

Autofocusing Mechanism of a Triple-Magnification Infrared System

Hyojung Jung[†], Suseong Jeong, Yunseok Yang, Yongchun Lee, and Jeongsu Han

Image System Team, Hanwha Systems, 188, Pangyoeyeok-ro, Bundang-gu, Seongnam 13524, Korea

(Received October 19, 2020; Revised October 30, 2020; Accepted November 2, 2020)

The optics used in an infrared imaging system has a strong refractive-index change according to temperature, so an autofocus control function is essential for a military infrared imaging system with a wide operating-temperature range. In this study, we design a triple-magnification infrared imaging system, and to compensate for the change in refractive index according to temperature we measure the change in the lens focus according to temperature. The autofocus control function was implemented by using the measured movement amount, and we could obtain an image with satisfactory resolution performance over a wide range of operating temperatures.

Keywords: Infrared image, Auto focusing, Athermalization

OCIS codes: (110.3080) Infrared imaging; (260.3060) Infrared

3중 배율 적외선 영상 장비의 자동 초점 조절 방안

정효중[†] · 정수성 · 양윤석 · 이용춘 · 한정수

한화시스템 영상시스템팀

Ⓞ 13524 경기도 성남시 분당구 판교역로 188

(2020년 10월 19일 받음, 2020년 10월 30일 수정본 받음, 2020년 11월 2일 게재 확정)

적외선 영상 장비에 사용되는 광학계는 온도에 따른 굴절률의 변화가 심해 운용 온도 범위가 넓은 군용 적외선 영상장비에는 자동초점조절 기능이 필수적이다. 본 논문에서는 3중 배율의 적외선 영상 장비를 설계하고 해당 장비의 온도에 따른 굴절률 변화를 보상하기 위하여 온도 챔버에 영상 장비와 시준기를 설치하여 온도에 따른 렌즈 초점 이동량 변화를 측정하였다. 측정된 이동량을 활용하여 자동초점조절 기능을 구현하였으며 두 번의 온도 시험을 통해 -35~71°C의 넓은 운용 온도범위에서 상온의 MTF 성능과 동등한 수준의 분해능 성능의 영상을 확인하였다.

Keywords: 적외선 영상, 자동초점조절, 비열화

OCIS codes: (110.3080) Infrared imaging; (260.3060) Infrared

I. 서 론

적외선 영상 장비는 물체의 온도를 영상화하여 전시하는 장비로 빛이 없는 상황에서도 영상 전시가 가능하며 목표물의 온도를 확인할 수 있다. 이런 장점 때문에 다양한 체계에 장착되어 목표물을 탐지하는 역할을 수행하고 있다.

적외선 대역의 에너지를 검출하기 위해 적외선 광학계를 활용하며, 이는 주로 Si, Ge, ZnS와 같은 재료들로 제작된다. 이러한 소재를 사용하여 제작된 렌즈의 경우 온도에 따른 굴절률의 변화가 크게 나타난다. 또한 광학계가 장착되어 있는 경통, 마운트 등 기구 부품들 역시 온도에 따른 수축과 팽창을 하기 때문에 이런 변화들로 인해 광학 장비가 제 성능을

발휘하지 못하는 상황이 발생한다. 온도 변화에 따른 광학계, 기구 부품류의 변화에도 일정한 성능의 영상을 전시하기 위하여 대물렌즈의 온도를 활용한 자동초점 조절 기능을 설계하였다¹⁻³⁾.

II. 적외선 영상 시스템 설계

적외선 영상 시스템은 광학계와 중적외선 검출기, 전자기판 및 하우징 등으로 구성이 된다. 물체에서 발생하는 열에너지는 적외선 광학계를 거쳐 적외선 검출기의 검출면에 모이게 된다. 검출기는 검출면에 모인 적외선 에너지를 전자 에너지로 변환하는 역할을 수행한다. 여기서 발생한 전자 에

[†]E-mail: hj11.jung@hanwha.com, ORCID: 0000-0002-5069-5635

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

너지의 아날로그 출력을 디지털화하고 불균일 보정, 불량화소 보정 등의 디지털 영상 처리를 거쳐 최종 적외선 영상으로 변환한다.

2.1. 광학계 설계

본 적외선 광학계는 헬기 및 항공기에 장착되어 운용되기 때문에 목표물을 탐지하고 빠르게 인지, 식별하여야 한다. 이를 위해 광시계, 중시계, 협시계의 단계중 형태의 광학계 설계가 요구된다. 또한 전차와 함선 등 다양한 체계에 적용 가능한 15 inch Ball type의 시스템에 장착할 수 있도록 소형화 설계가 요구된다. 표 1은 본 장비의 적외선 광학계 설계 목표 사양이다.

목표 사양을 만족하는 광학계를 주어진 공간 안에 효율적으로 배치하기 위하여 협시계와 중시계는 배울 렌즈와 초점 렌즈로 구동하며, 광시계는 반사경이 삽입되어 시계를 변환할 수 있도록 설계하였다. 그림 1에 협시계, 중시계 및 광시계에서 사용된 광학계와 광경로를 표현하였다.

