

Wide-angle optical design using high-resolution uncooled thermal detector

Jonghoon Lee*

Abstract

In this paper, we propose efficient design and construction of an infrared wide angle optical system with low distortion utilizing a high resolution detector for automobile application. The operational convenience and the recognition ability have been improved significantly by applying the high resolution uncooled thermal detector with wide angle optical design. The active athermalization mechanism is implemented so that the adjustment of the optical component of the system is to be made automatically according to the temperature change by motorized control. The modulation transfer function (MTF) is about 50% at the Nyquist frequency close the diffraction limit. The distortion is less than 5% at the edge field. As a result, a high-resolution uncooled thermal optical system with wide field of view (FOV) is assembled, aligned and its performance is tested successfully.

▶Keyword: infrared, athermalization, MTF, distortion

I. Introduction

본 논문은 고해상도 비넵각 검출기를 이용한 차량용 열상 광학 광학계의 설계 및 제작에 관한 내용을 기술하고 있으며 본 방안을 수행하기 위해 아래의 내용과 같은 기법을 적용하였습니다.

측이 가능하다. 이러한 이점으로 적외선 광학계는 군사장비로 개발되어 사용되어 왔으며, 최근에는 인공위성, 의료기기, 소방 등의 산업용으로 응용범위가 확대되어 왔다.

II. Preliminaries

모든 물체는 물리적으로 고유한 에너지를 방출한다. 이는 상온에 존재하는 물체는 모두 눈에 보이지 않는 적외선 영역의 에너지를 방출한다는 의미로, 물체의 특성에 따라 방출되는 에너지양에 차이가 있다. 적외선광학계는 물체에서 방출되는 적외선 영역의 복사 에너지를 감지하여 눈으로 볼 수 있게 해주는 장비이다. 따라서 적외선광학계는 물체에서 반사되는 빛의 세기 차이가 아닌 물체의 온도에 따른 복사에너지의 차이를 영상화한다. 이는 주간뿐만 아니라 빛이 없는 야간에도 물체를 감지하여 눈으로 볼 수 있게 하는 것을 의미한다. 또한 안개나 연막 같은 가시광 영역에서는 앞이 보이지 않는 상황에서도 관

국내의 운전 보조용 전자광학장비는 초반에는 군용으로 사용되었으며, 그 시작은 1970년대 0.4~0.7 μm 대의 가시광선을 이용하는 주간 잠망경이다. 그 이후로 1980년 중반부터 2000년대 초까지는 미광 증폭식 장비가 주류를 이루었으며, 2000년대 초반부터 현재까지는 열상장비가 주류를 이루고 있다.

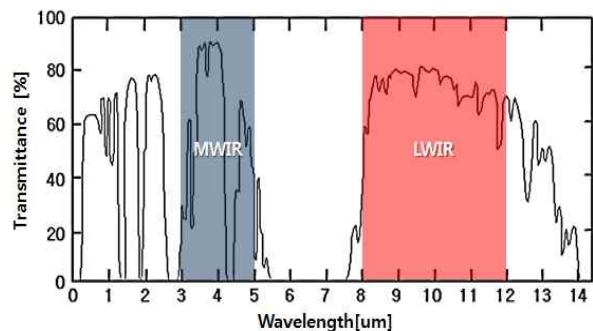


Fig. 1. atmospheric window

- First Author: Jonghoon Lee, Corresponding Author: Jonghoon Lee
- *Jonghoon Lee (jonghoon13.lee@hanwha.com), Electro-Optics Team, Hanwha Systems Company
- Received: 2017. 10. 11, Revised: 2017. 10. 21, Accepted: 2017. 11. 10.
- This work was supported by Hanwha Systems Company.

일반적으로 적외선 광학계는 적외선 파장 영역 중 대기투과 특성이 좋은 3~5um(MWIR, Middle Wavelength InfrRed)의 중적외선 파장대역과 8~12um(LWIR, Long Wavelength InfrRed)의 원적외선 파장 대역만을 이용하며, 이 영역을 대기의 창이라고 한다. 또한 관측 대상과 대기투과특성에 따라 MWIR과 LWIR을 이용할 것인지 구분해서 광학계를 설계 및 제작하여 사용한다.

