

편심측정 결과가 반영된 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 적외선 광학계 조립정렬 공차 할당 기법

유재은[†]

국방과학연구소

Ⓣ 305-600 대전광역시 유성구 조치원길 462번지

(2011년 4월 28일 받음, 2011년 6월 9일 수정본 받음, 2011년 6월 20일 게재 확정)

본 논문에서는 광학 민감도가 큰 IR 광학계의 조립정렬과정에서 목표 성능을 만족시키기 위한 조립정렬 허용범위를 설정하는 방법을 제시하였다. 조립정렬 과정에서 편심측정기를 이용하여 각각의 광학소자에 대한 반사 편심량을 측정할 수 있다. 측정된 값을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였고 이를 이용하여 조립 정렬 이후의 광학계의 성능을 예측하였다. 시뮬레이션 결과와 실제 제작된 광학계의 광학 성능을 비교하여 본 논문에서 제시한 공차 할당 기법의 타당성을 확인하였다.

Tolerance Allocation Method for IR Optics Fabrication Using Monte-Carlo Simulation Based on Measured Reflective Eccentricity

Jaeun Yoo[†]

Agency for Defense Development, Jochiwongil 462, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea

(Received April 28, 2011; Revised manuscript June 9, 2011; Accepted June 20, 2011)

In this paper, a tolerance allocation method using Monte-Carlo simulation with measured reflective eccentricity for high-sensitive IR optics is proposed. During optics fabrication and alignment, reflective eccentricity was measured using an optical centration measurement instrument. A Monte-Carlo simulation was performed using measured eccentricity data, and it gives statistical estimated performance of the optics after fabrication. The validity of the proposed tolerance allocation method was verified comparing the estimated MTF result with the measured MTF result of the fabricated optics.

Keywords: IR optics, Monte-Carlo simulation, Optics fabrication, Reflective eccentricity, Tolerance allocation

OCIS codes: (110.3080) Infrared imaging; (220.0220) Optical design and fabrication; (280.4788) Optical sensing and sensors; (030.6600) Statistical optics

I. 서 론

항공용 카메라와 같은 좁은 공간에 장착되는 고해상도 광학계^[1]는 광학소자의 조립 정렬 오차에 대한 민감도가 크다. 또한 무게 및 구조적인 한계로 초기 조립 정렬과정에서 발생 되는 오차를 보상할 수 있는 보상 메커니즘을 구현할 수 없는 경우도 있으므로 광학계 제작 조립 공차의 설정은 매우 중요하다.

광학계의 민감도를 이용하여 제작 조립 과정에서 발생할 수 있는 성능 저하를 예측하는 분석 방법은 렌즈들의 상대적

인 기울기와 같은 서로 독립적이지 않은 광학 오차에 대한 조립 성능 예측은 어렵다. 이와 같이 서로 독립적이지 않은 광학 오차 성분에 의한 영향을 포함한 조립 정렬 성능 예측을 하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

본 논문에서는 일반적인 몬테카를로 시뮬레이션과 달리 실제 광학계의 조립 정렬 과정에서 측정된 반사 편심값을 이용하여 목표성능을 만족하기 위한 조립 정렬 공차를 제시하였다. 또한 실제 조립된 3개의 광학계의 편심측정값을 이용한 몬테카를로 시뮬레이션 결과와 촬영된 영상을 이용한 MTF 측정 결과를 비교하여 성능예측 결과의 타당성을 확인하였다.

[†]E-mail: add156974@add.re.kr

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

II. 본 론

2.1. 광학계

본 논문에서 사용한 IR 광학계는 telephoto type 대물렌즈와 재결상 형태의 릴레이(relay) 광학계로 구성되는 삼중배율 스텝 줌(step zoom) 광학계이다. 광학계는 두 개의 축거울을 이용하여 ㄷ자 형태로 소형화되었다. 대물렌즈(L1), 배울렌즈(L2+L3)와 보상렌즈(L4)에 광학적 파워가 집중되어 있기 때문에 제작 조립 오차에 가장 민감하다. 또한 삼중배율을 구현하기 위해 배울렌즈와 보상렌즈가 리니어 가이드에 장착되어 움직이므로 기계적인 조립 공차가 누적되어 조립 공차를 일반적인 값보다 작게 규제하기 어렵다.

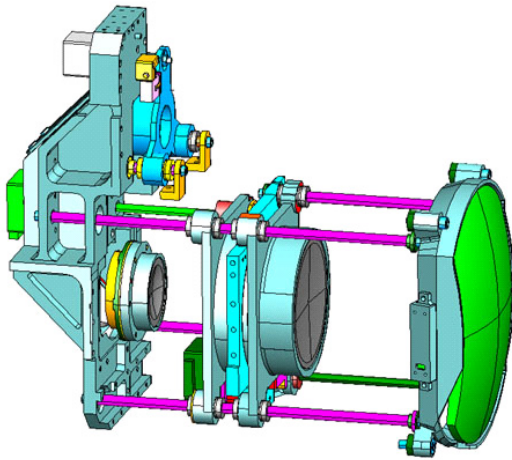


FIG. 1. IR camera frame layout.

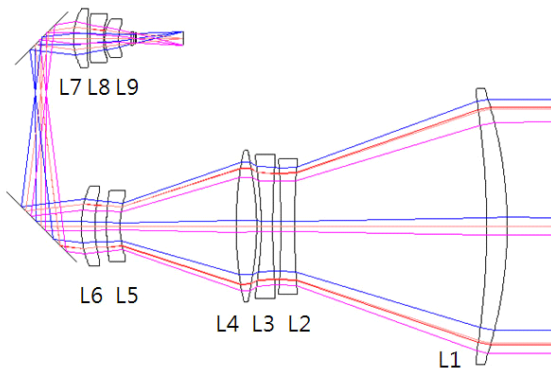


FIG. 2. Optical layout.