반사경2가 협, 중시계의 광학계로 삽입되면 협, 중시계 광학계를 통과한 에너지가 검출기로 전달되고, 반사경2가 제거 되면 반사경2가 광시계 광경로로 삽입되어 광시계 광학계를 통과한 에너지가 검출기에 전달되는 구조로 설계가 되었다.

Table 1. Design requirements of IR optical system

Specification	Value
Wavelength range	3.7-4.8 μm
Sensor array format	1280 × 1024
Sensor pixel size	15 μm × 15 μm
Sensor size	19.2 mm × 15.36 mm
F-number	f/5.5
Focus length	874 mm (NFOV)
	264 mm (MFOV)
	53 mm (WFOV)
Field of view (FOV)	1.25° × 1.00° (NFOV)
	4.10° × 3.28° (MFOV)
	20.00° × 16.00° (WFOV)

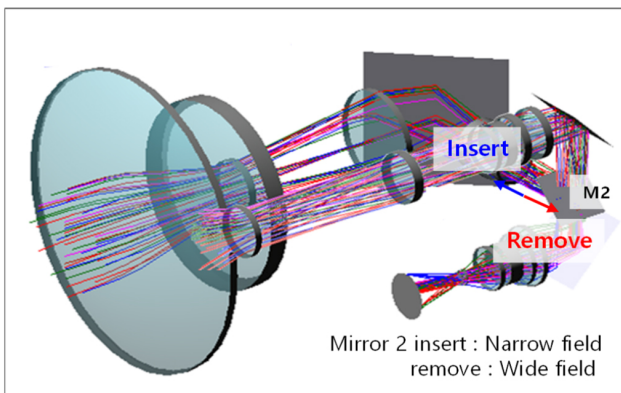


Fig. 1. Optical layout.

그림 2는 협시계와 중시계의 광경로를 보여준다. 협시계에서 중시계로 변환 시, 배울 렌즈는 대물렌즈 방향으로 이동하며 초점 렌즈는 반사경 방향으로 이동한다.

그림 3은 광시계의 광경로를 보여준다. 협, 중시계와 광시계는 반사경 2가 삽입되어 시계 변환이 되도록 하였다.

그림 4-6은 협, 중, 광시계에서의 광학계 MTF 성능을 시뮬레이션한 결과이다. 모든 배울에 대해 14 cycle/mm에서 40% 이상의 성능을 확보하였다.

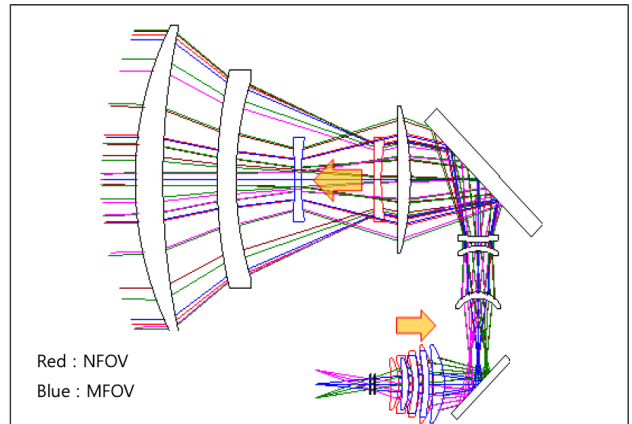


Fig. 2. Optical layout of NFOV and MFOV IR paths.

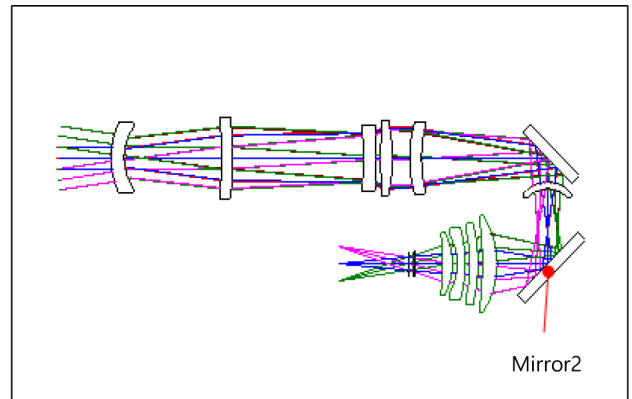


Fig. 3. Optical layout of WFOV IR path.

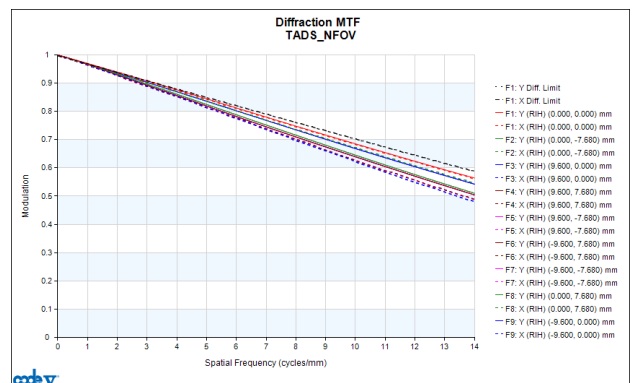


Fig. 4. MTF of NFOV.

