

Athermalization and Narcissus Analysis of Mid-IR Dual-FOV IR Optics

Do Hwan Jeong¹, Jun Ho Lee^{1†}, Ho Jeong², Chang Min Ok², and Hyun-Woo Park²

¹Department of Optical Engineering, Kongju National University, 1223-24, Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea
²LIG Nex1 Co., Ltd., 207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin 16911, Korea

(Received April 16, 2018; Revised April 25, 2018; Accepted April 26, 2018)

We have designed a mid-infrared optical system for an airborne electro-optical targeting system. The mid-IR optical system is a dual-field-of-view (FOV) optics for an airborne electro-optical targeting system. The optics consists of a beam-reducer, a zoom lens group, a relay lens group, a cold stop conjugation optics, and an IR detector. The IR detector is an $f/5.3$ cooled detector with a resolution of 1280×1024 square pixels, with a pixel size of $15 \times 15 \mu\text{m}$. The optics provides two stepwise FOVs ($1.50^\circ \times 1.20^\circ$ and $5.40^\circ \times 4.32^\circ$) by the insertion of two lenses into the zoom lens group. The IR optical system was designed in such a way that the working f -number ($f/5.3$) of the cold stop internally provided by the IR detector is maintained over the entire FOV when changing the zoom. We performed two analyses to investigate thermal effects on the image quality: athermalization analysis and Narcissus analysis. Athermalization analysis investigated the image focus shift and residual high-order wavefront aberrations as the working temperature changes from -55°C to 50°C . We first identified the best compensator for the thermal focus drift, using the Zernike polynomial decomposition method. With the selected compensator, the optics was shown to maintain the on-axis MTF at the Nyquist frequency of the detector over 10%, throughout the temperature range. Narcissus analysis investigated the existence of the thermal ghost images of the cold detector formed by the optics itself, which is quantified by the Narcissus Induced Temperature Difference (NITD). The reported design was shown to have an NITD of less than 1.5°C .

Keywords: Infrared optics, Lens design, Narcissus, Athermalization

OCIS codes: (220.3620) Lens system design; (220.4830) Systems design; (280.4991) Passive remote sensing; (110.3080) Infrared imaging

이중 시야 중적외선 광학계 비열화·나르시시스 분석

정도환¹ · 이준호^{1†} · 정 호² · 옥창민² · 박현우²

¹공주대학교 기하광학연구실
☎ 31080 충청남도 천안시 서북구 천안대로 1223-24

²LIG 넥스원(주)
☎ 16911 경기도 용인시 기흥구 마북로 207

(2018년 4월 16일 받음, 2018년 4월 25일 수정본 받음, 2018년 4월 26일 게재 확정)

항공용 전자 광학 타겟팅 시스템을 위한 중적외선 광학계를 설계하였다. 본 광학계는 이중 시야를 갖도록 설계되었으며, 빔 축소 전단 광학계, 줌 렌즈 그룹, 릴레이 렌즈 그룹, 콜드스탑 공액 광학계 및 냉각 적외선 검출기로 구성된다. 적외선 검출기는 단일 화소의 크기가 $15 \times 15 \mu\text{m}$ 인 1280×1024 화소 배열을 가지며 잡음을 최소화하기 위하여, $f/5.3$ 의 냉각 콜드스탑이 적용된 제품으로 선정하였다. 이중 시야 ($1.50^\circ \times 1.20^\circ$, $5.40^\circ \times 4.32^\circ$)는 두 개의 렌즈를 삽입하는 방식으로 구현했으며, 줌 배율 변경 시 모든 시야에 걸쳐 $f/5.3$ 의 콜드스탑의 효율을 유지하도록 설계하였다. 열 효과가 이미지에 미치는 영향을 조사하기 위해 비열화 및 나르시시스 분석을 수행하였으며, 비열화 분석은 $-55 \sim 50^\circ\text{C}$ 의 작동 온도를 기준으로 초점 이동과 잔여 고차 파면 수차에 조사하였고 제르니케 다항식을 이용한 민감도 분석을 수행하여 최적의 보상자를 선정하였다. 선정된 보상자의 최적 이동을 고려한 MTF 해상력을 확인한 결과, 작동 온도 전 구간에 걸쳐 요구조건인 33 lp/mm에서 축상 10% 이상의 성능을 유지하는 것을 확인하였으며, 나르시시스 분석 결과, NITD (Narcissus Induced Temperature Difference) 값이 1.5°C 이하가 되도록 설계 된 것을 확인하였다.

Keywords: 적외선 광학계, 렌즈 설계, 나르시시스, 비열화 설계

OCIS codes: (220.3620) Lens system design; (220.4830) Systems design; (280.4991) Passive remote sensing; (110.3080) Infrared imaging

[†]E-mail: jhlsat@kongju.ac.kr, ORCID: 0000-0002-4075-3504

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

I. 서 론

항공기용 전자광학 타겟팅 시스템은 넓은 범위의 탐지와 좁은 범위의 식별을 용이하게 수행하기 위하여, 독립된 2개의 광시야 및 협시야 광학계 또는 1개의 공통 이중 시야 광학계를 포함하고 있다^[6]. 이 적외선 광학계는 3.6~4.9 μm의 중적외선 대역에서 검출기 잡음 최소화를 위하여, 극저온으로 냉각된 듀어(dewar) 내에 적외선 검출기를 설치하고, 추가적으로 적외선 광 잡음을 최소화하기 위해 듀어 내에 콜드 스탑(coldstop)을 설치한다. 선명한 이미지 획득을 위하여 적외선 광학계는 듀어 내에 설치된 콜드 스탑이 모든 시야에 대하여 100% 효율을 가지도록 콜드 스탑과 조리개 또는 입사동과 공액 관계를 가지도록 설계한다. 그림 1에 중적외선에 사용되는 냉각형 적외선 검출기의 구조와 이에 설치된 콜드 스탑의 개념적 광학 배치 구성을 보여주고 있다.