광학해석프로그램을 이용하여 설계된 광학계에서 미소변위를 발생시키고 이에 따른 파면오차의 Zernike 계수 값의 변화를 이용하여 광학계 민감도를 계산한다. 본 연구에서 사용된 IR 광학계의 광학 민감도 중 가장 민감한 부분은 TABLE 2와 같다. 줌렌즈(L2 + L3)와 보상렌즈(L4)의 기울기 오차에 매우 민감하여 Coma 수차에 해당하는 C8, C9 값이 크게 나타난다.

2.2. 민감도를 이용한 공차분석

Zernike 계수로 표현된 광학계의 민감도 정보와 조립정렬 공차를 이용하면 조립정렬 이후의 성능을 예측 할 수 있다. Zernike 계수는 선형성을 갖고 각각의 계수들은 서로 독립이기 때문에 광학소자의 미소변위(Δd_j)에 대한 Zernike 계수의 변화 (ΔC_j)는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta C_j = \sum_{i=1}^m S_{ij} \Delta d_i$$

m은 광학성능에 영향을 주는 변위 개수이고, S_{ij} 는 민감도이다. 직교규격화(Orthonormal)된 Zernike 다항식^[2]을 이용하는 경우 RMS 파면오차를 Zernike 계수를 이용하여 간단하게 계산할 수 있다.^[3]

$$\sigma_w^2 = \sum_{j=2}^N C_j^2$$

σ_w 는 표준편차를 의미하고 RMS 파면오차와 동일하다. C_j 는 j번째 Zernike 계수이다.

TABLE 1. Optical design specification

F/number	F/5.3
Wavelength	3700-4800nm
Field of view (FOV)	NFOV : 1.2°×0.96° MFOV : 3.75°×3.0° WFOV : 20.0°×16.0°
Focal length	611mm
MTF _{optics} (@ 15 cycles/mm, 0.0field)	NFOV : 0.502 MFOV : 0.532 WFOV : 0.494

TABLE 2. Sensitivity table for major components (0.0field)

대상	변위	민감도(Zernike coefficient, λ/mrad)						
		C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₃
Lens 2 + Lens 3	x tilt	0	0	0	0	0.07656	0	0
Lens 2 + Lens 3	y tilt	0	0	0	0	0	-0.0978	0
Lens 4	x tilt	0	0	0	0	-0.0964	0	0
Lens 4	y tilt	0	0	0	0	0	0.1084	0

기울기 오차의 경우 단순히 스칼라 형태가 아닌 벡터 형태로 값이 표현되기 때문에 기울기 오차의 크기와 방향이 표현되어야 한다. 기울기 오차의 방향에 따라 x축 기울기오차, y축 기울기오차 성분으로 나눌 수 있다.

$$a = r \cdot \cos(\theta), \quad x_{\text{tilt}} = a$$

$$b = r \cdot \sin(\theta), \quad y_{\text{tilt}} = b$$

기울기 오차의 방향에 따라 배울렌즈와 보상렌즈에 의해 발생하는 파면오차의 Zernike 계수는 다음과 같다.

$$C_8 = 0.07656 \cdot r_1 \cdot \cos(\theta_1) - 0.0964 \cdot r_2 \cdot \cos(\theta_2)$$

$$C_9 = -0.0978 \cdot r_1 \cdot \sin(\theta_1) + 0.1084 \cdot r_2 \cdot \sin(\theta_2)$$

r_1, θ_1 은 배울렌즈의 기울기 오차 크기와 방향이고 r_2, θ_2 는 보상렌즈의 기울기 오차 크기와 방향이다. 위의 식을 이용하여 배울렌즈와 보상렌즈의 기울기 오차의 상대적인 방향 차이에 의한 파면오차 크기를 계산할 수 있다.

$r_1=3$ 분, $r_2=3$ 분 일 때, L2+L3 렌즈군과 L4의 상대적인 방향 차이에 따라 RMS 파면오차는 약 0.01 λ 에서 0.18 λ 의 범위로 분포한다. 이를 Fischer의 Exponential model^[4, 5]을 이용하여 MTF 값으로 환산하여 조립 성능 예측을 할 수 있다.

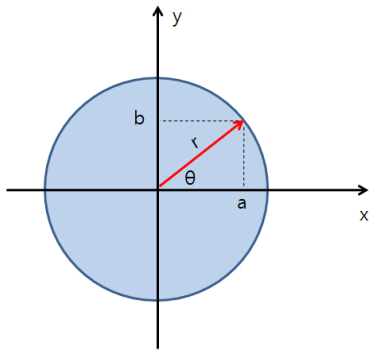


FIG. 3. Decomposition of tilt error (a: x tilt, b: y tilt).

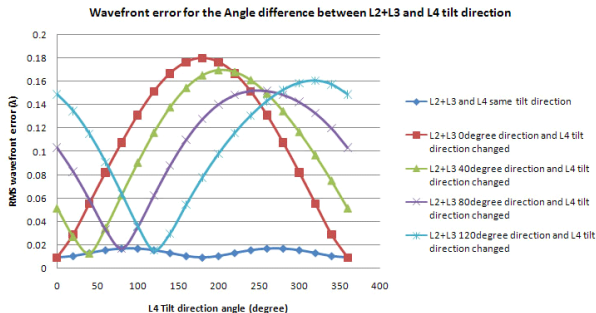


FIG. 4. RMS wavefront error for the angle difference between L2+L3 and L4 tilt direction.

$$OQF = \exp^{-\left(2\pi\sigma\right)^2 \left(1 - \exp\left(-2\left(\nu/s\right)^2\right)\right)}$$

ν = normalized spatial frequency

σ = RMS wavefront error (waves)

s = correlation parameter

ν 는 Cut-off frequency로 정규화된 공간주파수이고 σ 는 파장 단위로 표현된 RMS 파면오차이다. s 는 correlation parameter로 본 논문에서는 0.333을 사용하였다^[6]. OQF는 Optical Quality Factor로 회절한계 MTF에 대한 수치가 있는 MTF의 비율을 의미한다.

