대칭형 공차를 갖는 플로팅 광학계의 상면 변화 보정 방법에 대한 통계적 해석

류재명¹ · 김용수¹ · 조재홍^{2†} · 강건모¹ · 이해진¹ · 이혁기¹

¹삼성전자(주) 디지털이미징사업부 렌즈개발그룹
Ⓢ 443-742 경기도 수원시 매탄3동 416

²한남대학교 이과대학 광·전자물리학과
Ⓢ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133

(2012년 8월 6일 받음, 2012년 9월 12일 수정본 받음, 2012년 9월 24일 게재 확정)

플로팅 광학계는 초점 맞춤 시, 2개 이상의 군이 움직이는 광학계를 의미한다. 카메라 광학계에서는 매크로 렌즈와 같이 배율 변화가 큰 광학계에 주로 채용된다. 플로팅 광학계도 가공 및 조립 오차로 인해 무한대단 및 매크로단의 초점위치가 촬상소자의 결상면과 일치하지 않는다. 그러므로 제조공정상에서 이러한 BWD(Back Working Distance) 차이를 최소화하는 초점 조정을 해야 한다. 본 논문에서는 플로팅 광학계의 각 군들의 이동량을 결정하기 위하여 초점 조정에 필요한 캠 회전각을 계산하고, 초점 조정에 따른 플로팅 광학계의 최대 배율도 보정하는 수치해석 방법을 제안하였다. 그리고 이를 이용하여 대칭형 공차를 갖는 플로팅 광학계의 제조 오차를 고려한 초점 조정에 필요한 캠 회전각의 분포를 통계학적으로 계산하여 캠 회전각의 허용 범위를 결정하는 방법도 제안하였다.

Statistical Analysis of Focus Adjustment Method for a Floating Imaging System with Symmetric Error Factors

Jae Myung Ryu¹, Yong Su Kim¹, Jae Heung Jo^{2†}, Geon Mo Kang¹, Hae Jin Lee¹, and Hyuck Ki Lee¹

¹*R&D Team, Digital Imaging Business, Samsung Electronics Co., Ltd., Suwon 443-742, Korea*

²*Department of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea*

(Received August 6, 2012; Revised manuscript September 12, 2012; Accepted September 24, 2012)

A floating optical system is a system that moves more than 2 groups to focus at the camera lens. At the camera optics, the floating system that is mainly used is an optical system such as a macro lens which changes magnification very much. When the floating system is assembled and fabricated in the factory, there are differences between the image plane of the sensor and the focal plane of the infinity or macro state. Therefore, in a considerable proportion of cases, the focus adjustment to minimize the difference of BWD(Back Working Distance) is carried out in the process of manufacturing. In this paper, in order to decide the movement of each group in a floating system, we evaluated the rotation angle of CAM for the focus adjustment. We know that the maximum magnification of macro state is corrected by this numerical method for the focus adjustment, too. We investigated the limit of CAM rotation angle of the system by using statistical analysis for CAM rotation angle, which uses the focus adjustment of the floating system with symmetric error factors.

Keywords: Lens design, Zoom lens design, Tolerance analysis, Floating imaging system

OCIS codes: (110.0110) Imaging systems; (220.3620) Lens system design; (220.2740) Geometric optical design; (220.4830) Systems design

I. 서 론

카메라 광학계에서는 피사체 거리의 변화에 따른 상면 변

화를 보정하기 위해 특정 렌즈군을 움직인다^[1]. 대부분의 카메라 광학계에서는 1개의 군만으로 AF(Auto-focus)를 구현하여, 이러한 피사체 거리의 변화에 따른 상면 변화를 보정

[†]E-mail: jhjo@hnu.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

하지만, 2개 이상의 군을 움직여서 상면 보정을 하는 경우도 있다. 이렇게 2개 이상의 군이 움직여서 피사체 거리의 변화에 따른 상면 변화를 보정하는 광학계를 플로팅 광학계(floating imaging system)라고 한다. 일반적으로는 움직이는 군을 적게 해야 기구 설계가 쉬워지고, 양산 단계에서 광학계의 해상력 성능을 확보하는데 유리하다. 그러므로 대부분의 광학계는 플로팅 광학계로 구성하지 않는다. 그러나 피사체 거리의 변화에 따른 설계적인 해상력 성능을 높일 수 있는 장점도 있기 때문에 일부 광학계에서는 사용되는 경우도 있다.

이동군이 1개인 일반적인 광학계에서 피사체 거리의 변화에 따른 배율은 0배에서 최대 -0.5배를 넘지 않는다. 그러나 꽃술 또는 곤충의 눈 등의 매우 작은 물체를 촬영하기 위해서는 이보다 높은 배율을 구현할 수 있어야 한다. 교환렌즈 광학계 중에서 촬상소자와 같은 크기의 피사체까지 촬영할 수 있는 광학계가 있는데, 이는 최대 배율이 등배(-1배)까지 변배가 가능함을 의미하며 이러한 카메라 광학계를 매크로 렌즈라고 한다. 이러한 매크로 렌즈에서는 배율 변화가 커서, 1개의 군만을 움직여서는 모든 구간에서 설계 성능을 만족하기 어렵다. 이 때문에 현재 제품화된 매크로 렌즈는 모두 2개 이상의 군이 움직이는 플로팅 광학계로 구성되어 있다.