냉각형 검출기의 콜드스탑을 이용한 적외선 광학계에서 렌즈의 내부전반사 및 이중반사로 인한 미광은 어두운 배경에 대한 신호차를 발생시켜 고스트(ghost) 현상이 발생하게 되고, 이는 가시광 영역보다 고스트에 취약한 단점이 있다. 또한 극저온으로 냉각된 검출기와 광학계 하우징의 고온 복사 에너지에 의한 고스트 현상은 어두운 배경에서 렌즈 균 또는 관측중인 물체의 배경 온도 차이보다 강한 빛으로 작용되어 검출기에 단일 반사된 열에 의한 상이 입사될 수 있으며 이를 나르시스 현상(Narcissus)이라고 한다^[7-9]. 그림 2는 검출면 발생한 나르시스 이미지의 예를 보여주고 있다.

나르시스 효과로 인해 발생된 불균일한 열상은 물체의 배경 온도 차를 감소시키므로 상의 분해가 불가능하며, 이를 해결하기 위해 광학적 보정, 주변온도를 일정하게 충족, 렌즈 이동 등을 고려하여 나르시스 효과를 억제할 수 있다. 나르시스 분석 이외에도 적외선 광학계는 운용온도의 편차가 크기 때문에 성능 분석 시 비열화 분석도 함께 고려해야 한다.

비열화 분석이란 온도변화에 따른 광학계의 성능 변화에 대해 보상자를 통하여 성능 변화를 최소로 만드는 것이다. 적외선 광학계에 사용되는 물질의 굴절률은 가시광의 영역보

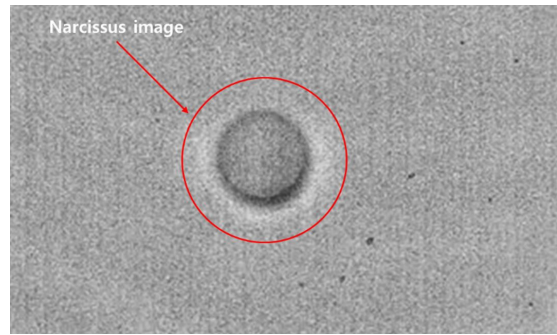


Fig. 2. Narcissus image in a thermal imaging system^[7].

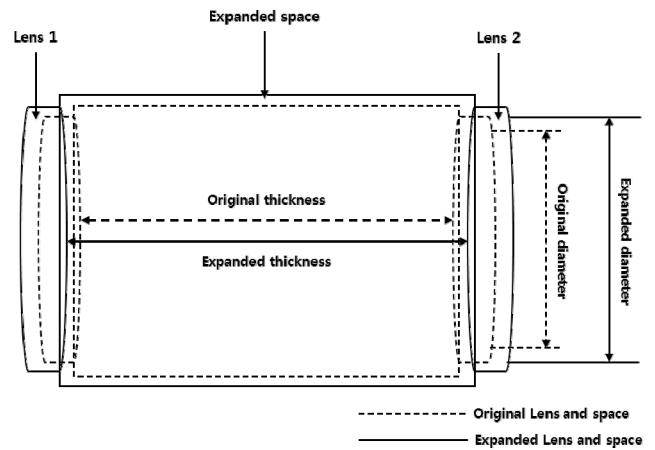
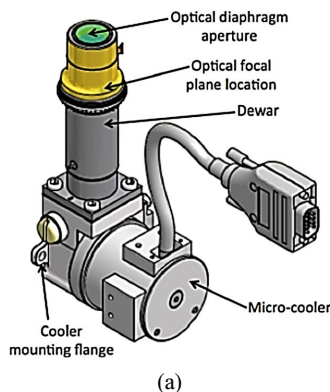


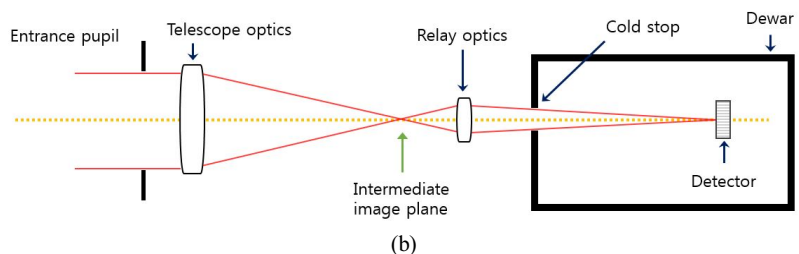
Fig. 3. Schematic diagram of the thermal expansion of a two-lens system.

다 크기 때문에 온도에 따른 굴절률 변화도 커질 수밖에 없어 비열화 분석을 반드시 고려해야 한다^[10]. 그림 3은 온도 변화에 따른 경통 및 렌즈의 변화를 개념적으로 표현하고 있다.

본 논문의 분석 대상 중적외선 광학계는 전자 광학 타겟팅을 위해 이중 시야를 가지도록 설계되었으며, 빔 축소 전단 광학계, 줌 렌즈 그룹, 릴레이 렌즈 그룹, 콜드스탑 공액 광학계 및 냉각 적외선 검출기로 구성된다. 적외선 검출기는 단일 화소의 크기가 15 × 15 μm 인 1280 × 1024 화소 배열을



(a)



(b)

Fig. 1. A 3D drawing of a mid-IR detector^[6] and its coldstop conjugation in an optics layout. (a) Mid-IR detector design^[6], (b) Schematic optical layout of an IR optics with a cold-stopped detector.

가지며, 적외선 잡음을 최소화하기 위하여 $f/5.3$ 의 냉각 콜드 스타프가 적용된 제품으로 선정하였다. 이중 시야 ($1.50^\circ \times 1.20^\circ$, $5.40^\circ \times 4.32^\circ$)는 두 개의 렌즈를 삽입하는 방식으로 구현했으며, 줌 배율 변경 시 전 시야에 걸쳐 $f/5.3$ 의 콜드 스타프의 효율을 유지하도록 설계하였다. 그림 4는 본 논문에서 다루고 있는, 이중 시야 중적외선 광학계 개념도를 보여주고 있다^[11].

