은 줌 광학계로 갈수록 복잡해서 해석적인 방법으로 해를 구하는 것은 실질적으로 불가능하다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하고

자 근축광선 추적을 가우스 괄호법으로 표현하여 수치해석적인 방법을 사용으로써 군의 개수와 구속조건에 관계없이 일반적인 N군 줌 렌즈에 공통적으로 적용할 수 있는 일관된 알고리즘을 사용하여 줌 궤적프로그램을 구현하고자 한다.

한편 가우스 괄호법은 K. F. Gauss에 의하여 제안되었고, M. Herzberger에 의하여 렌즈계의 해석에 적용되어진 기법으로, K. Tanaka는 줌 렌즈계의 초기개념 파악 및 궤적해석에 유용하게 이용하였다.^[7-8] 실제 제작되는 줌 렌즈들은 최소의 비용으로 제작해야한다는 문제와 사용자의 입장에서 가볍고 작아야 한다. 그러므로 줌 렌즈에 군 이동을 단순화시키면서도 성능을 같게 할 수 있다면 실용화에 더욱 장점을 가질 수 있다. 이를 위하여 줌 렌즈의 궤적을 구할 시에는 다양한 줌의 형태에 대한 가능한 해를 알아보고 이 중에서 최적의 해를 선택해야 한다. 그러나 이전의 줌 궤적을 구하는 방법들은 이러한 면에서 불리한 방법이다. 즉 이미 계산을 할 때 이동할 렌즈의 형태를 잡고 계산을 시작하기 때문에 또 다른 줌의 형태에 대한 이동량을 구하고자 할 때는 다시 해석적인 식을 세워 계산을 해야만 한다.

이 논문에서는 가우스 괄호법으로 단순화시킨 줌 궤적 공식을 프로그래밍하여 여러 가지 형태, 특히 4군 이상의 복잡한 줌 렌즈의 궤적을 쉽게 구해 볼 수 있도록 하여 기존의 방법이 갖는 문제점들을 해결하고자 한다. 실제로 줌 렌즈에서 군수가 많아질수록 손으로 풀 수 없는 형태들이 존재하는데 가우스 괄호법으로 작성한 줌 렌즈 궤적을 구하는 단순화된 알고리즘을 사용하면 이러한 줌 렌즈 형태의 궤적을 쉽게 구할 수 있다.

[†]E-mail: jhjo@hannam.ac.kr

II. 가우스 괄호법을 이용한 줌 렌즈계의 줌 궤적 추적식

2.1. 가우스 괄호법을 이용한 근축광선 추적법의 표현

일반적으로 사용하는 근축광선 추적식을 이용하여 각 렌즈에 대한 입사고(h_i)와 입사각(u_i)을 알 수 있다. 그림 1과 같이 초기 입사고와 초기 입사각을 각각 $h_1=1, u_1=0$ 로 했을 경우, 즉 무한물점에 대한 근축광선 추적식은 가우스 괄호법^[3,6]으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 n_i 는 i 번째 렌즈의 굴절률이고, k_i 는 i 번째 렌즈의 굴절능이며, z_i 는 i 번째 렌즈와 $i+1$ 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. 식 (1)을 일반화하여 i 번째 면에서의 광선에 대한 입사고와 입사각인 h_i 와 $n_i u_i$ 를 가우스 괄호법의 규칙과 행렬식을 이용하여 기술하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} h_i \\ n_i u_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{d_{i-1}}{n_{i-1}} \\ -k_i & -\frac{d_{i-1}}{n_{i-1}} - k_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{i-1} \\ n_{i-1} u_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 연속적으로 모든 면들에 적용하면 물체면인 0번째 면에서의 입사고(h_0) 및 입사각($n_0 u_0$)과 i 번째 면에서의 입사고(h_i) 및 입사각($n_i u_i$)사이의 관계를 구할 수 있으며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} h_i \\ n_i u_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [k_1, \dots, -\frac{d_{i-1}}{n_{i-1}}] & -[\frac{d_0}{n_0}, k_1, \dots, -\frac{d_{i-1}}{n_{i-1}}] \\ [k_1, -\frac{d_1}{n_1}, \dots, k_i] & [-\frac{d_0}{n_0}, k_1, \dots, -\frac{d_{i-1}}{n_{i-1}}, k_i] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ n_0 u_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

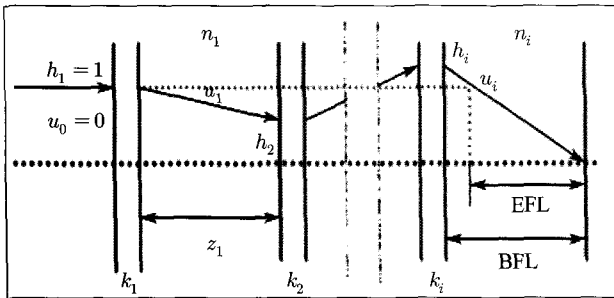


그림 1. 근축 광선 추적도.

무한 물점의 경우 $u_0=0$ 이기 때문에 식 (3)에서 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$h_i = \left[k_1, \dots, -\frac{d_{i-1}}{n_{i-1}} \right] h_0 \quad (4)$$

$$n_i u_i = - \left[k_1, -\frac{d_1}{n_1}, \dots, k_i \right] h_0 \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)으로부터 평행하게 입사한 광선의 각 면에서의 높이와 입사각을 알 수 있으며, 이 두 식은 높이 h_0 로 출발한 광선의 $i-1$ 번째 면에서의 광선의 높이와 1면에서 i 번째 면까지의 굴절능 K 를 의미한다. 또한 식 (3)을 사용하면 각 렌즈 또는 렌즈계의 주요면을 알아 낼 수 있다. 즉 $u_0=0$ 이면 제 2 주요면의 위치가 되고, u_i 가 0이 되면 제 1 주요면의 위치가 된다. 이것을 식 (3)에 대입하여 정리하면 제 1 주요면 (H_1)과 제 2 주요면 (H_2)의 위치는 다음과 같다.

$$H_1 = \frac{1 - \left[-\frac{d_0}{n_0}, k_1, \dots, -\frac{d_{i-1}}{n_{i-1}}, k_i \right]}{\left[k_1, -\frac{d_1}{n_1}, \dots, k_i \right]} \quad (6)$$

$$H_2 = \frac{\left[k_1, \dots, -\frac{d_{i-1}}{n_{i-1}} \right] - 1}{\left[k_1, \dots, -\frac{d_1}{n_1}, k_i \right]} \quad (7)$$

2.2. 가우스 괄호법을 이용한 줌 렌즈 궤적 추적식의 표현

식 (6)과 (7)에서 보듯이 근축광선에 대한 가우스 괄호법 표기를 가지고 광선 추적을 하면 주요면 사이의 거리를 각 면 사이의 거리로 산출해 낼 수 있다. 이제까지는 단일 렌즈 단위로 광선 추적을 했는데 이 절에서는 줌 궤적을 계산하기 위해서 렌즈군 단위로 광선 추적을 한다.

