

셔터렌즈에 의한 검출기 불균일 보정을 적용한 이중배율 적외선 카메라 설계

안규봉 · 김서현[†] · 정재철 · 조문신

삼성탈레스

Ⓣ 449-712 경기도 용인시 기흥구 농서동 산 14번지

김창우 · 김현숙

국방과학연구소 기술연구본부

Ⓣ 305-600 대전시 유성우체국 사서함 35-5

(2007년 4월 4일 받음, 2007년 4월 13일 수정본 받음)

완전한 2차원 배율을 갖는 중적외선 대역의 320×240 검출기를 사용하는 3세대 열상 장비의 설계 및 제작은 이차원 배율 검출기 제작 기술의 발달과 영상 신호처리 기술의 진전으로 인해 최근 더욱 더 활발히 이루어지고 있다. 본 논문은 다양한 응용 분야에서 적외선 센서로 사용될 수 있도록 하기 위하여 소형 경량화 제작을 목표로 한 3세대 열상장비의 이중 배율 적외선 카메라의 설계와 Defocus용 셔터 렌즈에 의한 영상기반 불균일 보정 방식에 대해 다룬다.

주제어 : Thermal Imaging System(TIS; 열상장비), Noise Uniformity Correction(NUC; 불균일 보정), Noise Equivalent Temperature Difference(NETD; 등가잡음 온도차), Shutter lens(셔터렌즈)

I 서 론

빛이 전혀 없는 야간에서도 표적과 배경이 방출하는 고유한 복사에너지의 차이를 감지하는 적외선 카메라는 감시 및 의료용 진단 등 여러 분야로의 응용이 가능하다. 특히 야간 및 연막과 같은 가혹한 상황에서의 관측성능이 우수하다는 장점으로 인해 1970년대 선진국에서는 군사용 목적의 열상 장비를 개발하기 시작하였다. 1970년대 미국의 병렬 주사 방식을 시작으로 1980년대 중반이후에 영국, 프랑스 등의 직병렬 주사 방식과 같은 1세대 장비에서 국내의 50만 화소 이상의 2세대 주사방식에 이르기까지 다양한 종류의 열상 장비가 설계/제작되어 육상/항공/해상 등 여러 분야에서 활용되고 있다. 그 중 2차원 배율을 갖는 중적외선 대역의 320×240 검출기를 사용하는 3세대 열상 장비의 설계 및 제작은 이차원 배율 검출기 제작 기술의 발달과 영상 신호처리 기술의 진전으로 인해 최근 더욱 더 활발히 이루어지고 있다. 비주사 방식의 3세대 열상 장비는 광학경로에 영상을 형성시키기 위한 주사장치를 사용하지 않기 때문에 장비를 소형, 경량화할 수 있다. 본 연구에서는 위와 같은 3세대 열상장비의 소형경량화 개념에 Defocus용 셔터 렌즈에 의한 영상 기반 불균일 보정을 적용한 적외선 카메라의 설계에 대해 논의하기로 한다.

II. 이중배율 적외선 카메라의 설계

3~5 μm 의 중적외선 영역의 파장을 사용하는 3세대 열상

장비는 8~12 μm 의 파장대역을 사용하는 1, 2세대 열상 장비가 일차원 배율의 검출기와 주사장치를 사용하는 것과 달리 2차원 배율의 검출기를 사용하기 때문에 광학계를 망원경 모듈과 주사 모듈로 분리하여 설계하지 않고, 전체를 한 모듈로 설계할 수 있다. 다만, 주어진 공간 안에 광학계를 효율적으로 집어넣기 위하여 거울을 3개 이용하여 광경로를 세 번 접고, 대물부에 의해 한번 결상된 상을 릴레이부를 통하여 검출기에 재 결상 시킨다. 또한 이중배율로 줌 기능을 간소화하여 배율렌즈 1대만 움직이게 한 것이 특징이다. 콤팩트하게 최적화된 시스템 전체의 길이는 약 297 mm, 무게는 3.5 kg 이하이다.