이렇게 등배 촬영이 가능한 매크로 렌즈는 주로 사진의 입문기에서 고급기로 넘어가는 과정에서 주로 구매하는 광학 제품으로, 각 카메라 회사에서 제품 라인업 초반에 반드시 포함되는 제품군 중의 하나이다. 따라서 기존 SLR(single-lens reflex) 교환렌즈 제품군 뿐만 아니라, 비교적 최근에 출시된 미러박스(mirror-box)가 없는 콤팩트 시스템 카메라(CSC, compact system camera)의 다양한 제품군에서도 이를 확인할 수 있다.^[2-5]

앞서 언급한대로 매크로 렌즈는 2개 이상의 군이 움직이는 플로팅 광학계로 구성되며, 변배시, 광학계 전체의 초점거리가 바뀌면서 상면이 고정된다. 한편 줌 렌즈의 정의가 변배시 광학계 전체의 초점거리가 바뀌면서 상면이 고정되는 광학계이므로^[6] 플로팅 광학계로 구성된 매크로 렌즈는 광학설계적으로는 줌 광학계라 할 수 있지만, 변배시 줌배율에 비해 화각이 크게 변하는 것은 아니므로 단초점 렌즈(single focus lens)로 분류한다.

광학계의 제조에 있어서 부품의 제작오차와 조립 오차 때문에 제품의 BWD(Back Working Distance)와 광학 설계 상의 이론적인 BWD가 일치하지 않으며, 이 BWD 차이를 보정하는 것을 초점 조정(focus adjustment)이라고 한다.^[1] 이러한 초점 조정은 일반적으로 1개의 군으로 수행하지만,^[1] 고배율 교환렌즈 광학계와 같이 보정량이 커서 1개의 군으로만 보정이 불가능한 경우에는 2개 이상의 군을 움직여서 초점 조정을 한다.^[7] 여기서 플로팅 광학계도 부품의 오차와 조립 오차가 발생하므로 당연히 초점 조정을 해야 한다. 이러한 플로팅 광학계는 2개의 군이 움직이고, 움직이는 군이 기구적인 캠(cam) 부품에 물려서 이동하므로 서로 독립적으로 움직일 수 없다. 따라서 이러한 플로팅 광학계에서 초점 조

정 시에 2개의 군이 움직이게 되므로 기존에 발표된 방법^[1,7]과는 다르게 초점 조정을 생각해야 한다.

본 논문에서는 이러한 플로팅 광학계에 대한 초점 조정 방법과 초점 조정량을 가우스 괄호법을 이용하여 체계적으로 유도하고자 한다. 그리고 초점 조정을 위하여 캠을 회전시키는 경우, 초점 조정에 필요한 캠 각도, 즉 초점 조정량과 각 설계 변수에 따른 종민감도^[7]를 통계적인 분석을 통하여 자세히 조사하고자 한다.

II. 플로팅 광학계의 궤적

그림 1은 US2010-0177407A1의 실시예 3으로 주어진 매크로 광학계의 광로도와 궤적으로 그림 1(a)는 이 광학계의 광로도이고, 그림 1(b)는 이 광학계의 줌궤적이다.^[8] 앞서 언급한 바와 같이 플로팅 광학계는 줌 렌즈와 설계 방법과 동일하다. 따라서 그림 1(b)와 같이 설계 줌단으로 무한대와 최지근 거리인 매크로단 외에 이 두 지점 사이에 중간단을 적절

FIG. 1. An example of (a) the optical layout and (b) the zoom locus of a floating imaging system for the third example in patent US2010-0177407A1^[8].

히 넣어서 설계를 한다. 그림 1(a)에서는 총 3개의 줌단을 넣은 것으로 되어 있지만, 실무 설계에서는 모든 중간단에서 원하는 성능을 내기 위해 이보다 많은 줌단을 넣어서 진행한다. 여기서 몇 개의 줌단을 넣는지에 대해서는 정해지는 것은 없고 설계자가 경험적으로 판단하여 그 개수를 결정한다.

