

디지털 카메라용 줌렌즈에서 대칭성 오차요인에 의한 상면 변화의 보정과 이에 따른 불량률 예측

류재명 · 강건모 · 이해진 · 이혁기

삼성테크윈(주) 광디지털사업부 선도기술팀
☎ 641-716 경상남도 창원시 성주동 42번지

조재흥[†]

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

(2006년 9월 11일 받음, 2006년 9월 20일 수정본 받음)

곡률, 두께, 굴절률 오차와 같은 광축대칭 오차요인들 때문에 상면이 이동하는 디지털 카메라용 줌렌즈 광학계에서 보상자를 이동시켜서 상면을 고정시키는 조건을 가우스 팔호법을 이용하여 유도하였다. 그리고 줌렌즈 광학계의 일반적인 세 가지 형태(3군, 4군, 5군 줌렌즈)를 사용하여 이 조건의 타당성을 검증하였다. 이러한 줌렌즈 형태에서 각 면의 곡률, 두께, 굴절률 등을 공차 내에서 Monte Carlo 방법에 따라 임의로 변화시켰을 때, 보상자의 이동량의 분포가 정규분포를 이루는 것을 확인하였다. 그리고 이로부터 공정능력을 계산하여 보상자의 최대 이동량에서 이에 따른 불량률을 이론적으로 예측하는 방법을 제시하였다.

주제어 : 기하광학, 줌렌즈, 가우스 팔호, 보상자, 공차 이론.

I. 서 론

최근 보급형 디지털 카메라의 형태는 얇아지고 가벼워지는 것이 일반적인 추세이나, 그 기능은 2000년대 초반에 처음 출시된 디지털 카메라에 비해 월등히 좋아졌다. 또한 요즘 출시되는 디지털 카메라는 CCD(charge coupled device) 또는 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Silicon)에서 일한 사진을 전자회로적으로 확대하는 디지털 줌과 달리 화질의 저하가 없는 광학 줌을 탑재하고 있다. 하지만 일부 초저가 기종에서는 단초점 렌즈에 디지털 줌만을 채용하는 경우도 있다. 이러한 극히 일부를 제외한 거의 모든 디지털 카메라에는 광학 줌이 채용되고 있고, 심지어 폰카메라에도 이제는 서서히 광학 줌이 적용되어 폰카메라도 디지털 카메라화되고 있다. 이러한 디지털 카메라에 필수적인 기능 중의 하나가 바로 자동초점(auto-focus: AF) 기능이다. 이 기능은 한 개의 렌즈군을 이동해 피사체 거리에 따라 상면에 정확히 초점이 맺히도록 하는 것이다. 이 때 이동하는 렌즈군을 조출군(繰出群)^[1]이라 하며, 일반적으로는 줌렌즈에서 상면 보정을 담당하는 보상자(compensator)^[2]를 조출군으로 이용한다. 이러한 자동초점 기능은 단초점 디지털 카메라에도 기본 기능으로 장착되고 있고, 현재는 폰카메라에도 광학 줌과 더불어 서서히 장착되고 있다. 이러한 자동초점 기능은 설계 단계에서부터 고려해야 하며 일반적으로 물체 거리를 무한대로 하여 설계를 하나 자동초점과 접사를 위해서는 물체 거리를 무한대,

보통 물체거리인 0.5 m ~ 2 m 정도, 근접 물체거리인, 즉 접사 거리인 0.1 m ~ 0.5 m로 각각 놓고 설계한다. 자동초점을 광학계에서 구현하기 위해서는 이러한 줌렌즈 설계 후에 줌 궤적뿐만 아니라 자동초점에 따른 물체거리와 조출군의 이동량, 즉 조출량(繰出量)을 기구 및 전자회로 설계자에게 알려 주어야만 한다.

한편 광학계를 구성하는 렌즈는 여러가지 오차요인들에 의해서 가공 및 조립시 오차가 발생한다. 디지털 카메라와 캠코더 같은 광학 제품의 제조의 경우, 제조 단가의 문제로 인하여 성능에 지장을 주지 않는 범위 내에서 어느 정도의 제작 오차는 허용하고 있으며, 이 때 허용할 수 있는 최대제작 오차를 공차(tolerance)라고 한다. 이 때 오차요인은 대칭성 오차요인과 비대칭성 오차요인으로 나눌 수 있다. 대칭형 오차요인은 발생된 오차가 광축에 대해 회전 대칭성을 갖는 오차로서 뉴턴링(Newton ring), 두께 오차, 굴절률 오차 등이 있고, 비대칭성 오차요인은 광축에 대해 대칭성이 없는 오차요인으로서 디센터(decenter), 틸트(tilt) 등이 있다. 여기서 후방초점거리(back focal length: BFL)에 영향을 주는 오차요인은 각 면의 곡률, 두께, 굴절률 등의 대칭성 오차요인뿐이다. 이 때 마지막 렌즈의 뒷면에서 BFL만큼 떨어진 곳에 위치하는 CCD는 고정되어 있기 때문에 조출군을 이동시켜 CCD가 있는 곳에 초점이 맺히도록 해야만 한다. 여기서 조출량은 기구적인 제한 때문에 무한정 커질 수 없어서 카메라 제조 현장에서는 이에 대한 최대허용한계가 존재한다.

본 논문에서는 이러한 대칭성 오차요인에 의한 상면 변화를 막기 위해서 우선 조출량을 가우스 팔호법(Gaussian

[†] E-mail: jhjo@hannam.ac.kr

bracket)^[3-5]을 이용해 구하는 방법을 논의하고, Monte Carlo 방법^[6]에 따라 각 면에 오차를 발생시켜서 조출량 분포를 구하고자 한다. 그러나 비대칭성 오차요인에 의해서는 광학계의 BFL이 바뀌지 않기 때문에^[7] 본 논문에서는 다루지 않기로 한다. 여기서 얻어진 조출량 분포를 알고, 이것의 허용 한계가 주어지면 카메라 제조시 각 렌즈들의 오차요인 때문에 발생하는 BFL 변화에 따른 불량률을 이론적으로 계산할 수 있다. 이러한 불량률은 품질공학론에서는 C_p , C_{pk} 등으로 표기하나^[8], 최근에 많은 기업들이 도입하고 있는 고객 중심의 품질 혁신 활동인 6-sigma^[9]에서는 시그마 수준(sigma level)으로 표시하고 있다. 그러므로 본 논문에서는 각 렌즈들의 오차에 의한 BFL 변화를 막기 위한 조출군 이동량에 의한 불량 수준인 시그마 수준을 이론적으로 계산하고자 한다.