WFE_{rms}의 최대값인 0.18 λ 의 85%인 0.153 λ 인 경우 Fischer 식을 적용하면, 15 cy/mm에서 OQF=0.46이고, MTF_{optics}=0.245 이 된다. 반면에 최대 WFE_{rms}의 50% 수준인 0.09 λ 인 경우는 MTF_{optics}=0.407이다. 시스템 요구조건에서 15cy/mm에서 요구되는 MTF_{optics}는 0.238 이상이다. 이를 만족하기 위해 민감도 정보를 이용하여 공차를 설정하면 L2+L3 렌즈군과 L4 렌즈의 기울기 오차는 3분 이내가 되어야 한다. 기울기 공차를 3분으로 제한하여도 L2+L3 렌즈군과 L4 렌즈의 상대적인 기울기 오차에 따라 광학 성능은 크게 달라지므로 신뢰성 있는 조립 정렬 성능 예측이 어렵다. 따라서 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 조립성능을 확률적으로 예측하는 것이 필요하다.

2.3. MCS(Monte-Carlo simulation) 이용한 공차분석

광학계의 제작, 조립 공차에 의해 발생하는 실제 광학계의 성능을 예측하기 위해 주어진 공차 범위 내에서 난수를 발생시켜 각 광학 소자의 변위를 발생시키고 초기 조립조정자를 적절히 이동하여 보상을 하였을 때, 조정자의 이동량과 광학 성능을 확인한다. 이와 같은 과정을 반복하여 결과를 통계적으로 분석하여 조립 정렬 성능 예측을 수행할 수 있다^[7].

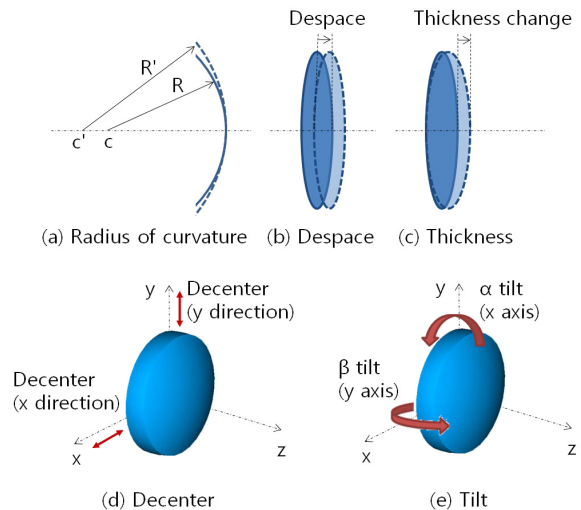


FIG. 5. Fabrication & alignment error for MCS.

본 연구에서는 CODE V 매크로를 이용하여 광학계의 조립 정렬 성능 예측을 하였다. 렌즈 단위 성적서의 측정오차를 이용하여 고정된 변위 오차를 적용하고 렌즈 두께 방향, decenter에 대한 기구물과 렌즈 자체의 조립에 의해 발생될 수 있는 오차를 공차 범위내에서 난수를 발생시켜 적용하였다. 일반적으로 제작 가능한 정밀 가공 기구물의 공차는 10 μm 이므로 기구물에 의해 발생하는 모든 공차는 10 μm 를 적용하였다. 따라서 렌즈 단위의 조립에서 발생될 수 있는 x방향 decenter 와 y방향 decenter 광축방향 despace의 공차는 10 μm 로 적용된다.

IR광학계의 측정된 부품 제작 오차(성적서)는 TABLE 3과 같다.

R1은 앞면의미, R2는 뒷면을 의미한다. 본 연구에서 공차

TABLE 3. Lens fabrication error (prototype #3)

광학부품 번호	R1 오차(mm)	R2 오차(mm)	thickness오차 (mm)
L1	-0.024	0.150	0.02
L2	0.188	0.092	0.00
L3	-0.190	0.017	0.01
L4	-0.005	-0.009	0.00
L5	0.020	0.000	0.01
L6	-0.014	0.015	0.00
L7	-0.003	0.076	0.00
L8	-0.012	-0.002	0.00
L9	0.008	0.015	-0.01

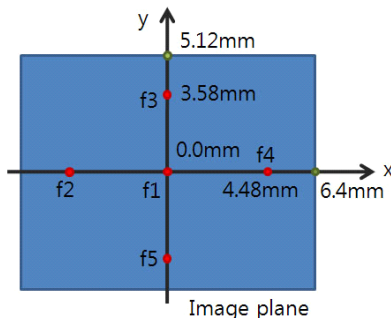


FIG. 6. Field positions diagram.

분석에 사용한 렌즈 제작 오차는 곡률반경과 두께로 초점보상으로 보상이 되는 성분이므로 시제 3호기에 대한 값을 대표값으로 1,2호기에 대한 시뮬레이션에도 동일하게 적용하였다.