차량용 광학계는 관측대상인 물체의 에너지 방출 특성을 볼 때, 일반적으로 상온(300K) 근처에 있다. 이는 최대 에너지 방출 파장은 절대온도에 반비례한다는 빈의 변위 법칙(Wien's Displacement Law)에 따라 계산해 보면 약 10um의 파장을 얻을 수 있다.

$$\lambda_m = \frac{2897.8}{T} [um \cdot K]$$

계산된 10um의 파장은 LWIR 파장대역에 속해 있으므로 검출기는 이대역의 파장을 이용하는 것이 유리하다. [1][2]

또한 차량용으로 사용하기 위해서는 광학계의 크기가 작아야 하므로 냉각검출기에 비해 상대적으로 크기가 많이 작은 비냉각 검출기를 사용하여야 한다. 그리고 넓은 시야각을 적용하여 운전자의 운용편의성이 높아야 하며, 거리감과 원근감이 좋아야 하기 때문에 고해상도의 검출기를 사용하여야 한다.

비냉각 열상 검출기는 1990년대 초반 240×336의 배열을 갖는 검출기가 개발되었고, 1990년대 후반부터 320×240 배열에 25um의 화소크기를 갖는 검출기가 개발되었다. 이 후에 2000년대 후반부터는 640×480 배열의 17um 화소 크기를 갖는 검출기를 사용하기 시작하였으며, 현재는 1024×768 배열에 17um의 고해상도 검출기가 개발되어 점점 사용이 늘어가는 추세이다. Fig. 2는 320×240 검출기와 1024×768 검출기를 사용한 영상을 비교한 그림이다. 320×240 검출기는 해상도가 낮아 좁은 영역의 영상만 전시하지만 1024×768 검출기 같은 경우에는 해상도가 좋기 때문에 더 넓은 영역의 영상을 전시하여 화면 자체의 원근감과 거리감이 더 좋은 것을 확인 할 수 있다.

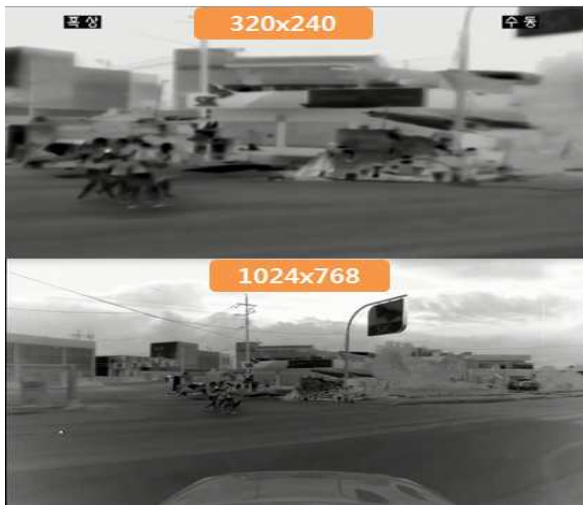


Fig. 2. The image comparison according to the detector resolution

기존의 광각 적외선 광학계는 감시/정찰 등의 방위산과 산업용 보안 카메라 또는 연구개발 용도로 주로 사용 되었다. 또한 차량용 적외선 광학계는 320×240, 640×480 배열 등의 검출기 등이 적용되어 왔다.

본 논문의 연구배경은 기존의 차량용 열상 광학계는 좁은 FOV로 인해 사각지대가 많아 커브길 등에서 주행로를 놓칠 수 있고, 영상의 화질이 떨어졌으며, 화면 자체의 원근감과, 거리감이 좋지 못하였다. 또한 계절/환경별 대조비 조정의 어려움으로 인해 운용자의 개선 요구사항이 항상 있어왔다. 또한 렌즈의 열팽창계수를 이용한 렌즈 비열화가 적용되어 있으나 저온 그리고 고온에서 실질적으로 비열화 시 또렷한 영상이 아닌 흐릿한 영상을 보여주곤 하였다.

