

# Focus-adjustment Method for a High-magnification Zoom-lens System

Jae Myung Ryu<sup>†</sup>

*Department of Optical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea*

(Received February 23, 2023; Revised March 12, 2023; Accepted March 15, 2023)

Zoom lenses are now starting to be applied to mobile-phone cameras as well. A zoom lens applied to a mobile-phone camera is mainly used to capture images in the telephoto range. Such an optical system has a long focal length, similar to that of a high-magnification zoom optical system, so the position of the imaging device also shifts significantly, due to manufacturing errors of the lenses and mechanical parts. In the past, the positional shift of the imaging device was corrected by moving the first lens group and the total optical system, but this paper confirms that the position of the imaging device can be corrected by selecting any two moving lens groups. However, it is found that more distance must be secured in the front and rear of a moving lens group for this purpose.

**Keywords:** Focus adjustment, Lens design, Tolerance analysis

**OCIS codes:** (080.3620) Lens system design; (220.2740) Geometric optical design; (220.4610) Optical fabrication

## 고배율 줌 광학계의 상면 오차 보정 방법

유재명<sup>†</sup>

국립금오공과대학교 광시스템공학과

☎ 39253 경북 구미시 대학로 61

(2023년 2월 23일 받음, 2023년 3월 12일 수정본 받음, 2023년 3월 15일 게재 확정)

줌 렌즈는 이제 휴대폰에도 적용되기 시작했다. 휴대폰에 적용되는 줌 렌즈는 주로 망원 영역을 촬영하기 위해 적용되고 있으며, 이러한 광학계는 고배율 줌 광학계와 유사하게 초점거리가 길어서 부품의 제작 오차에 의한 촬상 소자의 위치도 크게 변한다. 이를 보정하기 위해 기존에는 렌즈군 1군과 광학계 전체를 이동해서 촬상 소자의 위치 변화를 보정했으나, 본 논문에서는 이동하는 렌즈군 2개를 임의로 선택해서 촬상 소자의 위치를 보정할 수 있음을 확인했다. 다만, 이를 위해서는 이동하는 렌즈군 앞쪽과 뒤쪽으로 간격을 더 확보해야 함을 알 수 있었다.

**Keywords:** 초점 맞춤, 렌즈 설계, 공차 분석

**OCIS codes:** (080.3620) Lens system design; (220.2740) Geometric optical design; (220.4610) Optical fabrication

### I. 서 론

줌 광학계는 영상을 취득하는 장치에 사용되며, 영상을 취득하는 대표적인 제품 분야로는 카메라가 있다. 이때 가시광은 물론이고, 군사 분야에서 많이 사용하는 원적외선 열상 장비 등도 카메라로 볼 수 있다. 과거의 카메라는 film을 사용했

으나, 2000년대 초반부터 디지털화가 진행되고, 또 SNS의 유행과 맞물려서 디지털 카메라가 많이 판매되었다. 그 이후에는 digital single-lens reflex (DSLR) 및 compact system camera (CSC) 등의 제품에 사용되는 광학계에 줌 렌즈가 적용되어 왔다. 하지만, 휴대폰 카메라의 급격한 발전으로 인해 소형 디지털 카메라는 물론이고 CSC 제품조차 판매량이 많이

<sup>†</sup>Corresponding author: [jmryu@kumoh.ac.kr](mailto:jmryu@kumoh.ac.kr), ORCID: 0000-0001-6318-0684

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



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

감소했다.

휴대폰 카메라는 화각이 다른 단초점 광학계 2-3개를 적용하고, 디지털 줌과 같은 영상 처리를 통해 줌을 구현한다. 그러나 이것을 망원 영역에서 적용하게 되면 화질 열화가 발생하며, 때문에 망원 영역에는 광학적 줌을 적용해야 한다. 광학 줌은 실제로도 제품화가 시도되고 있는데, 최근 CES 2023에서 광학 줌 방식이 적용된 휴대폰 카메라용 줌 광학계가 전시되어 많은 주목을 받았다<sup>[1]</sup>. 따라서 광학 줌은 여전히 여러 제품에 적용될 것으로 예상할 수 있다.