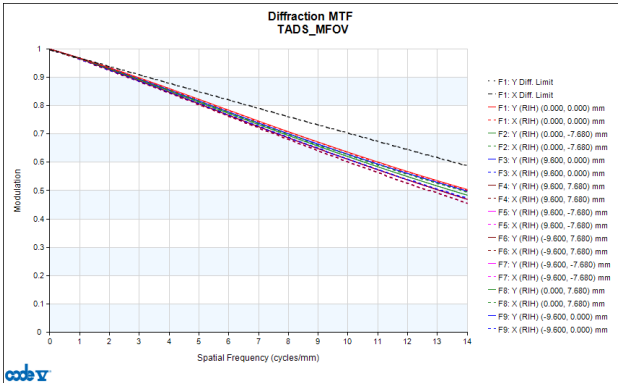


Fig. 5. MTF of MFOV.

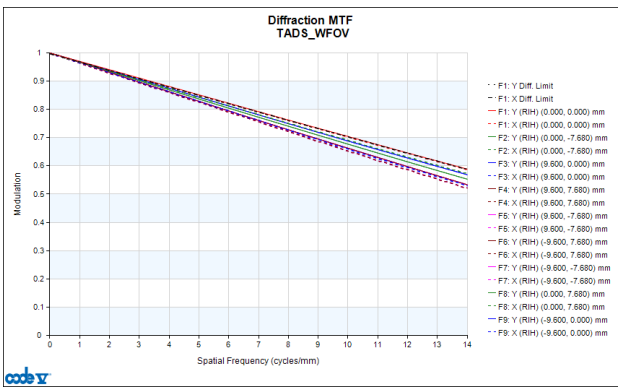


Fig. 6. MTF of WFOV.

2.2. 비열화 분석

중적외선 광학계 제작에 사용되는 재료는 Ge, Si, ZnS 등으로 온도에 따른 굴절률 변화가 크다는 단점이 있다. 그래서 사계절이 뚜렷한 우리나라의 야외에서 주로 사용되는 적외선 영상 장비의 경우 장비의 성능 유지를 위하여 비열화 보상이 필요하다. 비열화 보상으로는 기계적 능동식 방법을 활용하였다. 장비의 기본 기능 수행을 위하여 초점 렌즈와 배울 렌즈를 모터를 이용하여 이동하도록 설계가 되었고 이를 활용하여 MTF 성능이 유지될 수 있도록 비열화 보상을 수행하였다^{3,4)}.

사용된 광학 재질 중 Ge는 열팽창 계수(α) $58 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, 굴절률 변화율 $396 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, Si은 열팽창 계수 $25.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, 굴절률 변화율 $150 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, ZnS은 열팽창 계수 $65 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, 굴절률 변화율 $54.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 경통 재질은 열팽창 계수 $234 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 의 값을 입력하고, 초점 렌즈 및 배울 렌즈의 위치에 다른 MTF 성능 변화를 분석하여 아래 비열화 시뮬레이션 결과들을 얻을 수 있었다.

협시계 상태에서 온도에 따른 렌즈 이동량을 그림 7을 통해 확인할 수 있다. 배울 렌즈를 약 -0.6~0.6 mm 정도 선형적으로 이동시키고, 초점 렌즈는 0.1 mm 이내로 미세조정을 통해 -35~71°C 온도 범위에서 광학 성능 유지가 가능하도록 하였다.

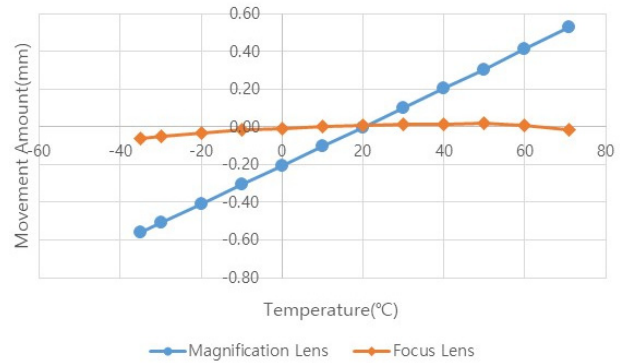


Fig. 7. Athermalization data of narrow field-of-view.

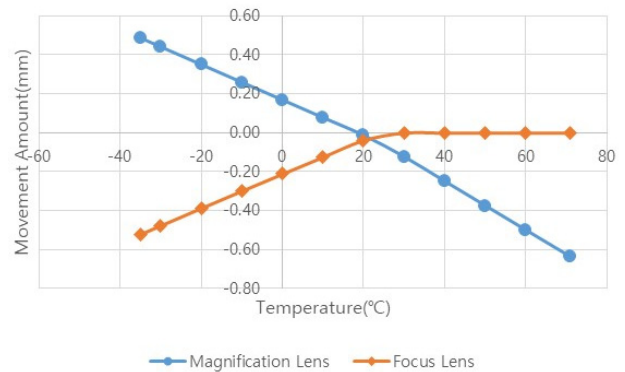


Fig. 8. Athermalization data of medium field-of-view.