본 논문에서는 이중시야 중적외선 광학계의 비열화 및 나르시시스를 분석하였다. 2장에서는 비열화 및 나르시시스 분석에 대한 이론적 배경을 설명하고, 3장에서는 중적외선 광학계의 나르시시스 분석과 비열화 분석을 통한 광학계 성능에 대해 서술하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 온도 변화에 따른 초점 이동

적외선 광학계에 사용되는 광학재료는 온도에 따른 굴절률의 변화가 가시광에서 사용되는 광학재료에 비하여 크다는 단점이 있다. 그 외에 렌즈의 마운트 및 광학계의 위치를 잡아주는 기구의 팽창 또는 수축에 의한 현상도 고려해야 한

다. 적외선 광학계를 설계 및 제작 시 상온(20°C)을 기준으로 설계를 하지만 실제 적외선 광학계 장비는 상온에서 벗어난 $-32\sim+55^\circ\text{C}$ 온도범위에서 운용되는 경우가 대다수이기 때문에 광학계의 성능저하가 크게 발생한다. 이러한 광학성능저하는 단순 초점 이동(defocus)과 고차의 잔여 수차 형태로 발생하게 되나, 대개 잔여 고차 수차의 경우 무시할 수 있을 정도로 작은 양이어서, 열에 의한 광학계 광학 성능 저하 보상은 단순 초점면 이동이 주로 사용된다^[12].

초점 이동 변화를 제거하는 방법으로, 본 논문에서는 기계적 능동식 비열화 방법을 선택하여 진행하였다. 기계적 능동식 방법은 광학계 내에 렌즈를 이동시켜 보정하는 방법이며, 온도변화에 따라 발생하는 초점 이동을 정하여 광학계 성능을 유지시킨다. 렌즈는 수동 또는 모터를 이용하여 움직이게 된다. 그림 5는 온도 변화에 따라 발생하는 초점 이동에 대해 렌즈를 이동시켜 비열화 하는 방법을 표현하였다. 광학계 온도가 20°C 에서 55°C 로 변화하였을 때, 초점은 가까이 맺히게 되며, 렌즈를 뒤로 이동시켜 본래의 검출기 위치로 상을 맺히게 하는 비열화 방법을 나타낸다.

비열화를 진행하기 전 설계된 광학계의 온도 변화에 따른

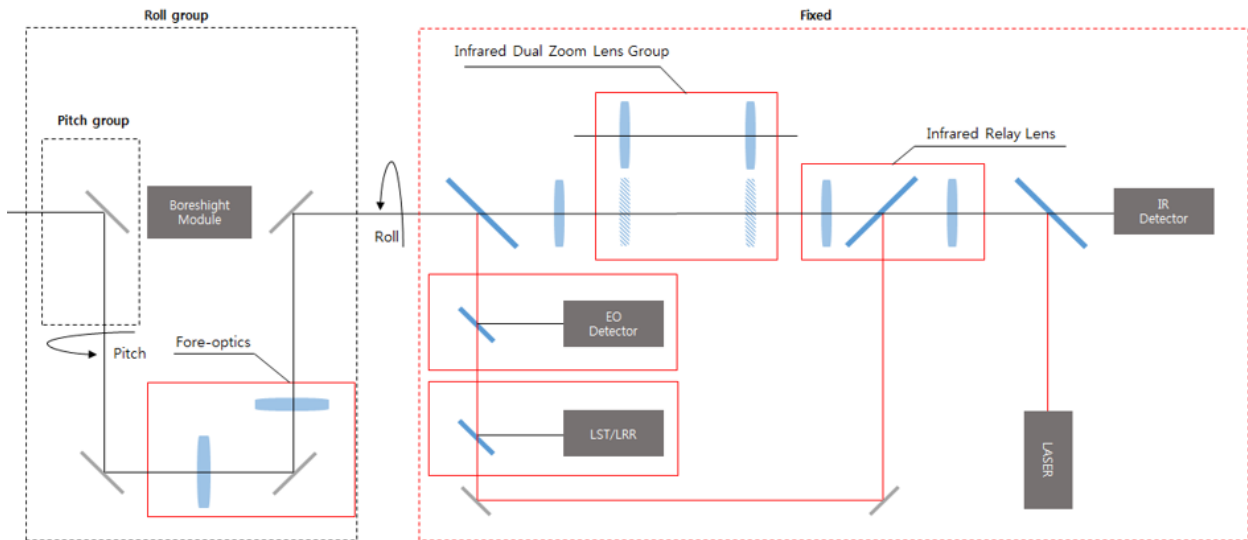


Fig. 4. Schematic optical layout of the common-aperture targeting system^[11].

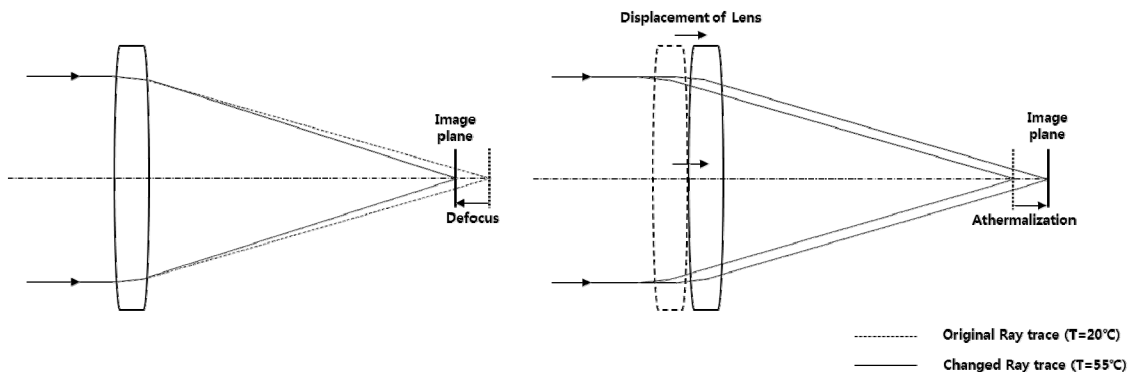


Fig. 5. Schematic diagram of single lens athermalization.

