

## Optimal Management of Fabrication and Assembly Tolerance of Optical Systems by Analyzing Its Influence on Zernike Coefficients

Hyunsook Kim<sup>1,2†</sup> and Jin Seung Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Agency for Defense Development, Jochiwongil 462, Yuseong, Daejeon 305-600, Korea

<sup>2</sup>Department of Nano Science and Technology, Graduate School, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

(Received June 24, 2015; Revised manuscript July 30, 2015; Accepted August 3, 2015)

A new method is proposed for optimal management of the fabrication and assembly tolerance of optical systems. The practical utility of the method is shown by applying it to a wide-angle anamorphic IR optical system. In this method the wavefront error of an optical system is expressed in terms of Zernike polynomials, and the sensitivity of the expansion coefficients to the variation of design parameters is analyzed. Based on this sensitivity analysis, the optimal tolerances of the fabrication parameters are determined and the best compensators for the assembly process are selected. By using this method, one can accurately predict with good confidence the best possible performance of a completed optical system in practice.

Keywords: Fabrication and assembling tolerance, Tolerancing, Zernike coefficients, Optical performance

OCIS codes: (220.0220) Optical design and fabrication; (110.0110) Imaging systems; (110.3080) Infrared imaging

## 쩌르니케 계수의 민감도에 바탕을 둔 광부품 제작 및 조립 공차의 최적 관리

김현숙<sup>1,2†</sup> · 김진승<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국방과학연구소

☎ 305-600 대전광역시 유성구 조치원길 462번지

<sup>2</sup>전북대학교 대학원 나노기술학과

☎ 561-756 전북 전주시 덕진구 백제대로 567번지

(2015년 6월 24일 받음, 2015년 7월 30일 수정본 받음, 2015년 8월 3일 게재 확정)

광부품 제작 및 조립 과정을 고려하여 완성된 광학계의 성능을 최적화하는 공차분석 방법을 제안하고 이를 적외선 광각 광학계에 적용하여 그 유용성을 확인하였다. 이 방법은 광학계에서 나오는 파면 오차를쩌르니케 다항식으로 전개하고, 전개 계수인쩌르니케 계수가 광부품 및 조립정렬 변수에 대해 변화하는 정도를 나타내는 민감도를 분석한다. 이 민감도를 바탕으로 광부품 제작 공차를 최적값으로 정하고 최선의 조립정렬 보상자를 고른다. 이 방법은 광부품의 제작 및 조립정렬 공차를 최적값으로 잡고, 또 그러한 공차에 의한 성능저하를 예측하고, 대비하므로 실제로 완성될 광학계의 성능을 최상으로 높일 수 있고, 또 정확하게 예측할 수 있다.

Keywords: 제작 및 조립 공차, 공차분석,쩌르니케 계수, 광학 성능

OCIS codes: (220.0220) Optical design and fabrication; (110.0110) Imaging systems; (110.3080) Infrared imaging

### I. 서 론

광학계를 구성하는 어떤 구성품도 설계에서 마무리된 수치로 제작되지 않는다. 따라서 공차분석은 광설계를 최적화하는 가장 중요한 과정중 하나이다. 공차분석은 광학계를 제작하여 목표로 하는 광학성능을 얻고자 수행하는 일련의 작업

으로 크게 광부품에 대한 제작공차 할당, 조립정렬 보상자 선정 및 제작 후 광학성능 예측 등의 일을 수행한다. 따라서 공차분석에는 많은 매개변수가 서로 연관되어 영향을 주고 받으며 그 과정은 매우 복잡하고 셈 품이 많이 든다.

초기 공차분석은 밝기분포나 스트렐 비(Strehl ratio)를 성능의 목표값으로 설정한 성능지수(figure of merit) 함수를 구성

<sup>†</sup>E-mail: [khsryu@add.re.kr](mailto:khsryu@add.re.kr)

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

하는 수차계수의 변화를 분석하거나, 레일리의 사반파장 규칙 또는 광학전달함수(OTF)를 판단하는 등 광학 설계자의 절대적인 경험과 직관적 요소에 의해 대부분 이루어졌다.<sup>[1]</sup> 그러나 홉킨스등이 섭동법을 제안하고<sup>[2-3]</sup> 대량 계산을 컴퓨터로 할 수 있게 되자, 공차분석은 광학계의 설계변수를 조금씩 바꾸면서 성능의 변화를 정량적으로 관찰하고 그 결과를 이용하여 공차할당 및 조정자 분석에 이용하려는 방향으로 연구가 진행되어왔다.

최근에는 섭동방법을 이용한 분석 방법을 더욱 발전시켜 성능지수에 대한 1계, 2계 도함수를 써서 정렬과 공차 사이의 관계를 최적화하거나<sup>[4]</sup>, 선형 주요성분분석(PCA) 특성을 이용하여 공차의 정중도에 영향을 주는 주요 구성품을 찾아내는 연구들<sup>[5]</sup> 진행하고 있다. 또한 수차 계수에 대한 민감도 분석을 이용하여 공차분석에 이용하는 연구도<sup>[6]</sup> 발표되었다. 그러나 이와 같은 접근 방법들은 미분이나 행렬 등 비교적 까다로운 수학적 방법을 써야 하며, 분석결과에서 광학계의 공차할당과 보상자 선정을 직관적으로 판단하기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 상용 광학설계 도구를 써서 광학계의 제작을 효율적이고 직관적으로 수행하는데 도움이 되는 공차분석 방안을 제시한다. 이 방안은 제르니케(Zernike) 계수에<sup>[7]</sup> 대한 민감도를 분석하고, 그 결과를 써서 광부품의 제작공차 설정, 조립정렬의 보상자 선정, 초기 조립정렬 오차보상 및 광축정렬 후 성능예측 등을 정량적으로 수행하는 것이다. 이렇게 광학계 제작 과정 전체를 체계적으로 분석하면 실제로 완성된 광학계의 성능을 최적화할 수 있고 비교적 정확히 예측할 수 있다.