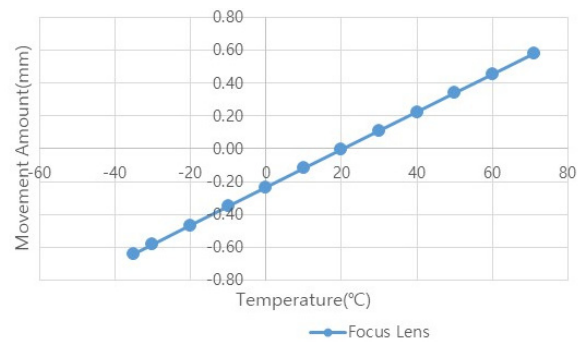


Fig. 9. Athermalization data of wide field-of-view.

중시계 상태에서 온도에 따른 렌즈 이동량을 그림 8을 통해 확인할 수 있다. 배울 렌즈가 선형적으로 이동하도록 설정하고 초점 렌즈의 이동량을 분석하였다. 저온 구간에서는 초점 렌즈 이동량이 선형적인 형태를 보였지만, 고온 구간에서 초점 렌즈의 이동이 없이 상온에서와 동일한 위치에 있는 것을 확인하였다.

광시계 상태에서 온도에 따른 렌즈 이동량을 그림 9를 통해 확인할 수 있다. 초점 렌즈 하나로 비열화 보상을 진행한다. 초점 렌즈를 약 -0.6~0.6 mm 구간에서 선형적으로 이동하여 비열화 보상을 수행하였다.

2.3. 자동초점조절 구현

광학계 비열화 분석 데이터를 기반으로 주기적으로 대물렌즈의 온도를 측정하고 온도에 따라 초점조절렌즈와 배울 렌즈가 적절한 위치로 이동하여 온도가 변화하여도 장비의 성능이 저하되지 않도록 광학구동기판을 설계하였다. 표 2는 대물렌즈 온도의 변화에 따른 렌즈의 이동량을 10°C 단위로 분석한 자료이다.

2.3.1. 하드웨어 설계

본 장비를 위하여 제작된 광학구동기판은 TI사의 TMS320 F28335 제품을 코어로 사용하였다. CPU에 내장된 12 bit ADC를 사용하여 온도를 측정하였다. 렌즈 구동에는 TI사의 DRV8880 모터 드라이버를 사용하여 스텝모터를 제어하도록 하드웨어를 구성하였다.

정밀한 자동초점조절 기능 구현을 위해서는 정확한 온도 측정이 우선되어야 한다. 이를 위하여 대물 렌즈에 부착 가능한 온도센서 중 높은 정밀도를 가진 AD590 온도센서를 선정하였다. 해당 온도센서는 아날로그 출력 방식의 온도 센서로 주변 회로의 구성 방식이 성능을 좌우한다.

온도센서의 정밀도를 최대한 높이기 위해 그림 10과 같이 증폭 회로를 설계하였다. 입력 전류를 I_i , 1차 증폭기를 거친 전압을 V_x , 최종 출력 전압을 V_{out} 이라 하면

$$V_x = R_i \times I_i \times \frac{R_1 + R_2}{R_1} \tag{1}$$

$$V_{out} = \frac{R_4 \times V_x + (R_3 + R_4) \times V_{ref}}{R_3} \tag{2}$$

1차 증폭기의 출력인 V_x 는 (1)과 같이 구할 수 있으며 최종 출력은 식 (2)에 식 (1)의 결과를 대입하여 구할 수 있다.

온도센서의 스펙을 확인해보면 -55~125°C 범위에서 선형적으로 218~426 mA의 전류를 출력한다. 해당 범위의 전류값을 I_i 에 대입하게 되면 증폭 회로의 최종 출력은 37 mV~3 V가 되는 것을 확인할 수 있다. CPU 내부 ADC의 경우 입력 범위는 3 V까지이며, 12 bit 스펙이므로 -55~125°C의 온도를 0.05°C의 정밀도로 측정할 수 있다.

초점 렌즈, 배울 렌즈의 이동을 위하여 선형 이동이 가능한 구동부를 설계하였다. 스텝모터를 구동하면 볼스크류에 연결되어 있는 렌즈조립체가 리니어 가이드를 따라 움직이는 구조이다.

그림 11과 같은 구조로 초점 렌즈, 배울 렌즈 구동부를 설계하였다. 스텝모터는 정격 전류가 2 A/Phase로 최대 토크 200 mN·m의 42각 스텝모터를 선정하였다. 제어가 간편하며 높은 토크로 렌즈 구동에 무리가 없는 제품을 선정하였다. 스텝모터 제어를 위한 모터드라이버로는 2 A 이상 출력이 가능한 DRV8880을 선정하였다.