한편, 적외선 광학계의 설계 기준이 되는 검출기는 S사의 320×256 MWIR 검출기로 1픽셀(pixel)의 크기가 가로, 세로 각각 30 μm 이며, 검출기의 크기는 가로 9.6 mm, 세로 7.2 mm이며 F/수는 2.5이다. 소형경량화를 목표로 광량을 적게 받더라도 대물구경을 작게 만들기로 하고 시스템의 F/수를 4.0으로 정했으며, 검출기의 Cold stop 역할을 대신할 수 있는 외부 Worm stop을 설계하였다. 표 1은 본 적외선 줌 광학계의 설계 사양이다.

본 적외선 줌 광학계는 대물부와 릴레이부로 구성되는데, 그림 1의 레이아웃과 같이 대물부의 배율렌즈를 앞뒤로 움직여 초점거리를 변화시킨다. 배율렌즈의 구동 거리는 약 36.6 mm로 스텝모터를 사용하며, 배율전환 시간을 1초 이내로 한다. 대물렌즈와 배율렌즈 사이에 놓이는 축거울 1은 적외선 카메라가 장착되는 시스템의 공간적인 제약으로 인해 광 경로를 접어주기 위한 것이다. 배율렌즈의 뒤에 있는 고정렌즈가 수차를 보정하기 위한 보정렌즈이며, 축거울 2 앞에 있는 렌즈가 결상렌즈로 중간영상을 맺게 하는 역할을 한

[†]E-mail: lucidus.kim@samsung.com

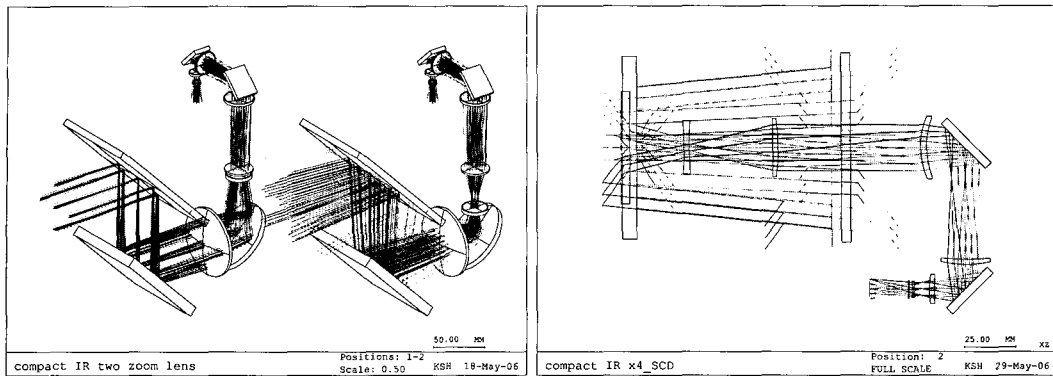


그림 1. 최적 설계된 이중 배율 광학계 3D 레이아웃(좌)과 XZ 평면 레이아웃(우).

표 1. 이중배율 광학계의 설계 목표 사양

	설계 목표 사양
Image format	320×256 MWIR
Unit Pixel size	30 μm × 30 μm
Sensor size	9.6(H) × 7.2(V)
Effective focal length	wide : 48.95 mm, tele: 194.6 mm
F/#	4.0
Max. lens diameter	φ = 70 mm 이하
Wavelength(μm)	3.7 ~ 4.8
Distortion	±1 % 미만
FOV	2.5° × 1.7° 이상(NFOV) 10° × 7.5° 이상(WFOV)
Relative illumination	50 % 이상
MTF 특성	Nyquist frequency에서 30 % 이상
기능	비열화 적용
Optics structure	9매(lens + mirror)