비축수차와 관련된 조립정렬 오차인 렌즈의 기울기 오차는 1분의 공차를 적용하였다. 하지만 모터에 의해 구동되는 배울렌즈와 구동렌즈는 부상 및 가이드에 의해 고정되므로 조립정렬 과정에서 오차가 누적되어 큰 오차가 발생할 수 있으므로 배울렌즈와 보상렌즈는 각각 3분, 5분, 6분을 적용하여 MCS를 수행하였다.

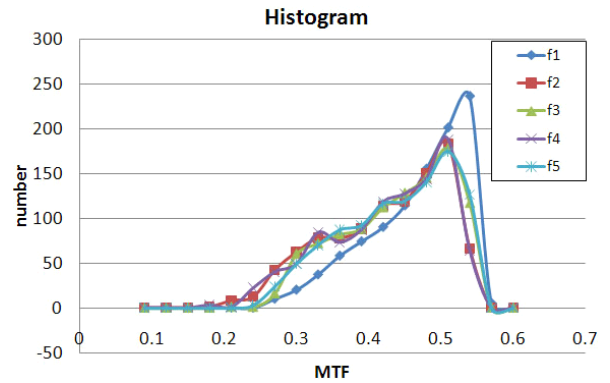


FIG. 7. MTF Histogram as a result of MCS (L2+L3 and L4 eccentricity are 3 min).

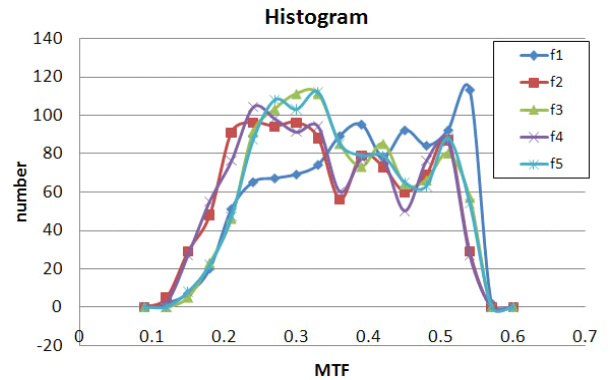


FIG. 8. MTF Histogram as a result of MCS (L2+L3 and L4 eccentricity are 5 min).

TABLE 4. Minimum MTF for satisfying given probability

field	Case I (L2+3, L4 편심 3분)		Case II (L2+3, L4 편심 5분)		Case III (L2+3, L4 편심 6분)	
	probability	MTF	probability	MTF	probability	MTF
f1	0.841	0.391	0.844	0.263	0.841	0.205
f2	0.841	0.327	0.841	0.220	0.842	0.188
f3	0.841	0.349	0.845	0.251	0.841	0.213
f4	0.841	0.332	0.841	0.224	0.845	0.186
f5	0.841	0.347	0.843	0.253	0.843	0.211

본 연구에서 이용한 광학계는 보상렌즈(L4)가 초기 조립과정자로 사용되므로 시뮬레이션 과정에서 제작조립 오차가 적용된 후 보상렌즈의 위치를 광축방향으로 이동시켜 최적 위치에서 광학성능을 확인하였다. 몬테카를로 실험 횟수는 1000회이다.

확률분포가 정규분포를 따를 때, 평균값-1σ 이상의 범위에 결과가 위치할 확률은 84.1%, 평균값-2σ 이상의 범위인 경우는 97.7%, 평균값-3σ이상의 범위인 경우는 99.9%이다. 본 연구에서는 평균값-1σ 기준인 84.1%를 기준으로 MTF 예측을 하였다.

시스템 요구조건 $MTF_{optics} = 0.238 @ 15cy/mm$ 을 만족하기 위해서는 배울렌즈, 보상렌즈의 편심량은 5분 이하이다.

2.4. 반사편심측정

편심측정기를 이용하여 각 렌즈의 편심을 측정하면서 조립정렬을 한다. 가시광 광원을 이용한 편심측정기를 IR 광학계

에서 사용하기 위해 반사편심을 이용하였다. 편심측정기는 광원을 측정대상에 조사하고 반사 또는 투과된 빛을 결상시켜 반사된 빛의 각도를 측정하는 콜리메이터부와 측정대상을 정밀하게 회전시키는 회전테이블과 광원부로 구성된다.^[8] 렌즈 배럴과 렌즈를 조립하는 셀본딩 과정은 FIG. 9와 같다.

렌즈 셀은 대물렌즈, 배울렌즈군, 보상렌즈, 중간결상렌즈군, 초점렌즈군의 5개로 구성되고 각 렌즈 셀은 카메라 기구부에 조립된다. 이 때 조립 오차를 확인하기 위해 편심을 측정한다. 반사 편심을 이용하기 때문에 기준렌즈를 설정하고 기준렌즈에 대한 상대적인 편심값을 측정한다.

일반적인 편심량 측정 과정은 FIG. 10과 같다. 렌즈 5,6번 위치에 평판플레이트를 위치시켜 광학계 프레임의 기울기를 맞춘다. 다음에 렌즈 5, 6번 셀을 프레임에 장착하여 광학계 프레임의 decenter를 맞춘다. 프레임 정렬이 끝나면, 측정하고자 하는 렌즈의 편심량을 측정한다.