우선 줌 렌즈 궤적을 추적하려면 줌 궤적에 대한 방정식과 이 식에서 구한 해가 정확한지 판단하기 위한 판별식이 필요하다. 그림 2에서 보듯이 결상 광학계에 평행광이 입사한다면 마지막 상면에서의 h_i 는 0이 되는데 이 식을 가우스 괄호로 표현하여 homogeneous 방정식인 f_i 으로 나타내면

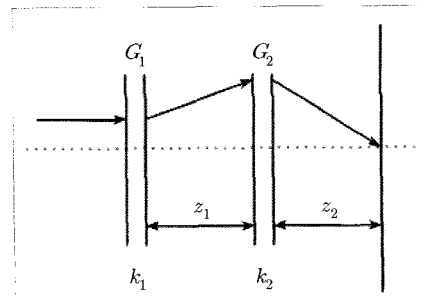


그림 2. 줌 렌즈에서 렌즈군의 광선 추적도.

$$f_1(k_1, k_2, \dots, k_{i-1}, k_i) = [k_1, -z_1, k_2, \dots, k_{i-1}, -z_{i-1}, k_i] - K = 0 \quad (8)$$

와 같이 표현할 수 있고, 이 식을 줌 공식이라고 한다. 그리고 식 (5)를 K 로 치환하여 정리한 후 homogeneous 방정식인 f_2 로 쓰면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$f_2(k_1, k_2, \dots, k_{i-1}, k_i) = [k_1, -z_1, k_2, \dots, k_{i-1}, -z_{i-1}, k_i, -z_i] = 0 \quad (9)$$

이 되며, 이를 굴절능 공식이라고 한다. 이렇게 구한 식 (8)은 구한 줌 궤적을 가우스 팔호에 대입했을 때 얻어진 굴절능과 본래 주어진 굴절능의 일치정도를 판단하는데 사용하며, 식 (9)는 상면까지 진행한 주광선의 상의 높이를 판단하여 일치정도에 따라 반복을 하여 계산하는데 사용한다.

위 식을 줌 궤적 추적식에서 편리하게 이용하기 위하여 각 성분으로 편미분하는데, 가우스 팔호를 편미분하여 다시 가우스 팔호의 형태로 단순화시켰다. 이렇게 f_1 과 f_2 를 각 변수들로 편미분한 값은 아래의 식 (10)와 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial z_1} &= -k_1 [k_2, -z_2, \dots, k_i] \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_2} &= -[k_1, -z_1, k_2] [k_3, -z_3, \dots, k_i] \\ &\vdots \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_{i-1}} &= -[k_1, -z_1, \dots, k_{i-1}] k_i \\ \frac{\partial f_1}{\partial z_i} &= 0 \\ \frac{\partial f_1}{\partial K} &= -1 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{f_2}{z_1} &= -k_1 [k_2, -z_2, \dots, k_i, z_i] \\ \frac{f_2}{z_2} &= -[k_1, -z_1, k_2] [k_3, -z_3, \dots, k_i, z_i] \\ &\vdots \\ \frac{f_2}{z_{i-1}} &= -[k_1, -z_1, \dots, k_{i-1}] [k_i, -z_i] \\ \frac{f_2}{z_i} &= -[k_1, -z_1, \dots, k_i] \\ \frac{f_2}{K} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

이렇게 나온 식 (8)부터 식 (11)까지와 구속 조건의 함수 f_3, \dots, f_n 를 같이 연립하여 줌 궤적인 z_i 에 대해서 풀 수 있다. 그리고 최종적으로 구해진 줌 궤적의 해들은 이 연립 방정식들을 자동으로 만족해야만 한다. 만약 미지수가 많게 되면 연립방정식을 풀 수 없기 때문에 보간법을 사용하여 변수를 줄이는데, 본 논문에서는 2가지 보간법인 선형보간법과 곡선보간법의 한 종류인 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 보간한 값과 고정된 군을 제외하고 줌 궤적을 구하고자 하는 값만을 가지는 f_1, f_2, \dots, f_n 로 다시 쓰고, 이를 두 변수에 대한 Taylor 급수 전개를 하여 1차 미분항까지만 정리하면

$$\begin{aligned} f_1(z_1, \dots, z_i, K) &\approx f_1(z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0) \\ &+ \left. \frac{\partial f_1}{\partial z_1} \right|_{z_1=z_{10}} \cdot (z_1 - z_{10}) + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial z_i} \right|_{z_i=z_{i0}} \cdot (z_i - z_{i0}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial K} \right|_{K=K_0} \cdot (K - K_0) = 0 \\ f_2(z_1, \dots, z_i, K) &\approx f_2(z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0) \\ &+ \left. \frac{\partial f_2}{\partial z_1} \right|_{z_1=z_{10}} \cdot (z_1 - z_{10}) + \dots + \left. \frac{\partial f_2}{\partial z_i} \right|_{z_i=z_{i0}} \cdot (z_i - z_{i0}) + \left. \frac{\partial f_2}{\partial K} \right|_{K=K_0} \cdot (K - K_0) = 0 \\ &\vdots \\ f_i(z_1, \dots, z_i, K) &\approx f_i(z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0) \\ &+ \left. \frac{\partial f_i}{\partial z_1} \right|_{z_1=z_{10}} \cdot (z_1 - z_{10}) + \dots + \left. \frac{\partial f_i}{\partial z_i} \right|_{z_i=z_{i0}} \cdot (z_i - z_{i0}) + \left. \frac{\partial f_i}{\partial K} \right|_{K=K_0} \cdot (K - K_0) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

이 된다. 단, 식 (12)에서 1차 미분 항까지만 고려한다는 가정은 모든 i 에서 $(z_i - z_{i0})$ 의 값이 1보다 작다는 것을 전제로 한다. 위 식 (12)를 행렬로 정리하면 아래와 같이 편미분 요소로 이루어진 Jacobian 행렬이 만들어진다.