Table 2. Athermalization table

Temperature [°C]	Narrow FOV		Mid FOV		Wide FOV
	Magnification lens	Focus lens	Magnification lens	Focus lens	Focus lens
-35	-0.55	-0.055	0.5	-0.517	-0.638
-30	-0.5	-0.044	0.45	-0.473	-0.583
-20	-0.4	-0.033	0.35	-0.385	-0.462
-10	-0.3	-0.022	0.25	-0.297	-0.352
0	-0.2	-0.011	0.15	-0.209	-0.231
10	-0.1	0	0.1	-0.132	-0.121
20	0	0	0	0	0
30	0.1	0.011	-0.1	0	0.11
40	0.2	0.011	-0.25	0	0.22
50	0.3	0.022	-0.35	0	0.341
60	0.4	0	-0.5	0	0.451
71	0.55	-0.011	-0.65	0	0.583

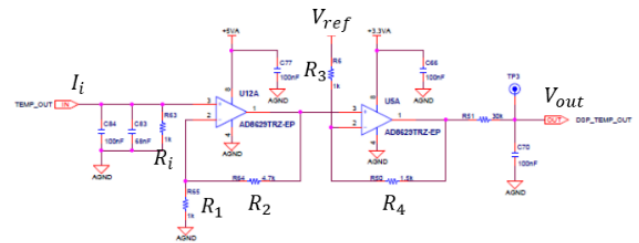


Fig. 10. Amplifier for temperature sensor.

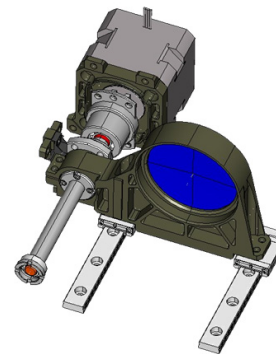


Fig. 11. Lens driving assembly.

2.3.2. 소프트웨어 설계

광학구동기판은 운용자의 명령에 따라 배울 변환, 초점 조절 등의 기능을 수행하고, 구동부 및 센서들의 상태를 확인한다. 그림 12는 광학구동기판 소프트웨어의 순서도를 보여준다. 장비에 전원이 인가되면 바로 구동부 초기화를 진행한다. 초기화가 완료되면 주기적으로 온도센서의 값에 따라 자동초점조절 수행 혹은 상위조립체로부터 수신된 메시지를 처리하고 수행결과를 보고한다. 장비에 전원이 인가되어 있는 동안 이 과정을 반복적으로 수행한다.

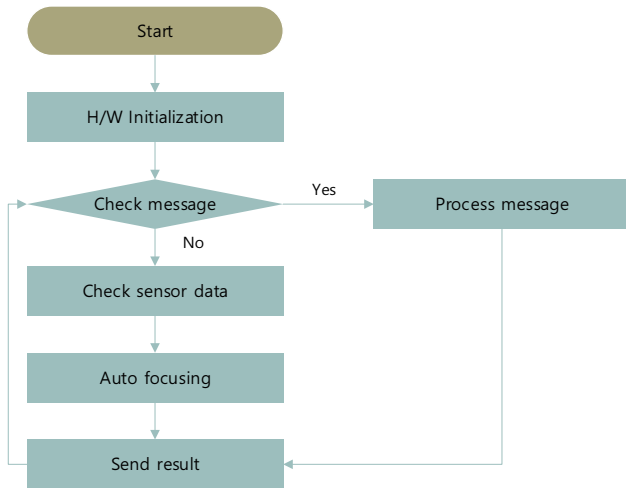


Fig. 12. Active diagram for software of the optics driving board.

장비에 전원이 인가되면 구동부 초기화를 수행한다. 구동부 특성상 현재 렌즈의 위치를 알 수 없으므로 광센서를 이용하여 초기 위치를 확인한다. 구동부를 광센서 방향으로 이동시키고, 광센서의 값이 확인되면 구동을 멈춘다. 이후 초기화 위치(광시계)로 구동부를 이동한다.

자동초점조절을 위하여 비열화 시험 수행 결과를 10°C 단위로 광학구동기판에 저장한다. 하지만 대물렌즈의 온도가 10°C 변화할 때마다 자동초점조절을 수행할 경우 중시계, 험시계에서는 초점 민감도 때문에 분해능 성능이 매우 떨어지는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 렌즈의 위치는 10°C 단위로 저장하지만 이를 10등분하여 온도가 1°C 변화할 때마다 렌즈를 이동할 수 있도록 소프트웨어를 설계하였다.

III. 실험 장치 및 방법

3.1. 실험 장치

열영상장비의 비열화 시험을 위해 사용되는 실험 장치는 온도별 광학 성능을 확인할 수 있는 시준기(collimator)이다. 시준기의 역할은 원거리의 영상을 모사하는 장치로서, 원거리에 위치한 타겟을 관측하는 장비의 성능을 실험실 환경 및 온도가 변화하는 환경에서 구현하기 위한 실험 장치이다.

시준기는 일반적으로 광학계, 타겟, 광원으로 구성된다. 시준기는 원거리에서 오는 영상의 파면들이 평면파 형태로 오기 때문에 최대한 평면파 형태, 즉 평행광을 모사해주는 실험 장치이고 이에 맞게 광학계가 구성되어 있다. 광학계는 두 가지 형태로 나누어지는데, 광원을 통해 나오는 광이 투과형 광학계(렌즈 타입)를 통하여 평행광을 모사해주는 시준기, 반사형 광학계를 통하여 평행광을 모사해주는 시준기로 분류할 수 있다. 일반적으로 투과형 시준기는 일반 구경, 반사형 시준기는 대구경 장비를 확인할 때 사용된다.