이를 해결하기 위해 본 논문에서는 좁은 FOV를 개선하기 위해 100도 이상의 광각, 그리고 원근감과 거리감을 해소하기 위하여 1024×768 배열을 갖는 고해상도의 비냉각 열상 검출기를 적용하였다. 또한 정확한 비열화를 위하여 온도에 따라 모터를 움직여 보상하는 능동형 비열화 방법을 사용하였다. Table 1. 은 기존의 광학계와 개선된 광학계의 기본적인 사양을 비교한 표이다.

Table 1. The comparison of system specifications between previously designed optical system and the newly designed optical system

Item	Previously Optical System	Newly Optical System
Wavelength	8.0um~12um	8.0um~12um
FOV	50° (diagonal)	>100° (diagonal)
Detector Resolution	320×240	1024×768
Pixel Pitch	45um	17um
Cooling system	Uncooled	Uncooled
Athermalization	Lens Athermalization	Active Athermalization

본 논문의 구성은 신규 광학계의 광학설계부터 광학계의 비열화 설계 그리고 제작 후에 성능평가의 순서로 진행되며 결론에서는 전체적인 내용 리뷰와 Field TEST한 내용으로 구성된다.

III. Subject

1. The design of the infrared optical system

적외선 광학계는 표적의 열에너지를 적외선 검출기 면에 집속시켜 외부의 물체들의 상을 검출기 검출면에 나타내주는 역할을 한다.

적외선 광학계의 설계에 필요한 검출기는 운전자의 원근감과 거리감등을 높이기 위해 1024×768의 고해상도의 검출기를 적용하였다. 이 검출기의 화소 크기는 가로, 세로 17um로 정사각형이며, 검출기의 전체크기는 가로 17.408mm, 세로 13.506mm 으로 냉각이 필요 없는 비냉각 방식의 검출기이다. 검출기의 사양은 Table 2. 와 같다.

Table 2. The specification of the detector

Item	Value
Wavelength	8.0um~12um
Technology	Microbolometer
Detector Resolution	1024×768
Pixel Pitch	17um
Cooling system	Uncooled

광학계 설계는 먼저 F-number를 정하였다. F-number는 광학계의 밝기를 나타내는 수치로 광학계의 대물렌즈 크기와 초점거리가 연동되어 계산된다. F-number가 작을수록 밝은 광학계를 의미하며, 본 광학계는 F-number를 1.0으로 적용하여 광량을 많이 받아들일 수 있게 하였다. 그리고 운전자의 운전 편의성을 높이기 위해 100° 이상의 넓은 FOV(Field Of View)를 확보하여 전방의 상황 인식에 유리하게 만들었다. 또한 광각 광학계에서 항상 문제가 되는 왜곡은 광학적으로 보상하여 최소한의 왜곡을 갖도록 하였다.

광학계의 초점 구동 방식은 스텝모터를 사용하여 자동으로 초점을 조절할 수 있는 방식을 채택하였으며, 초점렌즈 조립체 구동을 통한 능동형 비열화 메카니즘을 구현하였다. 적외선 광학계에서 중요한 성능 요소인 MRTD(Minimum Resolvable Temperature Difference, 최소분해가능온도차, 이하 MRTD)는 무한 거리상에 흑/백의 4 bar 수직 막대의 표적과 배경과의 온도 차이를 나타내는 성능으로 사람이 식별할 수 있는 흑체복사의 최소 온도차를 나타낸다. MRTD 측정은 다양한 크기의 표적을 통해 이루어지며, 표적이 작을수록 그리고 온도차가 적을수록 성능이 우수하다고 할 수 있다. MRTD가 낮을수록 적은 온도 차이를 식별하므로 영상 선명도가 높아지게 된다. 본 광학계에서는 MRTD 성능을 분석하여, 이를 규격으로 정하였다. Table 3. 은 적외선 광학계의 설계목표를 정리하였다.[3][4]

Table 3. The target specifications

Item	Value
Wavelength	8.0um~12um
F/#	1.0
FOV	>100° (diagonal)
Distortion	<7%
Transmittance	85%
Athermalization	Active Athermalization
Temperature	-30℃~65℃

최적 설계된 광학계의 구성은 전면창, 대물렌즈 조립체, 초점렌즈 조립체, 보상렌즈 조립체로 구성된다. Fig. 3.은 최적 설계된 광학계의 3D Layout이며, 구조는 일자형으로 광학계의 조립 및 정렬을 간편하게 할 수 있는 구조로 설계하였다.