$$\begin{bmatrix} f_1(z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0) \\ \vdots \\ f_{i-1}(z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0) \\ f_i(z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial z_1} \right|_{z_1=z_{10}} & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial z_i} \right|_{z_i=z_{i0}} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial K} \right|_{K=K_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_{i-1}}{\partial z_1} \right|_{z_1=z_{10}} & \dots & \left. \frac{\partial f_{i-1}}{\partial z_i} \right|_{z_i=z_{i0}} & \left. \frac{\partial f_{i-1}}{\partial K} \right|_{K=K_0} \\ \left. \frac{\partial f_i}{\partial z_1} \right|_{z_1=z_{10}} & \dots & \left. \frac{\partial f_i}{\partial z_i} \right|_{z_i=z_{i0}} & \left. \frac{\partial f_i}{\partial K} \right|_{K=K_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \vdots \\ \Delta z_i \\ \Delta K \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

여기에서 $z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0$ 들은 각 군들 사이의 거리와 전체 줌 렌즈의 굴절능에 대한 초기값들이며, $\Delta z_1, \dots, \Delta z_i, \Delta K$ 는 이 초기값들에서 아주 작게 움직인 거리 혹은 작게 변화시킨 굴절능으로 본 식에서 구하고자 하는 굴절능 변화에 따른 줌 궤적의 변화값이다. 이 값들에 대한 표현을 구하기 위하여 식 (13)을 다시 쓰면

$$\begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \vdots \\ \Delta z_i \\ \Delta K \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial z_1} \right|_{z_1=z_{10}} & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial z_i} \right|_{z_i=z_{i0}} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial K} \right|_{K=K_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_{i-1}}{\partial z_1} \right|_{z_1=z_{10}} & \dots & \left. \frac{\partial f_{i-1}}{\partial z_i} \right|_{z_i=z_{i0}} & \left. \frac{\partial f_{i-1}}{\partial K} \right|_{K=K_0} \\ \left. \frac{\partial f_i}{\partial z_1} \right|_{z_1=z_{10}} & \dots & \left. \frac{\partial f_i}{\partial z_i} \right|_{z_i=z_{i0}} & \left. \frac{\partial f_i}{\partial K} \right|_{K=K_0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_1(z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0) \\ \vdots \\ f_{i-1}(z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0) \\ f_i(z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0) \end{bmatrix} \quad (14)$$

과 같다. 마지막으로 식 (14)에 식 (10)과 식 (11)에서 구한 편미분 값을 대입하면 각 군들의 움직인 거리 Δz_i 와 줌 렌즈의 변화된 총 굴절능 ΔK 를 구할 수 있다. 이렇게 구한 값들은 앞의 판별식인 식 (8)과 식 (9)에 대입하여 그 오차가 최소가 되도록 반복하는 최적화 과정을 진행한다. 실제로 작성한 프로그램에서는 이 오차값이 10^{-8} 이하가 될 때까지 최적

화를 하였다. 그리고 식 (14)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 $z_{10}, \dots, z_{i0}, K_0$ 을 더해지면 각 군들이 움직인 줌 궤적을 구할 수 있다. 그리고 여기에 식 (6)과 식 (7)로 구한 주요면의 위치 값을 적용해지면 각 군들 사이의 거리를 렌즈들 면과 면 사이의 거리로 환산할 수 있다.

III. 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.^[15] 현재는 정밀한 기계적 가공이 가능하기 때문에 기계보정식 줌 렌즈만을 사용한다. 각 줌 렌즈계의 분류를 참고문헌 [6]에 따라서 보면 4군과 5군의 구속조건들은 표 1과 같다. 여기에서 아래첨자 숫자들은 줌 렌즈의 군수를 의미하며, 아래첨자 문자들은 구속조건에 따른 분류를 나타낸다.

초기 궤적설계시에 각 군의 굴절능 $k_1, k_2, k_3, \dots, k_i$ 은 이미 정해져 있고, 알고자 하는 궤적의 미지수는 각 군 사이의 거리들인 $z_1, z_2, z_3, \dots, z_i$ 와 뒤초점거리인 BFL, 그리고 줌 렌즈의 총 굴절능인 K 이다. 여기에서 미지수가 알고 있는 방정식보다 많게 되면 해를 구할 수가 없다. 가우스 괄호 근축 광선추적식을 사용해서 상높이에 관련된 식과, 줌 렌즈계의 굴절능 식을 알아 낼 수 있고, 여기에 각 형태에 따른 구속조건 방정식이 추가되어 연립방정식을 만들 수 있다. 그렇지만

표 1. 4군과 5군의 줌 렌즈계에 대한 구속조건.

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

당연히 미지수가 방정식의 수 보다 많은 경우가 존재하며, 이 경우에는 부족한 방정식의 수만큼 보간법 이용하여 방정식을 만든다. 이렇게 구성한 방정식들을 식 (14)와 이를 구현하는 앞서 설명한 여러 가지 알고리즘에 대입하여 2군에서 5군까지의 줌 궤적 설계가 가능한 프로그램을 만들었다. 작성된 프로그램은 한 가지 형태의 궤적뿐만 아니라 군에 따른 모든 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 알려주는 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 k_i 들, 각 군의 주요면 사이 거리 z_i 들이다. 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 하였

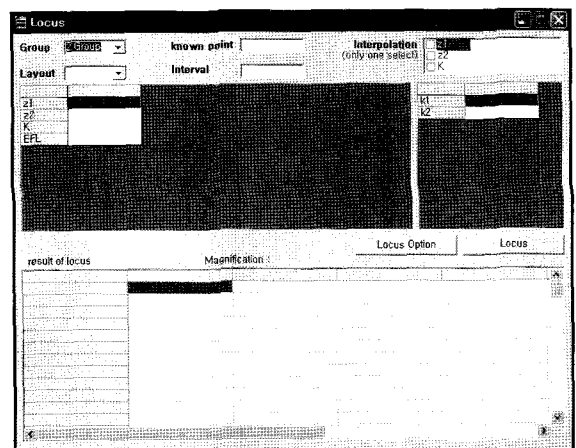


그림 3. 줌 렌즈의 근축광선을 이용한 줌 궤적 계산을 위한 프로그램에서의 데이터 입력 및 선택 창.