II 이 론

서론에서 언급한 것처럼 대칭형 오차요인이 발생하면 각 면의 곡률, 두께, 굴절률이 변하게 된다. 이로 인하여 각 군의 굴절능과 군내 주요점의 위치 등이 변하기 때문에 그림 1(a)의 설계값에 의한 군(group)간 간격과 BFL이 그림 1(b)처럼 모두 변한다. 일반적으로 BFL은 렌즈 전체의 마지막 면에서 상면까지의 거리를 의미한다. 그러나 이 값은 마지막

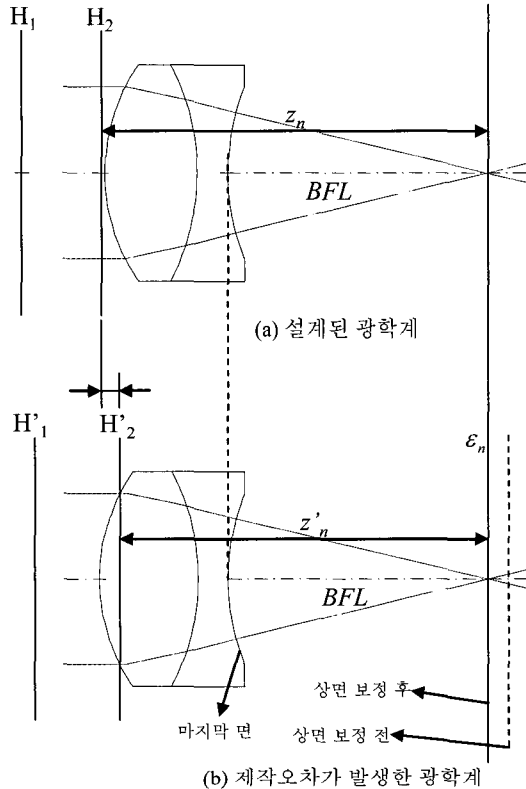


그림 1. 곡률, 두께, 굴절률 등의 변화에 따른 상면 이동. (a) 설계된 광학계, (b) 제작 오차가 발생한 광학계.

군의 제 2 주요면 H_2 에서 상면까지의 거리 z_n 까지와는 다르다. 광학계 제작시 가공 오차에 의해 BFL은 물론 z_n 도 변하게 되는데, 앞으로 모든 계산은 근축광학적으로 계산하게 되므로 BFL보다는 z_n 을 사용하게 될 것이다. 하지만 곡률, 두께, 굴절률 등의 오차에 의해 BFL과 z_n 은 동시에 구해질 수 있는 값이다. 여기에서 H_1 과 H_2 는 제 1주요면과 제 2주요면이고 z_n 은 제 2주요면에서 상면까지의 거리이다. 각 기호의 프라임은 제작오차가 발생한 광학계에서의 각 양들이다. 그리고 ϵ_n 은 이 광학계(여러 개의 군으로 이루어진 줌 렌즈의 경우에는 마지막 군)에서 제 2 주요면의 변화량을 의미한다.

여기서는 이러한 대칭형 오차요인에 의해 상면을 고정시키기 위한 조출량을 구해 보고자 한다. 구하는 과정은 조출군이 어디에 위치하는 지에 따라 약간씩 다르기 때문에 1 군이 조출군인 경우, 마지막 군의 바로 앞의 군이 조출군인 경우, 마지막 군이 조출군인 경우로 각각 나누어 설명한다.

2.1 1군이 조출군인 경우

그림 2(a)는 1군이 조출군인 경우 광학계를 보여주는 개략도이고, 그림 2(b)는 오차요인이 발생하여 각 군의 위치가 설계값에서 벗어난 것을 표현해 놓은 것이다. 원래 설계된 광학계의 BFL이 z_n 일 때, 오차요인이 발생한 광학계의 BFL은 원래 값과 달리 z'_n 이 된다. 이 때 CCD 면이 고정되므로 초점을 맞추기 위해 1군이 δ 만큼 이동하면 BFL은 z''_n 이 된다. 그리고 마지막 군에서 제 2 주요면의 변화량을 그림 1과 같이 ϵ_n 이라고 하자.

원래 광학계에서 각 군의 굴절능 k_i , 군간 간격을 z_i 라 하면 전체 광학계의 굴절능 K 와 BFL에 관한 방정식을 가우스 팔호법을 이용해 표현하면 다음과 같다.

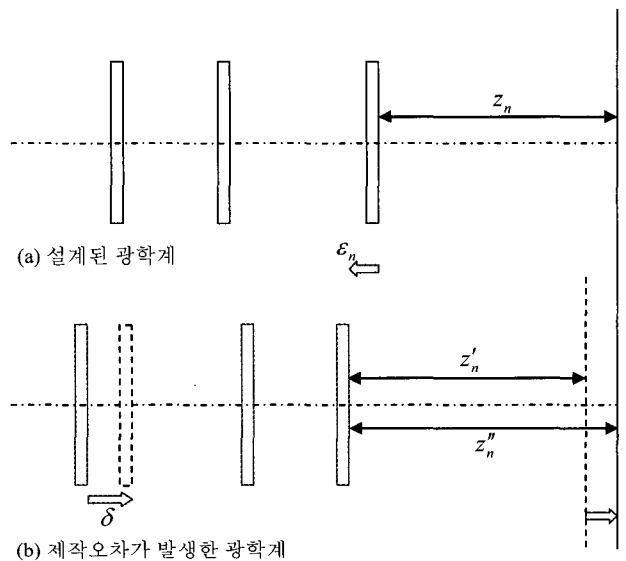


그림 2. 각 면의 제작 오차에 따른 상면 이동을 막기 위한 1군 조출. (a) 설계된 광학계와 (b) 제작오차가 발생한 광학계.

$$\begin{aligned} [k_1, -z_1, k_2, -z_2, \dots, -z_{n-1}, k_n] &= K \\ [k_1, -z_1, k_2, -z_2, \dots, -z_{n-1}] &= Kz_n \end{aligned} \quad (1)$$

이 때 대칭형 오차요인이 발생하는 경우, 식 (1)의 모든 값은 바뀌게 되며, 앞으로 설계값과 구분하기 위해 각 변수에 프라임 기호를 붙여서 표현하기로 한다. 한편 오차요인이 발생하면 상면에 focusing하기 위해서 1군이 이동하는데, 이 때 전체 광학계의 굴절능은 K'' 으로, BFL은 z_n'' 으로 변한다. 또한 1군과 2군 사이의 거리에는 1군의 이동량 δ 를 고려해야만 한다. 따라서 1군이 이동하여 focusing이 완료된 광학계에서는 식 (1)과 같은 원리로 다음과 같은 식이 역시 성립한다.

$$\begin{aligned} [k'_1, -z'_1 - \delta, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1}, k'_n] &= K'' \\ [k'_1, -z'_1 - \delta, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1}] &= K''z_n'' \\ z_n'' &= z_n + \varepsilon_n + \delta_{CCD} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 δ_{CCD} 는 CCD 또는 CMOS 등의 디지털 센서의 조립 오차를 의미한다. 여기서 미지수는 굴절능 K'' 과 1군의 이동량 δ 이고 나머지 변수들은 임의의 범위 내에서 난수 발생에 의해 결정되는 값이다. 그러므로 식 (2)를 연립하여 1군의 이동량 δ 를 각 군의 굴절능(k_i)과 군간 간격(z_i)의 변수로만 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{B_1 z_n'' - B_2}{A_2 - A_1 z_n''} \\ A_1 &\equiv k'_1 [k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1}, k'_n] \\ B_1 &\equiv [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1}, k'_n] \\ z_n'' &= z_n + \varepsilon_n + \delta_{CCD} \\ A_2 &\equiv k'_1 [k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1}] \\ B_2 &\equiv [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1}] \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 N-1군이 조출군인 경우

N-1이라 함은 전체 군이 N개이고, 이 때 조출군은 마지막 군의 바로 앞에 위치한다는 것을 의미한다. 그림 3(a)는 N-1군이 조출군인 경우의 설계된 광학계를 나타내는 것이고, 그림 3(b)는 오차요인이 발생하여 각 군의 위치가 설계치에 벗어난 것을 표현해 놓은 것이다. 각 변수의 표기는 바로 앞의 2.1절에서 사용한 것과 같다.