초점 이동 변화에 따라 보정을 하기 위한 보상자를 선정하기 위해 민감도 분석을 수행하게 된다. 민감도 분석은 각 광학 요소에 축상 변위 또는 비축상 변위에 변화를 주어 제르니케 (Zernike) 계수의 변화가 선형적임을 이용한 각 계수의 변화율을 추정하는 것이다. 이를 이용하여 분석을 진행하게 될 광학계의 기본 제르니케 계수와 광학계 변화에 따른 제르니케 계수의 차이 값을 분석하게 된다.

또한 최소 제곱법(least-squares fitting)을 이용한 회귀직선의 계수(기울기)를 구하고 광학계의 움직임에 따른 제르니케 계수 변화율 추출하여, 최소 제곱 회귀직선의 기울기인 민감도 값을 구하며, 초점조절 이동량의 변화량이 크고 기구적으로 움직이기 쉬운 렌즈를 보상자로 선정한다. 다음 그림 6은 렌즈 이동에 대한 변수와 민감도를 구하기 위한 최소 제곱 회귀직선의 기울기에 대하여 정리하였다.

광학계에서 온도 변화로 인한 초점거리 변화의 발생에 대하여 단일렌즈를 통해 개념을 설명하고자 한다. 대개 온도변화에 따른 광학계의 초점거리 변화는 렌즈의 굴절률, 곡률반경, 두께의 변화 그리고 경통의 팽창 또는 수축에 의한 경우를 생각할 수 있는데 렌즈의 두께변화에 관련된 계수는 초점거리에 미치는 영향이 매우 작기 때문에 고려대상에서 제외된다. 단일 렌즈의 초점거리는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{r}{n-1} \tag{1}$$

위 식에서 f 는 초점거리, n 은 굴절률, $r = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 이며 R_1, R_2 는 렌즈의 곡률반경이다. 식 (1)을 온도에 따른 초점거리 변화로 나타내면

$$\begin{aligned} \frac{df}{dT} &= \frac{1}{n-1} \frac{dr}{dT} - \frac{r}{(n-1)^2} \frac{dn}{dT} \\ &= \frac{r}{n-1} \left(\frac{1}{r} \frac{dr}{dT} - \frac{1}{n-1} \frac{dn}{dT} \right) \\ &= f \left(\alpha - \frac{1}{n-1} \frac{dn}{dT} \right) \\ &= -vf \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 v 는 온도에 따른 렌즈의 광학 초점거리 변화를 나타내는 광학-열 팽창계수 (opto-thermal expansion coefficient)로 다음과 같다.

$$v = \left(\frac{1}{n-1} \right) \left(\frac{dn}{dT} \right) - \alpha \tag{3}$$

여기서 경통의 열팽창/수축을 동시에 고려하면, 온도에 따른 초점거리 변화는 식 (4)로 표현된다.

$$\delta = \frac{-f}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} + \alpha_l \cdot f + \alpha_h \cdot L \tag{4}$$

α_l 및 α_h 는 렌즈 재질 및 경통(하우징)의 열 팽창 계수이고, L 은 렌즈부터 초점면까지의 경통 길이이다.

렌즈 2장을 고려할 때의 색수차 보정 방정식은 식 (5) 및 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_i = f(V_i - V_j) / V_i \tag{5}$$

$$f_j = f(V_j - V_i) / V_j \tag{6}$$

여기서 V_i 와 V_j 는 각 렌즈 i, j 의 아베(Abbe) 상수를 나타낸다.

2장 접합렌즈의 색수차 보정을 고려할 때 비열화 위한 조건은 식 (7)과 같다.

$$V_i v_i = V_j v_j \tag{7}$$

위 식 (7)과 같이 온도의 변화에 따른 수차 보정 진행 시 Vv 의 값이 같거나 비열화를 위해 원하는 값과 가까운 렌즈 조합을 선택하면 된다. 복잡한 광학계의 경우에는 보다 많은 렌즈를 사용하여 색수차 및 비열화를 달성하기도 한다.

2.2. 나르시스 분석

적외선 광학계는 검출기는 열복사 에너지에 민감하다. 그러므로 검출기의 민감도를 증가시키기 위해 대략 -200°C 수준의 극저온까지 낮추어 냉각시킨다. 검출기에는 콜드실드 (cold-shields)가 있으며, 배경에너지의 양을 제한한다.

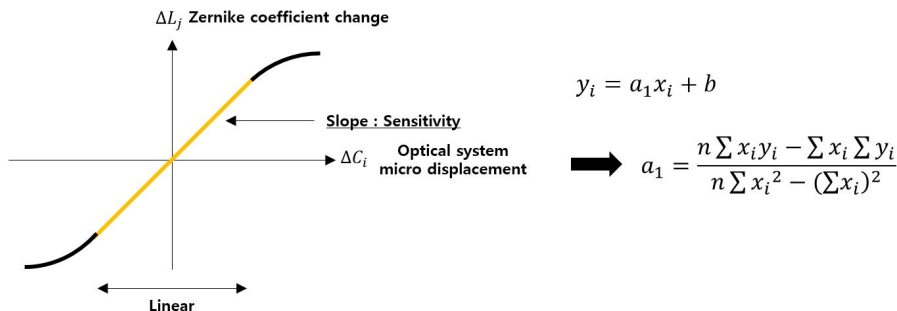


Fig. 6. Lens variable & sensitivity using least-squares fitting.