지금까지 제품화된 줌 광학계는 화각 변화를 위해 렌즈군의 일부가 이동한다. 줌 렌즈를 구성하는 렌즈군은 그 역할에 따라 전통적으로 초점자, 변배자 및 보상자 등으로 분류된다<sup>[2]</sup>. 렌즈군을 이동하는 방식으로는 회전운동을 직선운동으로 변환하는 캠(CAM) 부품을 사용하거나, 스텝핑 모터와 직선 스크류에 렌즈군의 기구물을 직접 연결하여 이동하는 방법을 사용한다.

이러한 줌 렌즈는 단초점 렌즈에 비해 비교적 많은 렌즈와 부품이 사용되는 것이 일반적이므로, 공차 항목이 많아진다. 렌즈와 부품의 오차로 인해 상면 위치 역시 오차가 발생하며, 따라서 상면의 위치를 반드시 보정해야 한다. 줌 렌즈에서 상면 위치 보정의 가장 일반적인 방법은 보상자를 앞뒤로 이동하는 것이다<sup>[3]</sup>. 이 방법은 별도의 추가 기구물이나 특별한 공정 없이, 보상자 앞뒤의 공간만 충분히 확보된다면 쉽게 적용할 수 있다. 그러나 촬상소자가 커서 광학계의 초점거리가 길거나, 줌 배율이 큰 광학계에서는 상면의 위치 변화가 너무 커서 적용할 수 없다는 단점이 있다.

따라서 이를 개선하기 위해 1군과 2군의 간격, 광학계의 마지막 군과 상면 사이의 간격을 조절해서 광각단과 망원단의 상면 위치 오차를 최대한 보정하고 잔류량을 보상자로 상면의 위치를 보정하는 방법<sup>[4]</sup>도 이미 제안된 바가 있다. 그러나 이 방법은 현업에서 와셔(washer)라고 불리는 다양한 두께의 도넛 형상 금속판이 추가적으로 필요하고, 제조 공정에서 이를 자동화하기 어렵다는 문제가 있다. 또한 작업자의 실수로 와셔의 두께를 잘못 인지할 경우 상면 오차 불량이 발생하기도

한다.

다만, 교환렌즈와 같이 캠이 사용되고 크기가 큰 제품에서는 상기의 방법이 필수적이다. 그 외에도 단초점 렌즈이면서도 2개 이상의 렌즈군이 이동하는 렌즈군도 있으며, 이러한 제품은 구조적으로 줌 광학계와 유사하다. 교과서적으로는 이러한 광학계도 줌 광학계로 분류되기는 하지만, 교환렌즈 업계에서는 줌 광학계로 분류하지 않는다. 이러한 광학계에서는 캠 각도를 조절해서 상면 보정을 한다<sup>[5]</sup>. 이러한 상면 조정은 3개 이상의 렌즈군으로 조정하는 것도 가능하지만, 상면의 조정 방법이 복잡하기도 하고 특수한 환경에서 사용하는 줌렌즈에만 적용이 가능하여 이에 대해 추가 연구가 필요하다.

휴대폰 카메라용 망원 줌 광학계 또는 감시카메라, 캠코더와 같은 제품은 촬상소자가 작더라도 망원단에서 초점거리가 긴 경우가 많아서 상면 위치 오차도 큰 편이다. 이러한 제품에서<sup>[3]</sup>과 같은 상면 오차 보정 방법을 적용할 경우 앞서 언급한 바와 같이 소형화가 어렵고,<sup>[3]</sup>과 같은 방법도 단점이 존재하므로 경우에 따라서 적용되지 않는 경우도 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 방법 외에도 캠을 사용하지 않으며 스텝핑 모터를 사용하는 고배율 또는 망원 줌 광학계에서 효과적으로 사용할 수 있는 상면 조정 방법에 대해 논의하고자 한다.