대칭형 오차요인이 발생한 광학계에서 각 군의 굴절능을 k'_i , 군간 간격을 z'_i 라 하면 N-1군이 이동된 전체 광학계의 굴절능 K'' 와 BFL(z_n'')에 관한 방정식을 가우스 괄호법을 이용해 표현하면 다음과 같다. 다만 2-1절과 달리 N-1군의 이동량 δ 는 N-1군과 마지막 군의 군 간격뿐 아니라, N-2군과 N-1군 사이의 군 간격에도 영향을 주므로 식을 세울 때 주의하여야 한다.

$$\begin{aligned} [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-3}, k'_{n-2}, -z'_{n-2} - \delta, k'_{n-1}, -z'_{n-1} + \delta, k'_n] &= K'' \\ [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-3}, k'_{n-2}, -z'_{n-2} - \delta, k'_{n-1}, -z'_{n-1} + \delta] &= K''z_n'' \\ z_n'' &= z_n + \varepsilon_n + \delta_{CCD} \end{aligned} \quad (4)$$

마찬가지로 미지수는 굴절능 K'' 과 N-1군의 이동량 δ 이고 나머지 변수들은 결정되는 값들이다. 그러므로 식 (4)를 연립하여 표현한 N-1군의 이동량 δ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (A_3 - A_2 z_n'') A_4 \delta + [A(B_3 - B_2 z_n'') - (A_3 - A_2 z_n'') B_3] \delta - B_3(B_3 - B_2 z_n'') + \frac{C_1 z_n'' - C_2}{K_{n-1}} &= 0 \\ A_3 &\equiv [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-3}, k'_{n-2}] \\ B_3 &\equiv [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-3}, k'_{n-2}, -z'_{n-2}] \\ C_1 &\equiv [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-3}, k'_{n-2}, -z'_{n-2} - z'_{n-1}, k'_n] \\ A_2 &\equiv k'_n \\ B_2 &\equiv [-z'_{n-1}, k'_n] \\ C_2 &\equiv [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-3}, k'_{n-2}, -z'_{n-2} - z'_{n-1}] \\ A_3 &\equiv 1 \\ B_3 &\equiv -z'_{n-1} \\ z_n'' &= z_n + \varepsilon_n + \delta_{CCD} \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 마지막 군이 조출군인 경우

그림 4(a)는 마지막 군이 조출군인 경우의 설계된 광학계를 나타내는 것이고, 그림 4(b)는 오차요인이 발생하여 각 군의 위치가 설계치에 벗어난 것을 표현해 놓은 것이다. 앞서와 마찬가지로 이 경우 식 (6)이 성립하는데, 마지막 군의 이동량 δ 에 대해 표현하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

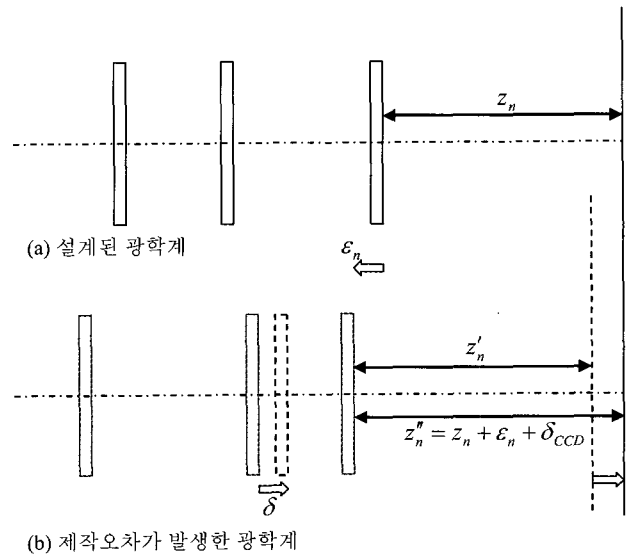


그림 3. 각 면의 제작 오차에 따른 상면 이동을 막기 위한 N-1군 조출. (a) 설계된 광학계와 (b) 제작오차가 발생한 광학계.

$$\begin{aligned} [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1} - \delta, k'_n] &= K'' \\ [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1} - \delta] &= K'' z''_n \\ z''_n &= z_n - \delta + \varepsilon_n + \delta_{CCD} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A_2 A_3 \delta^2 + (A_1 - A_2 B_3 - A_3 B_2) \delta + B_2 B_3 - B_1 &= 0 \\ A_1 &\equiv [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, k'_{n-1}] \\ B_1 &\equiv [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, k'_{n-1}, -z'_{n-1}] \\ A_2 &\equiv [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, k'_{n-1}] k'_n = A_1 \cdot k'_n \\ B_2 &\equiv [k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, k'_{n-1}, -z'_{n-1}, k'_n] \\ A_3 &\equiv -1 \\ B_3 &\equiv z_n + \varepsilon_n + \delta_{CCD} \end{aligned} \quad (7)$$

2.4 유한 물체인 경우

앞의 식 (3), 식 (5), 식 (7)은 무한 물체에 대해 가우스 팔호법으로 구한 식이다. 만약 물체가 유한 거리에 있다면 총 조출량은 물체 거리에 대한 양도 고려해야한다. 그러면 식 (1)은 아래와 같이 식 (8)로 바뀐다.

$$\begin{aligned} [-z_0, k_1, -z_1, k_2, -z_2, \dots, -z_{n-1}, k_n] &= \frac{1}{\beta} \\ [-z_0, k_1, -z_1, k_2, -z_2, \dots, -z_{n-1}] &= \frac{z_n}{\beta} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 z_0 는 물체에서 1군의 제1주요면까지의 거리이고, β 는 광학계의 배율이다. 이러한 경우 식 (2), 식 (4), 식 (6)은 아래와 같이 각각 식 (9), 식 (10), 식 (11)으로 바뀐다.

$$[-z'_0 + \delta, k'_1, -z'_1 - \delta, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1}, k'_n] = \frac{1}{\beta''}$$

$$\begin{aligned} [-z'_0 + \delta, k'_1, -z'_1 - \delta, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1}] &= \frac{z''_n}{\beta''} \\ z''_n &= z_n + \varepsilon_n + \delta_{CCD} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} [-z'_0, k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-3}, k'_{n-2}, -z'_{n-2} - \delta, k'_{n-1}, -z'_{n-1} + \delta, k'_n] &= \frac{1}{\beta''} \\ [-z'_0, k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-3}, k'_{n-2}, -z'_{n-2} - \delta, k'_{n-1}, -z'_{n-1} + \delta] &= K'' z''_n \\ z''_n &= z_n + \varepsilon_n + \delta_{CCD} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} [-z'_0, k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1} - \delta, k'_n] &= \frac{1}{\beta''} \\ [-z'_0, k'_1, -z'_1, k'_2, -z'_2, \dots, -z'_{n-1} - \delta] &= \frac{z''_n}{\beta''} \\ z''_n &= z_n - \delta + \varepsilon_n + \delta_{CCD} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (9)부터 식 (11)까지에서 미지수는 배율 β'' 과 조출량 δ 이고 나머지 값들은 난수 발생으로 주어지는 값들이다. 따라서 식 (9)부터 식 (11)까지는 조출량 δ 에 대해 배율을 제외한 나머지 변수로만 전개할 수 있다. 한 가지 주의해야 하는 것이 있는데, 1군 조출의 경우에 대해서는 무한물점과 달리 유한물점에서는 조출량이 물체거리에 영향을 주므로 식의 형태가 식 (3)과 달라진다는 것이다.