나르시시스 현상이란 적외선 광학계의 역 반사(reverse reflection)에 의해 극저온으로 냉각된 검출기의 상이 맺히는 현상으로 발생시 이미지의 배경 복사를 줄이므로 물체와 배경의 구분이 어려워진다. 나르시시스 계산의 경우 나르시시스 강도 비율(Narcissus intensity ratio, NIR)과 나르시시스 배경 온도 차(Narcissus induced temperature difference, NITD)를 계산함으로써 수식으로 표현할 수 있다. 나르시시스 강도 비율(NIR) 최대 각을 면 s 에 대해 정의한 뒤, 초점 면에서 주변광선의 각을 u_0 라고 했을 때 다음과 같이 정의된다^[13].

$$NIR = \frac{\sin^2 u_s}{\sin^2 u_0} = \frac{\Omega_s}{\Omega_0} \quad (8)$$

나르시시스 배경 온도 차(Narcissus induced temperature difference, NITD)는 각 렌즈의 면에서 발생하는 나르시시스 강도 비율(Narcissus intensity ratio, NIR)를 반사율과 복사에너지 수렴향을 곱한 것으로 나타낼 수 있다.

$$NITD = \sum_{j=1}^{scn-1} NIR_j r_j \frac{t_j^2 (W_{HOV} - W_{DET})}{(\Delta W / \Delta T)_{BAC}} \quad (9)$$

$$= \sum_{j=1}^{scn-1} NIR_j \frac{t_j^2}{t_0} r_j \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\frac{w(\lambda, T_{HOV}) - w(\lambda, T_{DET})}{\lambda} \right] \frac{\lambda}{\lambda_2} d\lambda \quad (10)$$

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial w(\lambda, T_{BAC})}{\partial T} \frac{\lambda}{\lambda_2} d\lambda$$

위 식에서 W_{HOV} , W_{DET} 는 각각 하우징복사에너지(w)와 검출기의 복사에너지(w)를 나타내며, T_{HOV} , T_{DET} , T_{BAC} 는 각각 하우징의 온도($^{\circ}K$), 검출기의 온도($^{\circ}K$), 배경의 온도($^{\circ}K$)를 나타낸다. 광학계에서 콜드실드는 이미지 평면 근처에 있으며, 주변 광선(marginal ray)이 편차 없이 면을 가로지르게 된다면 나르시시스 기여도가 높게 나올 것이다. 이는 입사하

는 주변 광선의 각이 주광선의 높이가 0으로 근접할 때를 나타낸다.

III. 광학계 분석

3.1. 분석 대상 적외선 광학계

분석 대상의 중적외선 광학계는 전자광학 대역($0.6\sim 0.8 \mu m$)과 레이저($1.064 \mu m$) 공통의 개구를 가지는 이중시야 광학계이며, 빔 축소 전단 광학계, 줌 렌즈 그룹, 릴레이 렌즈 그룹, 콜드스탑 공액 광학계 및 냉각 적외선 검출기로 구성되고 광학계의 이중 시야 ($1.50^{\circ} \times 1.20^{\circ}$, $5.40^{\circ} \times 4.32^{\circ}$)는 두 개의 렌즈를 삽입하는 방식이다^[11].

전단 광학계는 넓은 스펙트럼 영역에서 우수한 투과율을 갖기 위해 BaF₂, MgF₂, ZnS의 재질로 설계되었기 때문에 외부 열에 의한 영향을 많이 받는다. 본 중적외선 광학계의 검출기는 1280×1024 의 해상도를 가지고 픽셀의 크기는 가로, 세로 $15 \mu m$ 이며, 검출기의 크기는 가로 $19.2 mm$, 세로 $15.3 mm$ 이고 f -number는 5.3이다. 표 1은 분석 대상 적외선 광학계 사양에 대해 정리하였다. 그림 7은 펼쳐진 광학계 광선 추적도를 보여주고 있다.

Table 1. Design requirements of IR optical system

Wavelength range	3.6~4.9 μm
Sensor array format	1280 × 1024
Sensor pixel size	15 μm × 15 μm
Sensor size	19.2 mm × 15.3 mm
f -number	$f/5.3$
Effective focal length	203.57 mm (NFOV), 733.34 mm (WFOV)
Field of view (FOV)	1.5° × 1.2° (NFOV), 5.4° × 4.3° (WFOV)
MTF	≥ 10% @33 lp/mm at the on-axis
Distortion	≤ 2%
Relative illumination	≥ 70%

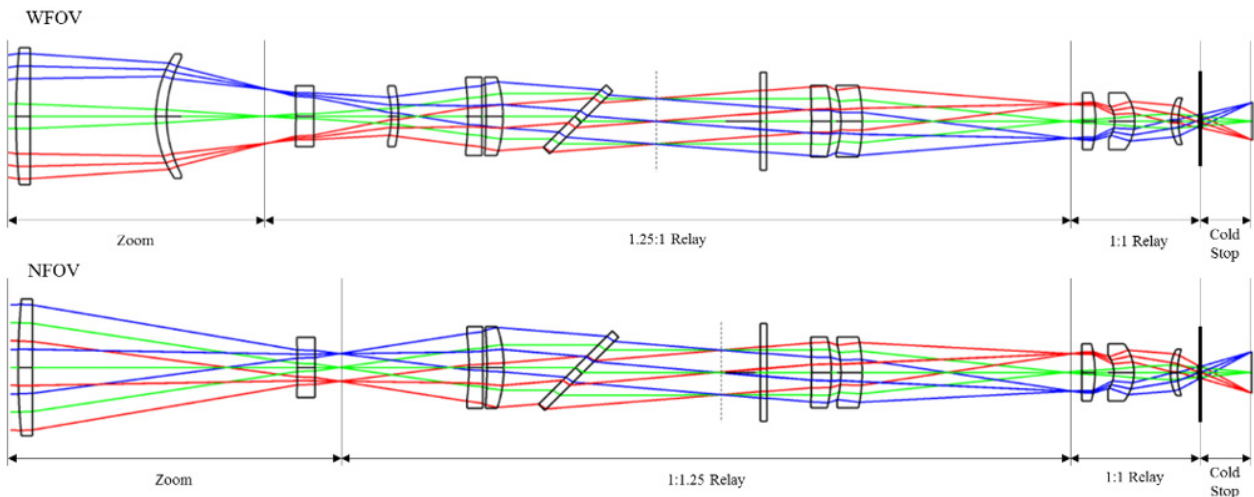


Fig. 7. Two optical relay and cold stop conjugation layouts for the NFOV and WFOV IR paths^[11].