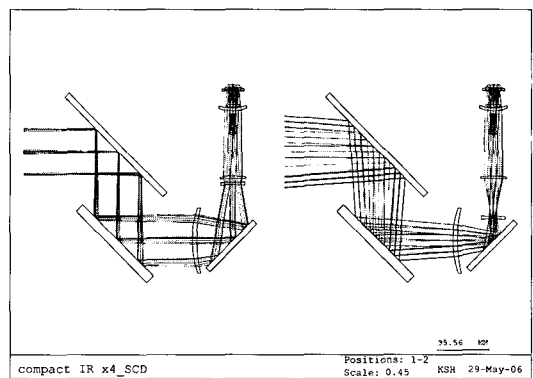


그림 2. 최적 설계된 이중 배율 광학계 1D 레이아웃.

다. 대물렌즈, 배율렌즈, 보상렌즈, 결상렌즈 총 4매만으로 구성된 대물부는 동급의 이중배율 3세대 열상 장비의 대물부가 6매로 구성되었던 것에 비해 렌즈수가 줄어들어 제작 구현이 간단해졌다. 또한 렌즈의 재질도 소재 수급이 국내에서 원활한 Ge과 Si으로 이루어져 있어 제작기간 단축에 유리하며, 비구면이 없어 비구면 가공에 필요한 시간과 비용을 절감하였다.

축거울 2 뒤에 오는 중간상면에 맺혔던 영상은 두개의 릴레이 렌즈에 의해 검출기에 다시 재결상 된다. 릴레이 렌즈는 수차가 보정된 완벽한 상을 위하여 4면 중 2면에 비구면을 적용하였다.

본 광학계를 설계할 때, 특히 고려한 점은 고배율에서의 입사동의 위치와 대물렌즈의 크기를 조절하는 것이다. 입사동의 위치는 검출기 불균일 보정을 위한 셔터 렌즈의 삽입시 이탈하는 광선이 없도록 정했다. 즉, 대물렌즈의 앞쪽에 존재하는 광속분할기 및 전면 거울, 전면 창에 떨어지는 광속의 크기를 줄여주기 위해서 가능한 창의 앞쪽에 위치시키는 것이 유리하다. 입사동의 위치가 대물렌즈 방향으로 점점 가까워질수록 대물렌즈 구경을 줄이기에 편리하지만, 셔터 렌즈의 삽입시 크기가 제한되어 있는 전면 거울에서 이탈하

는 광선들이 생기기 때문이다.

설계된 적외선 광학계의 광학성능은 변조전달함수(MTF: Modulation Transfer Function)가 그림 8/저배율 모두 Nyquist frequency인 16.7 cy/mm에서 축상/비축상 광선 모두 0.5이상이다. 또한 그림 4에 최적설계한 적외선 광학계의 수차특성을 나타내었다. 구면수차는 초점면을 기준으로 ±0.3 mm 이내에 존재하며, 비점수차는 ±0.2 mm 이하를 만족한다. 이는 전시된 영상을 볼 때 잘 드러나지 않는 양으로 설계 기준을 충족시키는 값이다. 왜곡 수차는 실제 광선의 상높이와 이상적인 근축광선의 상 높이의 차이인데, +왜곡 수차는 Pincushion 형태로 나타나고 -왜곡 수차는 Barrel 형태로 나타난다. 왜곡수차의 보정시 유의할 점은 광학계의 왜곡수차 보정과 함께 영상이 전시되는 전시기의 왜곡수차 특성에 맞게 설계하는 것이다. 따라서 보통 텔레비전의 왜곡수차가 -2.0 %에서 +1.2 %인 것을 감안하여 왜곡수차의 설계목표를 -2.0 %에서 +1.2 %로 잡고 설계한 결과 -0.7 %에서 +0.4 % 이내로 왜곡수차를 보정하였다. 일반적으로 +왜곡 수차보다 -왜곡수차를 관대하게 잡는 것은 -왜곡 수차는 이상적인 상점보다 상 크기가 작아지므로 주변 광량비가 다소 증가해, 광량의 기준값인 Vignetting × cos^4θ보다 광량이 줄어드는 +왜곡수차보다 수차범위를 더 크게 허용할 수 있다. 또한 왜곡 수차의 부호가 고배율과 저배율에서 반전되는 것은 저배율의 시야각이 때