III. Programming 및 광학계 적용

2장 이론에서 제시한 식들을 계산하는 도구로서 일반 컴퓨터 언어인 BASIC, C, C++, C# 등을 이용할 수 있으나 요즘 광학설계에 사용하는 CODE V, OSLO, ZEMAX 등의 내부언어를 사용할 수도 있다. 본 논문에서는 설계 완료 후 데이터 변환없이 바로 실무에 적용할 수 있도록 광학설계 S/W의

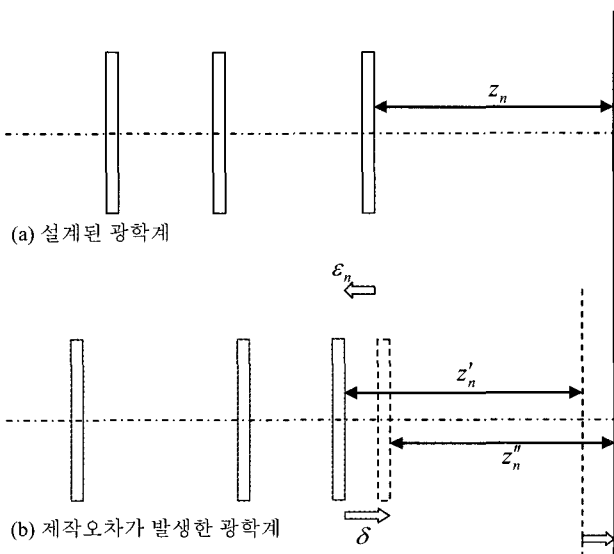


그림 4. 각 면의 제작 오차에 따른 상면 이동을 막기 위한 N군 조출. (a) 설계된 광학계와 (b) 제작오차가 발생한 광학계.

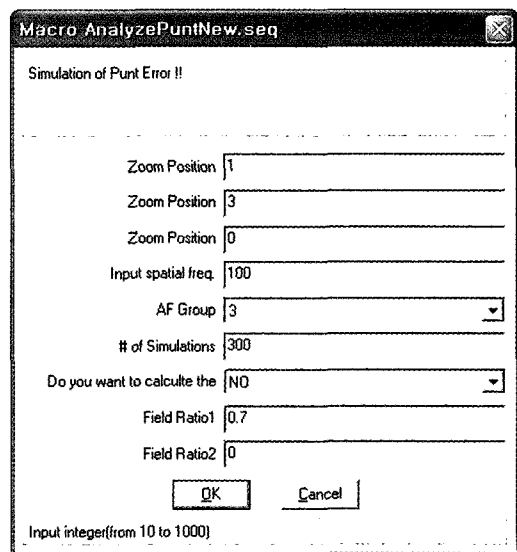


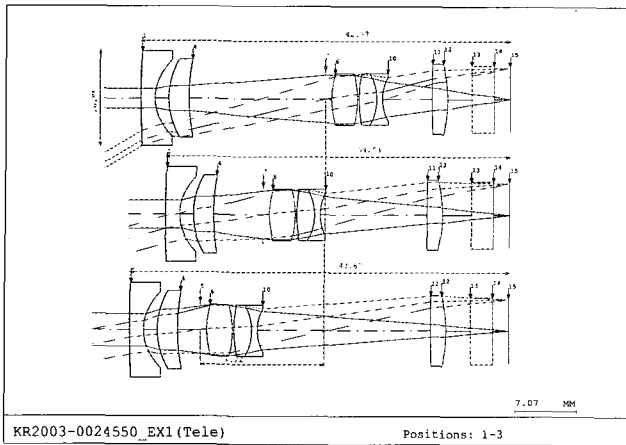
그림 5. 프로그램의 실행 모습.

내부 언어를 이용해 계산했다. 여기에서 예제로 사용할 광학 설계들은 ORA사의 CODE V로 입력되었으므로 모든 계산은 CODE V의 내부 언어인 MACRO-PLUS로 작성했다.

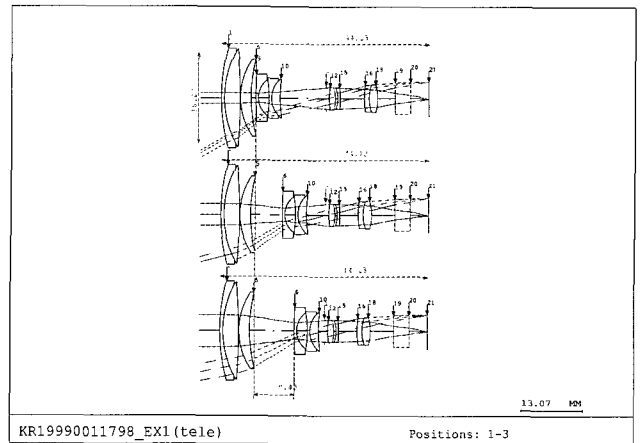
CODE V에서 곡률에 대한 공차 입력은 'DLF', 두께는 'DLT', 굴절률은 'DLN'라는 명령어로 입력할 수 있으며, MACRO-PLUS의 내부 명령어를 적절히 조합하여 S/W를 구성하면 입력된 공차 값을 모두 불러 올 수 있다. 또한 각 면의 곡률, 두께 등의 모든 광학 변수 역시 내부 명령어로 간단히 불러 들일 수 있으므로, 2장의 모든 식들은 그림 5와 같이 CODE V 내에서 모두 계산이 가능하다.

작성된 프로그램을 실제 광학계에 적용하기 위해 디지털 카메라의 대표적 형태인 3군에서 5군까지의 광학계 하나씩 선정하여 조출량을 계산했다. 3군 형태의 광학계는 국내 특허 KR2002-0025599의 제1실시예^[10], 4군은 KR1999-0011798

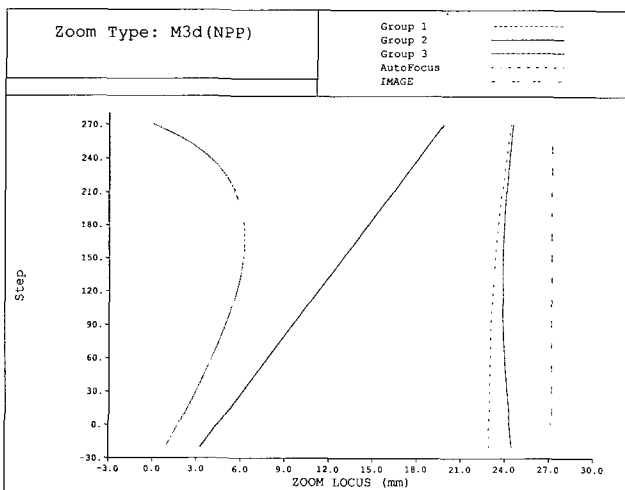
의 제1실시예^[11], 5군은 KR2005-0102860의 제1실시예^[12]를 선택했다. 각 광학계의 곡률, 두께, 굴절률 등의 데이터는 해당 특허 내용을 참고하면 된다. 다만, 세 가지 광학 사양의 비교를 위해 상높이가 1/2.5" CCD의 대각 길이인 3.6 mm가 되도록 축척(scaling)했다. 그림 6은 각각 3군 광학계의 광로도와 줌궤적이고, 그림 7은 4군 광학계의 광로도와 줌궤적이고, 그림 8은 5군 광학계의 광로도와 줌궤적이다. 그림 6에서 그림 8까지의 (b)들은 상면에서 각 군 첫 면까지의 거리를 그린 것이며, 가장 오른쪽의 1점 파선은 고정된 상면을 의미한다. 그림 6의 줌 궤적에서 세 실선은 왼쪽부터 차례로 1군, 2군, 3군을 의미하고, 점선은 일정한 거리에 있는 물체의 상을 맺기 위한 조출군의 위치를 의미한다. 그림 7의 줌 궤적도 같은 의미이며 4군 광학계이므로 실선이 4개이다. 그림 8의 줌궤적은 5군이므로 마찬가지로 5개의 실선이 있