다. 또한 그림 3의 창에서 “LOCUS”는 줌 궤적을 구하기 위한 보간의 형태를 선택하는 창이다. 즉 앞에서 설명한 것처럼 선형보간법과 곡선보간법, 그리고 보다 유연한 방식인 위치이동 보간법으로 보간을 할 수 있도록 하였다. 특히 선형 보간법이나 곡선보간법에서 사용한 줌 렌즈의 wide와 tele 상태의 중간에 있는 줌의 구간을 똑같이 분배를 하여 중간 구간을 정했던 것을 위치이동 보간법에서는 이 중간 구간의 간격을 서로 다르게 보간함으로써 줌 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 그래프로써 이 줌 렌즈의 배율변화를 알 수 있다.

IV. 4군과 5군 줌 렌즈군의 궤적해석

본 논문에서 구한 일반화된 근축광선의 줌 궤적공식과 이를 이용한 알고리즘으로 작성한 줌 궤적 프로그램을 사용하여 비교적 복잡한 4군 줌렌즈와 5군 줌 렌즈에서 기준에 특허로 발표된 자료들에 대한 줌 궤적을 구하여 비교함으로써 본 프로그램의 타당성을 확인하고자 한다.

4.1. 4군 줌 렌즈

4군 줌 렌즈의 경우 표 1에서 보듯이 많은 형태가 존재하고, 줌 궤적을 구하기 위해서는 단순한 줌 렌즈계인 2군이나 3군 줌 렌즈계보다 더 많은 방정식을 연립하여 풀어야하는 문제가 생긴다. 특히 이 중에도 M_{4h} 형태와 같은 경우는 모든 군이 움직이는 경우로 직접 계산하여 풀어나기 매우 어렵지만 본 논문에서 제시한 2절의 가우스 괄호법을 이용한 이론식 및 이를 구현하는 알고리즘과 3장의 프로그램을 사용할 경우 매우 쉽게 구할 수 있다.

표 2는 4군 줌 렌즈계의 예로 제시한 13매의 렌즈로 구성된 특허 US 7,190,529 B2 예제 1^[16]의 사양이며, 줌 렌즈의 wide 상태(Position 1), middle 상태(Position 2), tele 상태 (Position 3)에서 초점거리(F), f#, 반화각(FOV(semi)), 줌비 (Zoom ratio), 줌 렌즈 형태(Type)를 각각 나타내었다. 특히 줌 렌즈 형태에서 P는 수렴렌즈를 의미하고 N은 발산렌즈를 의미하며, 각 군의 형태가 수렴렌즈군-발산렌즈군-수렴렌즈군-수렴렌즈군이라는 것을 의미한다.

표 2에서 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), 유효초점 거리(EFL), 굴절능(K)을 알 수 있다. 또한 wide 상태(Position 1), middle 상태(Position 2), tele 상태(Position 3)에서 그림 2에서 나타난 것과 같은 각 군들 간의 거리 z와 이 각각의 상태들에서의 총 굴절능(total K), 유효초점거리(EFL), 뒤초점

거리(BFL)들도 계산하여 알 수 있다. 이들을 이용하여 4군 줌 렌즈 광학계의 줌 궤적을 구한다.

그림 4는 4개의 군으로 이루어진 줌 렌즈계의 줌 궤적과 EFL을 구한 결과이다. 그림 4에서 보듯이 앞서 말한 바와 같이 4군 줌 렌즈의 형태 중에서 가장 복잡한 M_{4h}를 서로 다른 보간법으로 줌 궤적의 구간을 30개로 나누어 구하였다. 우선 첫 번째로 구한 그림 4(a)는 M_{4h} 형태의 줌 궤적에 대해서 z₁, z₂, z₃를 곡선보간하여 계산한 줌 궤적으로 광학배율은 9.05X이다. 모든 군의 줌 궤적은 부드럽게 이어짐을 알 수 있다. 그림 4(c)는 M_{4h} 형태의 줌 렌즈계 궤적은 z₁, z₂, z₄를 곡선보간하여 구하였다. 이 경우의 광학배율은 9.59X였다. 마지막으로 그림 (e)와 (g)는 각각 그림 4(c)의 경우에서 z₄를 선형적으로 보간한 경우와 광학계 중심부분을 아래로 이동시켜서 구한 경우의 궤적이다. (c), (e), (f)의 경우들은 (a)의 경우 보다 줌 궤적이 훨씬 급격하게 변함을 알 수 있으

표 2. 4군 줌 렌즈인 특허 US 7,190,529 B2 예제1^[15]의 렌즈계 사양.

Position	1	2	3
F	4.3	14.1	46.1
f/#	2.80	3.22	3.70
FOV (semi)	38.746	13.309	4.137
Zoom ratio	10.72 X		
Type	PNPP		

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

(a) 광학계 속성

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
H1	2.5201	0.1075	-2.163	0.5298
H2	-4.2899	-8.3821	-10.3581	-1.1768
EFL	38.5426	-7.6847	14.3645	20.8297
Power	0.0259	-0.1301	0.0696	0.048

(b) 줌 위치별 속성

Position 1				
z	z1	z2	z3	z4
	4.9174	29.9291	12.1679	4.9168
Total Power	0.2324			
EFL	4.3022			
BFL	5.7063			
Position 2				
z	z1	z2	z3	z4
	15.6974	12.9291	14.6579	8.2368
Total Power	0.0709			
EFL	14.097			
BFL	9.0384			
Position 3				
z	z1	z2	z3	z4
	25.2674	8.5191	24.1379	3.1768
Total Power	0.0217			
EFL	46.1539			
BFL	3.9853			