## II. 광학계의 예시와 상면 위치 보정의 원리

현재까지 상용화된 줌 광학계는 캠 또는 스텝핑 모터를 사용하는 방법으로서 개략적인 기구 구성은 그림 1과 같다. 이들은 모두 과거 콤팩트 카메라에 사용되었던 기구 구성 방식이고 기계 보정식 줌 렌즈이다<sup>[2]</sup>. 다만, 최근 업계에서는 그림 1(b)와 같은 방식의 줌 렌즈를 전자보정식 줌 렌즈라고 하며, 캠코더 및 감시카메라를 비롯해 서론에서 언급된 휴대폰용 망원 줌 렌즈도 스텝핑 모터와 스크류를 사용한다. 광학 설계 관점에서는 두 가지 형태 모두 설계 방식은 동일하다. 특히 그림 1(b)와 같은 형태의 광학계는 1군이 고정되는 것이 일반적이며, 이 광학계의 설계 방법에 대한 매우 훌륭히 기술된 논문은<sup>[6]</sup>과 같다.

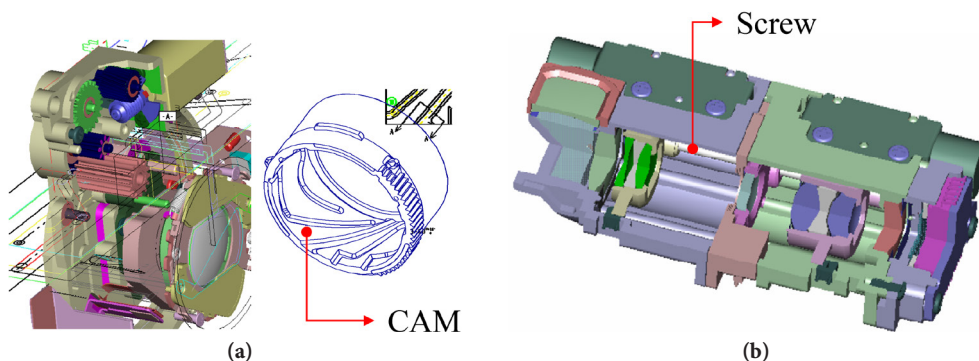


Fig. 1. Mechanical layout for zoom lenses. (a) Zoom lens using CAM. (b) Zoom lens using stepping motor and screw.

줌 광학계의 기계적인 구성과는 관계없이 망원 줌 광학계 또는 고배율 줌 광학계는 [3]과 같은 방법을 적용할 수 없음은 이미 서론에서 언급했으며, 원칙적으로는 [4]와 같은 방법을 사용해야 한다. [4]와 같은 방식의 단점은 있으나, CAM을 사용하는 광학계에는 필수적이며 지금도 제품에는 광범위하게 적용되고 있는 방식이므로 이에 대한 원리를 간단히 정리하고 난 뒤 새로운 조정 방법을 기술하고자 한다.

그림 2는 특허로 공개된 것으로서 높은 줌 배율을 갖는 4군 줌 광학계의 광로도이다. 그림 2(a)와 같은 광학계는 교환렌즈에 적용되며, 모든 렌즈군이 이동한다. 그림 2(b)는 캠코더에 적용되는 광학계로서 1군과 3군은 고정되고, 2군과 4군이 움직이는 광학계이다. 두 광학계 모두 특허에서 곡률, 두께 및 소재 정보 등이 모두 공개되어 있고, 이를 바탕으로 [4]에 언급된 각 렌즈군의 종민감도를 계산한 결과는 표 1과 같다.

표 1의 종민감도는 해당 렌즈군이 단위 길이를 이동했을 때의 상면 이동 변화를 의미한다. 표 1의 값은 길이 단위를 길이 단위로 나눈 값이므로, 단위가 없는 값들이다. 예를 들어 JP2006-284763[7]의 실시예 1에서 1군이 0.1 mm 이동한다면, 광각단에서의 상면은 약 0.0033 mm가 이동하고, 망원단에서는 약 0.3702 mm가 이동한다는 것을 의미한다. 종민감도의 부호는 렌즈의 이동 방향과 상면의 이동 방향이 같음을

의미한다. 또한 각 줌 위치에서 각 렌즈군의 종민감도를 모두 더하면 1이 되는데, 이것은 광학계 전체가 이동하면 광학계의 이동량과 상면의 위치 변화가 같다는 것을 의미한다. 이는 당연한 결과인데, 광학계 전체가 이동하는 것은 그냥 상면이 이동하는 것과 같기 때문이다.