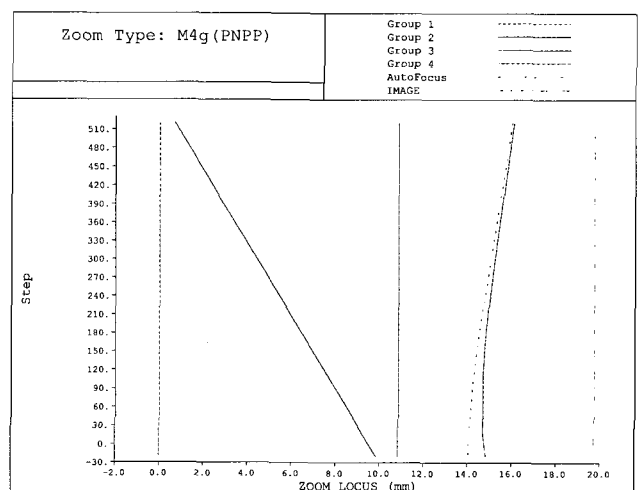
(a)



(a)



(b)

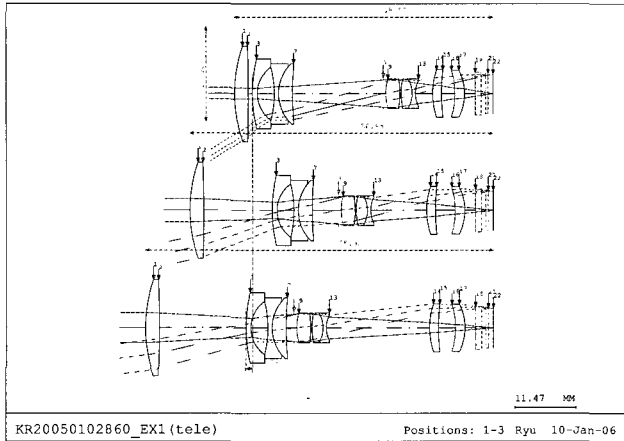


(b)

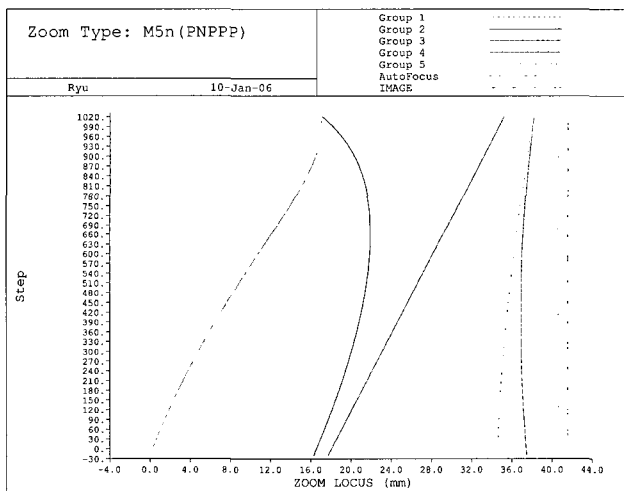
그림 6. KR2002-0025599의 제1실시예에 대한 광로도(위)와 궤적(아래).

그림 7. KR1999-0011798의 제1실시예에 대한 광로도(위)와 궤적(아래).

며, 상면과 인접한 5군은 고정이므로 상면과의 거리가 일정함을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 8. KR2005-0102860의 제1실시예에 대한 광로도(위)와 궤적(아래).

표 1. 이론을 적용하는데 사용한 각 광학계의 사양

	KR2003-0024550	KR1999-0011798	KR2005-0102860
EFL	6.40~18.54	6.49~19.29	5.89~28.34
FOV	60.6~20.6	59.2~20.6	64.8~14.2
F/#	2.84~5.01	2.77~2.84	2.86~5.11
Sensor	1/2.5" CCD(대각 3.6 mm)		
Zoom Ratio	2.90	2.97	4.81
Zoom Type	NPP(3군)	PNPP(4군)	PNPPP(5군)
Lens 매수	6매(비구면 3매 포함)	10매(비구면 1매 포함)	9매(비구면 2매 포함)
OAL	43.7 mm 이하	44.2 mm 이하	65.3 mm 이하

표 1에서 이러한 3가지 광학계의 대략적인 광학 사양들인 유효초점거리(EFL), 화각(FOV), F수(F/#), 센서(sensor), 줌비(zoom ratio), 줌형태(zoom type), 렌즈갯수, 광학전장(OAL)을 열거해 놓았다.

그림 6에서 보는 것처럼 본 논문에서 적용한 3군 광학계에서는 2군이 변배 역할을 담당하며 3군이 보상자 역할을 한다. 따라서 물체거리 및 각 광학 부품의 공차에 따른 상면 변화에 대한 자동초점은 보상자인 3군이 담당을 하게 된다. 4군 광학계의 경우(그림 7)는 4군이 보상자 역할을 하므로 마찬가지로 자동초점은 4군이 담당을 한다. 마지막으로 5군 광학계(그림 8)에서는 마지막 군인 5군은 고정되므로 4군이 보상자 역할을 하게 된다.

IV. 공정능력 분석

본 논문의 목적이 렌즈의 공차를 결정하는 것이 아니고 이미 결정된 공차에 의한 상면 변화를 막기 위한 보상자의 이동량을 구하는 것이 목적이므로 그림 6, 7, 8의 세 가지 예에 대해서 뉴턴링 변화는 3개, 두께 변화는 0.03 mm, 굴절률 변화는 0.0005로 제한했다. 또한 주어진 공차 내에서 임의로 발생하는 난수의 확률 분포는 여러 가지가 있겠지만, 여기에서는 균등 분포를 가정했다. 필요시 여러 가지의 확률 분포를 계산해 주는 MACRO-PLUS 코드를 작성하면 이론에서 제시한 식으로부터 조출량 분포는 항상 계산할 수 있다.

지금까지 제시한 방법으로 표1의 광학계들에 대한 조출량 변화에 대한 빈도수의 히스토그램(조출량 분포)이 그림 9, 그림 10, 그림 11이다. 여기에서 히스토그램에 표기된 실선(Wide의 경우) 및 점선(Tele의 경우)들은 각각 정규분포 함수로 피팅한 결과이며, 각 줌렌즈의 Wide와 Tele의 경우에 대한 평균과 표준편차 및 데이터 개수(N)는 오른쪽 아래의 작은 사각형에 적어 놓았다.