3.2. 적외선 광학계 비열화 분석

3.2.1. 적외선 광학계 민감도 분석 및 보상자 선정

본 적외선 광학계 분석에 앞서 비열화를 위한 민감도 조사 및 보상자 선정을 진행하였다. 민감도 조사는 주요 조립 오차인 축상 변위 오차(Δz , 단위: mm) 및 기울기 오차($\Delta\theta_x$,

$\Delta\theta_y$, 단위: mrad)에 대하여 수행되었다. 그림 8은 민감도 조사에서 적용한 렌즈 이름 및 해석 결과 선정된 보상자 그룹의 위치를 보여주고 있으며, 표 2는 협시야 모드 경로 상의 렌즈에 대한 민감도 조사 결과를 놓았다. 광시야 모드 경로 상에서도 유사한 결과를 보이고 있다.

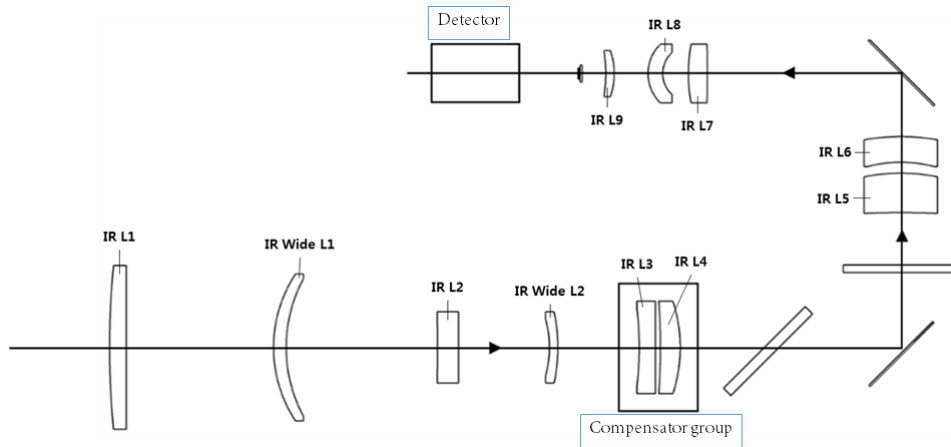


Fig. 8. Folded optical layout of the dual FOV optics with labeling and the indication of the selected compensator group.

Table 2. Sensitivity of the IR narrow optics. Coefficients of Zernike polynomials are expressed in waves

Components	Tolerance (mm, mrad)	Z4 (Def)	Z5 (Ast_45)	Z6 (Ast_0)	Z7 (Cma_X)	Z8 (Cma_Y)	Z11 (Sph)	
IR L1	Δz	0.1	0.0690	0.0000	0.0077	0.0019	0.0000	0.0003
	$\Delta\theta_x$	0.3	-0.0131	0.0000	0.0037	-0.0135	0.0000	-0.0005
	$\Delta\theta_y$	0.3	-0.0023	0.0000	0.0023	-0.0029	0.0000	0.0000
IR L2	Δz	0.1	0.0088	0.0000	0.0009	0.0004	0.0000	0.0000
	$\Delta\theta_x$	0.3	-0.0039	0.0000	0.0020	-0.0006	0.0000	0.0000
	$\Delta\theta_y$	0.3	-0.0011	0.0000	0.0004	-0.0004	0.0000	0.0000
IR L3	Δz	0.1	0.3132	0.0000	0.0306	0.0022	0.0000	0.0042
	$\Delta\theta_x$	0.3	-0.1504	0.0000	0.0783	0.0480	0.0000	0.0008
	$\Delta\theta_y$	0.3	0.0036	0.0000	0.0021	0.0001	0.0000	-0.0002
IR L4	Δz	0.1	0.3836	0.0000	0.0376	0.0035	0.0000	0.0045
	$\Delta\theta_x$	0.3	-0.1101	0.0000	0.0476	0.0440	0.0000	0.0003
	$\Delta\theta_y$	0.3	-0.0052	0.0000	0.0084	0.0065	0.0000	-0.0002
IR L5	Δz	0.1	0.3065	0.0000	0.0373	0.0114	0.0000	0.0116
	$\Delta\theta_x$	0.3	-0.1267	0.0000	0.0577	-0.0714	0.0000	-0.0060
	$\Delta\theta_y$	0.3	0.0000	0.0000	0.0033	0.0392	0.0000	0.0006
IR L6	Δz	0.1	0.2667	0.0000	0.0329	0.0113	0.0000	0.0113
	$\Delta\theta_x$	0.3	-0.1092	0.0000	0.0520	-0.0979	0.0000	-0.0052
	$\Delta\theta_y$	0.3	-0.0158	0.0000	0.0068	-0.0376	0.0000	-0.0009
IR L7	Δz	0.1	0.0224	0.0000	0.0023	-0.0018	0.0000	0.0000
	$\Delta\theta_x$	0.3	-0.0105	0.0000	0.0015	-0.0036	0.0000	0.0008
	$\Delta\theta_y$	0.3	-0.0047	0.0000	0.0045	0.0090	0.0000	-0.0010
IR L8	Δz	0.1	0.0039	0.0000	-0.0020	-0.0018	0.0000	0.0000
	$\Delta\theta_x$	0.3	0.0043	0.0000	0.0030	0.0072	0.0000	-0.0010
	$\Delta\theta_y$	0.3	0.0018	0.0000	0.0014	0.0052	0.0000	-0.0008
IR L9	Δz	0.1	0.0123	0.0000	0.0020	0.0010	0.0000	-0.0002
	$\Delta\theta_x$	0.3	-0.0175	0.0000	0.0313	-0.0076	0.0000	-0.0002
	$\Delta\theta_y$	0.3	-0.0134	0.0000	0.0072	0.0009	0.0000	0.0006

앞서 그림 8에 표현되어 있듯이, 민감도 해석 및 렌즈 이동 구현의 편이성을 모두 고려하여, 렌즈 그룹 (IR L3 및 IR L4) 을 비열화 보상자로 선정하였으며, 추가의 해석 결과 렌즈 그룹의 축상 이동에 대하여 초점 이동이 선형적으로 발생하고, 추가의 수차 발생량도 크지 않음을 확인하였다. 그림 9는 보상자 렌즈 그룹의 광축 이동에 대한 주요 수차 발생량을 보여주고 있다.