이렇게 몇 개의 줌단을 넣어서 설계를 했다면, 무한대에서 매크로단까지 캠 부품 가공을 위한 궤적을 구해야 하는데, 이를 위해 플로팅 광학계의 궤적을 계산하는 방법을 구해본다. 총 N개의 군으로 구성되어 있고, 배율이 β 인 광학계의 각 군의 굴절능이 k 이고, 각 군 사이의 주요점 사이의 거리가 z 일 때, 배율과 상면에서의 상고를 가우스 괄호로 나타내면 식 (1) 및 식 (2)와 같다.^[9]

$$[-z_0, k_1, -z_1, k_2, -z_2, k_3, \dots, k_{N-1}, -z_{N-1}, k_N] = \frac{1}{\beta} \quad (1)$$

$$[-z_0, k_1, -z_1, k_2, -z_2, k_3, \dots, k_{N-1}, -z_{N-1}, k_N, -z_N] = 0 \quad (2)$$

여기서 k 및 z 의 첨자는 각 군의 일련번호를 의미하며, 특별히 z_0 는 물체에서 첫 번째 군의 제1주요면까지의 거리이고, z_N 은 N번째 군의 제2주요면에서 상면까지의 거리이다. 식 (1)과 식 (2)는 플로팅 광학계의 임의의 물체거리에 관한 식으로서 광학 설계가 완료되면 각 군의 굴절능 $k_1 \sim k_N$ 은 주어진 값이 되나, 배율 β 와 각 군간 거리 $z_0 \sim z_N$ 은 미지수가 된다. 물론 설계가 완료되어도 설계 줌단인 무한대와 최지근 거리의 매크로단에서는 배율과 군간 거리가 모두 주어지나, 그 외의 중간단은 그 값이 주어지지 않는다. 따라서 미지수는 총 $N+2$ 개가 된다. 그러나 주어진 식은 식 (1)과 식 (2)로 이들 2개만 주어졌으므로, 식 (1)과 식 (2)는 연립해서 풀 수 없다. 한편 그림 1과 같이 1군, 3군, 5군이 고정된 5군 매크로 줌 광학계에서 주어진 구속 조건 3개와 초기에 주어진 2개의 수식을 합쳐도 식은 총 5개만 주어지나, $N=5$ 로서 미지수는 7개이므로 그림 1과 같은 광학계도 더 이상의 조건이 주어지지 않는 한 궤적을 구할 수 없다. 이렇게 플로팅 광학계는 보통의 조건으로는 미지수의 개수가 주어진 수식보다 많아 궤적을 구할 수 없어서, 각 군간 거리인 $z_1 \sim z_N$ 은 다음과 같이 스플라인 보간법(spline interpolation)^[10]을 이용해서 결정한다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i^3 & x_i^2 & x_i & 1 \\ 3x_i^2 & 2x_i & 1 & 0 \\ x_{i+1}^3 & x_{i+1}^2 & x_{i+1} & 1 \\ 3x_{i+1}^2 & 2x_{i+1} & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_i \\ z'_i \\ z_{i+1} \\ z'_{i+1} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{(x_i - x_{i+1})^3} \begin{bmatrix} -2z_i - x_{i+1}z'_i + 2z_{i+1} - x_{i+1}z'_{i+1} + x_i(z'_i + z'_{i+1}) \\ -x_i^2(z'_i + 2z'_{i+1}) + x_i(3z_i - x_{i+1}z'_i - 3z_{i+1} + x_{i+1}z'_{i+1}) + x_{i+1}(3z_i + 2x_{i+1}z'_i - 3z_{i+1} + x_{i+1}z'_{i+1}) \\ -x_{i+1}^3z'_i + x_i^3z'_{i+1} + x_i^2x_{i+1}(2z'_i + z'_{i+1}) - x_ix_{i+1}(6z_i + x_{i+1}z'_i - 6z_{i+1} + 2x_{i+1}z'_{i+1}) \\ -x_{i+1}^3z_{i+1} + x_ix_{i+1}^2(3z_i + x_{i+1}z'_i) + x_i^3(z_{i+1} - x_{i+1}z'_{i+1}) + x_i^2x_{i+1}\{-3z_{i+1} + x_{i+1}(-z'_i + z'_{i+1})\} \end{bmatrix}$$

FIG. 2. Spline interpolation of the loci of a group.

그림 2는 임의의 광학계의 임의의 군에 대한 궤적의 예이다. 각 점은 설계 줌단을 의미하며, 그림 2와 같은 경우라면 총 5개의 줌단으로 광학설계를 했음을 의미한다. 이 곡선의 각 구간을 3차 다항식으로 나타내고, 설계 줌단에서 연속이고 1차 미분이 연속이면 식 (3)이 만족된다. 여기서 x_i 는 줌 궤적(또는 캠궤적)인 z_i 를 나타내는 i 번째 줌 스텝(step)을 의미한다. 이 x_i 와 z_i 는 설계 줌단이므로 주어지는 값이고, z'_i 는 (x_i, z_i) 에서의 미분값으로 $(x_{i-1}, z_{i-1}) \sim (x_{i+1}, z_{i+1})$ 의 기울기의 산술평균값으로 근사한다면, a, b, c, d 만이 미지수가 된다. 식 (3)에서의 z_i 는 특정 군에 대한 i 번째 줌단에서의 위치값이고, 식 (1)과 식 (2)에서의 z_i 는 군간 간격이므로 이를 혼동하지 말아야 한다.