3군 줌렌즈에 대한 조출량 분포를 보여주는 그림 9와 5군 줌렌즈에 대한 조출량 분포를 보여주는 그림 11의 히스토그램을 보면 Tele(그림 9와 그림 11에서 점선 분포)가 Wide(그림 9와 그림 11에서 실선 분포)보다 최고점이 낮고 폭이 넓

은 것을 볼 수 있다. 이것은 Tele가 초점거리가 길고, F/#가 커서 초점심도가 길기 때문에 같은 공차 범위가 주어지면

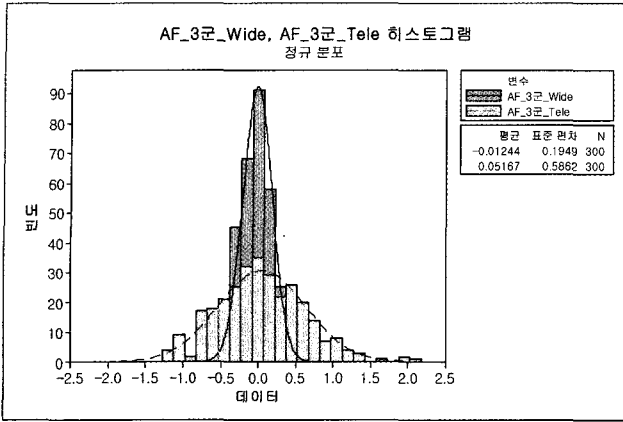


그림 9. KR2003-0024550의 제1실시예에 대한 Wide와 Tele에서의 조출량 분포

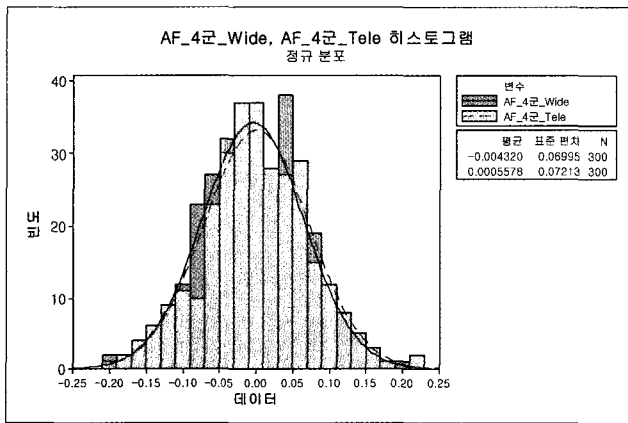


그림 10. KR1999-0011798의 제1실시예에 대한 Wide와 Tele에서의 조출량 분포

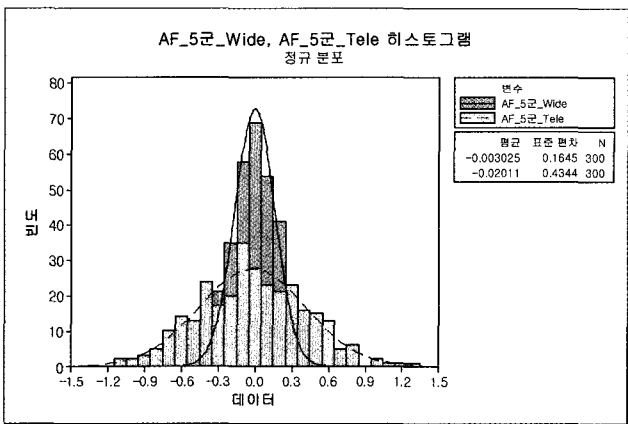
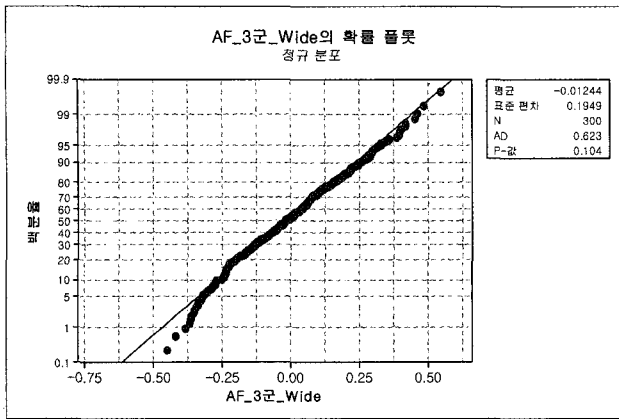


그림 11. KR2005-0102860의 제1실시예에 대한 Wide와 Tele에서의 조출량 분포

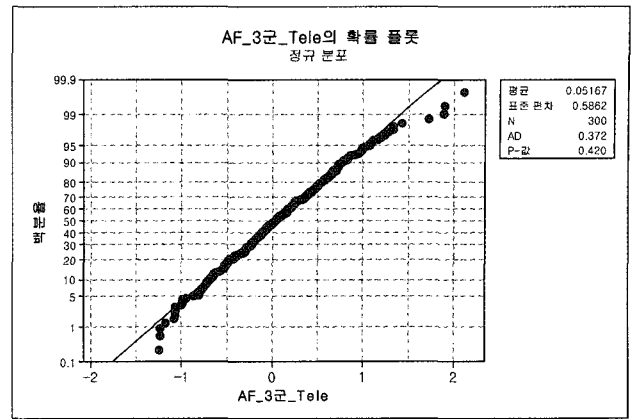
BFL의 변화가 길어지기 때문이다. 그러나 그림 10에서 보는 것처럼 4군 줌렌즈의 경우는 Wide와 Tele의 빈도 분포가 비슷한 것을 알 수 있는데, 같은 논리로 4군의 경우는 F/#가 거의 같아 초점심도가 비슷해서 BFL 변화 분포도 비슷하기 때문이다.

마지막으로 이러한 결과로부터 AF 보정에 따른 불량률을 계산해야 한다. 이를 위해서 공정능력분석(capability analysis)^[13]을 해야 하는데, 이러한 계산 방법은 통계학에서 이미 정립된 이론이고 자세한 계산 과정을 보이는 것은 본 논문에서 주장하고자 하는 것과 거리가 멀기 때문에 여기에서는 이를 계산해주는 S/W인 MINITAB^[14]을 사용하고자 한다. 여기서 공정능력이라 함은 어떤 공정이 어떤 특정한 조건하에서 공정이 안정되어 있다고 가정할 때, 공정이 만들어낼 수 있는 품질에 대한 달성 능력이다. 본 논문에서 예를 든 조출량 분포가 공정이라면, 각 단품 렌즈들의 공차 및 조립 공차 등이 본 논문에서 제시된 수준으로 완벽하게 관리된다고 가정했을 때, 조출량에 의한 불량률이 공정능력이 된다. 이러한 공정능력은 AF 분포가 위에서 언급한 방법으로 구해지고 그 조정 범위가 결정되면 계산할 수 있다. 그러나 위에서 구한 AF 조정량의 분포는 정규성 검증(normality test)를 거쳐야만 한다. 정규성 검증은 주어진 data가 정규분포 곡선을 따르는지에 대한 가설 검증 단계를 말하는데^[15], 그림 12에서 그림 14까지를 확률지(probability paper)라 한다. MINITAB에서는 이를 자동으로 그려주는데, 이 그림에 대한 원리는 참고문헌 15에 잘 언급되어 있다. 앞에서 구한 6가지의 조출량 분포는 그림 12(3군 줌렌즈의 경우), 그림 13(4군 줌렌즈의 경우), 그림 14(5군 줌렌즈의 경우)에서 보는 것처럼 'P-값'이 모두 0.05 이상이므로 정규성을 가짐을 알 수 있고, 특별한 데이터 변환 없이 공정능력 계산이 가능하다. 여기에서 그림 12, 그림 13, 그림 14에서 (a)들은 각 경우의 Wide, (b)들은 Tele에 대한 조출량 분포의 확률값을 보여준 결과이다.