또한 종민감도의 계산 결과로부터 JP2006-284763에서는 변배 시에 2군의 종민감도의 부호가 바뀌지 않으나, KR20140018744에서는 종민감도의 부호가 바뀌는 것을 알 수 있다. 종민감도가 0이 된다는 것은 렌즈군의 이동에 따라 상면의 위치가 보정되지 않는다는 것을 의미한다. 카메라에서 초점 맞춤이라는 것은 물체거리 변화에 따라 변하는 상면 위치를 원래 위치로 다시 보정해서 피사체의 거리에 관계없이 또렷한 영상을 촬영할 수 있는 기능이다. 따라서 종민감도가 0이 되면 피사체의 거리에 따른 상면 위치 변화를 보정할 수 없음을 의미한다. 그러므로 종민감도가 0이 되는 구간이 있는 렌즈군은 초점 맞춤에 사용할 수 없다. 실제 JP2006-284763에서 초점 조절 렌즈군은 2군이고, KR20140018744에서는 초점 조절 렌즈군은 4군이 담당한다.

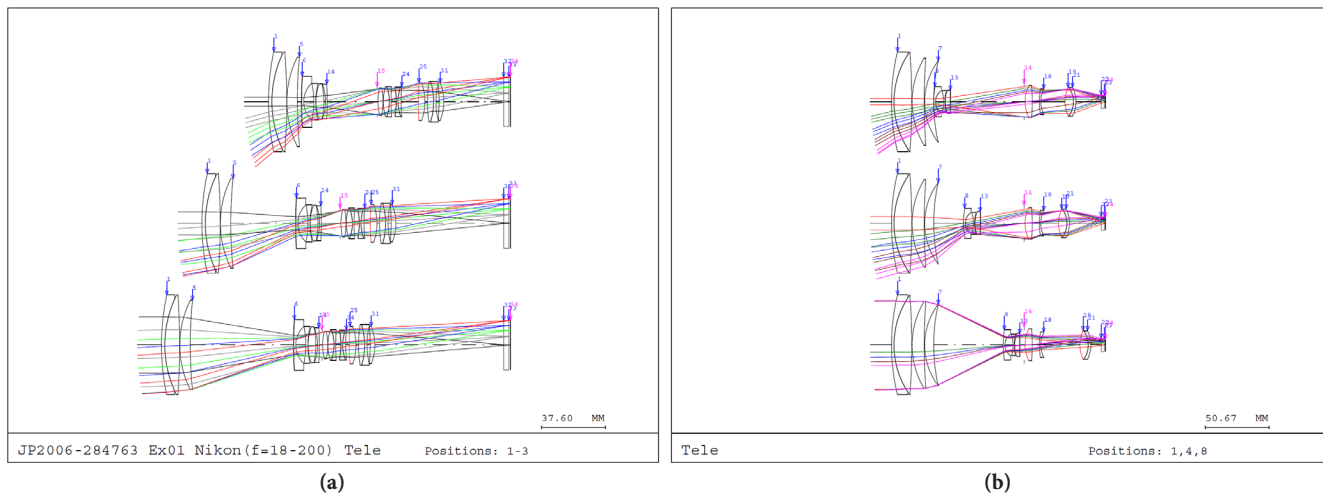


Fig. 2. Optical layout for zoom lens patents. (a) Optical layout of example 1 in [7] and (b) optical layout of example 1 in [8].

Table 1. Longitudinal sensitivity calculation results for the two optical systems used as examples in the patents JP2006-284763 [7] and KR20140018744 [8]

No.	JP2006-284763 Example 1			KR20140018744 Example 3		
	Wide	Normal	Tele	Wide	Normal	Tele
1 <sup>st</sup>	0.03342	0.47311	3.70226	0.00771	0.04392	10.84628
2 <sup>nd</sup>	0.83181	2.98481	1.55737	0.16478	0.28247	-10.8123
3 <sup>rd</sup>	-0.83581	-2.67867	-3.83272	-0.17204	-0.29535	0.19267
4 <sup>th</sup>	0.97058	0.22076	-0.42691	0.99954	0.96896	0.77338