$$\begin{aligned} z_i &= ax_i^3 + bx_i^2 + cx_i + d \\ z'_i &= \frac{dz_i}{dx_i} = 3ax_i^2 + 2bx_i + c \approx \frac{1}{2} \left(\frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} + \frac{z_i - z_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right) \\ z_{i+1} &= ax_{i+1}^3 + bx_{i+1}^2 + cx_{i+1} + d \\ z'_{i+1} &= \frac{dz_{i+1}}{dx_{i+1}} = 3ax_{i+1}^2 + 2bx_{i+1} + c \approx \frac{1}{2} \left(\frac{z_{i+2} - z_{i+1}}{x_{i+2} - x_{i+1}} + \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} z_i \\ z'_i \\ z_{i+1} \\ z'_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i^3 & x_i^2 & x_i & 1 \\ 3x_i^2 & 2x_i & 1 & 0 \\ x_{i+1}^3 & x_{i+1}^2 & x_{i+1} & 1 \\ 3x_{i+1}^2 & 2x_{i+1} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (3)과 같이 각 단의 미분값을 결정하게 되면 양 끝단에서는 미분값을 결정할 수 없는데, 이러한 경우에는 스플라인 계수인 a, b, c, d 의 줌 1단에서의 값이 줌 2단과 같은 값으

로 해서 계산하고, 마지막 단인 줌 N단에서의 값은 줌 N-1 단과 같은 값으로 해서 계산하면 된다. N은 가장 마지막 줌 단을 의미하며 그림 2와 같은 경우는 N=5가 된다.

식 (3)을 행렬 형태로 나타내면 식 (4)가 되고, 역행렬을 구해 다항식의 계수를 계산하면 식 (5)와 같다.

이렇게 되면 식 (5)를 통하여 z 는 정해지므로 미지수는 배울 β 와 물체거리 z_0 만 미지수가 되어 식 (1)과 식 (2)를 이용하면 이를 모두 구할 수 있다.

일반적인 줌 렌즈 광학계의 캠 부품은 광각단부터 망원단까지 줌계적(즉 캠계적)을 계산하여 이 값으로 가공을 한다. 실무적으로 광각단과 망원단 부근에서 캠 가공을 위한 여유 구간을 계산하지만, 그 양이 크지 않다. 그러나 플로팅 광학계는 캠 회전으로 초점 조절을 해야 하므로, 캠 가공에 대한 여유 구간을 어느 정도로 해야 할 지 결정해야 한다.

그림 2에서 무한대(infinity)단의 왼쪽 연장선과 최대 배율인 매크로(macro)단의 오른쪽 연장선은 플로팅 광학계에서 캠 가공을 위한 여유 구간이다. 무한대단과 매크로단 사이의 보간은 앞서 설명한 스플라인 보간법을 사용하면 된다. 그러

나 무한대단의 왼쪽 여유 구간과 매크로단 오른쪽의 여유 구간은 앞과는 다르게 독립적인 보간 방법을 사용하여 이를 결정해야 한다. 이때 무한대단과 매크로단의 양 끝단에서 연속이고 미분가능해야만 캠 가공을 해서 조립했을 때 문제가 없다. 이를 무한대단이 포함된 스플라인 곡선의 계수인 a_1, b_1, c_1, d_1 를 그대로 무한대단의 여유 구간 계산시에 사용하고, 마찬가지로 매크로단에서도 a_4, b_4, c_4, d_4 를 여유 구간 계산에 사용한다면, 연속이고 미분가능한 조건을 만족할 수 있다. 그림 3에서는 5개의 줌단이므로, 4개의 스플라인 곡선 구간이 생기지만, 만약 N개의 줌단이라면, 총 N-1개의 스플라인 곡선 구간이 생기게 됨을 기억해야 한다. 단, 이 방법을 사용했음에도 불구하고, 무한대단과 매크로단 양 끝에서 캠 곡선의 기울기가 급격하게 변한다면, 곡선의 기울기가 완만해지도록 중간단의 군간 거리를 조정하는 광학 설계를 진행해서 이를 완만하게 만들어야 한다.

III. 플로팅 광학계의 초점 조정량

II 절에서 캠 여유 구간에 대해 설명을 했다. 플로팅 광학계의 초점 조절은 이러한 캠 여유 구간을 이용해서 무한대단 기준간격을 기준으로 초점 조절이 되도록 약간씩 앞뒤로 돌려서 조정하게 된다. 여기서 플로팅 광학계를 사용하는 매크로 렌즈에 있어서 매크로단에서는 초점 조절을 하더라도 등배를 유지해야 한다. 광학계의 제작에 있어서 렌즈 부품의 공차와 조립 공차가 존재하게 되므로, 이러한 제작 오차에 의해 등배 조건이 유지되는지는 반드시 확인해야 한다. 이 외에도 초점 조절에 필요한 캠 여유각은 어느 정도로 해야 하는 지에 대해서도 확인해서 기구 설계에 반영이 되도록 해야 한다.