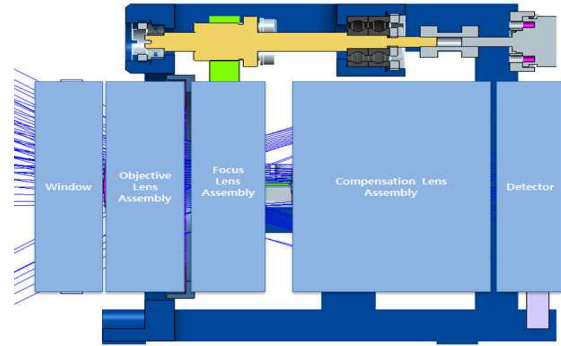


Fig. 3. 3D layout of optical system

적외선 광학계의 렌즈 소재는 가시광 영역을 이용하는 광학계와는 다르게 사용가능한 광학재질이 많이 적다. 특히 LWIR 영역의 파장을 이용하는 광학계는 MWIR 대역을 이용하는 광학계 보다 수량은 더 적어진다. 본 연구에서의 렌즈 소재는 적외선 광학계에서 주로 사용되는 소재로 수급이 원활한 Germanium과 ZnSe로 이루어져 있다. 이는 제작기간 단축에 유리하다. Germanium은 10um의 파장에서 굴절률이 4.00정도이며, ZnSe는 2.41 정도이다. 이는 가시광대역에서 사용하는 소재들보다 큰 굴절률을 갖는 것을 알 수 있다.

본 광학계를 설계할 때, 유의한 점은 광학계의 크기를 작게 만드는 것이다. 먼저 광각으로 인해 렌즈가 커지는 것을 방지하기 위해 STOP의 위치를 결정하였다. STOP의 위치는 왜곡 등의 수차 보상과 렌즈의 크기의 상관관계를 고려하여 위치를 정하였고, 이를 통해 대물렌즈의 크기를 $\varnothing 70$ 이하로 결정하였다. 또한 일부 렌즈면에는 비구면 렌즈를 사용하여 렌즈 수량을 줄임으로써 광학계의 무게 및 크기를 작게 만들었다. 이를 통해 광학계의 전장길이는 대물렌즈에서 검출면까지 100mm이하이며, 전면창 포함 시 110mm 이하로 소형화 하였다.

광학계 맨 앞에는 내부의 렌즈를 보호하기 위하여 전면창을 사용하였다. 전면창의 앞면은 전방 즉 외부에 노출되는 면으로 외부의 먼지, 진흙 및 충격 등의 강력한 환경을 견뎌야 한다. 이를 위해 적외선 광학계에서 외부 노출되는 면에 주로 쓰이는 높은 강도의 DLC(Diamond Like Carbon) 코팅을 적용하였으며, 뒷면은 일반 코팅인 AR(Anti Reflective, 무반사 코팅) 코팅을 하였다.

열상 장비의 성능을 저하하는 노이즈 등의 요소들은 영상의 화질을 균일하지 않게 만든다. 따라서 우수한 열상 영상 획득과 최대의 시스템 성능을 보유하기 위해서는 검출기의 불균일 보상이 필수적이다. 불균일 보상은 광학적으로 Defocusing 된 영상을 제공하는 방법과 균일한 Scene을 이용하는 방법 그리고 셔터를 이용하는 방법이 있다. 이 중 본 적외선 광학계에서는 셔터를 이용하는 방식을 적용하였다.[5]

설계된 적외선 광학계의 광학성능은 Fig. 4.의 The MTF Performance에서 볼 수 있듯이 Nyquist Frequency인 29.4 cycle/mm에서 광축 및 외각 모두 0.5 이상으로 회절한계에 가

까운 MTF 성능으로 설계하였으며, 광학 광학계에서의 중요한 성능요소인 왜곡과 구면수차 그리고 비점수차는 Fig. 5.에서 알 수 있듯이 왜곡은 최외각에서 7% 이하의 성능으로 최적화하였다. 또한 구면수차는 초점면을 기준으로 - 0.03mm 이내이며, 비점수차 또한 -0.05mm 이내를 만족한다.[2][3][4][6][7][8][11]