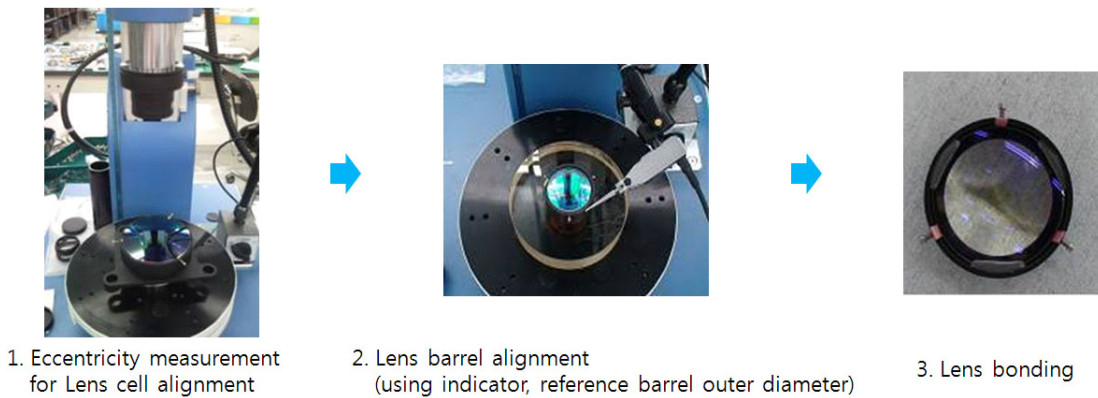


FIG. 9. Bonding process for lens cell.

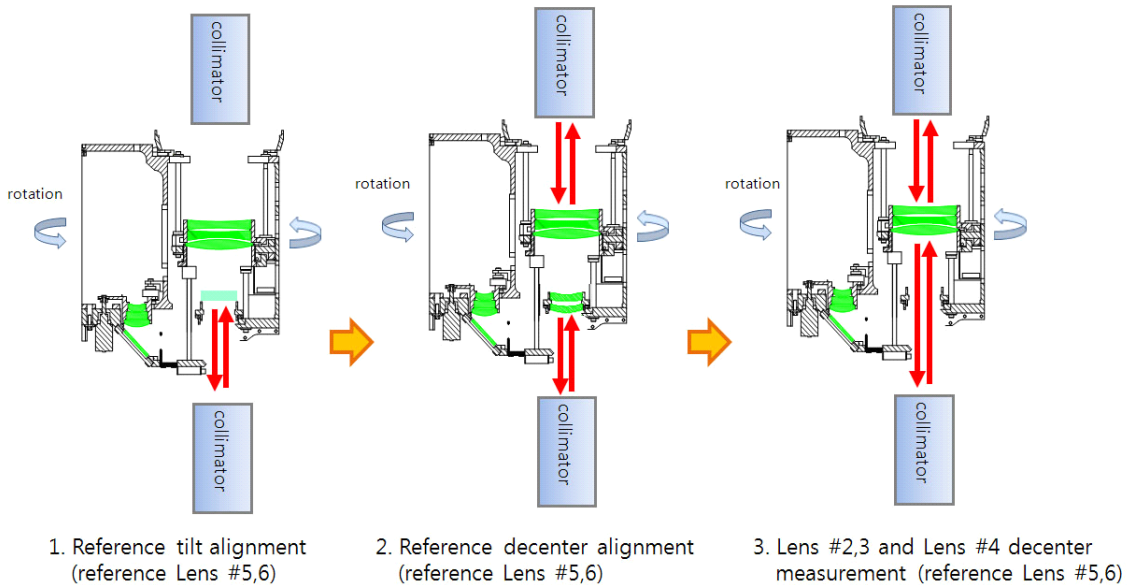


FIG. 10. Reflective eccentricity measurement process for general case (L5+L6 reference).

하지만 배울렌즈와 보상렌즈는 가장 민감한 부분이고 절대적인 편심 크기보다 배울렌즈와 보상렌즈의 상대적인 편심 크기가 중요하기 때문에 FIG. 11과 같이 상대적인 편심량을 측정하였다. 배울렌즈와 보상렌즈의 상대적인 편심량을 측정하기 위해 배울렌즈 앞면에 평판 플레이트를 위치시킨다. 평판플레이트에 의한 반사편심을 측정하여 프레임의 기울기를 맞추고 평판 플레이트를 제거한 후 렌즈 2번 앞면에서 반사되는 반사편심을 측정하여 decenter를 맞춘다. 프레임 정렬이

끝난 후 렌즈 4번의 반사편심을 측정한다.

측정된 렌즈 셀 조립오차는 TABLE 5와 같고, 렌즈 셀단위 조립 오차는 TABLE 6과 같다.

L1은 편심측정기를 이용하여 조립하기 때문에 렌즈 셀 조립오차의 일반적인 크기인 1분의 편심을 적용하였다. L5+L6는 기준면이므로 마찬가지로 렌즈 셀 조립오차의 일반적인 크기인 1분의 편심을 적용하였다. L7+L8+L9의 편심은 시제 1호기에서 측정된 값을 이용하였다. L1, L5+L6, L7+L8+L9