그림 1과 그림 3은 각각 미국 특허 US2010-0177407A1^[8]의 실시예 3과 US2011-0096410A1^[11]의 실시예 2에 대한 광로도(각 그림의 (a))와 군별 궤적(각 그림의 (b))이다. 또한 표 1은 이 광학계의 광학 사양들로서 유효초점거리(EFL, effective focal length), 반화각(HFOV, half field of view), F수(F/#), 센서(sensor), 최대 배율(max. mag.), 광학계 형태(optics type),

(a)

(b)

FIG. 3. (a) Optical layout and (b) locus for the second example in patent US2011-0096410A1^[11].

TABLE 1. Specifications of the third example in patent US2010-0177407A1^[8] and the second example in patent US2011-0096410A1^[11]

patent number	US2010-0177407	US2011-0096410
EFL	59.03 mm	58.14 mm
HFOV	13.57°	13.82°
F/#	2.06	2.88
sensor	APS-C	
max. magnification	≈ -1.0	
optics type	PPP (Group 3)	PNPPN (Group 5)
moving groups	Group 1, Group 2, Group 3	Group 2 and Group 4 (Inner Focus)
lens construction	9 elements in 7 groups	12 elements in 9 groups (with 1 ED glass element)

이동군(moving group), 렌즈매수(lens construction) 등이 열거되어 있다.

US2010-0177407A1^[8]은 이중 가우스 형태(double-gauss type)의 광학계로서 민감도가 낮아 제품화했을 때 해상력 성능 변화가 작은 장점이 있으나, 제품 전장이 변해서 곤충과 같은 피사체를 촬영할 때 불편한 단점이 있다. 초점거리가 짧은 경우에는 매크로단에서의 물체거리도 같이 짧아지기 때문에 곤충 촬영을 목적으로 하지 않는 초점거리가 짧은 매크로 렌즈에 주로 적용되는 렌즈 형태이다. 반면 US2011-0096410A1은 일반 고배율 줌 광학계와 유사한 positive-lead type의 내부초점(inner focus) 방식의 광학계로서, 민감도가 높아 고도화된 제조 기술이 필요하나 변배시 제품 전장이 변하지 않기 때문에 곤충과 같은 피사체 촬영에 편리하다. 최근에 출시되는 반화각이 25도 미만의 중망원 계열의 매크로 렌즈에는 이러한 렌즈 형태의 제품이 많이 출시되고 있다. 현재 제품화된 매크로 렌즈는 대부분 그림 1이나 그림 3과 같은 렌즈 형태 중 한 가지로 구성된다.

광학계의 사용 목적에 따라 두 렌즈 형태 중 한 종류를 적절히 선택하면 되지만, 제작 오차에 따른 초점 조정 방법은 동일하므로 예제는 최근 제품화에 많이 사용되는 US2011-

0096410A1에 대해서만 설명하기로 한다.

BWD의 변화에 영향을 주는 설계 변수는 곡률, 두께, 굴절률 등의 광축에 대해 대칭인 축상 공차이다. 이러한 설계 변수에 대한 BWD의 변화는 식 (6)으로 주어진다.^[1]

$$\Delta BWD = BWD - f_{BWD_0} \approx \frac{\partial f_{BWD}}{\partial R} \cdot \Delta R + \frac{\partial f_{BWD}}{\partial d} \cdot \Delta d + \frac{\partial f_{BWD}}{\partial n} \cdot \Delta n \quad (6)$$

ΔR , Δd , Δn 등은 각각 곡률, 두께, 굴절률의 변화량으로 오차량을 의미한다. 그리고 각 수차 함수의 미분값이 해당 공차 항목의 민감도가 된다. 물론 각 오차량에 의한 교차효과 때문에 추가 항을 계산할 필요가 있겠으나, 카메라 광학계에 대해 여러 해 동안의 개발 경험에 따르면 이러한 추가 항은 크게 영향이 없기 때문에 별도 계산할 필요가 없다. 이는 수차 함수의 선형 근사가 비교적 잘 맞는다는 것을 의미한다. 이때 ΔR , Δd , Δn 등을 공차로 그 양을 결정한다면, 각 변수의 미분값은 해당 공차 항목의 변화량으로 근사할 수 있다.

각 면의 곡률의 공차를 ± 5 분, 두께는 ± 0.05 mm, 굴절률 ± 0.001 로 가정하고, 각 공차분포가 균등분포를 따른다고 가정하여 US2011-0096410A1^[11]의 실시예 2에 대해 BWD 변화 분포를 광학 설계 S/W에서 구하여 그려보면 그림 4와 같다.

(a)

(b)

FIG. 4. The distribution of BWD for the second example in patent US2011-0096410A1^[11] in case of (a) infinite state and (b) macro state.

(a)

(b)

FIG. 5. The distribution of correction angle for the second example in patent US2011-0096410A1^[11] in case of (a) infinite state and (b) macro state.