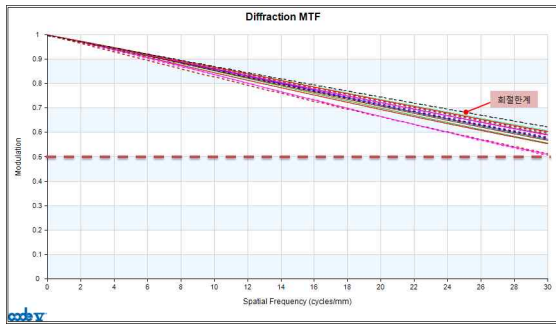


Fig. 4. The MTF performance

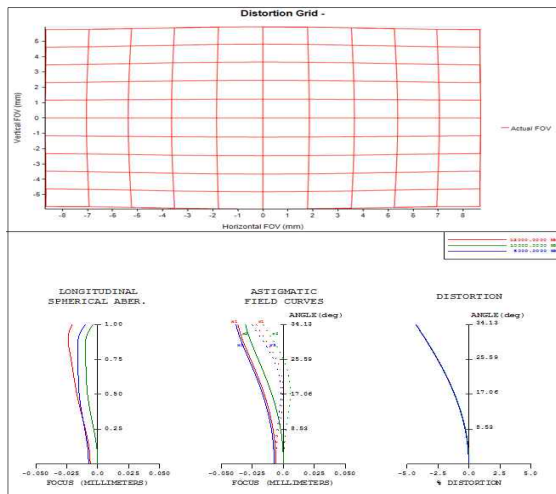


Fig. 5. The Aberration characteristic

2. The athermalization mechanism

적외선 광학계는 유리 재질을 사용하는 가시광 영역을 보는 광학계와 다르게 온도 변화에 따른 굴절률 변화와 열팽창계수가 큰 재질을 주로 사용한다. 이는 온도에 민감하므로 광학성능 및 영상 화질에 많은 영향을 준다는 의미로 볼 수 있다. 특히 우리나라와 같이 기후 변화가 뚜렷한 조건에서는 여름과 겨울에 초점의 위치가 크게 달라져 광학계를 사용할 수 없을 수도 있게 된다.

이를 해결하기 위해서는 비열화 설계가 필요하다. 비열화 설계는 온도의 변화에 따라 초점의 위치를 이동하여 상온과 고온 그리고 저온 일 때 영상의 선명도를 동일하게 유지시켜주는 초점의 위치를 찾는 것이다. 특히 적외선 광학계에서는 설계 완료 후 비열화 설계가 가장 중요한 요소 중에 하나이다.

비열화 보상의 종류에는 변화하는 온도에 따라 수동으로 렌즈를 이동 시키는 수동 비열화 방식과 온도에 따라 모터로 렌즈를 이동하는 보상방법 그리고 렌즈와 기구물을 조합하여 자

체적으로 온도를 보상하는 자체 비열화 방식 등의 비열화 방법이 있다. Fig. 6.에서 위에는 온도에 따라 광학계의 성능이 저하된 영상을 나타내며 아래는 비열화 보상 후 영상이 또렷해진 것을 확인 할 수 있다.