위와 같이 정규성 검증이 완료된 조출량 분포의 공정능력 계산 방법은 Wide와 Tele 모두 똑같으므로 본 논문에서는 Tele단에서만 공정능력을 계산하고자 한다. 앞서 잠시 설명했듯이 공정능력을 계산하려면 불량 기준이 되는 한계가 주어져야 하는데, 여기서는 이 기준이 보상자의 최대 이동폭이 된다. 이것이 최대 조출량 범위가 되는데, 일반적으로는 해당 광학계의 기구물 설계가 완료되어야 완전히 결정되는 값이다. 이러한 최대 조출량 범위는 광학적으로 어느 정도는 계산이 할 수 있는 값이지만, 이를 계산하는 방법을 설명하는 것은 상당히 자세히 다뤄야 하고 내용 자체가 본 논문의 직접적인 주제와 거리가 있기 때문에 여기서는 임의로 결정된 값에 대한 공정능력만을 계산하기로 한다. 만약 정식으로 최대 조출량 범위가 결정되었다면 MINITAB에서 최대 조출량 범위만 바꿔서 공정능력만 다시 계산하면 되므로 실제적인 불량률을 예측하는 과정과 방법은 어렵지 않다. 여기서는 AF의 최대 조출량 범위를 각 조출량 분포의 표준편차의 3배로 가정하였다. MINITAB에서 구한 3군 줌렌즈, 4군 줌렌즈,

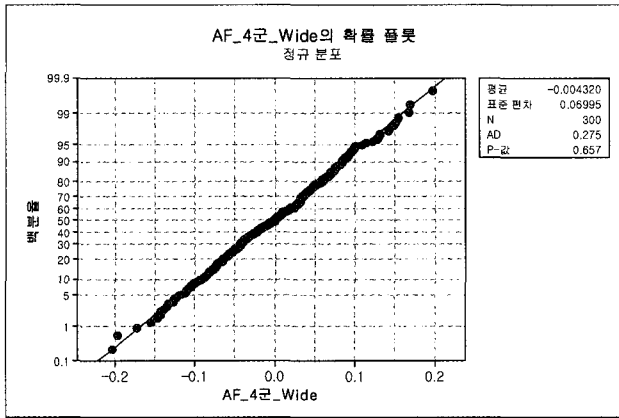


(a)

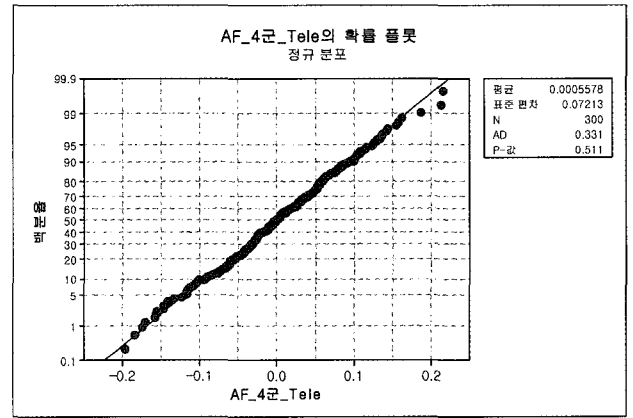


(b)

그림 12. KR2003-0024550의 제1 실시예에 대한 Wide와 Tele에서의 조출량 분포에 대한 정규성 검증.

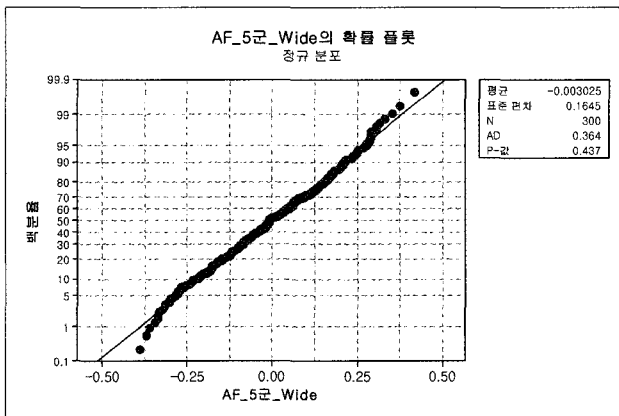


(a)

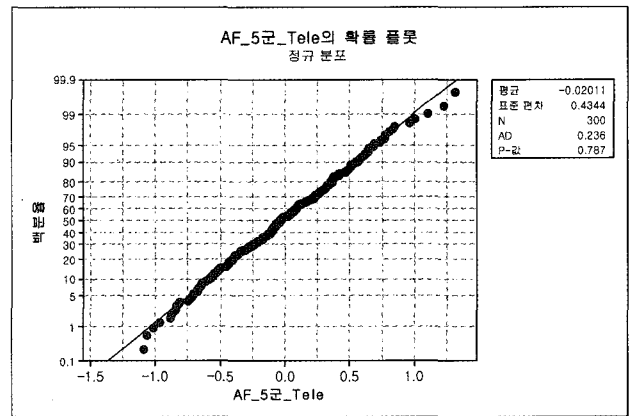


(b)

그림 13. KR1999-0011798의 제1 실시예에 대한 Wide와 Tele에서의 조출량 분포에 대한 정규성 검증.



(a)



(b)

그림 14. KR2005-0102860의 제1 실시예에 대한 Wide와 Tele에서의 조출량 분포에 대한 정규성 검증.

5군 줌렌즈의 세 가지 광학계에 대한 Tele단에서의 조출량 분포에 따른 공정능력 계산 결과가 각각 그림 15, 그림 16, 그림 17이다.

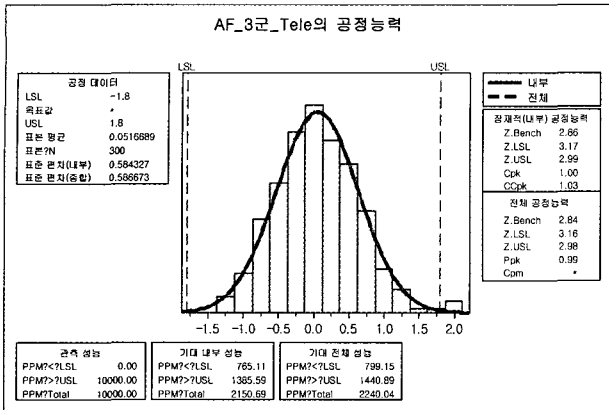


그림 15. KR2003-0024550의 제1 실시예에 대한 Tele단에서의 조출량 분포에 따른 공정능력.

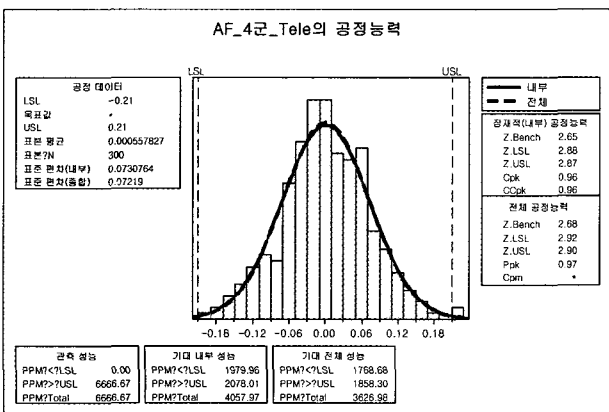


그림 16. KR1999-0011798의 제1 실시예에 대한 Tele단에서의 조출량 분포에 따른 공정능력.