그림 4에서 보는 것처럼 무한대단의 분포(그림 4(a))와 매크로단의 분포(그림 4(b))의 표준편차가 서로 다른 것을 알 수 있다. 그림 4의 (a)와 (b)에서 파란 곡선은 정규분포곡선이며, 이로부터 평균과 표준편차를 구할 수 있고, 이 값들은 각 그래프의 우측 상단에 나와있다. 이러한 BWD 변화를 보정하기 위해서 캠을 회전시키면, 그림 5에서 보는 것처럼 2군과 4군이 움직여서 초점 조정, 즉 캠 회전각 보정을 하게 된다. 각 군의 궤적은 II 절에서 설명한대로 스플라인 보간을 했다고 가정하자. 그리고 2군과 4군은 하나의 캠 부품에 연결되어 서로 종속적으로 움직이므로, 전체 궤적은 캠 회전각의 함수로 표현이 된다. 먼저 무한대단에 대해서만 보면, 초점 조정이 되는 구간은 그림 2의 첫 번째 스플라인 곡선이 된다. 마찬가지로 매크로단에서는 N-1번째, 즉 마지막 구간의 스플라인 곡선이 된다. 이 때 N은 설계 줌단의 개수이다. 여기서 BWD인 z_N 에 대해 식 (1) 및 식 (2)를 연립해서 풀면 식 (7)과 같다.

$$z_N = \beta \cdot [-z_0, k_1, -z_1, k_2, -z_2, k_3, \dots, k_{N-1}, -z_{N-1}] = f(\theta) \quad (7)$$

(a)

(b)

FIG. 6. The distribution of magnification for the second example in patent US2011-0096410A1^[11] in case of (a) before the focus adjustment and (b) after the focus adjustment.

식 (7)에서 굴절능을 제외한 모든 변수는 회전각 θ 에 대한 함수이므로 z_N 역시 회전각 θ 에 대한 함수가 된다. 이때 식 (7)은 원칙적으로 해석적으로 표현할 수 있지만, 그림 6과 같이 군의 개수가 많아질수록 식이 매우 복잡해져서 해석적으로 표현하는 것이 사실상 불가능하다. 그러므로 주어진 z_N 에 대해 식 (7)을 만족하는 회전각 θ 를 구하는 방법은 수치해석적인 방법으로 구해야 한다. 이 때 회전각 θ 가 구해지면, 각 군의 거리 $z_1 \sim z_{N-1}$ 은 II 절에서 설명한 각 구간별 스플라인 보간식에 회전각 θ 를 대입하면 모두 구할 수 있다. 이와 같이 그림 4와 같이 광학계의 각 면의 RDN의 변화에 따른 z_N 을 만족하는 각 경우에 대한 회전각 θ 를 구하면 이 역시 분포를 이루게 되며, 이를 계산하여 분포를 그리면 그림 5와 같다. 그림 5(a)와 (b)는 각각 무한대단의 각도를 0도로, 매크로단의 각도를 79도로 가정했을 때의 양단에서의 초점 조정 각도의 분포이다. 그림 4에서 무한대단과 매크로단에서의 BWD에 대한 변화 분포의 표준편차는 0.1446으로 크지만, 그림 5에서는 양단 간의 표준편차의 차이가 0.1257로 BWD 분포때 보다는 차이가 작음을 알 수 있다. 이는 양단에서 캠 회전각에 따른 캠 각도의 초점 변화와 BWD의 변화가 서로

(a)

(b)

FIG. 7. The comparison with the distributions of BWD for the second example in patent US2011-0096410A1^[11] in case of (a) infinite state and (b) macro state.

다름을 의미한다.

매크로 렌즈는 매크로단에서 등배(-1배)를 유지해야 하는데, 이와 같이 초점 조정을 했을 때에도 등배(-1배)가 유지되는 지를 확인해야 한다. 무한대단에서는 제조 오차와는 관계없이 물체거리가 항상 무한대가 되므로 배율은 무조건 0이 된다. 그러므로 무한대단에서는 별도 배율 분포를 계산할 필요는 없다.

그림 6은 그림 4와 같이 발생한 오차에 따라 BWD 변화를 보정하기 전(그림 6(a))과 보정한 후(그림 6(b))에 대한 배율의 분포를 그린 것이다. 그림 6에서 보는 것처럼 BWD 변화를 보정하면 초점 위치도 보정이 되지만, 최대 배율의 분포가 좁아지는 것으로 보아서 배율도 같이 보정되는 것으로 간주할 수 있다.