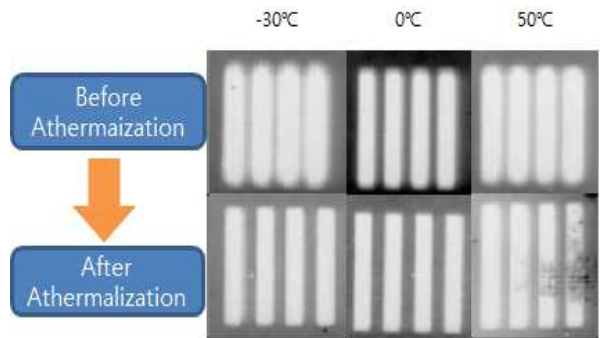


Fig. 6. The example before and after the athermalization compensation

본 논문의 적외선 광학계는 온도에 따라 모터로 렌즈를 이동하는 보상방법을 채택하였다. 비열화 보상을 위해 온도 따른 각 재질의 굴절률 변화와 열팽창 계수를 입력하여 이동 시 비열화 보상이 가장 잘 되는 렌즈를 선정하여 이를 초점렌즈로 정하였다. Fig. 7.은 초점렌즈를 선정한 후 초점렌즈의 구조를 보여주는 Layout 이다. 초점렌즈 선정 후 각 온도 구간에 따른 초점면의 이동양을 분석하였고, 이를 초점렌즈의 이동양을 계산하여 보상해 주었다. 이때의 초점렌즈 이동양은 5°C당 약 0.05mm이며, 총 이동양은 ± 0.55um 정도 이다.[3][6][9][10]

이 후 각 온도 구간에서 온도센서를 통해 자동으로 온도를 감지하여 실시간으로 초점렌즈가 이동할 수 있게 신호처리 하였다.

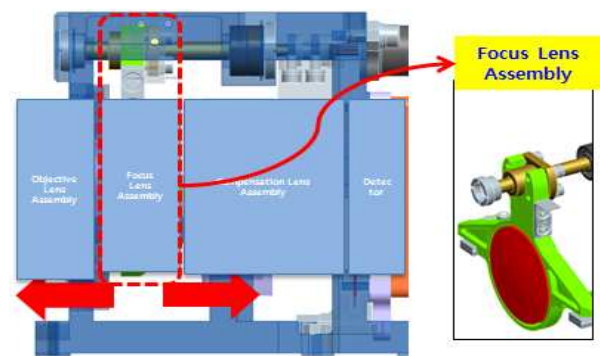


Fig. 7. The focus lens selection

3. The measurement and evaluation of the system performance

최적화 설계를 통해 제작된 적외선 광학계는 아래의 성능평가를 진행하였다. 먼저 기본적인 성능인 FOV와 MRTD는 광학 콜리메이터를 이용하여 측정하였으며, 시험의 구성은 Fig. 8.과 같이 콜리메이터 앞에 광학계를 설치하여 TEST를 진행하였다.

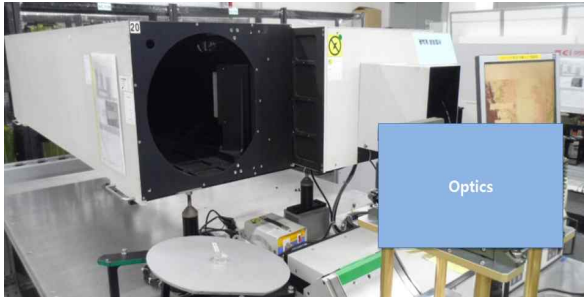


Fig. 8. The FOV and MRTD measurement

FOV와 MRTD 측정 결과 FOV는 100° 이상의 설계규격과 동일한 결과를 얻었으며, MRTD는 측정값이 설계규격보다도 더 좋은 결과 값을 얻을 수 있었다.

광학계의 왜곡양은 한국광기술원에 의뢰하여 측정하였다. Fig. 9.는 왜곡 측정을 위해 왜곡 측정 장비에 광학계를 설치한 모습이다. 이때 측정 결과 값은 Table. 4.와 같으며, FOV의 최외각에서 규격 왜곡수치보다 낮은 5%의 이하의 결과 값을 얻어 광학적으로 왜곡보상이 잘 이루어진 것을 확인했다. 이는 광각을 가지는 광학계에 기본적으로 따르는 큰 왜곡은 광학설계 시 보상하여 상대적으로 작은 왜곡을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