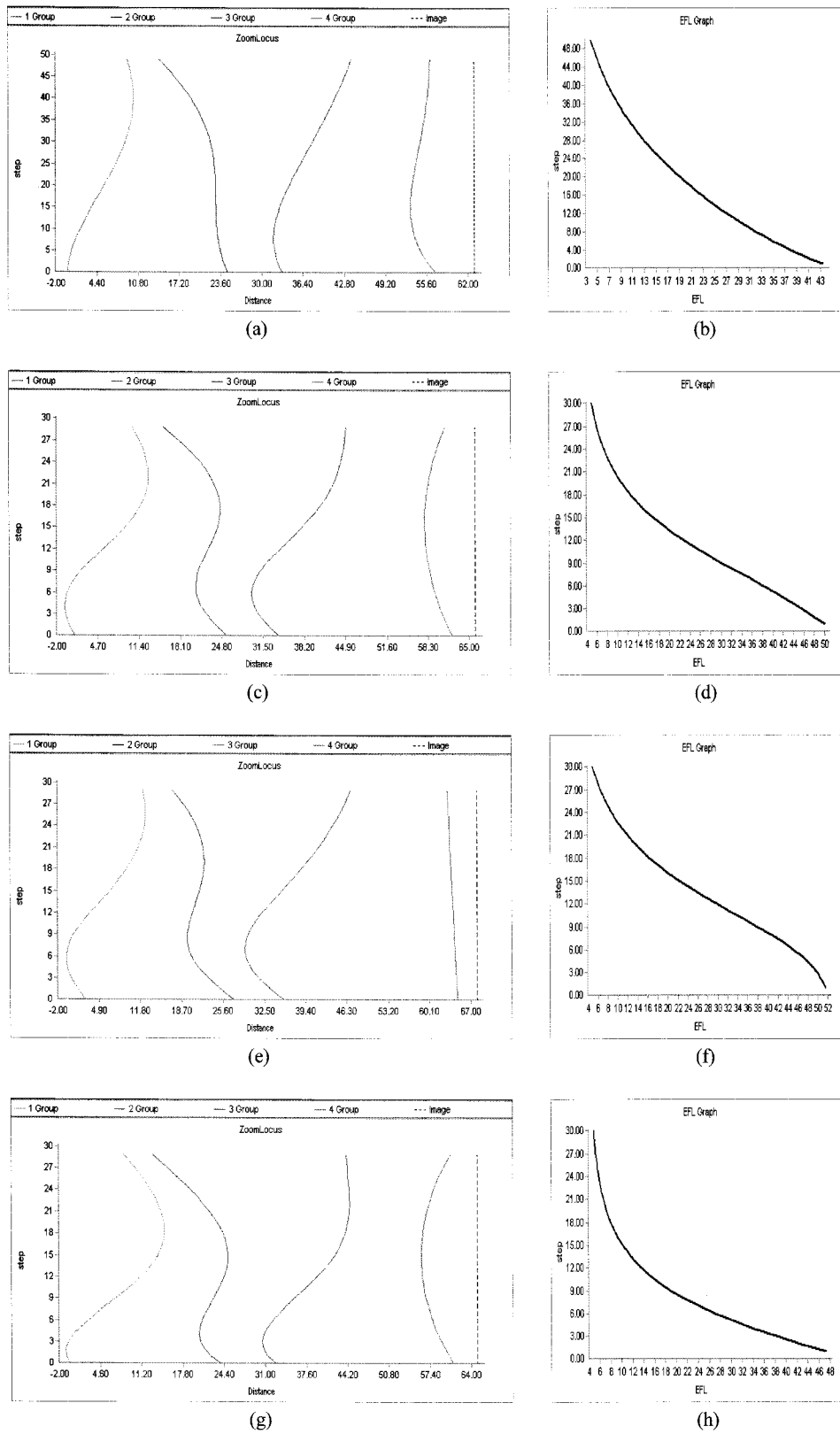


그림 4. 4군 줌 렌즈계(M_{4h})에서 각 군의 주요면에 대한 줌 궤적 그래프. (a) z_1, z_2, z_3 를 곡선보간하여 구한 줌 궤적 그래프, (c) z_1, z_2, z_4 를 곡선보간하여 구한 줌 궤적 그래프, (e) (c)의 경우에서 z_4 를 선형보간한 경우의 줌 궤적 그래프, (g) (c)의 경우에서 z_4 를 선형보간하되 광학계 중심부분을 아래로 이동시켜서 구한 경우의 줌 궤적 그래프; (b), (d), (f), (h)는 (a), (c), (e), (g)의 경우들에 대한 각각의 EFL 변화 그래프임.

므로 실용성이 상대적으로 (a)보다 떨어진다고 볼 수 있다. 그림 4(g) 경우 (c)보다 꺾적이 조금 더 단순화되지만 여전히 (a)의 경우보다 줌 꺾적이 심하게 변한다. 그림 4의 (b), (d), (f), (h)는 각각의 (a), (c), (e), (g)의 경우들에 대한 EFL 변화 곡선들이다.

4.4. 5군 줌 렌즈

표 4는 14매 렌즈로 구성된 5군 줌 렌즈계의 특허자료(US 6,002,527 예제2^[17])를 정리한 렌즈계 사양에 대한 것이다. 표 4는 이 줌 렌즈의 3가지 줌 위치에서 유효초점거리, F-수($f\#$), 반화각(FOV(semi)), 줌비(Zoom ratio), 줌 형태(Type)를 정리한 것이다.

이 렌즈의 사양들을 입력하여서 구한 5군의 꺾적은 표 1에서 보듯이 4군 줌렌즈보다 4가지 더 많은 꺾적이 가능하나 일부의 형태에서는 해가 존재하지 않는다. 그림 5는 5군 줌

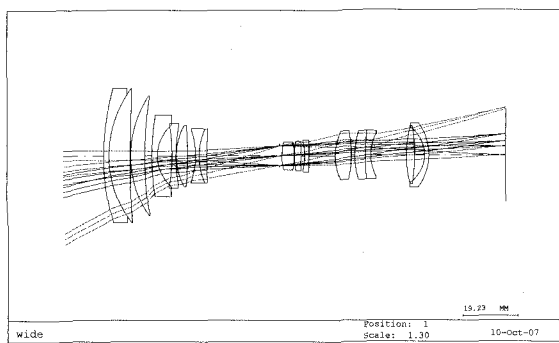
표 4. 5군 줌 렌즈인 특허 US 6,002,527 예제2^[17]의 렌즈계 사양.

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

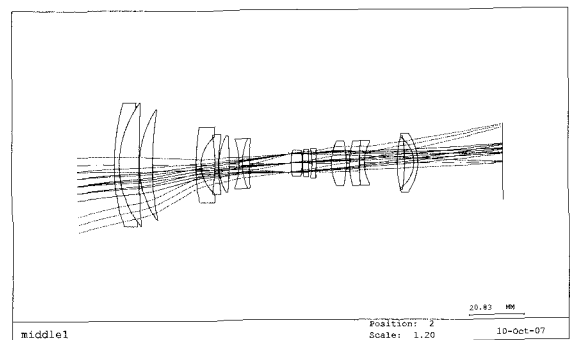
렌즈계의 여러 가지 줌 상태에서 축상광선과 비축광선을 추적하여 구한 결상점들을 보여주는 결과로 5군 줌 상태의 렌즈 군들의 배치를 직접적으로 보여준다. 여기서 각 줌 상태란 줌 렌즈의 초기 설계에서 설계된 줌 상태를 나타내는 각 렌즈의 지점을 의미한다. 일반적으로 그림 5(a) 및 (d)와 같은 양 끝단의 줌 상태가 각각 wide 상태와 tele 상태이며, 이들의 중간지점들인 그림 5(b), (c)는 middle 상태들이다.