마지막으로 초점 조정을 위한 캠 각도 여유분을 결정하고자 한다. 앞서 가정한 각 면의 곡률의 공차를 $\pm 5\mu\text{m}$, 두께는 $\pm 0.05\text{ mm}$, 굴절률 ± 0.001 의 변화에 대한 BWD의 캠 보정 각도의 표준편차는 그림 5에서 보는 것처럼 무한대단과 매크로단에서 각각 0.4873° 와 0.6130° 이다. 중심치 이동 1.5σ 를 허용하는 조건에서 6σ 수준의 불량률을 달성하기 위해서는 표준편차의 4.5배 규격을 만족해야 한다.^[12, 13] 따라서 이를 가정하면 캠 여유 각도는 무한대단과 매크로단에서 각각 2.19285° 와 2.7585° 가 되어야 한다. 기구 설계적으로 이러한 여유각이 문제가 있다면, 공차를 더 줄이거나, 공차 분포를 균등분포에서 표준분포를 이루도록 관리를 해야 한다. 만약 공차를 줄이거나, 공차 분포를 관리할 수 없는 상황이라면 초점 조정을 캠 각도 보정 외에도 매크로 렌즈의 마운트 부분에 BWD 변화에 해당하는 얇은 금속판을 넣거나 빼는 방법을 이용할 수 있다.

IV. 플로팅 광학계의 종민감도

i 번째 군의 군배율이 m_i 이고, 총 n 개의 군이 있을 때, i 번째 군의 종민감도 p_i 는 식 (8)과 같이 주어진다.^[7]

$$p_i = (1 - m_i^2) \cdot \prod_{k=i+1}^n m_k^2 \quad (8)$$

식 (8)과 같이 주어진 종민감도는 i 번째 군이 단위 길이 1만큼 움직였을 때, 상면이 p_i 만큼 움직이는 것을 의미하며, 렌즈군의 종방향 이동에 따른 BFL 또는 BWD의 이동량을 의미한다. 또한 식 (8)에서 $m_i^2 > 1$ 인 경우, $p_i < 0$ 인데, 이는 렌즈 군의 이동과 상면의 이동 방향이 다르다는 것을 의미한다. 매크로 렌즈에서 자동 초점 기능을 구현하기 위해서는 렌즈군을 움직이는 모터와 같은 구동원 제어가 필요하고, 이를 위해서는 구동원의 단위 이동량에 대한 상면의 이동량을 구할 수 있어야 한다. 플로팅 광학계가 아닌 경우에는 구동원의 단위 이동량과 초점조절군의 이동량이 비례하므로, 식 (8)과 같이 구한 종민감도를 사용할 수 있다. 그러나 플로팅 광학계는 2개의 군이 동시에 움직이므로 식 (8)에서 주어지

는 종민감도를 그대로는 사용할 수 없다. 일반적으로 매크로 렌즈에서는 이러한 구동원이 캠을 회전시키고, 캠이 회전하면서 렌즈군이 움직이는 방법으로 AF가 구현된다. 여기서 구동원의 단위 이동량과 캠 회전각이 비례하므로 플로팅 광학계에서의 종민감도는 캠 회전각에 대한 상면의 이동량을 구하는 것으로 계산할 수 있다. 그러나 식 (8)을 사용하고자 한다면 다음과 같이 개념을 추가하여 변환하여 사용하는 것이 가능하다. 즉 캠이 회전하면서 각 군이 미소량 이동하게 되며, 각 군의 미소 이동량과 식 (8)로 계산되는 각 군의 종민감도를 곱해서 모두 더한 값이 광학계의 BWD 변화량이 된다. 이를 수식으로 표현하면 식 (9)가 된다.

$$p = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \Delta l_{G_i} \quad (9)$$

식 (9)에서 p_i 는 식 (8)에서 주어지는 각 군의 종민감도이며, Δl_{G_i} 는 캠의 단위 회전량에 따른 i 번째 군의 첫 번째 면에서 상면까지의 거리의 변화량이다. 이 물리량이 i 번째 군의 실제 이동량이 된다. 그리고 III절에서 구한 $z_1 \sim z_N$ 을 알면 Δl_{G_i} 를 구할 수 있다. 또한 식 (9)에서 난수 발생으로부터 각 경우에 대해 군배율 m_i 는 정해지므로 i 번째 군의 종민감도 p_i 가 결정된다. 따라서 전체 광학계의 BWD 변화량 p 는 식 (9)를 이용해 구할 수 있다. 실질적으로 군배율 m_i 를 정확한 값을 사용하지 않고 근사적으로 설계값을 사용해도 식 (9)를 구하는 것에는 큰 문제는 없다. 이 때 식 (9)에 의해 얻어지는 최종 결과인 p 는 캠의 회전에 따른 BWD의 변화가 된다.

그림 4에서와 같이 난수 발생을 시키게 되면, 식 (9)에서 Δl_{G_i} 는 난수 발생에 의해 구해지는 군간 간격이고, 각 군의 군배율 m_i 는 난수 발생으로 인해 곡률, 두께, 굴절률 등에 의해 변하는 값이나, 앞서 설명한 대로 설계치와 큰 차이가 없다. 그러므로 식 (9)에 의해 구한 BWD의 보정 값과 그림 4와 같이 구한 BWD의 변화를 비교해 보면 그림 7과 같다. 그림 7에서 보는 것처럼 난수 발생에서 얻어진 BWD의 분포와 식 (9)에 의해 구해지는 BWD의 보정량이 일치하는 것을 볼 수 있다. 즉, 이러한 결과는 렌즈 부품의 가공 오차 및 조립 오차 등에 의해 발생된 BWD 변화 분포와 식 (9)에 의해 각 군의 종민감도로 계산된 BWD 보정량 분포가 같다는 것을 의미한다. 또한 Δl_{G_i} 는 캠 회전에 의해 결정되는 값임을 기억한다면, 그림 7과 같은 결과는 여러 가지 오차에 의해 발생된 BWD 변화를 플로팅 광학계에서 캠각도 회전으로 보정할 수 있다는 것을 의미한다.