## II. 배 경

### 2.1. 제안하는 방안의 특징

모든 광학계에 보편적으로 쓸 수 있는 최선의 공차분석 방법으로 공인된 것은 아직 없으므로, 설계자마다 고유의 방식을 쓴다.<sup>[1]</sup> 그렇지만 공차분석 과정은 일반적으로 다음과 같이 정리할 수 있다. 광설계에 대한 공차 할당, 민감도 분석을 통한 공차 재할당, 성능저하를 완화하기 위한 보상자 선정, 몬테카를로 기법에 의한 제작 후 성능 예측<sup>[8-10]</sup> 및 공차 검증이다.

공차분석을 할 때는 대개 상용 광학설계 소프트웨어에서 제공하는 공차분석 기능을 그냥 쓴다. 이 방법은 일반 광학계에서는 별 문제가 없지만, 광학계가 제작이나 조립정렬 오차에 매우 민감하거나 공간 제약 때문에 최적 보상자 선정이나 정확한 성능예측이 필요할 때는 최선의 결과를 얻기 어렵다. 즉, 광부품의 제작공차를 정할 때 광부품 제작 용이성 및 수차유발 정도를 정량적으로 서로 비교·판단할 수 있는 기준의 설정, 보상자의 필요 이동범위 및 구현 정확도에 대한 산출기준 마련, 보상자 후보들의 다양한 조합을 통한 광학계의 정확한 성능예측 등 최선의 결과를 얻는데 필요한 공차분석 자료가 상용 광설계 소프트웨어에서 제공하는 기

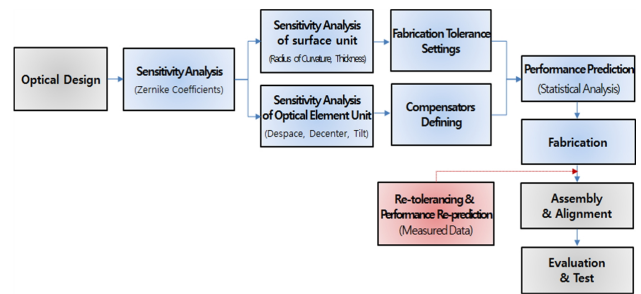


FIG. 1. Proposed tolerancing process.

능만을 이용할 경우 부족하거나 얻기 어렵다. 따라서 이 연구에서는 이러한 어려움을 개선하고자 Fig. 1과 같은 수행과정으로 진행되는 광학계의 제작, 조립정렬 및 성능예측을 위한 공차분석 방안을 제안한다.

이 방안에서는 제르니케 계수의 민감도를 분석하여 공차 및 성능을 예측한다. 즉, 낱알의 광부품이나 광기구의 제작 또는 조립정렬에서 생기는 오차가 파면 오차를 만들어내는 정도를 제르니케 계수의 변화를 통해 분석함으로써, 각 오차에 의한 광학계의 성능저하를 정량적으로 파악한다. 따라서 이 방안을 쓰면 광학계의 각 제작 과정에 대한 분석 및 판단을 정량적이고 직관적으로 수행할 수 있다. 또한 이와 같은 민감도 분석 결과는 ‘컴퓨터 보조 정렬(Computer-Aided Alignment: CAA)’과 같은 광학 정렬 기법을 쓸 때<sup>[11]</sup> 민감도 테이블로도 활용될 수 있다.

제르니케 계수의 민감도 분석은 크게 면 단위와 광부품 단위로 나누어 하며, 이 결과를 바탕으로 광부품의 제작공차를 정하고 조립정렬 오차 보상을 위한 보상자를 고른다. 이후 광학계를 조립정렬하여 완성했을 때의 성능을 예측한다. 예측한 성능이 목표값에 맞으면 분석결과를 토대로 광부품을 만들어 조립정렬을 진행한다.

똑같은 광학계를 여러 대 만들 경우에는 그림에서 보는바와 같이 광부품의 제작 결과를 반영하여 앞서 수행한 보상자 선정 및 성능예측 과정을 다시 수행할 수 있다. 이처럼 제작 오차를 반영하여 재분석하면 성능구현이 까다로운 광학계에 대해 최적의 조립정렬 보상자를 고를 수 있고 완성된 광학계의 성능을 더 정확하게 예측할 수 있다. 또한, 조립정렬 보상자에 대한 이동량을 좀 더 정확하게 산출하여 불필요한 여유를 줄일 수 있다.

### 2.2. 제르니케 계수의 민감도 분석

광학계의 민감도 분석은 광부품의 제작이나 조립정렬로 생긴 오차가 광학계 성능에 얼마나 영향을 주는지를 보는 것이다. 광학계 성능을 판단하는 지표로는 변조전달함수(MTF)나 파면오차를 주로 쓴다. 변조전달함수는 광학계의 최종 성능을 규정하는 지표로는 널리 쓰이지만 비선형성이 커서 민감도 분석에는 쓰기 어렵다. 파면오차는 제르니케 다항식으로 나타낼 수 있고<sup>[7,11-14]</sup> 각 항의 계수는 광학 설계 변수의 미소 변화에 비례한다. 따라서 제르니케 계수의 선형 변화의 기율

기, 즉 다항식의 각 항의 민감도를 알면 다른 값의 오차에 대해서도 제르니케 계수의 변화값을 알게 되어 결국 광학계의 파면오차 값을 알게 되므로 광학계 성능을 판단할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 파면오차를 나타내는 제르니케 다항식을 써서 민감도를 분석한다.