위 표 4의 자료를 프로그램에 입력하여 구한 각 군의 광학계 속성은 표 5와 같다. 표 5의 각 부호는 앞서의 4군의 표 3과 같다. 이 결과를 3절에서 만든 프로그램의 꺾적 추적창에 입력하여 줌 꺾적을 추적할 수 있다.

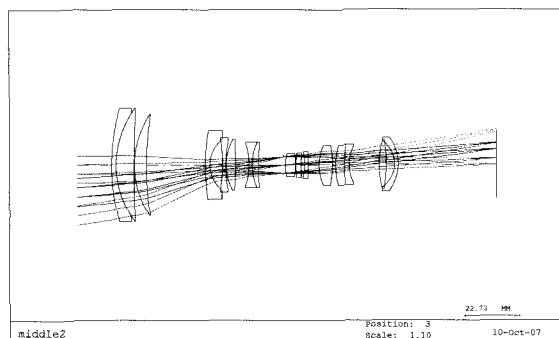
그림 6은 표 5의 내용을 사용하여 구한 5군 줌 렌즈의 형태에 따른 꺾적을 곡선보간법을 이용하여 30개의 구간으로 나누어 구한 각 군의 주요면에 대한 줌 꺾적((a), (c)), 이들 각 경우의 EFL((b), (d))을 그래프로 나타낸 것으로 그래프의 점선은 상면을 의미한다. 그리고 각 그래프들의 가로축의 단위는 mm이고 세로축은 줌의 wide와 tele 사이의 구간을 나눈 횟수이다. 이 때 사용한 줌 꺾적은 특허에 명시되어 있는 꺾적인 M_{5n} 형태로 구했으며, 여기에 다양한 보간법을 사용하여 꺾적을 산출하였다. 즉, 그림 6(a)는 M_{5n} 에 대한 줌 꺾적은 각각 z_1, z_2, z_3, z_4 를 곡선 보간하여 구한 각 군의 주요면들에 대한 줌 꺾적이다. M_{5n} 형태는 모든 군이 자유롭게 움직일 수 있다. 설계는 다른 형태보다 자유롭지만 제작은 보다 어렵기 때문에 제작비용이 더 많이 필요하게 된다. 그림



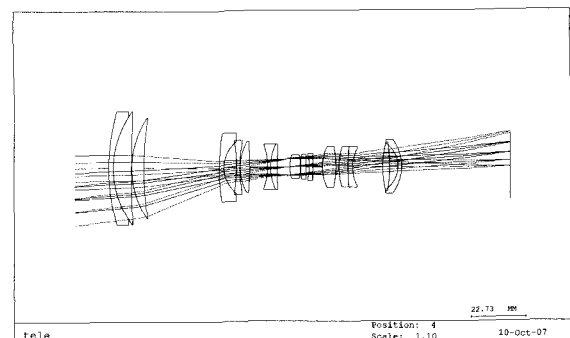
(a) wide에서의 광선추적



(b) middle에서의 첫 번째 광선추적



(c) middle에서의 두 번째 광선추적



(d) tele에서의 광선추적

그림 5. 5군 줌 렌즈계의 각 위치에서의 광선 추적.

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

(a) 광학계 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
Power	0.0131	-0.0227	-0.0258	0.0185	0.0173

(b) 줌 위치별 속성

Position 1						Position 2					
z	z1	z2	z3	z4	z5	z	z1	z2	z3	z4	z5
	5.6287	15.7495	23.0872	11.3623	58.917		19.6706	16.6713	13.3651	7.905	70.1373
Total Power	0.0317					Total Power	0.0165				
EFL	31.5733					EFL	60.5669				
BFL	26.9878					BFL	38.2081				

Position 3						Position 4					
z	z1	z2	z3	z4	z5	z	z1	z2	z3	z4	z5
	28.6204	18.5493	8.646	6.628	72.798		34.3523	20.4213	2.8455	5.9853	76.9771
Total Power	0.0112					Total Power	0.0076				
EFL	89.3265					EFL	131.042				
BFL	40.8688					BFL	45.0479				