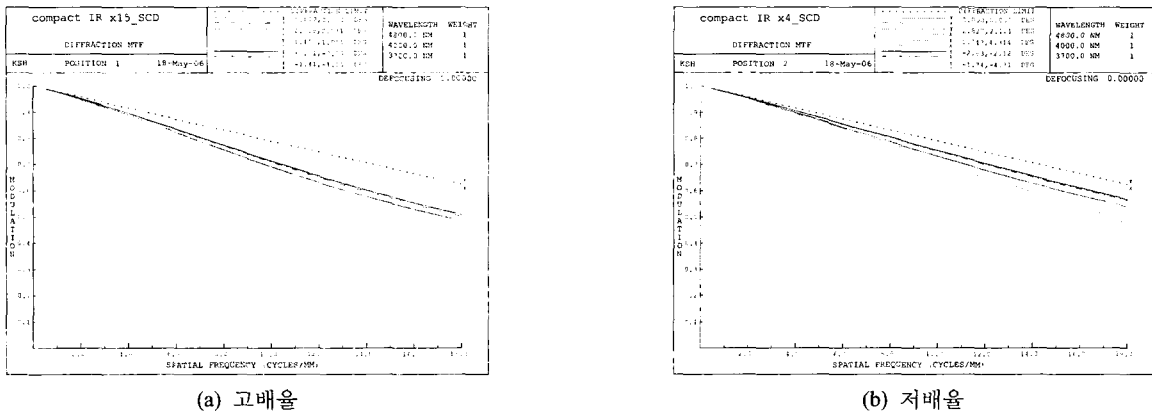


그림 3. 최적 설계된 이중배율 줌 광학계의 MTF 특성.