3.2.2. 적외선 광학계 비열화 분석

분석 대상 적외선 광학계는 BaF₂, MgF₂, ZnS, Si, Ge 와 같은 광학재료들로 구성되어있다. 이러한 광학재료들은 온도에 따른 굴절률의 변화가 크고, 가시광 대역의 재료들에 비해 재료의 분산능이 상대적으로 작으며 광학계의 하우징이나 마운트 등 기구부품도 온도변화에 따라 수축 팽창하기 때문에 적외선 광학계는 비열화 분석이 필요하다. 온도 변화에 따라 발생하는 문제는 간단한 식으로 나타낼 수 있다.

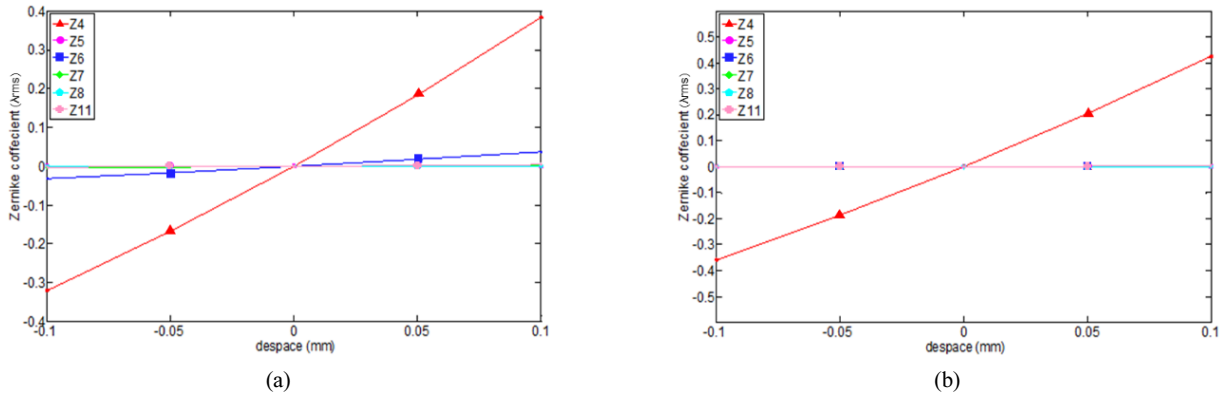


Fig. 9. Variation of low order Zernike polynomial coefficients in waves as the compensator lens group moves from -0.1 to +0.1 mm along the optical axis. (a) NFOV optical path, (b) WFOV optical path.

Table 3. Amount of thermal defocus and its corresponding moving distance of the compensator group

Temperature [°C]	WFOV defocus [mm]	NFOV defocus [mm]	WFOV compensator moving distance [mm]	NFOV compensator moving distance [mm]
-55	0.019	3.251	0.023	1.692
-50	0.019	3.064	0.022	1.581
-45	0.019	2.874	0.021	1.47
-40	0.019	2.679	0.02	1.358
-35	0.018	2.480	0.019	1.246
-30	0.017	2.276	0.017	1.134
-25	0.016	2.069	0.016	1.021
-20	0.015	1.857	0.014	0.909
-15	0.013	1.641	0.013	0.796
-10	0.012	1.420	0.011	0.682
-5	0.010	1.196	0.009	0.569
0	0.008	0.966	0.007	0.455
5	0.006	0.732	0.006	0.342
10	0.004	0.493	0.004	0.228
15	0.002	0.249	0.002	0.114
20	0.000	0.000	0.000	0.000
25	-0.002	-0.253	-0.002	-0.114
30	-0.004	-0.512	-0.004	-0.228
35	-0.007	-0.776	-0.006	-0.342
40	-0.009	-1.045	-0.008	-0.456
45	-0.012	-1.319	-0.010	-0.570
50	-0.014	-1.599	-0.012	-0.684

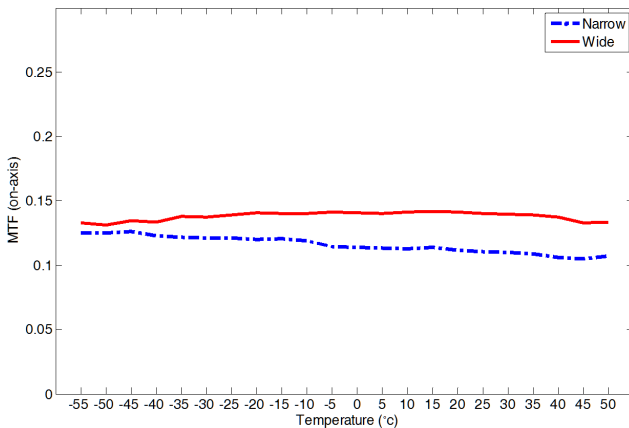


Fig. 10. MTF variation at the detector Nyquist frequency i.e. 33 cycles per mm as the working temperature varies from -55°C to 50°C. The optics is athermalized by the movement of the compensator lens group.

보통의 경우 열 영상 장비의 운용 온도는 -32~55°C 범위에서 비열화 분석을 진행하지만¹⁴⁾, 본 논문은 센서 개발 요구 조건에 따라 -55~50°C의 온도 변화 시 초점 이동 변화량을 분석하여 비열화 분석 및 보상자 이동량 설정을 진행하였다. 표 3에 온도 변화에 따른 각 시야 별 초점 이동량과 이를 보상하기 위한 보상자 렌즈 그룹의 필요 이동량을 정리하여 놓았다. 광시야 모드 보다는 협시야 모드에서 초점 이동량도 많이 발생하고, 이에 대응하는 보상자 이동량도 크다. 보상자 이동은 대략 초점 이동 반대 방향으로 0.52배만큼의 움직임이 필요하다.