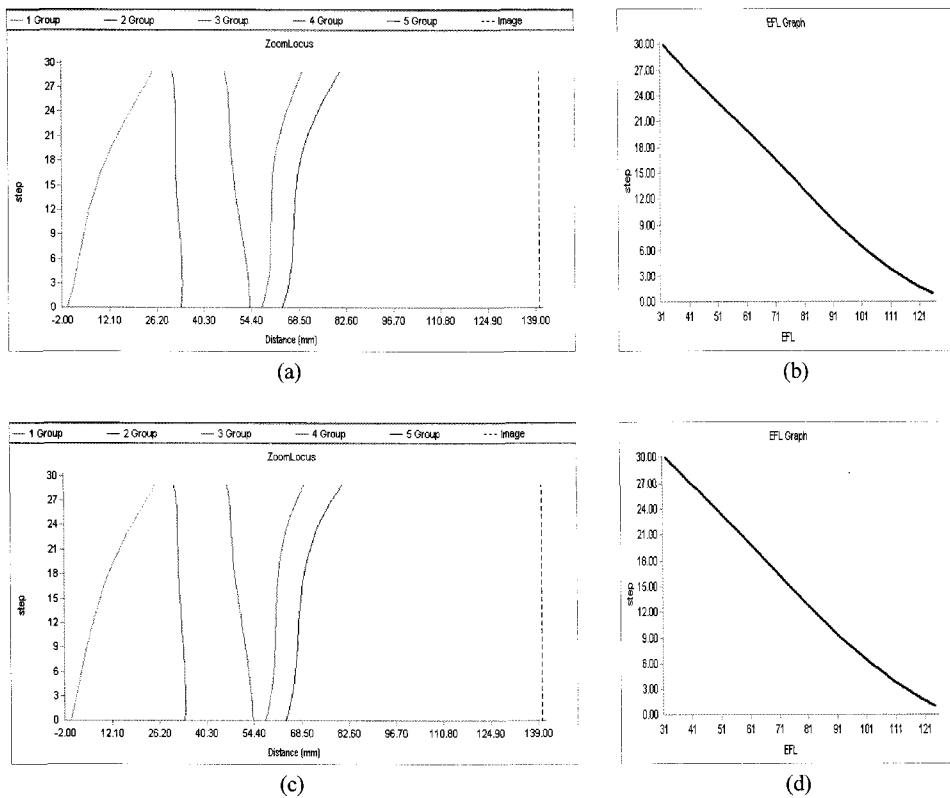


그림 6. 곡선보간법을 이용하여 구한 5군 줌 렌즈계(M_{5n})의 줌 궤적 그래프. (a) z_1, z_2, z_3, z_4 를 곡선보간하여 구한 각 군의 주요면들에 대한 줌 궤적 그래프, (b) (a)의 경우에 대한 EFL 변화 그래프, (c) z_1, z_2, z_4, z_5 를 곡선보간하여 구한 각 군의 주요면들에 대한 줌 궤적 그래프, (d) (c)의 경우에 대한 EFL 변화 그래프.

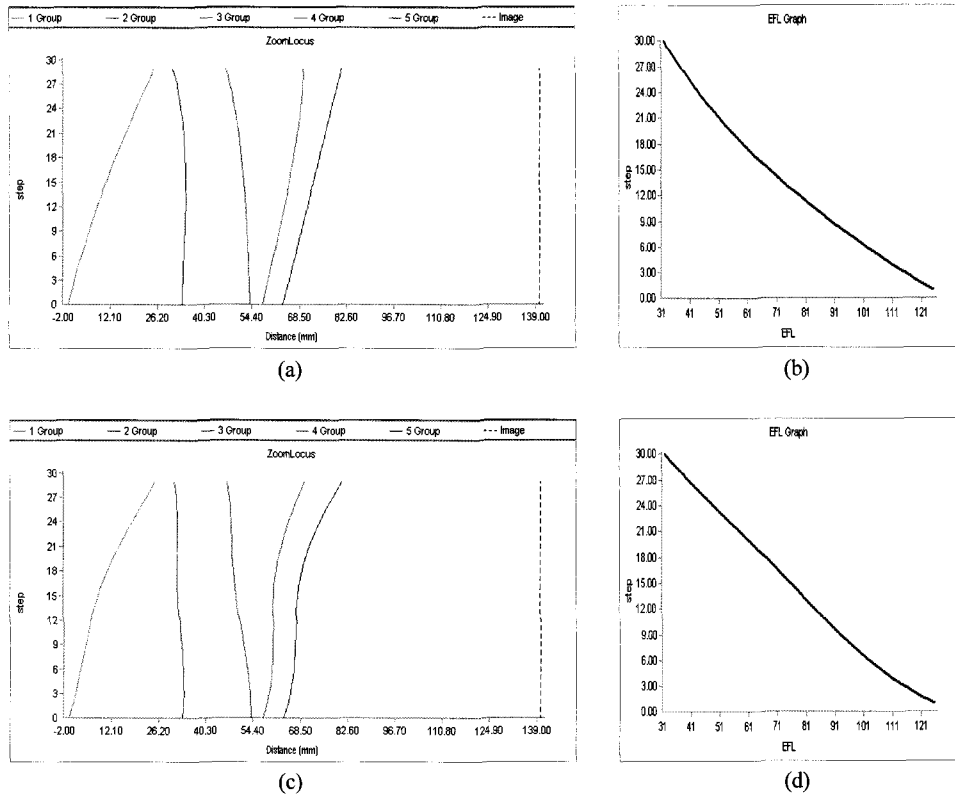


그림 7. 선형보간 줌 렌즈계의 줌 궤적 그래프. (a) 선형보간한 M_{5n} 줌 렌즈계의 각 군의 주요면들에 대한 줌 궤적 그래프, (b) (a)의 경우에 대한 EFL 변화 그래프, (c) 중심이동 보간을 사용한 M_{5n} 줌 렌즈계의 각 군의 주요면들에 대한 줌 궤적 그래프, (d) (c)의 경우에 대한 EFL 변화 그래프.

6(c)는 앞서 구한 (a)와 같은 M_{5n} 의 형태로써 각각 z_1, z_2, z_4, z_5 를 곡선보간하여 구한 궤적이다. 앞의 결과와 비교해 보면 거의 같은 결과가 나온 것을 볼 수 있다. 서로 다른 주요면의 거리를 잡고 궤적을 구해도 해를 구할 수 있음을 보여준다.

그림 7의 (a)는 그림 6(c)에서 구한 궤적에서 z_5 를 선형보간했을 경우로 M_{5n} 줌 렌즈계의 각 군의 주요면들에 대한 줌 궤적 그래프이다. 앞서 구한 그림 6(a)나 (c)와 비교하여 볼 때 5군이 선형적인 움직임을 보임으로써 궤적을 좀 더 간소화 된 것을 볼 수 있다. 이와 같이 원하는 군들의 줌 궤적을 선형으로 선택함으로써 곡선보간과 또 다른 궤적을 구할 수 있으며, 때에 따라서 더욱 간소화된 움직임을 보이는 줌 궤적을 구할 수 있다. 그림 7(c)의 줌 궤적은 그림 6(c)의 줌 궤적을 중심이동보간법으로 구한 줌 궤적으로, 여기서 구한 5군의 줌 궤적은 줌 궤적에서 4개의 알고 있는 점으로 줌 궤적을 구한 것으로 두 번째 줌의 위치와 세 번째 줌의 위치를 균일하게 분배하지 않고, 두 번째 줌의 위치를 원래의 위치보다 위로 옮기고 세 번째 줌의 위치를 아래로 내려서 새롭게 구한 줌 궤적이다. 이와 같이 중심이동 보간을 함으로써 그림 6(c)에서 구했던 궤적보다 중간위치에서 궤적을 좀 더 편평하게 만들 수 있다. 궤적을 좀 더 간소화시키면서도 배율을 유지할 수 있는 좋은 방법 중에 하나이다.

이와 같이 본 논문에서 제시한 줌 렌즈 궤적 추적식과 이를 이용한 프로그램은 다양한 줌 렌즈 형태에 대해서 여러

가지 보간법으로 최적의 줌 궤적을 초기에 서로 비교하여 알 수 있도록 통합적이고 일관성있는 과정을 보여준다.