광학계의 파면오차를 제르니케 다항식으로 나타낸 식은 다음과 같다.

$$W(\rho, \theta) = C_1 Z_1(\rho, \theta) + C_2 Z_2(\rho, \theta) + \dots = \sum_{i=1}^N C_i Z_i(\rho, \theta) \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 극좌표계의 반지름을 좌표로서 출사동의 반지름을 1로 잡아 규격화한 것( $0 \leq \rho \leq 1$ )이고,  $Z_i$ 는 제르니케 원형 다항식의  $i$ 번째 바탕함수로서  $\{Z_i\}$ 는 완비된 정규 직교계를 이룬다.  $C_i$ 는  $i$ 번째 제르니케 계수이다. 따라서 광학계의 파면 오차에 대한 분산  $\sigma_w^2$ 은 제르니케 계수를 써서 나타내면 다음과 같다.<sup>[13,14]</sup>

$$\sigma_w^2 = \sum_{i=2}^N C_i^2 \quad (2)$$

광부품의 오차를 나타내는 미소변위( $\Delta D_j$ )에 대한 제르니케 계수의 변화( $\Delta C_i$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta C_i = \sum_j \frac{\partial C_i}{\partial D_j} \Delta D_j = \sum_j S_{ij} \Delta D_j \quad (3)$$

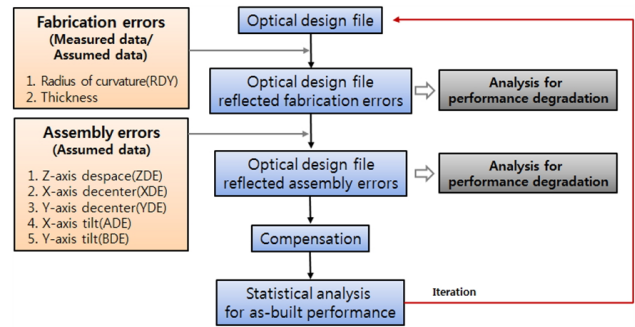
여기서  $S_{ij}$ 는 민감도이다. 따라서 제르니케 계수로 표현된 광학계의 민감도 정보인  $S_{ij}$ 와 광부품의 제작 오차 및 조립정렬 오차인  $\Delta D_j$ 를 알면 광학계의 파면오차를 분석할 수 있다.

### 2.3. 민감도 분석 방안

본 연구에서는 광학설계 도구인 CODE V를 써서 민감도를 분석하며, 이 때 쓴 오차는 총 다섯 가지로 면 단위 민감도 분석에서는 곡률반경 오차와 두께 오차를, 광부품 단위

**TABLE 1.** Coefficients of Zernike circle polynomial used for sensitivity analysis

Terms	Zernike circle polynomial	Remarks
C4	$\sqrt{6} \rho^2 \cos(2\theta)$	Astigmatism with axis at 0° or 90°
C5	$\sqrt{3} (2\rho^2 - 1)$	Defocus
C6	$\sqrt{6} \rho^2 \sin(2\theta)$	Astigmatism with axis at ±45°
C8	$\sqrt{8} (3\rho^3 - 2\rho) \cos(\theta)$	Third-order coma along y axis
C9	$\sqrt{8} (3\rho^3 - 2\rho) \sin(\theta)$	Third-order coma along x axis
C13	$\sqrt{5} (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Third-order spherical aberration



**FIG. 3.** Procedure for performance prediction.

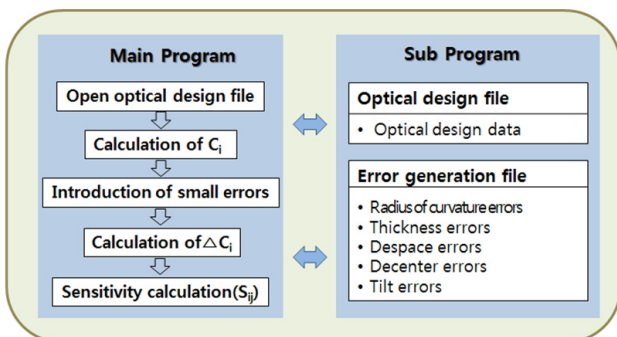
분석에서는 광축방향 변위 오차인 간격 오차와 비축방향 변위 오차인 중심이동 오차와 기울기 오차를 분석한다. Figure 2는 이와 같은 다섯 가지 오차에 대해 본 방안에서 제안한 민감도 수행과정을 보여준다.

민감도 분석에 쓴 제르니케 계수는 총 여섯 가지로 Table 1과 같다. 광축방향 변위인 곡률반경, 두께 및 간격 오차는 주로 초점이동(defocus:  $C_5$ )과 구면수차(spherical aberration:  $C_{13}$ )를 유발하며, 중심이동과 기울기 오차는 주로 비점수차(astigmatism:  $C_4, C_6$ )와 코마(coma:  $C_8, C_9$ ) 수차를 유발한다.