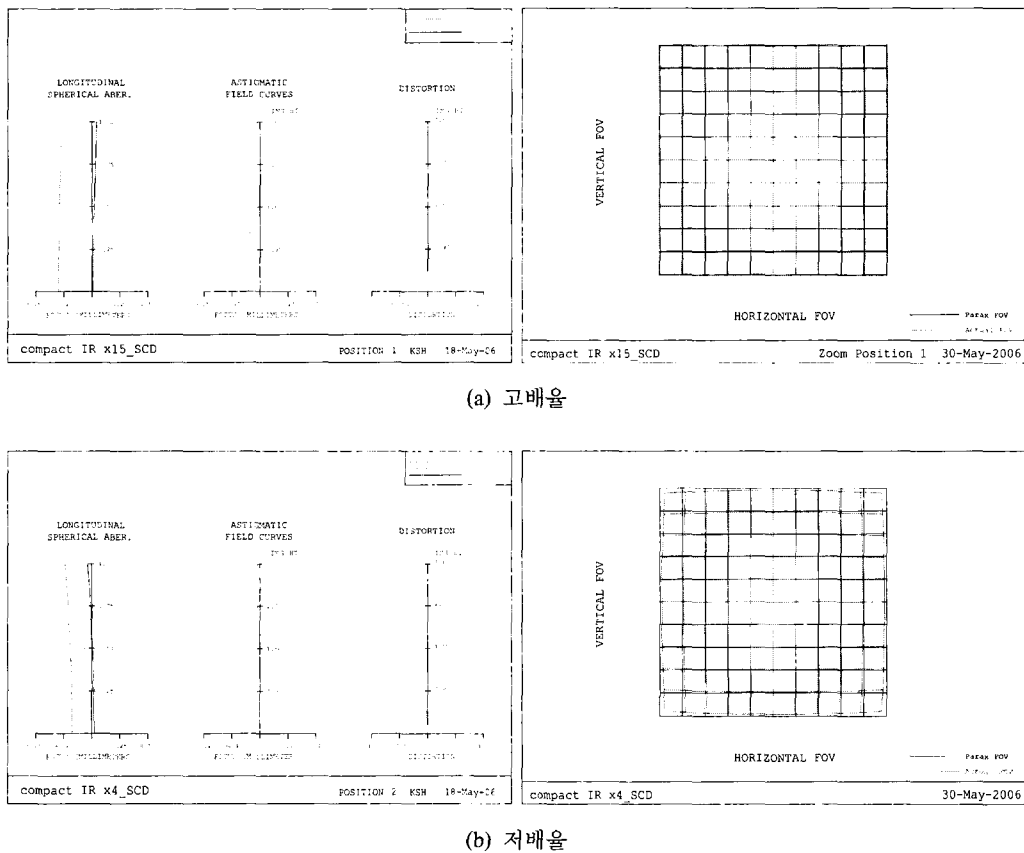


그림 4. 최적 설계된 이중배율 줌 광학계의 수차 특성(시야 수차도).

우 커서 우선 여기에서 왜곡수차를 줄이다 보면, -방향으로 가고 고배율에서는 시야각이 작아지므로 양쪽의 기준을 적절히 맞춰주는 수준에서 타협하는 것이다. 그림 4의 오른쪽 그림에서 왜곡수차가 화면의 중심과 상하 좌우 끝단에서 잘 드러나지 않도록 하였다. 그림 5의 광선 수차도를 보면, 기준 값인 $\pm 0.025 \text{ mm}$ 이하에 모든 파장 영역이내에 존재하게 수차보정을 하였다.

한편, 적외선 광학계의 특성상 설계단계에서 반드시 확인해야 할 것은 나르시시스 효과이다. 물에 비친 자신의 얼굴

을 보느라 물에 빠져 죽는지도 몰랐다는 고대 그리스 신화 속의 인물의 이름을 딴 이 효과는 냉각 검출기를 사용하는 적외선 광학계에 발생하는 고유한 현상이다. 적외선 광학계의 렌즈면 중 임의의 면이 77 K로 냉각된 검출기에 대해 반사시킬 때, 대물렌즈 앞에서 들어오는 영상에 심각한 저해를 줄 때 발생한다. 적외선 광학계는 시계내의 배경의 평균 온도에 대해 영상을 구성하는 각각의 미세한 온도차를 감지하여 영상으로 재현하는데, 온도차가 거의 없는 경우 물체의 분해가 불가능하며, 온도차가 존재할 때 비로소 물체를 분해