타겟은 장비의 특성에 맞게 열상 장비의 경우, 4 bar 타겟, EO 카메라 장비는 USAF 타겟 형태를 사용하고, 타겟의 크기는 장비의 요구사항에 따라서 조정된다. 장비의 요구사항

Table 3. Specification of the collimator

Specification	Value
Focal length (mm)	3000 mm
Aperture (mm)	300 mm
Weight (kg)	300 kg
Target resolution (cy/mrad)	7 cy/mrad (NFOV) 2 cy/mrad (MFOV) 0.5 cy/mrad (WFOV)

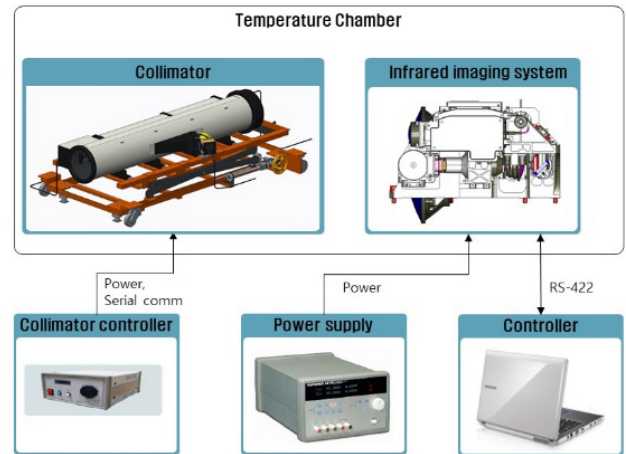


Fig. 13. Setting for athermalization test.

에 따라 타겟의 형태 및 크기는 각각 다르게 제작될 수 있다.

광원 역시 장비의 특성에 따라 열상 장비의 경우 열을 내는 광원을 사용하고, EO 카메라 장비는 적분구 형태의 광원을 사용한다. 광원은 타겟 뒤에 위치하여 광원의 전체 면적이 균일한 세기의 광을 발산해야한다. 비열화 시험 시 광원을 조절할 때는 조절기가 챔버 외부에 있고 케이블로 연결이 되어 있어서 온도별로 광원의 조건을 조절할 수 있도록 구성 되어 있다.

비열화 시험을 위해 사용되는 시준기는 챔버 내부에 위치하거나, 챔버 외부에 위치할 수 있는데 챔버 외부에 위치할 경우, 챔버 창의 투과되는 파장 영역을 장비가 관측하는 파장 영역과 맞추어야 한다. 만약, 열상 장비를 관측할 경우, 관측장도 열상 재질이 투과할 수 있는 재질로 창을 제작해야 한다. 챔버 내부에 시준기를 배치할 경우, 시준기는 온도 환경에 따라 타겟의 형태, 위치, 시준기의 광학부품 등의 변화가 최소가 되어야 하기 때문에 열팽창계수가 적은 기구물 및 광학 재질을 선정하여 제작하여야 한다.

이번 시험에서 사용된 시준기의 사양은 표 3과 같다. 시험 대상 장비와 시준기를 모두 온도 챔버 내부에 위치시킨 상태로 그림 13과 같이 장비를 구성하고 비열화 시험을 수행하였다.

3.2. 실험 방법

실험 방법은 온도 챔버 내부에 비열화 시준기와 장비를 놓고 시준기와 장비가 수평이 되도록 장착한 후, 챔버 내부에

온도를 조정하여 온도별 시준기에 장착된 타겟을 장비를 통하여 영상을 확인했을 때, 상온과 비슷한 수준의 분해능을 유지하는지 확인하는 방법으로 실험을 진행한다.

비열화 실험을 하기 전 상온 조건에서 분해능이 최대로 구현되는 구동부 초점 위치를 확인하여 기록하고, 비열화 실험 세팅을 완료한 후 챔버의 상온에서 분해능이 최대로 구현되는 구동부 초점 위치를 따로 기록한다. 실험실의 상온 조건과 챔버 내부의 상온 조건이 차이가 있는지 확인하고, 차이가 있으면 그 차이 값을 보정하여 실제 장비에 적용하도록 한다. 분해능을 확인할 때는 타겟의 중심이 장비의 중심에 최대한 오도록 위치시킨 후 실험을 진행한다.

비열화 실험을 위해서 온도 구간 및 범위를 설정하여야 한다. 챔버의 온도 구간을 10°C 또는 5°C 단위로 기준을 설정한다. 장비의 특성상 작은 온도 변화에도 분해능 성능이 변하는 장비는 온도 구간을 작게 설정한다. 온도 범위는 장비의 운용 환경에 맞게 설정한다. 본 장비의 경우, 장비의 운용 환경을 고려하여 -35~71°C 온도를 10°C 단위로 온도 구간을 설정하였다. 실험은 챔버 온도를 설정하고 2시간 정도의 안정화 시간을 가진 후 초점 구동부를 이동하여 영상의 분해능 성능이 구현되는지 확인하였다. 분해능 성능을 확인하고 각 렌즈 별 이동량을 확인하였다. 온도를 10°C 단위로 변화시키고 같은 작업을 반복하였다.