### III. 민감도 계산 및 상면 보정량 계산

제2장에서 본 논문의 예제에 사용된 광학계와 상면 보정의 원리에 대해 설명했다. JP2006-284763에 대해서는<sup>[4]</sup>에서 이미 분석을 했으므로 본 장에서는 KR20140018744의 실시예에 대해서만 분석을 하고자 한다. 표 2는 뉴턴 무늬 수 (fringe) 5개, 두께(thickness) 오차 0.05 mm, 굴절률(index) 오차 0.0005가 변했을 때 상면 변화를 계산한 결과이다.

여기서 RSS는 평균 제곱합(root square sum)이며, 각 공차에 의한 상면 변화의 확률 분포에 대한 표준편차를 의미한다. 따라서 본 논문의 예제에서 상면 변화의 표준편차는 뉴턴 무늬, 두께 및 굴절률 변화에 의해 광각단은 약 0.105 mm, 망원단은 약 1.284 mm가 됨을 의미한다. 즉 상면 변화는 망원단에서 더 산포가 더 넓어진다는 것이며, 이러한 결과는<sup>[4]</sup>에서 분석한 JP2006-284763의 실시 예와 유사하다. 여기서 상면 보정 방식은<sup>[4]</sup>와 동일한 방식이나, 사용되는 이동군만 다르다.

표 2를 잘 살펴보면 2군의 경우 1군과 유사하게 종민감도의 차이가 큰 것을 알 수 있으며, 4군의 경우 변배에 따른 종민감도의 변화가 크지 않을 것을 알 수 있다. 다만 2군을 이동할 경우, 중간단의 특정 구간에서 종민감도가 0이 되어 상면의 위치 변화가 없는 구간이 존재한다. 이렇게 중간단의 특정 위치에서는 4군을 움직여서 보정하면 된다. 특히 중간단에서는 4군 사이의 앞뒤 공간의 여유가 충분한 경우가 많고, 망원

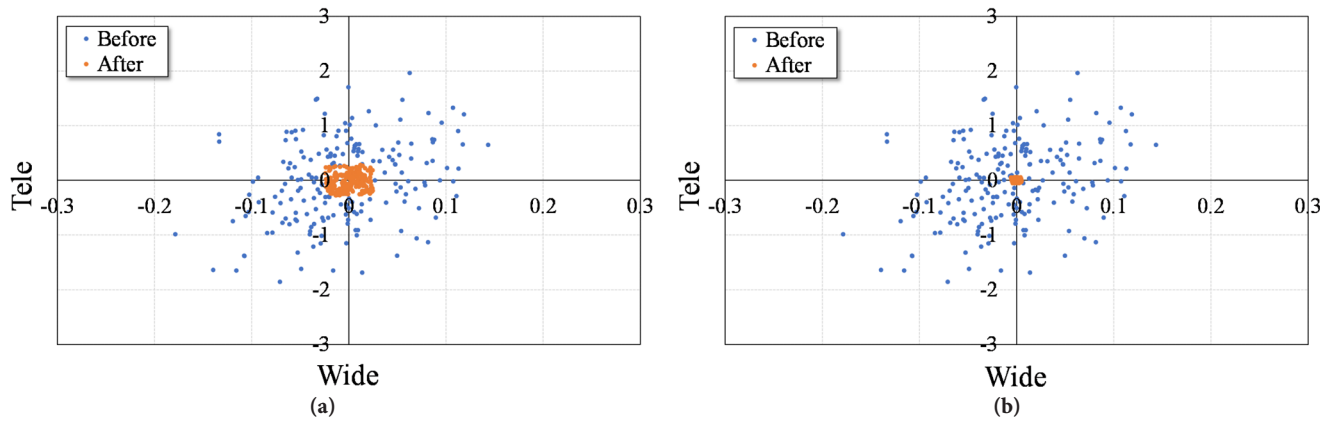
단에 비해 상면의 위치 변화도 크지 않아서 4군만으로도 상면 위치 보정이 충분히 가능하다. 상면 위치 보정을 위한 렌즈군의 이동량을 계산하는 식은<sup>[4]</sup>에 언급되어 있으며, 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{A,W} & p_{B,W} \\ p_{A,T} & p_{B,T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \text{BFL}_W \\ \text{BFL}_T \end{bmatrix} = \frac{1}{p_{A,W} \cdot p_{B,T} - p_{A,T} \cdot p_{B,W}} \begin{bmatrix} p_{B,T} \cdot \text{BFL}_W - p_{B,W} \cdot \text{BFL}_T \\ -p_{A,T} \cdot \text{BFL}_W + p_{A,W} \cdot \text{BFL}_T \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서  $p$ 는 종민감도를 의미하고, back focal length (BFL)는 상면 위치 오차를 의미한다. 첨자 W는 광각단을, T는 망원단을 의미하며, 첨자 A는 첫번째 이동군을 의미하고, 첨자 B는 두번째 이동군을 의미한다. 또한 변수 A는 첫번째 이동군의 보정량을, 변수 B는 두번째 이동군의 보정량을 의미한다. 식 (1)에서  $2 \times 2$  행렬의 행렬식이 0이 되지 않으면, 이동군의 보정량에 대한 해가 반드시 존재하게 된다. 만약 1군과 광학계 전체를 움직이는 경우라면  $p_{B,W}$ 와  $p_{B,T}$ 는 광학계에 관계 없이 항상 1이 된다. 이때 1군의 종민감도인  $p_{A,W}$ 와  $p_{A,T}$ 가 광각단과 망원단에서 값이 같아지지 않는다면 상면 조정은 반드시 가능하다는 것을 알 수 있다. 만약 2군과 4군을 움직이는 경