### 2.4. 성능예측 방안

광학계의 성능예측은 몬테카를로 시뮬레이션을 써서 통계적으로 한다. 앞서 말한 다섯 가지 오차는 조합되는 방식에 따라 광학계의 성능이 달라지는 양상이 다르다. 따라서 성능예측을 신뢰성 있게 하려면 갖가지 조합에 대한 확률적 접근이 필요하다.

본 연구에서는 CODE V의 매크로 기능을 써서<sup>[15]</sup> 다섯 가지 오차의 조합을 갖가지로 만들고 조립정렬 후의 성능을 통계적 방법으로 예측한다. 광부품의 제작오차는 공차 범위 내에서 난수를 만들어 쓰거나 직접 잴 값을 쓴다. 기구물 제작 및 렌즈 점착으로 생기는 오차인 광부품의 간격 오차, 중심이동 오차 및 기울기 오차는 공차 범위 내에서 난수를 만들



**FIG. 2.** Procedure for sensitivity analysis.

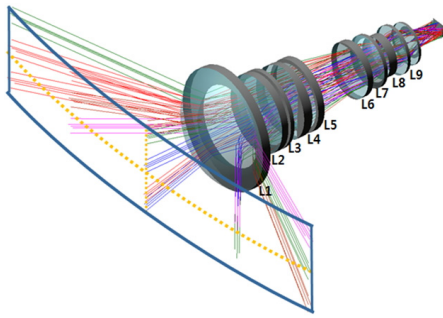


FIG. 4. IR Optics layout.

TABLE 2. Specifications of IR optics

Operating wavelength range	3.7 $\mu\text{m}$ ~ 4.8 $\mu\text{m}$
F/number	F/1.5
Effective focal length	Horizontal : 4.07 mm, Vertical : 12.15 mm
Field of view	Horizontal : 100°, Vertical : 26°
Anamorphic ratio	3:1

어 쓴다.<sup>[8-10]</sup> 이후 민감도 분석결과로 선정된 조립정렬 조정자를 적절히 이동하여 초기 조립정렬 오차를 보상할 때의 광학성능과 이동량을 분석한다. 본 연구에서는 1000회 이상 반복하여 통계처리 했다. Figure 3은 이와 같은 성능예측 시뮬레이션 과정을 보여준다.

### III. 적용 및 분석

#### 3.1. 대상 광학계

본 논문에서는 제안한 방안을 적외선 광각 광학계에 써서 그 실용성 및 유용성을 검증하였다. 이 광학계의 얼개는 Fig. 4와 같이 3군 9매의 렌즈로 구성되며, 가운데에 원통 렌즈(L4)와 토릭 렌즈(L6) 등 ‘비정형(anamorphic)’ 렌즈가 있어 시계가 비대칭이다. Table 2는 광학계 제원이다.

이 광학계는 비정형 렌즈 때문에 제작이 까다롭고 정확한 광축정렬이 요구된다. 또한 시스템으로부터의 공간 활용에 대한 제약이 있어 초점이동, 중심이동 및 기울기에 대한 조립정렬 보상자의 선택 및 조정범위에 대한 제한도 까다롭다.

TABLE 3. Simulated errors applied to the sensitivity analysis (@ Code V)

Errors	Introduced error range	Input parameter at Code V	Zernike coefficients related with errors
Radius of curvature	R*/1000	RDY	C5, C13
Thickness	0.1 mm	THI	C5, C13
Despace	0.1 mm	ZDE	C5, C13
Decenter	0.1 mm	XDE/YDE	C4, C6, C8, C9
Tilt	1 mrad	ADE/BDE	C4, C6, C8, C9

\*R : Radius of curvature

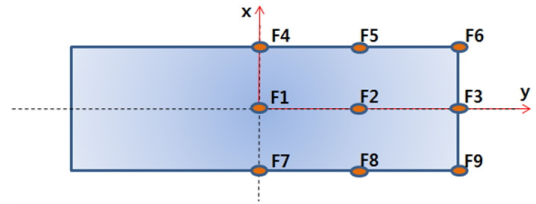


FIG. 5. Field positions for sensitivity analysis.

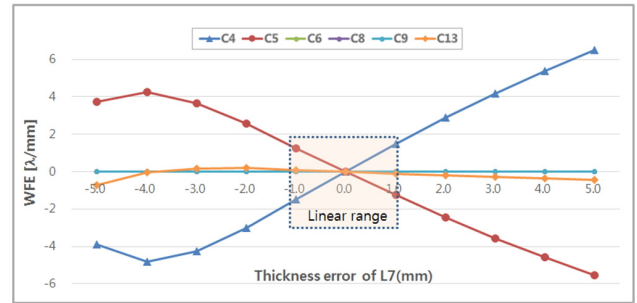


FIG. 6. Variations of Zernike coefficients due to errors (@ thickness error of L7).

#### 3.2. 적외선 광각 광학계의 민감도 분석

적외선 광각 광학계의 민감도는 Fig. 5와 같은 광학계의 시야에서 9곳을 잡아 분석한다.

##### 3.2.1. 미소변위 선형성 분석

제르니케 계수는 미소변위가 어떤 구간 안에 있을 때만 선형성이 유지되며, 그 때의 비례계수가 민감도이다. 따라서 제르니케 계수의 변화가 선형인 구간을 확인하고 그 범위 안에서 민감도 분석을 수행해야한다. 분석에는 CODE V에서 제공하는 변위 변수 RDY, ZDE, XDE, YDE, ADE, BDE를 써서 이들 양을 조금씩 바꿔가며 제르니케 계수의 변화량이 비례하는 범위를 확인한다.