-35~71°C 범위에서 온도 별 렌즈 이동량을 확인하고 이를 콘솔 프로그램을 활용하여 적외선영상장비의 소프트웨어에 주입하였다. 소프트웨어가 주입된 상태로 다시 운용온도 범위 내에서 10°C 단위로 챔버를 운용하며 장비에 전원을 인가 하였을 때 별도의 초점 조절 없이 분해능 성능을 만족하는지 확인하였다.

3.3. 실험 결과

이번 비열화 실험은 두 가지 목표를 가지고 수행하였다. 위에서 수행한 비열화 분석 결과를 실제 장비에서 확인하는 것과 시험을 통해 얻은 데이터를 장비에 주입하여 자동초점 조절 기능을 구현하고 기능이 정상적으로 동작하는지 확인하는 것이다.

이번 실험에서는 적외선 영상 장비와 시준기를 온도 챔버 내부에 설치하고 10°C 단위로 영상 분해능 성능과 렌즈 이동량을 확인하였다. 시험 장비는 체계에 장착되어 밀폐된 상태가 아니었고 렌즈 및 기구물들이 노출되어 있는 상황임을 감안하여 1시간 30분 동안 해당 온도를 유지하여 열평형을 진행하였고, 30분 동안 렌즈 이동량 측정과 영상 분해능 성능을 확인하였다. 시준기에는 시험 장비의 특성을 고려하여 각 시계 별 성능 측정이 가능한 3-bar, 4-bar 타겟을 설치하였다.

그림 14~16은 첫 번째 실험을 통해 얻은 렌즈의 이동량 데이터이다. 시뮬레이션 결과와 유사한 데이터를 확인할 수 있었다. 광시계의 경우 초점 렌즈 하나만 이동하기 때문에 시뮬레이션 결과와 비슷하게 직선 형태의 렌즈 이동량을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

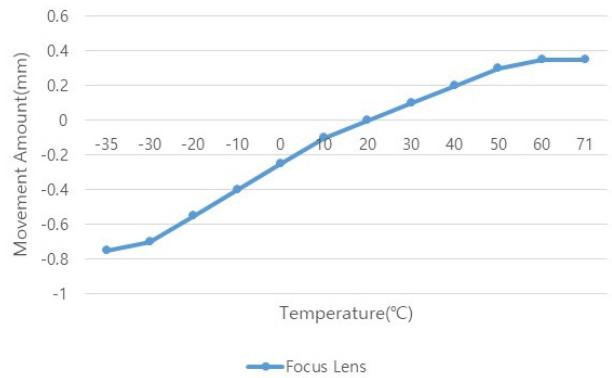


Fig. 14. Athermalization test data of wide field-of-view.

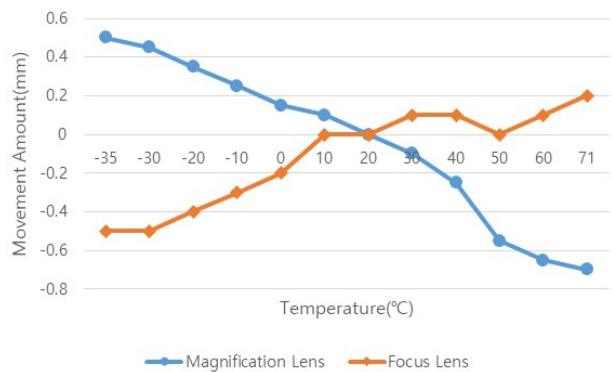


Fig. 15. Athermalization test data of mid field-of-view.

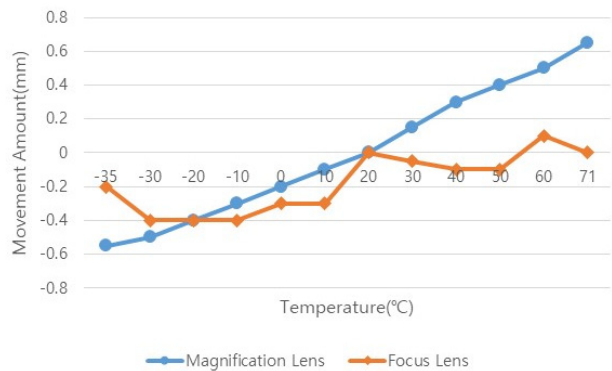


Fig. 16. Athermalization test data of narrow field-of-view.

중시계, 협시계의 경우 배울 렌즈와 초점 렌즈의 조합으로 비열화 보상이 이루어진다. 배울 렌즈는 초점렌즈보다 영상의 분해능 성능에 더 큰 영향을 주기 때문에 두 렌즈가 모두 직선 형태의 이동량을 보여주지 않았고, 최상의 분해능 성능을 위해 배울 렌즈를 우선 조절하다 보니 초점 렌즈의 이동량이 일부 시뮬레이션 결과와는 다른 형태를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

1차 실험을 통해 획득한 데이터를 적외선 영상 시스템에 삽입하여 자동초점조절 기능을 활성화한 후 2차 실험을 수행하였다. 2차 실험은 1차 실험과 동일한 방식으로 1시간 30분 열평형을 진행한 후 장비에 전원을 인가하였을 때 각 시

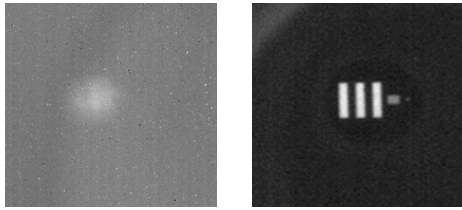


Fig. 17. Before & after autofocusing image of wide FOV at -35°C.