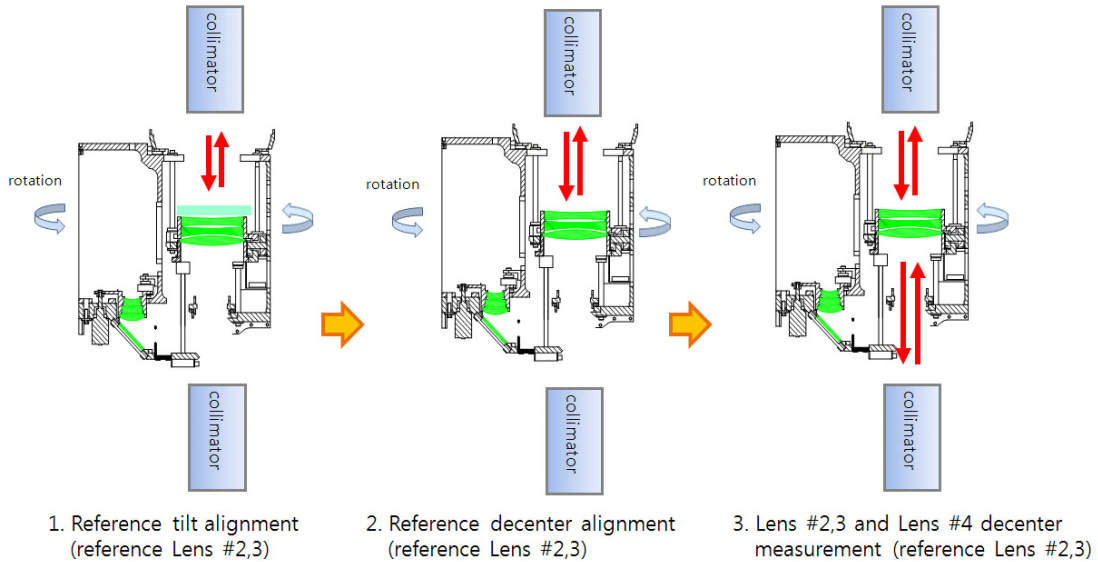


FIG. 11. Reflective eccentricity measurement process for L4 (L2+L3 reference).

TABLE 5. Lens cell bonding error

광학부품번호	시제1호기		시제2호기		시제3호기	
	분	mrad	분	mrad	분	mrad
L1	0.17	0.049	0.98	0.285	0.85	0.247255
L2	0.33	0.096	0.37	0.108	0.11	0.031998
L3	0.78	0.227	0.66	0.192	1.50	0.436332
L4	0.27	0.079	0.60	0.175	0.30	0.087266
L5	1.00	0.291	0.85	0.247	0.81	0.235619
L6	0.25	0.073	2.00	0.582	0.57	0.165806
L7	1.50	0.436	0.21	0.061	1.06	0.308342
L8	0.92	0.268	0.65	0.189	0.60	0.174533
L9	1.98	0.576	10.32	3.002	3.42	0.994838

TABLE 6. Cell unit assembly error

광학부품번호	시제1호기		시제2호기		시제3호기	
	분	mrad	분	mrad	분	mrad
L1	1.00	0.290888	1.00	0.290888	1.00	0.290888
L2+L3+L4	2.72	0.791216	3.64	1.058833	3.67	1.067560
L4	6.18	1.797689	3.02	0.878482	6.14	1.798605
L5+L6	1.00	0.290888	1.00	0.290888	1.00	0.290888
L7+L8+L9	2.48	0.721403	2.48	0.721403	2.48	0.721403

의 편심은 L2+L3, L4의 편심에 의한 영향에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 3개의 시제에 동일하게 적용하였다. L2+L3와 L4는 같은 가이드에 구속되어 있으므로 상대적인 위치오차가 작다고 가정하여 L2+L3와 L4 전체에 대한 편심은 L2+L3의 측정된 편심으로 적용하였다. L4의 상대적인 편심은 L2+L3를 기준으로 측정된 편심을 적용하였다.

2.5. 반사편심결과 이용한 MCS(Monte-Carlo simulation)

기존의 MCS에서 편심 크기 r에 대한 공차를 x축 y축 기울기에 대한 성분으로 나누기 위해 x축 기울기 공차, y축 기울기 공차를 각각 독립적으로 난수발생시켜 적용하였다. 하지만, 반사편심 측정 결과를 이용하면 편심 크기는 고정되고 편심의 방향, 즉 x축, y축 기울기의 비율에 대해서만 난수를 적용하면 된다. 따라서 비축 수차에 대한 공차는 측정된 편심 오차 r 과 x축, y축 기울기의 비율을 결정하는 편심의 방향을 θ 로 하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_a = r \cdot \cos(\theta), \quad r_b = r \cdot \sin(\theta)$$

r_a = magnitude of α tilt
 r_b = magnitude of β tilt

렌즈 단위 성적서의 측정 오차를 이용하여 렌즈 부품에 대한 오차를 적용하고, 렌즈 셀 조립과 렌즈 셀 단위 조립에서 편심측정기를 이용하여 측정된 편심량을 이용하여 난수 발생시켜 오차를 발생시킨다. 최종적으로 보상렌즈를 광축 방향으로 이동시켜 defocus 보상을 하고 MTF값을 확인한다. 몬테카를로 실험횟수는 1000회이다.

편심측정값이 없는 경우 렌즈 모듈간의 상대적인 기울기 오차를 확인하기 어렵기 때문에 MCS에서 각각 렌즈에 대해 독립적으로 공차범위 내에서 난수를 발생시켰다. 본 연구에서는 편심측정기를 이용하여 배울렌즈 기준으로 보상렌즈의 상대적인 기울기 오차를 측정하였기 때문에 MCS에서 이를 반영하기 위해 L2+L3+L4에 대해 편심을 적용하고 L2+L3+L4의 전체 편심이 적용된 상태에서 L4의 상대적인 편심을 추가로 적용하였다.

FIG. 12, FIG. 13, FIG. 14는 편심측정 결과를 이용한 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 예측된 MTF값의 히스토그램이다. 각각의 필드에 대해 1000회 랜덤 오차 적용 시 기준 주 파수에서의 MTF값이 나오는 횟수를 히스토그램으로 표현하였다. 히스토그램에서 특정 MTF값 이상의 값이 나오는 횟수를 실험 횟수로 나누어 확률값을 계산하였다. 84.1%를 기준으로 MTF 예측결과는 다음과 같다.