Figure 6은 L7 렌즈의 두께 오차에 대한 분석 결과이다. 그림과 같이 L7 렌즈의 두께 오차가 설계 값에서  $\pm 1.0$  mm 범위 안에 있을 때는 제르니케 계수도 비례하여 증가한다. 그러나 이 범위를 벗어나면 점차 선형성에서 벗어나며 두께 오차가  $\pm 2.0$ mm를 넘으면 비선형성이 급격히 커진다. 따라서 민감도 분석에서는 미소변위의 범위를  $\pm 1.0$  mm 이내로 잡고, 민감도 분석 결과로 활용하는 L7 렌즈의 두께 제작공차

도 이 범위 안에 있어야 의미가 있다. Table 3은 제르니케 계수 변화에 대한 선형성을 검증하여 민감도 분석에 적용한 미소변위 발생 범위를 보여준다.

### 3.2.2. 면 단위 분석

면 단위 분석에서는 곡률반경 오차와 렌즈 두께 오차에 대한 민감도를 다룬다. 각 면의 기울기 오차도 광학 성능에 영향을 주지만 적외선 광학계는 조립정렬의 특성상 렌즈 단위의 중심이동과 기울기 오차가 성능에 주는 영향이 제작 오차보다 훨씬 크므로 면 단위 민감도 분석에서는 뺀다.

Figure 7과 8은 중심시야인 F1에서의 면 단위 민감도 분석 결과이다: 광학계의 결상을 맡은 L7 렌즈와 L9 렌즈가 곡률반경 오차에 매우 민감하다. 특히 L7 렌즈는 곡률반경의 1%

오차 당 생기는 파면오차가 5λ를 넘으므로 제작 공차의 통상적인 값<sup>[16-18]</sup> 보다 엄격하게 3/10000 정도로 잡는다. 렌즈 두께에 대한 분석에서도 L7 렌즈의 민감도가 다른 렌즈 보

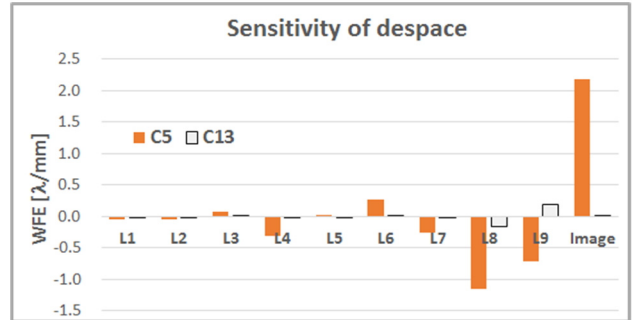
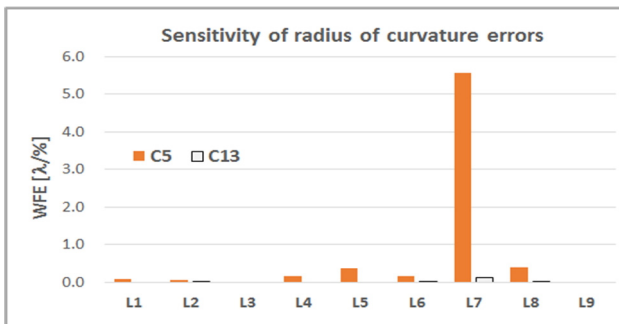
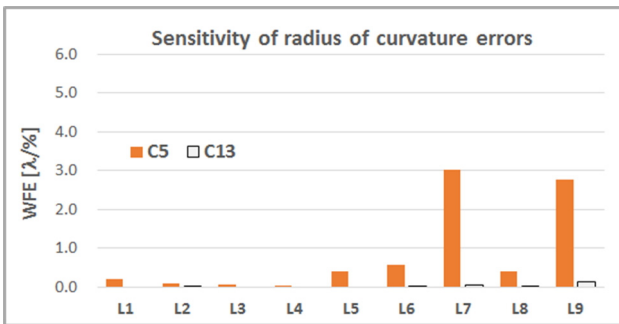


FIG. 9. Results of the sensitivity analysis for the despace error (@ F1).



(a)



(b)

FIG. 7. Results of the sensitivity analysis for the radius of curvature error (@ F1). (a) Front surface, (b) Back surface.

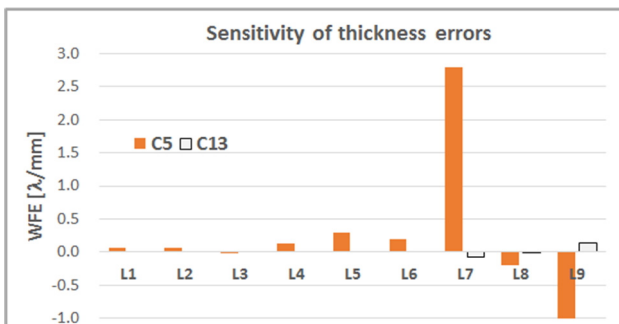
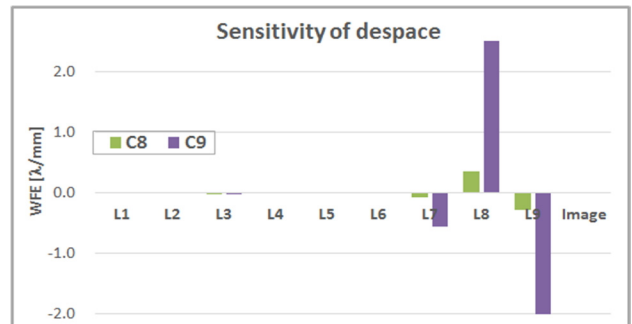
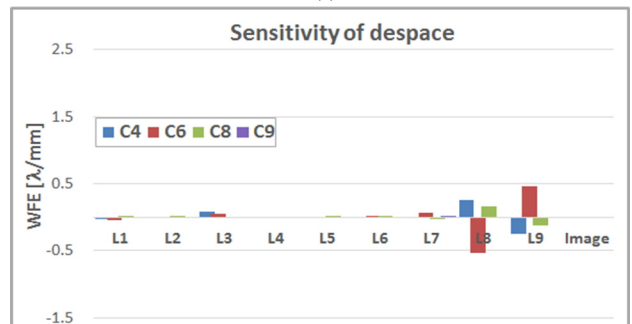