그림 10은 작동 온도 구간(-55~50°C)에서 보상자 렌즈 그룹 이동을 적용한 이후 광축 시야의 MTF 변화를 보여주고 있다. 그림 상의 MTF는 검출기 Nyquist 주파수인 33 lp/mm에서 측정된 값으로 전 온도 구간에 걸쳐 요구 조건인 10% 이상의 성능을 유지하고 있다.

3.3. 적외선 광학계 나르시스 분석

나르시스 현상은 적외선 광학계의 검출기 온도가 -195.9°C (77.3 K)의 상황에서, 극저온 복사 에너지(cold radiation)와 광학계 하우징의 고온 복사에너지(warm radiation)에 의해 고스트 현상을 발생시킬 때 대물렌즈 앞에 들어오는 상의 품질을 저하시키는 현상을 의미한다. 적외선 검출기는 배경의 평균 온도를 기준으로 각각의 미세 온도 차를 감지하여 영상으로 구현하므로 배경과 물체의 온도 차이가 거의 없는 경우 물체의 분해가 불가능하다¹⁴⁾.

표 4에 근축광선 추적을 통해 렌즈 각 면의 나르시스를 분석하여 정리하였다. 분석은 파장 영역 3.6~4.9 μm 이고, 검출기 온도는 -195.9°C (77.3 K), 하우징과 배경온도는 -20°C (293.2 K)로 설정하여 진행하였다. 광학 면당 반사율은 1% 기준으로 분석하였다. 각 면의 NIR 값의 합이 클 수록 나르시스가 많이 발생하며, NITD 값은 1.496°C로 1.496°C 이하이면 나르시스에 의해 이미지를 구별할 수 없음을 의미

Table 4. Narcissus analysis result

Components	Narcissus intensity ratio	
	Front surface	Back surface
IR L1	0.002	0.015
IR WIDE L1	1.000	0.640
IR L2	0.140	0.026
IR WIDE L2	0.820	1.000
IR L2	0.625	0.032
IR WIDE L2	0.035	0.050
IR L3	0.940	0.942
IR L4	0.011	0.012
IR L5	0.045	0.797
IR L6	0.221	0.181
IR L7	1.000	0.221
IR L8	0.181	0.529
IR L9	0.888	0.918
Fore-optics group	0.117	
TOTAL	15.343	
NITD	1.496°C	

한다. 본 적외선 광학계 설계 시 NITD 값이 1.5°C 이하가 되도록 설계되었음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구에서 이중시야 중적외선 광학계의 비열화 및 나르시스 분석을 시도한 결과 넓은 운용 온도 범위를 갖는 적외선 광학계는 가장 큰 변수가 온도변화에 따른 굴절률 변화이며, 광학계 성능에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 분석 대상의 중적외선 광학계의 나르시스 분석 결과 NITD 값이 목표 사양인 1.5°C 이하가 되도록 설계된 것을 확인하였다. 또한, 비열화 분석 시 보상자를 정하기 위한 민감도 분석을 수행하였으며, 요구사항에 따라 -55~50°C의 온도 변화에서의 비열화를 수행하였다. 비열화 후 MTF 해상력을 확인한 결과 보상자 렌즈를 통해 광학계 요구조건인 33 lp/mm에서 광축 상 10% 이상의 성능을 유지하는 것을 확인하였다.

References

1. R. E. Aldrich, "Three elements optically compensated two position zoom for commercial FLIRs," Proc. SPIE **2539**, Zoom Lenses (1995).
2. D. W. Anderson, "M1A2 tank commander's independent thermal viewer optics: optics design perspective," Proc. SPIE **1970**, 128-138 (1993).
3. M. Norland and A. Rodland, "Design of high performance IR sensor," Proc. SPIE **2269**, 462-471 (1994).
4. M. C. del la Fuente, "A compact dual FOV objective for 3-5 μm waveband," Proc. SPIE **3061**, 348-355 (1997).

5. M. N. Akram, "Design of a dual field-of-view optical system for infrared focal plane arrays," Proc. SPIE **4768**, 13-23 (2002).
6. M. Meftah, F. Montmessin, O. Korablev, A. Trokhimovsky, G. Poiet, and J.-B. Bel, "High-resolution infrared detector and its electronic unit for space application," Proc. SPIE **9469**, 946905 (2015).
7. J. W. Howard and I. R. Abel, "Narcissus: reflections on retroreflections in thermal imaging systems," Appl. Opt. **21**, 3393-3397 (1982).
8. L. M. Scherr and H. J. Orlando, "Narcissus considerations in optical design for infrared staring arrays," Proc. SPIE **2864**, 442-452 (1996).
9. M. N. Akram, "Simulation and control of narcissus phenomenon using nonsequential ray tracing. I. Staring camera in 3-5 μm waveband," Appl. Opt. **49**, 1185-1195 (2010).
10. M. Bayar and O. F. Farsakoglu, "Mechanically active athermalization of a forward looking infrared system," Infrared Phys. Technol. **43**, 91-99 (2002).
11. D. Jeong, J. H. Lee, H. Jeong, C. M. Ok, and H.-W. Park, "Infrared dual-FOV optical system design with EO/laser common-aperture optics," Curr. Opt. Photon. **2** (2018) (in publication).
12. J. Huddleston, A. Symmons, and R. Pini, "Comparison of the thermal effects on LWIR optical designs utilizing different infrared optical materials," Proc. SPIE **9070**, 90702E (2014).
13. R. Guodong, Z. Liang, L. Weihua, and P. Xiaodong, "Method of narcissus analysis in infrared system based on ASAP," Proc. SPIE **9795**, 97952J (2015).
14. S. H. Kim, G. B. Ahn, J. C. Jung, and M. S. Jo, "Design of two zoom infrared camera using noise uniformity correction by shutter lens," Korean J. Opt. Photon. **18**, 137-139 (2007).