편심측정결과에서 보상렌즈의 편심량이 3분이었던 시제2호기에 대해서 가장 좋은 MTF성능이 나올 것으로 예측된다. 조립된 3개의 시제의 L4 편심량은 최대 6.2분이었지만 MTF 예측값은 시스템 요구조건을 만족한다. 따라서 편심측정 결과를 이용한 MCS는 배울렌즈의 기울기 공차를 6분으로 할당 할 수 있다.

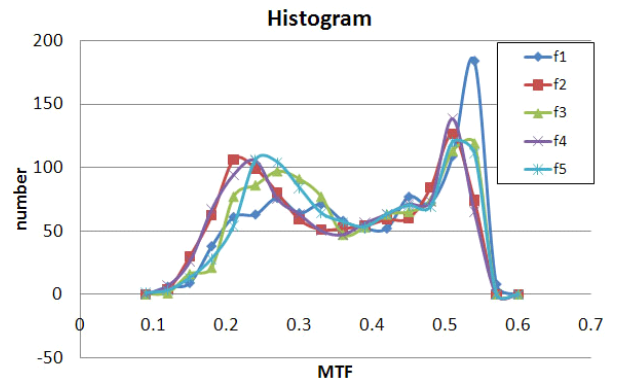


FIG. 12. MTF Histogram as a result of MCS (ptototype #1).

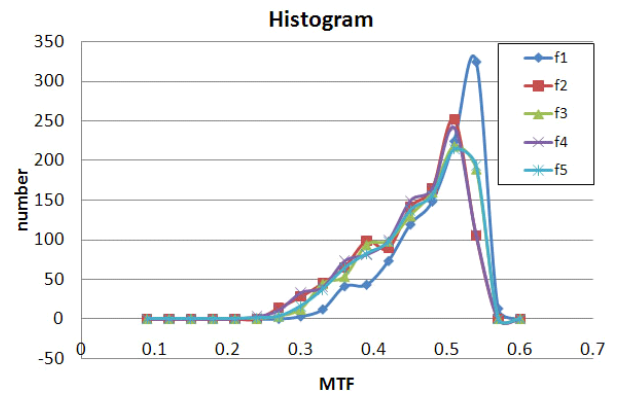


FIG. 13. MTF Histogram as a result of MCS (ptototype #2).

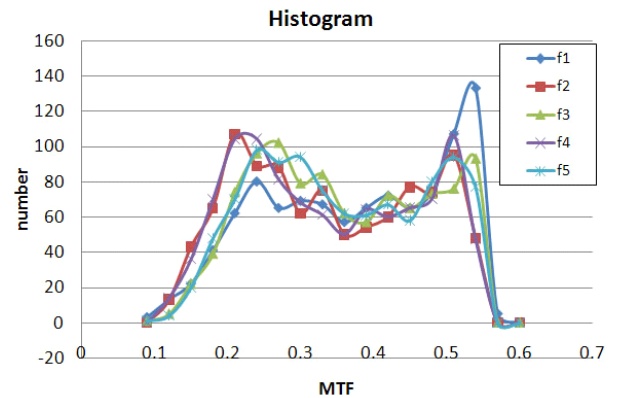


FIG. 14. MTF Histogram as a result of MCS (ptototype #3).

TABLE 7. Minimum MTF for satisfying given probability

field	1호기		2호기		3호기	
	percent age	MTF	percent tage	MTF	percent tage	MTF
f1	0.841	0.247	0.845	0.428	0.843	0.233
f2	0.845	0.212	0.842	0.378	0.846	0.205
f3	0.843	0.240	0.841	0.390	0.844	0.231
f4	0.842	0.216	0.843	0.374	0.845	0.206
f5	0.841	0.241	0.844	0.388	0.843	0.230

2.6. MTF 측정

MTF측정은 ISO12233^[9]의 Slanted edge target을 이용하는 방법을 이용하였다. 촬영된 영상을 이용하여 system MTF를 계산하는 절차는 FIG. 15와 같다. 이 때 측정된 system MTF 값은 검출기 MTF와 광학 MTF 이외에 다른 다양한 MTF 저하 요인이 포함된 값이다. 하지만 실험실 환경에서 안정된 상태에서 측정된 결과이므로 가장 큰 저하 요인은 검출기 MTF 이다.

2.7. 측정결과 비교

IR 검출기는 SCD Sebastian640모델로 검출기 pixel pitch는 20 μ m이다. 이 때, 이론적인 검출기 MTF는 15cy/mm에서 0.86이다^[10].

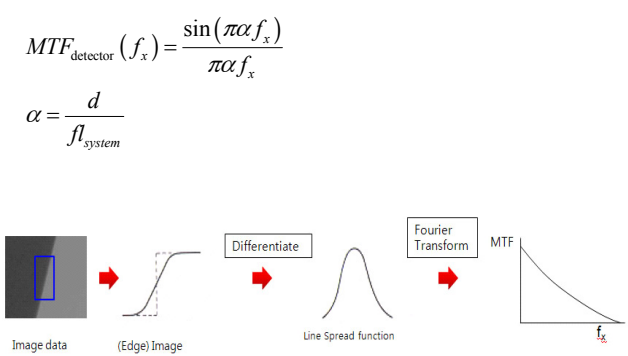


FIG. 15. MTF calculation process.