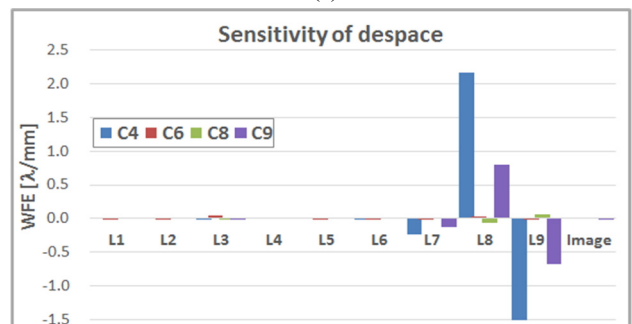
FIG. 8. Results of the sensitivity analysis for the thickness error (@ F1).



(a)



(b)



(c)

FIG. 10. Results of the sensitivity analysis for the decenter error. (a) F1 field(XDE, YDE), (b) F6 field(XDE), (c) F6 field(YDE).



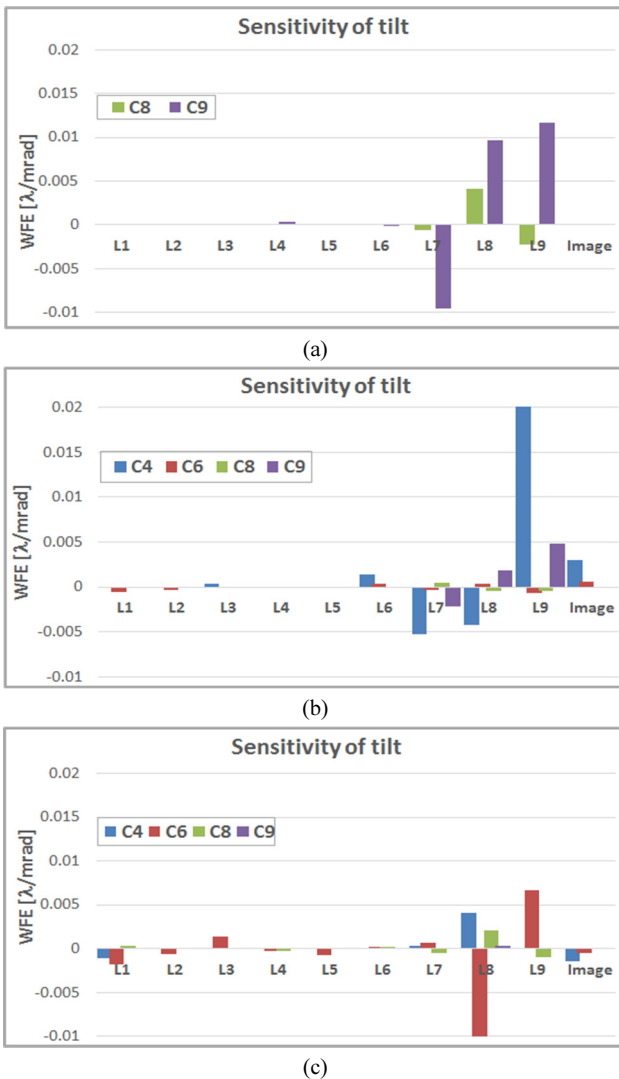


FIG. 11. Results of the sensitivity analysis for the tilt error. (a) F1 field(ADE/BDE), (b) F6 field(ADE), (c) F6 field(BDE).

다 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 L7 렌즈의 두께 공차도 다소 엄격하게 0.015 mm 이하로 잡는다. 이외에 L9 렌즈에 대한 제작 공차도 관리해야하며 나머지 렌즈들은 일반적인 제작공차를 적용해도 된다.

### 3.2.3. 광부품 단위 분석

광부품 단위 분석에서는 광축방향과 비축방향 변위에 대한 민감도를 분석하였으며 대표적 시야인 F1과 F9에서 Fig. 9, 10, 11의 결과를 얻었다. 중심 시야인 F1에서 광축방향 변위인 렌즈 간격 오차에 대한 민감도는 검출기의 위치 오차에

대한 것이 가장 크고, 렌즈들 중에는 L8 렌즈가 상대적으로 크다. 따라서 이 광학계에서는 L8 렌즈와 검출기의 위치를 정확하게 유지해야 광학계의 성능이 제대로 나오고 광축방향 제작 오차의 보상자로도 적합할 것이다.