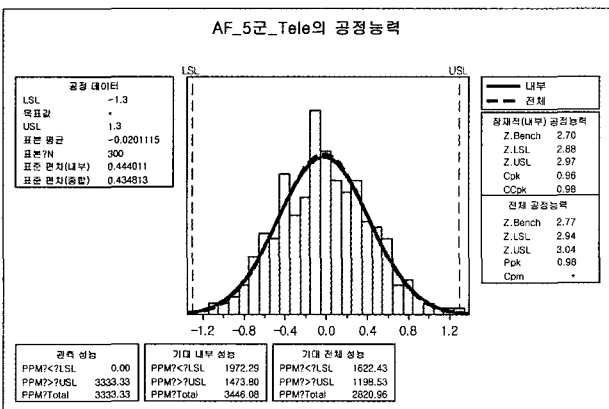


그림 17. KR2005-0102860의 제1 실시예에 대한 Tele단에서의 조출량 분포에 따른 공정능력.

여기서 구한 공정능력으로부터 불량률을 예측할 수 있는데, 그림 15, 그림 16, 그림 17의 오른쪽 아래에서 전체 공정능력의 'Z.Bench' 값이 sigma 수준을 나타낸다. 일반적으로는 'Z.bench' 값에 1.5를 더한 값이 sigma 수준이 되나^[1], 본 연구에서의 분포는 이론적인 계산 결과이고, Monte Carlo 방법에 따른 반복 수행 회수에 따라 분포도의 변화가 거의 없으므로 여기서는 그림 15, 그림 16, 그림 17에서의 'Z.bench' 값이 그대로 sigma 수준이 된다. 따라서 세 가지 광학계에 대해서 앞서 가정한 공차 내에서 제작 오차가 균일하게 발생한다면, sigma 수준이 2.86, 2.68, 2.77이 된다. 이것은 조출량 분포가 정규분포를 가진다고 가정했을 때, 조출량 공차 범위가 2.86, 2.68, 2.77이 됨을 의미한다. 따라서 이 값들을 모두 2.7이라고 근사했을 때, 평균이 0이고 표준편차가 1인 표준정규분포 곡선에서 표준편차가 ±2.7을 벗어나는 부분의 면적합이 약 0.0069이므로 불량률이 약 0.69%가 된다는 것이다. 이것은 카메라 백만 대를 생산하면 불량품이 약 6900대가 발생한다는 의미이다. 이러한 결과는 각 렌즈 면과 조립 오차가 균일분포를 이룬다는 가정에 계산된 결과이다. 따라서 만약 이러한 설계 변수들의 오차가 정규분포를 따르도록 관리한다면, 불량률은 더 낮아질 것으로 기대한다. 이때 예측된 불량률을 더 낮추기 위해서는 각 면에 적절한 공차 배분이 이루어져야 한다.

V. 결 론

광학계에서 제작 오차는 필연적으로 발생할 수밖에 없고, 이 때문에 실제 제작된 광학계는 BFL이 원래 설계값과는 차이가 생긴다. 광학계 제작 과정에서는 CCD가 고정되기 마련이며, 일반적으로는 CCD 위치가 BFL과 일치한다고 볼 수 없다. 따라서 이미 조립된 CCD에 정확히 결상시키기 위해서 줌 렌즈계의 보상자를 앞 또는 뒤로 이동시켜야 한다. 이러한 보상자의 이동량을 조출량이라 정의하며, 본 논문에서는 제작 오차에 따른 BFL 변화를 막기 위한 조출량에 대한 계산식을 가우스 괄호법을 이용하여 유도했다. 실제 광학계에 적용해 보기 위해 특히 자료 중 디지털 카메라 광학계의 줌 렌즈에 대한 대표적인 형태 세 가지를 선정했다. 선정된 세 광학계를 서로 비교하기 위해 각 광학계의 상면 높이가 1/2.5" CCD의 대각 길이가 되도록 축척(scaling)했다. 이들 세 가지 광학계에 임의의 공차를 부여하고 부여된 공차 내에서 각 면의 설계 변수가 균일한 분포를 갖도록 난수 발생시켜 조출량 분포를 구했다. 이렇게 구한 조출량 분포들이 정규성을 갖는지 확인했고, 공정능력을 구해 이론적으로 조출량 분포에 의한 불량률을 계산함으로써 불량률을 예측하는 이론을 제시하고 이를 검증하였다.

참고문헌

[1] 小倉, 寫眞レンズの基礎と發展(朝日ソノラマ, 東京,

- 1995), 1章, pp. 44
- [2] K. Yamaji, *Design of Zoom Lenses*, in *Progress in optics VI*, edited by E. Wolf(North-Holland, Amsterdam, 1971), Chap. 4.
- [3] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics*(Interscience Publisher, New York, 1958), Chap. 9.
- [4] 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.
- [5] 정진호, “줌 렌즈계의 근축설계와 궤적해석”, 경남대학교 박사학위논문(1994).
- [6] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling & B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*(Cambridge Univ. Press, 2nd ed., 1992), Chap. 7.
- [7] P. L. Ruben, *Aberrations Arising from Decentrations and Tilts*”, *JOSA* 54(1), pp. 45-52 (1964)
- [8] 박성현, *품질공학*(민영사, 서울, 1995), 4장.
- [9] 안승철, 이재원, 김건호, 윤성필, 임성욱, 조태연, *MINI TAB과 식스 시그마 경영*(자유아카데미, 서울, 2005).
- [10] 박영우, “소형 줌 렌즈,” 대한민국 특허 10-2002-0025599, 2003.
- [11] 박영우, “리어 포커스식 소형 줌 렌즈,” 대한민국 특허 특1997-035038, 1999.
- [12] 박영우, “고배율 줌 렌즈,” 대한민국 특허 10-2004-0028161, 2005.
- [13] 박성현, 박영현, *통계적 품질관리*(민영사, 서울, 1995), 14장.
- [14] “Minitab” is a registered trademark of Minitab Inc., <http://www.minitab.com/>.
- [15] 배도선 외 11명, *통계학 이론과 응용*(청문각, 서울, 2003), 14장.
- [16] 김영선, 박상찬, 박영택, 서영호, 유한주, 이동규, *품질경영론*(박영사, 서울, 2006), 10장.

Correction method for the Variation of the Image Plane Generated by Various Symmetric Error Factors of Zoom Lenses of Digital Still Cameras and Estimation of Defect Rate Due to the Correction

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

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

Jae Heung Jo[†]

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

[†]*E-mail: jhjo@hannam.ac.kr*

(Received September 11, 2006, Revised manuscript September 20, 2006)

In the zoom lens of digital still cameras with the variation of the image plane generated by various symmetric error factors such as curvature, thickness and refractive index error of each lens surface about the optic axis, we induce a theoretical condition to fix constantly the image plane by translating the compensator group of the zoom lens by using the Gaussian bracket. We confirm the validity of this condition by using three examples of general zoom lens types with 3, 4, and 5 groups, respectively. When these error factors are randomly changed within the range of tolerance according to the Monte Carlo method, we verify that the distributions of the degree of moving of the compensator are normal distributions at three zoom lens types. From capability analysis using these results, we theoretically propose the method estimating the standard deviation, that is, sigma-level, as a function of the maximum movement of the compensator.

OCIS code : 080.3620. 120.4570. 220.3620.