Table 2. Focus sensitivities of the third example in patent KR20140018744 [8]

Surface No.	Wide			Tele		
	Fringe	Thickness	Index	Fringe	Thickness	Index
1	-0.000076	-0.000037	0.000198	-0.107643	-0.052628	0.276026
2	0.000038	0	-0.000384	0.053914	-0.000613	-0.548781
3	-0.000047	0	-	-0.066063	-0.000512	-
4	-0.000054	-0.000096	-0.000309	-0.076248	-0.135713	-0.439668
5	-0.000049	-0.000115	-	-0.069574	-0.162082	-
6	-0.000056	-0.000389	-0.000254	-0.079266	-0.556591	-0.360838
7	-0.000048	-0.000386	-	-0.067384	-0.551904	-
8	-0.000623	-0.00066	0.001453	-0.034815	-0.390342	0.075524
9	-0.001143	-0.006083	-	-0.058426	-0.001909	-
10	-0.001945	-0.009408	0.002224	-0.048937	-0.026542	0.053517
11	-0.00213	-0.029849	-	-0.050955	-0.181185	-
12	-0.002658	-0.004437	-0.001445	-0.061927	-0.001179	-0.035596
13	-0.003044	-0.00862	-	-0.060045	-0.001697	-
14	-	-0.00862	-	-	-0.001697	-
15	-0.017529	-0.014307	-0.02522	-0.028234	-0.043122	-0.039737
16	-0.015993	-0.04363	-	-0.024465	-0.116057	-
17	-0.01906	-0.04287	0.011717	-0.02554	-0.09566	0.01556
18	-0.020554	-0.000023	-	-0.027146	-0.011341	-
19	-0.010058	-0.012589	-0.026592	-0.003486	-0.022237	-0.00719
20	-0.005731	-0.000622	0.003381	-0.001442	-0.009082	0.001166
21	-0.012553	-0.05	-	-0.002874	-0.05	-
RSS	0.0408258	0.0882638	0.0387478	0.2453583	0.9356526	0.8441399



**Fig. 3.** Comparison of lens group selection for correcting the position of the image plane in Example 1 of KR 20140018744 [7]. (a) Result obtained by moving the first lens group and the total optical system for image plane correction. (b) Result obtained by moving the first lens group and the fourth lens group for image plane correction.