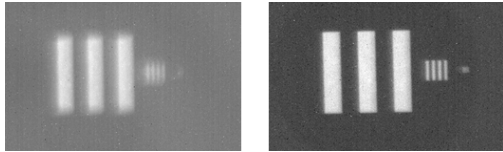


Fig. 18. Before & after autofocusing image of mid FOV at -35°C.

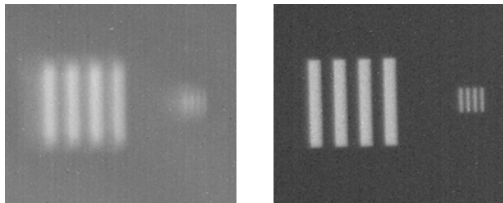


Fig. 19. Before & after autofocusing image of narrow FOV at -35°C.



Fig. 20. Before & after autofocusing image of wide FOV at 71°C.

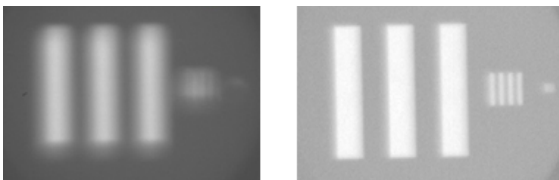


Fig. 21. Before & after autofocusing image of mid FOV at 71°C.

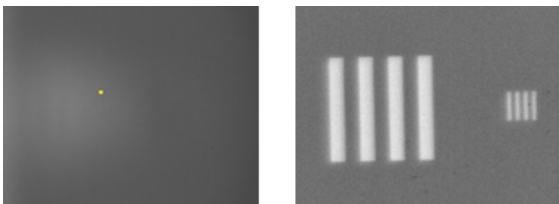


Fig. 22. Before & after autofocusing image of narrow FOV at 71°C.

계별로 영상 분해능 성능을 확인하는 방식으로 진행되었다. -35~71°C 범위에서 10°C 단위로 영상을 확인하였고, 광시계, 중시계, 협시계에서 모두 상온의 분해능 성능과 동등한 수준의 영상이 전시되는 모습을 확인하였다.

그림 17~22는 이번 실험의 최저 온도인 -35°C와 최고 온도인 71°C에서의 각 시계 별 자동초점조절 전과 후를 비교한 영상이다. 자동초점조절 수행 후 광시계에서는 0.5 cy/mrad 타겟이 확인 가능하며, 중시계에서는 2 cy/mrad, 협시계에서는 7 cy/mrad 타겟까지 분해가 되는 모습을 확인할 수 있다. 운용온도범위가 매우 넓은 편이기 때문에 최저, 최고온도에서는 영상의 분해능 성능이 매우 낮으며, 최고온도에서 협시계 영상의 경우 타겟의 형태조차 확인하기 힘들었지만 자동초점조절 기능을 활성화한 후 시계 별 목표 타겟이 정상적으로 분해되는 모습을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 3중배율 열영상장비에 대하여 -35~71°C 의 넓은 운용 범위에서 비열화시험을 수행하고 시험결과를 바탕으로 비열화 보상을 수행하는 자동초점조절기능을 구현하였다. 1차 실험에서는 상온 정렬 위치에서 온도별 영상을 확인하고 비열화 시뮬레이션 결과에 따라 렌즈를 이동한 후 미세 조절을 통해 초점 렌즈와 배율 렌즈의 위치를 확정하였다. 2차 실험에서는 1차 실험 결과를 주입하여 자동초점조절 기능을 활성화하여 온도별 영상을 확인하였다. 넓은 운용 온도 범위로 광학계와 기구물의 변화가 큰 편이었고, 최저, 최고 온도에서는 목표 타겟이 보이지 않을 정도로 분해능 성능이 떨어지는 상황이었다. 이를 1°C 단위로 배율 렌즈와 초점 렌즈를 동시에 이동하는 보상 방법을 택하여 큰 온도변화에도 모든 배율에서 최적의 분해능 성능의 영상을 획득할 수 있었다.

References

1. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging System* (Springer, NY, USA, 1975), Chapter 6.
2. Y. Jung, *Latest Technology Trend of Infrared Sensor* (Hongreung Co., Korea, 2016), pp. 25-113.
3. H.-S. Kim, S.-C. Choi, G.-W. Lee, Y.-C. Park, and H.-K. Kim, "Analysis and test of athermalization for 20:1 zoom thermal imaging system," *Korean J. Opt. Photon.* **12**, 281-288 (2001).
4. H.-S. Kim and C. M. Ok, "Anamorphic infrared camera with wide field of view and optomechanical automatic athermalization mechanism," *Korean J. Opt. Photon.* **26**, 187-194 (2015).