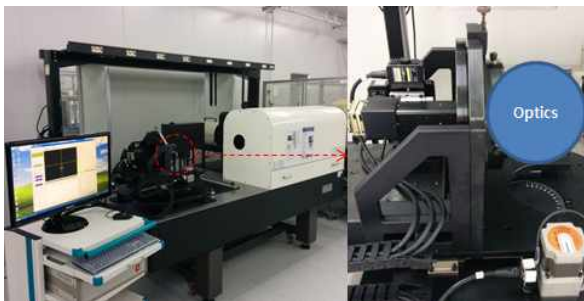


Fig. 9. The Distortion measurement

Table 4. The Distortion according to the fields

Field	FOV(°)		Distortion(%)		
	+	-	+	-	Average
0	0	0	0	0	0
0.1	6.427	6.397	0.74	0.26	0.50
0.2	12.684	12.657	0.62	0.41	0.51
0.3	18.777	18.711	1.26	0.90	1.08
0.4	24.581	24.513	2.01	1.73	1.87
0.5	30.151	29.972	3.23	2.61	2.92
0.6	35.196	34.952	3.95	3.23	3.59
0.7	39.789	39.494	4.57	3.79	4.18
0.8	43.861	43.565	4.90	4.19	4.54
0.9	47.478	47.166	5.08	4.39	4.74
1	50.567	50.201	4.93	4.17	4.55

적외선 광학계의 중요한 요소인 비열화 보상에 대한 시험은 규격 분해능 4bar 타겟보다 작은 4bar 타겟을 이용하였다.

온도 챔버에 비열화 콜리메이터와 광학계를 넣고 온도구간 -30~65℃에서 5℃마다 자동으로 온도 보상되어 타겟이 분해되는 가를 확인 하였다. Fig. 10.은 비열화 시험을 위한 구조도이다.

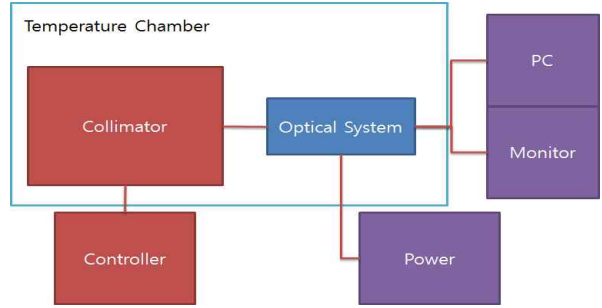


Fig. 10. The scheme of the athermalization test

Table. 5.는 시험결과로 전체 온도 구간에서 4bar 타겟이 분해가 잘되었으며, 이를 통해 각 온도 구간에서 실시간으로 초점렌즈가 이동하여 정확한 온도 보상이 되는 것을 확인하였다.

Table 5. The result of the athermalization test

T(°C)	Resolution Target	Focus Lens Deviation(mm)	Note
-30		0.540	
0		0.055	
20		0	
65		0.473	

IV. Conclusions

기존의 열상장비는 소재가 비싸고 무거웠으며, 작은 해상도의 광학계가 대부분이 이었다. 이를 세계적인 추세에 맞게 고해상도로 제작하였으며, 광학계를 소형화 및 경량화 하였다. 또한 열상소재에서 쉽게 구할 수 있는 Germanium과 ZnSe 의 두 가지의 소재만 사용하여 소재 수급 기간을 단축하였으며, 이를 통해 제작기간을 줄였다. 또한 비구면과 렌즈의 수량을 고려하여 렌즈의 수량을 줄여 광학계의 무게와 크기를 줄여 제작비 절감의 효과를 이루어냈다.

광학계의 MTF 성능은 Nyquist Frequency에서 0.5 즉

50% 이상으로 회절한계에 가까운 MTF를 구현하였다. 또한 광각 광학계에서 두드러지게 나타나는 높은 왜곡을 광학적으로 보상하여, 전자적인 알고리즘을 통한 왜곡보상이 불필요하게 만들었다. 측정 결과는 최외각에서 5% 이하로 설계 결과와 동일한 결과를 얻었다.

기존의 차량용 적외선 광학계는 FOV로 인해 사각지대가 많아 커브길 등에서 주행로를 놓칠 수 있고, 영상의 화질이 떨어졌으며, 화면 자체의 원근감과, 거리감이 좋지 못한 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 11, Fig. 12.에서는 볼 수 없으나 비열화 기능이 제대로 적용되지 않아 여름과 겨울에는 또렷한 비열화를 볼 수 없었다.