우, 식 (1)의 행렬식을 계산하면 0이 되지 않는다는 것을 알 수 있으며, 이 경우도 역시 상면 조정이 가능하다. 같은 원리로 1군과 4군을 사용하는 것도 가능하며, 이를 확장해서 4개의 군 중에서 2개를 임의로 선택해서 식 (1)의 해가 존재한다면 어떤 렌즈군을 사용해도 상면 보정이 가능함을 알 수 있다.

그림 3은 뉴턴 무늬 수 5개, 두께 오차 0.05 mm, 굴절률 오차 0.0005 내에서 난수 발생되었을 때 광각단과 망원단의 상면 위치 변화를 2차원 좌표 위에 표시한 것이다. 즉 식 (1)의 BFL<sub>1</sub>와 BFL<sub>4</sub>를 계산한 것이 그림 3의 푸른색 점에 해당한다. 표 2와 같은 중민감도를 사용해서 렌즈군들의 이동량 A와 B를 구해서 보정된 최종적인 상면 이동량은 그림 3의 붉은 점과 같다. 그림 3(a)는 1군과 광학계 전체를 이동해서 보정한 상면 위치 변화에 대한 분포이고, 그림 3(b)는 2군과 4군을 이동해서 보정한 상면 위치 변화에 대한 분포이다. 그림 3을 보면 1군과 광학계 전체를 이동해서 상면 보정한 결과가 산포가 더 넓은 것으로 보이는데, 그 이유는 보정 최소량을 0.05 mm로 결정했기 때문이다. 이는 제조 단계에서 1군의 위치와 광학계 전체의 위치를 연속적으로 바꿀 수 없기 때문이다. 그러나 2군과 4군을 이용해서 상면 보정을 하게 되면, 2군과 4군이 스텝핑 모터에 연결되므로 2군과 4군의 최소 이동량이 구동원의 최소 이동량에 의해 결정된다. 카메라에 사용되는 스텝핑 모터의 경우 최소 이동량은 보통 0.05 mm보다 훨씬 작은 값을 갖는 경우가 많고, 기어를 연결해서 감속비를 변경하게 되면 매우 정밀하게 이동시키는 것도 가능하다. 따라서 2군과 4군을 이동해서 상면 보정을 하게 되면, 보정 오차는 거의 0에 가까워질 수 있다. 또한 1군과 광학계 전체를 움직이는 경우에서도 최종적으로는 초점 조절 렌즈군으로 남은 상면 위치 변화를 보정할 수 있기 때문에 사용자 측면에서는 두 결과가 동일함을 알 수 있다.

1군과 광학계 전체를 사용하는 경우, 1군의 이동량과 광학계

전체 이동량의 표준편차는 각각 약 0.075 mm와 0.062 mm이고, 2군과 4군을 사용하는 경우는 2군과 4군의 이동량의 표준편차는 각각 약 0.073 mm와 0.065 mm로 거의 비슷한 값을 갖는다. 만약 상면 위치 보정에 따른 불량을 없애기 위해서는 표준편차의 4.5배만큼의 간격을 확보해야 한다<sup>[9]</sup>. 따라서 1군과 광학계 전체를 사용하는 경우 1군과 2군의 간격은 0.338 mm 이상이 확보되어야 하고, BFL은 0.279 mm 이상을 확보해야 하며, 마찬가지로 2군과 4군을 사용하는 경우는 1군과 2군 사이 및 2군과 3군 사이의 간격은 0.329 mm, 4군에서 상면까지의 거리인 BFL은 0.293 mm를 확보해야 한다. 여기서 2군과 4군을 사용하는 보정 방법은 2군의 앞뒤에 위치한 렌즈군까지의 간격을 확보해야 한다는 점을 주의해야 한다. 이를 통해서 KR20140018744의 실시 예에서 어떤 렌즈군을 사용하더라도 상면 보정은 가능하다는 것을 알 수 있다. 다만, 2군과 4군을 사용해서 상면 보정하는 경우에는 렌즈군 사이의 간격을 더 확보해야 한다.