V. 결 론

렌즈교환식 카메라용 광학계는 제품의 사양에 따라 화각 범위가 매우 다양하여 여러 가지 형태의 광학계가 존재한다. 이러한 교환렌즈 광학계는 여러 카메라에 사용되어야 하므로, BWD가 설계치에 정확히 오도록 초점 조정 공정을 거쳐

야 한다. 물론 컴팩트 DSC용 광학계에서도 초점 조정 단계가 있으며, 일반적으로는 초점조절군으로 조정을 하게 된다. 여기서 교환렌즈용 광학계의 형태에 따라서 초점조절군이 2개 이상으로 구성된 플로팅 광학계에서는 초점조절군들의 이동량이 캠 회전각에 의존하게 된다. 이 때, 2개 이상의 군이 움직이는 플로팅 광학계에 대한 대표적인 예를 2가지를 들고 각 형태에 따른 특징을 설명하였다.

이러한 플로팅 광학계에서도 BWD가 설계치에 정확히 오도록 반드시 초점 조정 공정을 거쳐야 한다. 플로팅 광학계에서는 각종 제조 오차에 의해 발생하는 BWD 변화를 캠 회전각으로 보정하므로, 제품 개발 단계에서 BWD 보정에 필요한 캠 회전각을 계산해야 한다. 여기서 각종 부품의 제조 오차는 통계적인 분포를 갖게 되며, 이 때문에 BWD 변화 역시 통계적인 분포를 갖는다. 따라서 BWD 보정에 필요한 캠 회전각 역시 통계적인 분포를 갖게 된다. 본 논문에서 최종적으로 무한대와 매크로단에 대한 캠 회전각 분포를 각각 구했으며, 이를 통해 캠 회전각의 공차를 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

하지만 이렇게 BWD 변화를 보정했을 때, 매크로단에서 제품 사양인 최대 배율이 어느 정도 분포를 갖는지 확인을 해야 하며, 본 논문에서 BWD 변화를 보정하기 전과 보정한 후에 대해 최대 배율 분포를 비교해 본 결과, 산포가 크게 줄어드는 것을 확인했다. 이로서 BWD 변화를 보정함으로써 제품에서 최대 배율 변화도 같이 보정될 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

1. J. M. Ryu, G. M. Kang, H. J. Lee, H. K. Lee, and J. H. Jo, "Correction method for the variation of the image plane

- generated by various symmetric error factors of zoom lenses of digital still cameras and estimation method of defect rate due to the correction," *Korean J. Opt. Photon.* **15**, 420-429 (2006).
2. Amateur Photographer, "AP award winners 2011," (IPC Media Ltd., 2011), http://www.amateurphotographer.co.uk/news/AP_Awards_2011_news_305140.html.
3. Samsung, "The lens roadmap of NX lenses," (Samsung Electronics Co. Ltd., Korean ed., 2012), http://www.nxlens.com/lens_lineup.asp.
4. D. C. Watch, "The lens roadmap of E mount," (Impress Watch Corporation, Japanese ed., 2012), <http://dc.watch.impress.co.jp/img/dcw/docs/511/246/html/022.jpg.html>.
5. Panasonic, "The lens roadmap of micro four-third lenses," (Panasonic Co. Ltd., Japanese ed., 2012), <http://panasonic.jp/dc/lens/index.html>.
6. K. Yamaji, "Design of zoom lenses," in *Progress in Optics* **17**, E. Wolf, ed. (North-Holland, Amsterdam, Netherlands, 1971), Chapter 4.
7. J. M. Ryu, J. H. Jo, G. M. Kang, H. J. Lee, and S. Yoneyama, "Focus adjustment method with statistical analysis for an interchangeable zoom lens with symmetric error factors," *Korean J. Opt. Photon.* **22**, 230-238 (2011).
8. J. M. Ryu, "Lens system," US Patent US2010-0177407A1 (2010).
9. J. H. Jung, "Paraxial design and locus analysis of zoom lens system," Ph. D. Thesis, Kyungnam University, Changwon, Korea (1994).
10. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992), Chapter 3.
11. J. M. Ryu, "Macro lens system and pickup device including the same," US Patent US2011-0096410A1 (2011).
12. W. Mendenhall, R. J. Beaver, and B. M. Beaver, *Introduction to Probability and Statistics*, 12th ed. (Thomson, Boston, USA, 2006), Chapter 11.
13. G. R. Henderson, *Six Sigma Quality Improvement with MINITAB*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, Midlothian, UK, 2006), Chapter 6.