비축방향 변위에 대한 분석에서는 L8 렌즈와 L9 렌즈가 중심 시야(F1)나 가장자리 시야(F6) 모두에서 중심이동 오차에 대해서 민감한 것으로 나타났다. 특히 L8렌즈는 가장자리 시야(F6)에서 y-쪽으로  $2.2\lambda/mm$  정도로 비점수차(C<sub>4</sub>)가 변한다. 코마수차(C<sub>9</sub>)에 대한 민감도도  $0.8\lambda/mm$ 나 함께 나타나 광학계의 비축방향 제작 오차 보상자로 적합하다. L9 렌즈의 민감도도 비슷한 정도로 나왔으나 검출기와 가까이 있어 광기구적으로 구현하기에는 공간이 좁다. 기울기 오차에 대한 민감도 분석에서는 L7, L8, L9 렌즈가 다른 렌즈들보다 조금 더 민감하지만 이들 렌즈에 대한 기울기 공차를 1.0 mrad의 범위 안에 두면 보상자를 따로 두지 않아도 성능을 낼 것이다.

### 3.3. 성능예측

민감도 분석 결과를 바탕으로 골라낸 보상자를 써서 제작 오차로 생긴 광학성능 저하를 보상한 뒤의 광학계 성능을 예측하였다. 광축방향 오차 보상자는 보상자 후보인 L8 렌즈와 검출기 중 검출기를 골랐다. 검출기를 고른 이유는 광축방향 오차에 대한 민감도가 L8 렌즈 보다 더 크며, L8 렌즈가 비축방향 오차 보상자로 선정된 점을 고려하여 광기구적 구현 및 수행의 편리성을 고려한 결과이다. 기울기 오차에 대해서는 공간 제약을 고려하여 별도의 조정자 없이 공차를 관리하였다.

성능예측은 앞서 제시한 Fig. 3의 과정을 따라 수행했다. 특별히 광부품의 제작오차는 실제로 만든 부품을 재어 얻은 값을 썼고, 확정할 수 없는 조립정렬 오차들은 광기구 제작 및 렌즈 접착 시 생길 수 있는 공차 범위 내에서 1000회 이상 조합을 만들어 확률적 결과<sup>[8-10]</sup>를 냈다. 아래 표는 성능예측에 쓴 오차 범위를 보여준다. 고정 값으로 적용된 곡률반경 오차 범위는 설계 값의  $\pm 1/1000 \sim 2/10000$ 이며 두께 오차 범위는  $\pm 0.01 \text{ mm} \sim 0.02 \text{ mm}$ 이다. 또한 변화하는 값으로 적용된 간격, 중심이동 및 기울기 오차는 기계적 가공 공차인 0.01 mm와 접착 공차인 5분을 기준으로 난수를 만들어 썼다.

설계한 광학계의 주 기능은 점표적을 탐지하는 것이므로, 성능 평가 기준은 점퍼짐 함수(PSF)의 에너지의 50%가 든 원의 지름(encircled energy diameter) 값으로 잡았다.

Figure 12는 표적 에너지의 50%가 든 지름 분포를 발생횟수에 대해서 보여준다. 지름이 0.01 mm 이하일 확률은 95.6%, 0.025 mm 이하일 확률은 99.9%이다. Figure 13은 조립정렬

TABLE 4. Range of errors for the performance prediction simulation

Variables	Radius of curvature	Thickness	Mechanical fabrication	Tilt
Error range	$\pm(1/1000\sim 2/10000)$	$\pm 0.01 \sim 0.02 \text{ mm}$	$\leq 0.01 \text{ mm}$	$\leq 5\text{min.}$
Remarks	Fixed	Fixed	Random	Random

TABLE 5. Statistical data of the compensators obtained from performance prediction (@ within 50% of encircled energy)

	Unit	Average	Standard deviation $\sigma$	Average-2 $\sigma$	Average+2 $\sigma$
L8 (XDE)	mm	0.001	0.018	-0.035	0.037
L8 (YDE)	mm	0.003	0.017	-0.031	0.037
Image(ZDE)	mm	0.001	0.004	-0.008	0.010

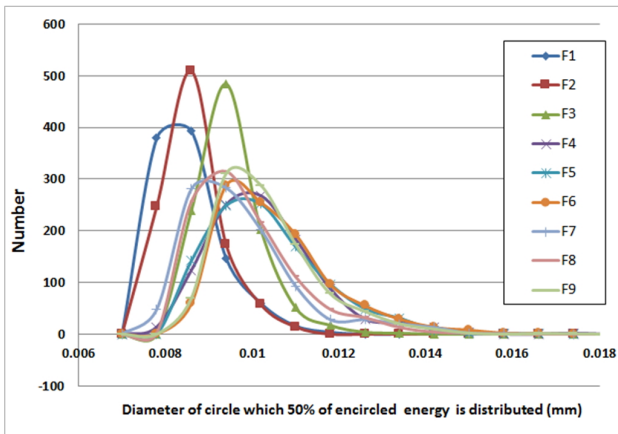


FIG. 12. Result of the performance prediction simulation(@ within 50% of encircled energy).