#### IV. 결 론

줌 렌즈는 교환렌즈 및 소형 디지털 카메라에 주로 사용되는 광학계이다. 교환렌즈 및 소형 디지털 카메라의 시장이 축소되면서 줌 렌즈 또한 적용처가 줄어들 것으로 예상되었으나, 최근 휴대폰의 줌 배율을 높이기 위해 망원 줌 렌즈가 휴대폰에도 적용되기 시작함에 따라 앞으로도 지속적으로 줌 렌즈 관련 제품이 개발될 것으로 예상된다. 기본적으로 모든 광학계는 제작 오차가 발생하므로, 광학계의 상면의 위치가 변하게 된다. 따라서 양산 단계에서 이를 보정해야 한다. 이때 초점 조절 렌즈군으로만 보정하는 것이 가장 간단한 방법이나, 고배율 줌 렌즈 또는 망원 줌 렌즈와 같이 초점거리가 길어지는 광학계에서는 상면 위치 변화도 커져서 초점 조절 렌

즈군의 이동만으로는 상면 위치 변화를 보정할 수 없다. 따라서 이를 위해 2개 이상의 렌즈군을 이동해서 상면의 위치 변화를 보정해야 한다.

휴대폰용 망원 줌 렌즈 및 캠코더 등은 캠을 사용하지 않고 스텝핑 모터를 사용해서 렌즈군을 이동한다. 이러한 광학계에서도 기존의 방법인 1군과 광학계 전체를 이동해서 상면 위치를 보정할 수는 있지만, 휴대폰과 같이 생산 수량이 매우 많아지게 되면 적용하기 어려울 수 있다. 따라서 스텝핑 모터에 연결된 렌즈군을 활용해서 상면 위치 보정을 하는 것이 효율적일 수 있다. 그러나 기존과 같은 1군과 광학계 전체를 이동하는 방식이 무의미하다는 것은 아니며, 캠을 사용하는 교환렌즈와 같은 제품군에는 여전히 유효한 상면 위치 보정 방법이다.

본 연구에서는 스텝핑 모터에 의해 이동하는 렌즈군을 선택해서 기존의 방법과 같은 수준으로 상면 위치 변화를 보정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 다만, 본 논문과 같은 방법으로 상면 위치 보정을 하는 경우 렌즈군 사이의 간격을 조금 더 확보해야 하며, 원하는 대로 임의의 2개의 렌즈군을 선택해도 상면 보정이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

### 재정지원

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역우수과학기술지원사업임(과제번호: NRF-2020R1I1A3052712).

### 이해상충

저자는 본 논문과 관련된 어떠한 이해충돌 사항도 없었음을 밝힌다.

### 데이터 가용성

본 연구의 결과 분석 및 생성된 데이터는 모두 본 논문 내 명시되었으며 공공의 이용이 가능하다. 데이터에 접근하거나 사용하고자 하는 이는 저자에게 타당한 이유를 밝히고 허가를 득해 사용 가능하다.

### References

1. LG Innotek, "LG Innotek reveals the optical telephoto zoom camera module for the first time in CES," (LG Innotek, Published date: 2022), <https://www.lginnotek.com/news/pressView.do?locale=en&idx=6397> (Accessed date: February, 2023).
2. K. Yamaji, "Design of zoom lenses," in *Progress in Optics VI*, Ed. E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1967), Chapter 4.
3. 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 of defect rate to the correction," *Korean J. Opt. Photonics* **17**, 420-429 (2006).
4. 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. Photonics* **22**, 230-238 (2011).
5. J. M. Ryu, Y. S. Kim, J. H. Jo, G. M. Kang, H. J. Lee, and H. K. Lee, "Statistical analysis of focus adjustment method for a floating imaging system with symmetric error factors," *Korean J. Opt. Photonics* **23**, 189-196 (2012).
6. S. C. Park and R. R. Shannon, "Zoom lens design using lens modules," *Opt. Eng.* **35**, 1668-1676 (1996).
7. S. Goji and S. A. Tomoki, "Zoom lens with vibration insulation," Japan Patent 2006-284763A (2005).
8. H. R. Shim, "Zoom lens system and photographing device with same," Korean Patent 20140018744A (2014).
9. W. Mendenhall, R. J. Beaver, and B. M. Beaver, *Introduction to Probability and Statistics*, 12<sup>th</sup> ed. (Thomson, USA, 2006), Chapter 11.