V. 결 론

줌 렌즈 궤적을 구하는 것은 앞서 설명한 것처럼 상면이 고정된 광학계에서 렌즈군이 이동하면서 zooming하는 경우에도 상면의 흐트러짐 없이 이동하기 위한 렌즈군들의 이동 변화량을 구하는 것이다. 이전에 방식은 연립방정식을 풀어 해석적인 해를 구하였으나 계산이 매우 복잡하여 시간이 많이 걸리고 서로 다른 zoom 렌즈마다의 프로그램을 달리 해야 하는 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 수치해석을 적용하여 줌 궤적추적을 단순화하였다. 또한 이 계산방법을 프로그램화하여 궤적을 빠르게 구하는 것이 가능해지도록 하였다. 실제로 작성한 프로그램을 사용하여 다양한 군의 궤적을 구해보았는데 해만 존재한다면 군이 많은 경우도 여러 가지 형태로 궤적을 구할 수 있음을 알 수 있었다. 이전 방법인 줌 렌즈 방정식의 연립을 통한 계산이 매우 어려운 M_{4n} 이나 M_{5n} 의 줌 렌즈계를 쉽게 풀어내는 것을 예로 보여 주었다. 또한 본 프로그램에서는 초기 줌 궤적이 나쁘더라도 서로 다른 보간법과 중심이동 보간법 등의 다양한 방법으로 변화를 주면 또 다른 줌 궤적을 구할 수 있기 때문에 훨씬 다양한 줌 궤적을 구하여 이들 간에 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 초기설계시 사용자가 매우 쉽고 다양하게 일반적으로 줌 궤적 설계에 접근할 수 있도록 해준다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 아직 5군까지만 궤적을 해석해 놓았으나 이 계산방법을 도입하면 N군까지의 궤적 해석이 가능하다. 그러나 이것은 초기 설계에 이용이 가능한 궤적으로 공차를 고려한 줌 궤적 분석이나 마지막 전 체수차를 고려한 설계는 하지 않았다. 본 논문은 좋은 줌 렌즈를 설계하는 것이 목적이 아니라 무한물점을 갖는 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

본 논문은 2007년 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음을 알려드립니다.

참고문헌

- [1] K. Yamaji, *Design of Zoom Lenses*, in Progress in optics VI, edited by E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1971), Chap. 4.
- [2] Jae Myung Ryu, Jae Heung Jo, Jin Ho Jung, Young Se Chun, and Geon Mo Kang, "Design of microscopic system using zoom structure with a fixed magnification and the independency on the vibration of object distance," *Proceedings of SPIE*, Vol. 5523, pp. 352-362, 2004.
- [3] 류재명, 임천석, 조재홍, 정진호, 전영세, 이강배, "와이어 본딩(wire-bonding) 검사용 현미경 광학계의 설계", *한국광학회지*, 제14권 6호, pp. 613-622, 2003.
- [4] 류재명, 김재범, 강건모, 조재홍, 백승선, 정진호, "반도체 부품 검사용 다중배치 현미경 광학계의 공차분석", *한국광학회지*, 제17권 2호, pp. 149-158, 2006.
- [5] 류재명, 이혁기, 이해진, 강건모, 조재홍, "디지털 카메라용 줌렌즈에서 대칭성 오차요인에 의한 상면변화의 보정과 이에 따른 불량률 예측", *한국광학회지*, 제17권 5호 pp. 420-429, 2006.
- [6] 정진호, *줌 렌즈계의 근축설계와 궤적해석*(영남대학교, 대구, 1994) 박사학위 청구논문, p. 3.
- [7] K. Tanaka, *Paraxial Theory in Optical Design in Terms of Gaussian Bracket*, in Progress in optics IXXXX, edited by E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1971), pp. 63-111.
- [8] 정진호, 정해빈, 이상수, "초점거리, 뒷초점거리, 앞초점거리를 만족하는 근축광학적 렌즈설계", *새물리*, 제27권 6호, pp. 576, 1987.
- [9] Jean-Paul Berrut and Lloyd N. Trefethen, "Barycentric Lagrange Interpolation," *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 46, No. 3, pp. 501-517, 2004.
- [10] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, and Clifford Stein, *Introduction to Algorithms*, 2nd ed., (MIT Press and McGraw-Hill, New York, 2001) pp. 735-741.
- [11] David H. Bailey, King Lee, and Horst D. Simon, "Using Strassen's Algorithm to Accelerate the Solution of Linear Systems," *The Journal of Supercomputing*, 4, pp. 357-371, 1990.
- [12] Warren 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* 111(4), pp. 149-156, 2000.
- [14] K. Tanaka, "Zooming components loci of a generally constructed mechanically compensated zoom lens," *Optik* 112(6), pp. 232-238, 2001.
- [15] 정진호, 정해빈, "4군 줌 렌즈계 1.(분류와 궤적해석)", *새물리*, 제3권 1호, pp. 26-30, 1990.
- [16] Toro Miyajima, Masaru Morooka, "Zoom lens," 2001, U. S. Patent 7,190,529 B2.
- [17] Motoyuki Ohtake, Kawasaki, "Compact High-Zoom-Ratio Zoom Lens," 1999, U.S. Patent 6,002,527.

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

Nam Jun Yoo, Won Seob Kim, and Jae Heung Jo[†]

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

[†]*E-mail: jhjo@hannam.ac.kr*

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

Optics & Digital Imaging Division, Samsung Techwin Co., LTD, Changwon 641-716, Korea

(Received October 23, 2007, Revised manuscript November 7, 2007)

We theoretically derive the set of utilizable paraxial zoom locus equations for all complicated zoom lens systems with infinite object distance, such as a camera zoom lens, by using the Gaussian bracket method and the matrix representation of paraxial ray tracing. And we make the zoom locus program according to these equations in Visual Basic. Since we have applied the paraxial ray tracing equations into Gaussian bracket representation, the resultant program systematically simplifies various constraints of the zoom loci of various N group types. Consequently, the solutions of this method can be consistently used in all types of zoom lens in the step of initial design about zoom loci. Finally, in order to verify the usefulness of this method, we show that one example among 4 groups and that among 5 groups, which are very complex zoom lens systems, can be rapidly and with versatility traced through various interpolations by using this program.

OCIS code : 080.3620, 120.4570, 220.3620.