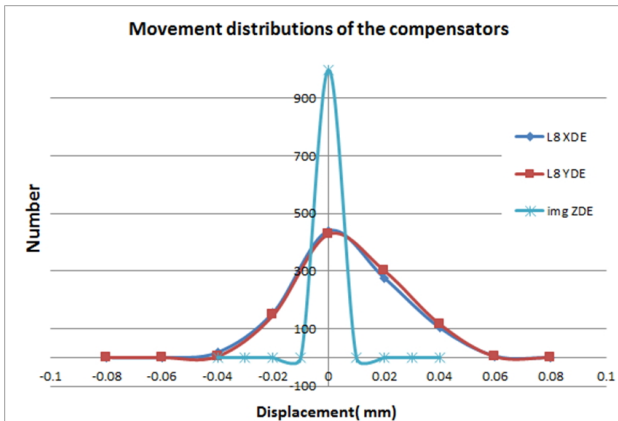


FIG. 13. Movement distributions of the compensators obtained from performance prediction (@ within 50% of encircled energy)

보상자의 이동량 분포 그래프이다. 1000회의 다양한 오차 조합에 대해서 95% 이상의 확률로 L8 렌즈의 조정범위가  $\pm 0.04$  mm 이하이다. 또한 분석 결과를 보면 예상과 달리 검출기의 광축방향 조정은 필요하지 않다. Table 5는 최종적인 조립정렬 보상자의 이동량에 대한 통계적 수치이다. 평균-2 $\sigma$  부터 평균+2 $\sigma$  까지 값은 정규분포에서 95%의 확률분포에 해당한다.

결론적으로 성능예측 시뮬레이션 결과로부터 적외선 광각 광학계의 조립정렬 보상자로는 L8 렌즈의 중심이동 만으로도 요구 성능을 낼 수 있으며 나머지 오차에 대한 성능저하는 적절한 공차관리 만으로도 충분하다. 또한 검출기에 대한

광축방향 이동은 크게 필요치 않다. 이는 L8렌즈가 비축방향으로 이동할 때 초점이동 수차( $C_3$ )에 대한 민감도도 x-축에 대해서  $0.5 \lambda/\text{mm}$ , y-축에 대해서  $1.7 \lambda/\text{mm}$ 가 있어 동시에 보상하는 것으로 파악되었다.

#### IV. 결 론

광학계의 제작 성능을 최적화하는 공차분석 방법을 제안하고 이를 적외선 광각 광학계에 적용하여 그 실용성 및 유용성을 확인하였다. 제안한 방법은 설계 변수에 대한 페르니케 계수의 민감도를 분석하여 광부품의 제작공차를 민감도에 맞춰 조절하고 조립정렬을 위한 보상자도 그 효과에 따라 선정하여, 제작 및 조립정렬에서 생기는 성능저하를 최소로 줄인다. 이 과정에서 공차 설정 및 보상자 선정을 정량적으로 할 수 있으므로 제작과정을 체계적으로 관리하여 실제로 완성될 광학계의 성능을 설계값에 가깝게 유지할 수 있고, 또 정확하게 예측할 수 있다.

#### References

1. R. N. Youngworth, "Twenty-first century optical tolerancing: A look at the past and improvements for the future," in *Proc. IOOC* (Vancouver, Canada, June 4 2006), Paper# MB3.
2. H. H. Hopkins, "A theoretical and experimental study of lens centering errors and their influence on optical image quality," *Brit. J. Appl. Phys.* **17**, 33-54 (1966).
3. M. Rimmer, "Analysis of perturbed lens systems," *Appl. Opt.* **9**, 533-537 (1970).
4. C. Olson and R. N. Youngworth, "Alignment analysis of optical systems using derivative information," *Proc. SPIE* **7068**, 70680A-1~70680A-10 (2008).
5. P. Jain, "Optical tolerancing and principal component analysis," *Appl. Opt.* **54**, 1439-1442 (2015).
6. E. Hermann and J. Sasian, "Aberration considerations in lens tolerancing," *Appl. Opt.* **53**, 341-346 (2015).
7. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 7<sup>th</sup> ed. (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999), Chapter 9.
8. D. Heshmaty-Manesh and G. Y. Haig, "Lens tolerancing by desk-top computer," *Appl. Opt.* **25**, 1268-1270 (1986).
9. D. E. Oinen and N. W. Billow, "A new approach to the simulation of optical manufacturing processes," *Proc. SPIE* **1354**, 487-493 (1990).
10. D. Forse, "Statistical tolerancing for optics," *Proc. SPIE*

- 2775, 18-27 (1996).
11. E. D. Kim, Y.-W. Choi, M.-S. Kang, E.-E. Kim, and H.-S. Yang, "Optical alignment of a high-resolution optical earth observation camera for small satellites," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **15**, 391-396 (2004).
  12. R. J. Noll, "Zernike polynomials and atmospheric turbulence," *J. Opt. Soc. Am.* **66**, 207-211 (1976).
  13. V. N. Mahajan, "Zernike circle polynomials and optical aberrations of systems with circular pupils," *Suppl. Appl. Opt.* **33**, 8121-8124 (1994).
  14. Y. Kim, H.-S. Yang, J.-B. Song, S.-W. Kim, and Y.-W. Lee, "Modeling alignment experiment errors for improved computer-aided alignment," *J. Opt. Soc. Korea* **17**, 525-532 (2013).
  15. "Code V reference manual," Optical Research Associates (2014), vol. 3.
  16. R. E. Fischer, B. Tadic-Galeb, and P. R. Yoder, *Optical System Design*, 2<sup>nd</sup> ed. (McGraw-Hill, New York, USA, 2008), Chapter 16.
  17. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, 4<sup>th</sup> ed. (McGraw-Hill, New York, USA, 2008), Chapter 20.
  18. E. Herman, R. N. Youngworth, and J. Sasian, "Efficient assessment of lens manufacturability in optical design," in *Proc. IODC* (Kohala Coast, Hawaii, United States, June 2014), Paper# IM4A.4.