TABLE 8. Measured system MTF (@ 15cy/mm)

	Field1	Field2	Field3	Field4	Field5
Prototype #1	0.15	0.14	0.15	0.11	0.14
Prototype #2	0.27	0.14	0.26	0.20	0.26
Prototype #3	0.19	0.19	0.20	0.16	0.20

TABLE 9. MTF comparisons between simulation and measured result (84.1% probability)

field	시제1호			시제2호			시제3호		
	MCS	Measured	error	MCS	Measured	error	MCS	Measured	error
f1	0.173	0.152	-0.021	0.300	0.269	-0.031	0.163	0.191	0.028
f2	0.148	0.143	-0.005	0.265	0.141	-0.124	0.144	0.192	0.049
f3	0.168	0.148	-0.020	0.273	0.264	-0.009	0.162	0.201	0.039
f4	0.151	0.110	-0.041	0.262	0.205	-0.057	0.144	0.162	0.018
f5	0.169	0.135	-0.034	0.272	0.262	-0.010	0.161	0.198	0.037

TABLE 10. The result of three tolerancing method and measured MTF

	민감도분석 (Exponential model)	MCS	반사편심 이용한 MCS (시제3호기)	실제 측정값 (시제3호기)
L4 기울기 공차	3 minutes	5 minutes	6.14 minutes	6.14 minutes
System MTF (0.0 field)	0.172	0.184	0.163	0.191

d는 검출기의 pitch, f_{system} 은 광학계의 초점거리, f_x 는 cy/rad단위의 공간주파수를 의미한다. 제조사에서 제공한 실제 측정값은 20cy/mm에서 0.5이다. 따라서 위의 수식에서 d를 변경하여 20cy/mm에서 0.5가 되도록 하였다. 이 때, 15cy/mm에서 $MTF_{detector}$ 는 0.7이 된다.

$$MTF_{system} = MTF_{optics} \times MTF_{detector} \times MTF_{motion}$$

System MTF는 광학MTF와 검출기 MTF와 카메라 이동에 대한 MTF의 곱으로 표현된다^[11]. 본 연구에서는 카메라 이동에 대한 MTF저하는 거의 없다고 가정하고 측정된 값을 바탕으로 근사화된 검출기 MTF 값인 0.7을 Optics MTF에 곱하여 System MTF를 계산한다.

MCS결과와 실제 측정결과는 오차는 있지만 비슷한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 검출기 MTF값이 각각 다르고, System MTF 측정 시 측정 오차가 크게 발생 할 수 있으므로 정확한 조립정렬 성능 예측은 어렵다. 하지만 각 시제의 결과에서 알 수 있듯이 가장 민감한 부분인 L4의 편심 크기에 따라 System MTF값이 크게 변화되는 것을 확인 할 수 있다.

TABLE 10은 각각의 공차분석 방법에 의해 할당된 L4 기울기 공차와 이에 따른 System MTF 예측값과 실제 측정값을 비교한 표이다.

세가지 공차분석 방법 중 반사편심을 이용한 MCS는 L4

기울기 공차를 가장 큰 값인 6.14분으로 할당함에도 불구하고 목표성능을 만족하는 것으로 예측되었고 실제 제작된 시제의 측정값도 성능을 만족하는 것을 확인하였다.

III. 결 론

기존의 민감도 분석 방법으로 조립 성능 예측이 어려운 렌즈의 상대적인 기울기 차이와 같은 서로 독립적이지 않은 광학 오차에 대한 조립 성능 예측을 하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 광학계와 같은 매우 민감한 광학계에서는 일반적인 공차를 적용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하면 시뮬레이션 결과와 실제 측정값의 오차가 매우 커질 수 있다. 따라서 실제 측정된 편심값을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

편심측정값을 이용한 MCS를 통해 본 연구에서 사용된 적외선 광학계의 조립 정렬 과정에서 보상렌즈의 편심량은 민감도 분석 또는 일반적인 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 값보다 더 큰 6분인 경우에도 시스템 요구조건을 만족하는 것으로 예측되었다. MTF 성능 예측 결과의 타당성을 확인하기 위해 실제 조립된 3개의 광학계의 MTF를 측정하여 비교하였다. 제안된 방법을 통해 MTF 성능 예측한 결과와 실제 측정된 결과는 유사한 것을 확인하였다. 따라서 편심측정값을 이용한 MCS를 이용하여 매우 민감한 광학계에 대해 기존의 공차할당 방법에 비해 보다 정확한 공차 할당이 가능하다.

References

1. B. Uhl, "Digital EO camera system VOS 40/270 for tactical reconnaissance pod recelite," Proc. SPIE **4824**, 47-57 (2002).
2. R. J. Noll, "Zernike polynomials and atmospheric turbulence," J. Opt. Soc. Am. **66**, 207-211 (1976).
3. V. N. Mahajan, "Zernike circle polynomials and optical aberrations of systems with circular pupils," Supplement to Appl. Opt. **33**, 8125-8127 (1994).
4. R. E. Fischer and B. Tadic-Galeb, *Optical System Design* (SPIE Press, Bellingham, WA, USA, 2000).
5. C. Olson, "Lens performance budgeting using the Hopkins ratio," Optics and Photonics News, Opt. Soc. of America, 12 (2008).
6. R. E. Fischer, "Tolerances don't lie... and stories of the grand canyon!," Proc. SPIE **7068**, 706803-1 (2008).
7. D. Heshmaty-Manesh and G. Y. Haig, "Lens tolerancing by desk-top computer," Appl. Opt. **25**, 1268-1270 (1986).
8. Trioptics, "OptiCentric inspection, alignment, cementing and assembly of optics," Trioptics GmbH (2010).
9. International Standard ISO 12233, Photography-Electronic still-picture cameras-Resolution measurements, ISO (2000).
10. G. C. Holst, *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*, 2nd ed. (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, USA, 1998).
11. L. Perret, D. Laubier, and V. Albuys, "New statistical approach for design optimization and performances assessment of spaceborne optical systems," Proc. SPIE **3739**, 422-442 (1999).