Fig. 11. ~ Fig. 13.은 기존 광학계와 신규 개발된 광학계의 도시 및 산악주행 영상이다. Fig. 11.은 기존의 광학계의 도시주행 영상으로 Fig. 12.의 개선된 광학계의 도시주행영상과 비교 해 보았을 때, 개선된 광학계가 시야가 넓고, 거리감과 영상의 질이 높은 것을 확인할 수 있다. Fig. 13.은 기존 광학계의 산악주행 영상이며, Fig. 14.는 개선된 광학계의 산악주행 영상이다. 산악 주행영상도 도시주행영상과 동일한 특성을 볼 수 있다.

기존의 광학계는 개선된 광학계의 영상보다 시야가 좁아 바로 앞만 볼 수 있는 것을 확인할 수 있으며, 개선된 광학계는 광각으로 인해 주변의 환경이 가려지는 것 없이 전체적인 환경을 볼 수 있는 것을 확인가능하며 광각에 비해 왜곡이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 운전자의 운용편의성 및 원근감과 거리감이 개선된 광학계가 설계 제작된 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 고해상도 비냉각 검출기를 이용한 차량용 광각 광학계의 설계 및 제작에 관한 내용을 기술하였다.



Fig. 11. The city driving view of the previously designed optical system



Fig. 12. The city driving view of newly designed optical system

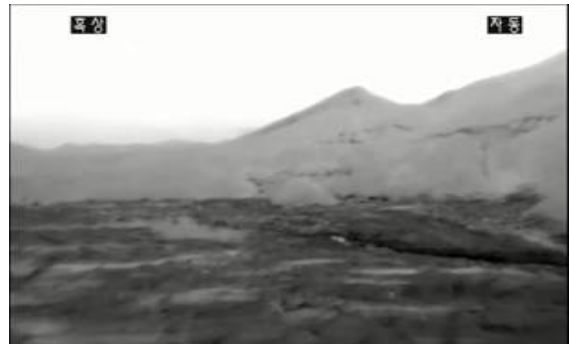


Fig. 13. The mountain driving view of previously designed optical system



Fig. 14. The mountain driving view of newly designed optical system

REFERENCES

- [1] Michael Vollmer, Klaus-Peter Mollmann, "Infrared Thermal Imaging Fundamentals, Research and Applications," HongReung Science Pub., P5~38, 2014
- [2] Seok Min Hong, Hyun Sook Kim, "Advanced LWIR Thermal Imaging System with a Large Zoom Optics", Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 16, P354~360, August 2005
- [3] Robert E. Fischer, Biljana Tadic-Galeb, "OPTICAL SYSTEM DESIGN," McGraw-Hill, P129~178, 2008
- [4] Chang-Min Ok, Sung-Chan Park, "Design and Analysis of a 10× Optical Zoom System for an LWIR Camera," Journal of the Optical Society of Korea, Vol. 18, P574~581, October 2014
- [5] Chih-Wei Kuo, "Scene-based nonuniformity correction midwave infrared staring array triple field of view lens design," SPIE Optical Engineering, vol.51, P1003001-1~6, October 2012
- [6] Robert E. Fischer, Biljana Tadic-Galeb, "OPTICAL SYSTEM DESIGN," McGraw-Hill, P179~198, 2008
- [7] Li Ronggang, Zhang xingde, Liu lin, "Mid-wave Infrared Dual-field-of-view Lenses with High Ratio for Third Generation Thermal Imager", SPIE, Vol. 8197, 2011

- [8] Seung Eun Oh, Sun Kyu Lee, Joong Kyu Choi, Kook Hyun Song, and Jong Sik Baek, "Design and Fabrication of Low Cost Infrared Optical System Using Precision Glass Molding Lens Made by Chalcogenide Glass," Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 23, P154~158, August 2012
- [9] J.M. Lloyd, "Thermal Imaging Systems," PLENUM(New York, United States of America), P257~267, 1982
- [10] Seok-Hyeon Son, "The design methods of Infrared Camera with Continuous zoom," Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 21, P19~26, December 2016
- [11] Chun-ho Song, "Applying tilt mechanism for high-resolution image acquisition," Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 19, P31~37, December 2014

Authors



Jonghoon Lee received the B.S., M.S. degrees in Image Optics Information Engineering from National Kongju University, Korea, in 2008, 2010. He is currently a Engineer in the Electro-optics•PGM R&D Site, Hanwha

systems. He interested in Infrared optical system.