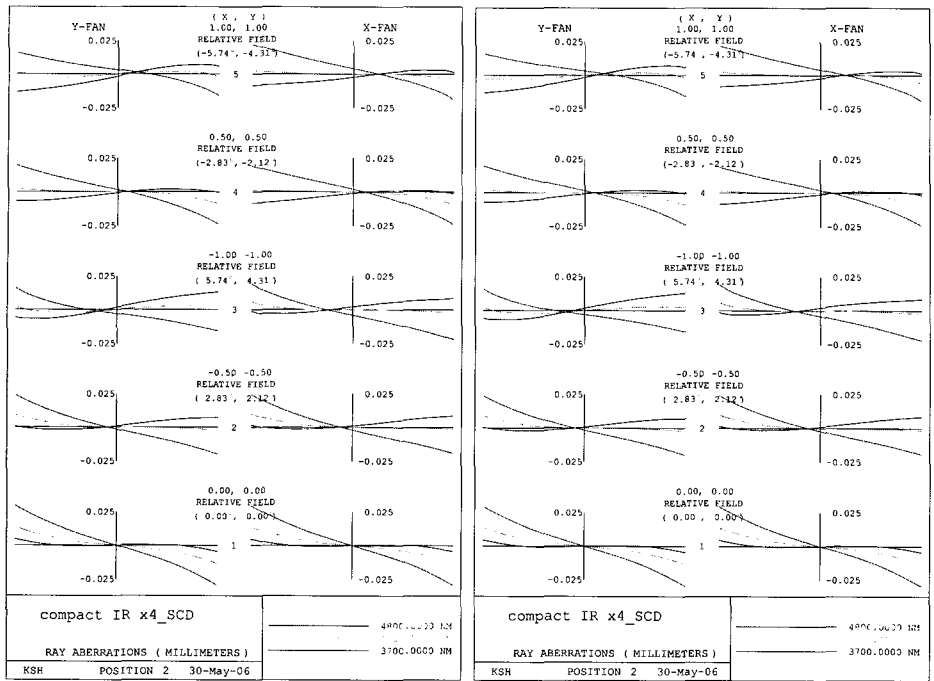


그림 5. 최적 설계된 이중배율 줌 광학계의 수차 특성(광선 수차도).

할 수 있게 된다. 냉각형 적외선 검출기를 둘러싸고 있는 검출기 듀어(Dewar)는 매우 낮은 온도(77 K)로 검출기 듀어와 광학계를 둘러싸고 있는 실온의 하우징과 비교할 때 검출기 듀어에서 방출되는 광자(Photon)의 수는 아주 작다. 적외선 광학계를 구성하는 임의의 렌즈 면의 검출기의 극저온 복사 에너지(Cold radiation)와 하우징의 고온 복사에너지(Warm radiation)에 대한 Ghost reflection을 발생시킬 때, 두 반사된 상의 온도차가 매우 커서 검출기에서 이것이 영상에 심각한 저해를 줄 때 이를 나르시시스라 한다.

나르시시스를 표현하는 방법의 하나로 나르시시스 신호의 크기를 배경의 온도차(NITD: Narcissus Induced Temperature Difference)를 사용하여 나타내는데, 각 면에서의 나르시시스 강도 비율(NIR)에 반사율과 복사 수렴향을 곱한 것이다.

$$\begin{aligned}
 NIR &= \frac{\sin^2 u_s}{\sin^2 u_0} = \frac{\Omega_s}{\Omega_0} \\
 NITD &= \sum_{j=1}^{scn-1} NIR_j \pm \frac{t_j^2 (W_{HOE} - W_{DET})}{t_0 (\Delta W / \Delta T)_{BAC}} \\
 &= \sum_{j=1}^{scn-1} \frac{t_j^2}{t_0} r_j \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[w(\lambda, T_{HOE}) - w(\lambda, T_{DET}) \frac{\lambda}{\lambda_2} \right] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial w(\lambda, T_{BAC})}{\partial T} \frac{\lambda}{\lambda_2} d\lambda} \quad (1)
 \end{aligned}$$

- W_{HOE} : 하우징의 복사에너지(watt)
- W_{DET} : 검출기의 복사에너지(watt)
- T_{HOE} : 하우징의 온도(°K)

표 2. 나르시시스에 의한 배경의 온도차

COLD STOP SURFACE:		33			
COLD STOP DIAMETER:		6.2000 MM			
SCENE FULL ANGULAR SUBTENSE:		0.24988 RADIAN		SET BY SURFACE 33	
		(from detector)		(F/ 3.98)	
PARAXIAL ANALYSIS: NO SCANNING					

SURFACE INFORMATION DESIGN AIDS PERFORMANCE DATA					

REFLECTING CLIPPING PARAXIAL DATA NARCISSUS NARCISSUS					
SURFACE APERTURE YNI I/BAR FULL ANGLE INTENSITY					
(MM) (RADIAN) RATIO					

6	23 (R)	5.6853	-3.838	0.021180	0.00722
7	33 (F)	-0.2465	0.612	0.249882	1.00000
11	26 (R)	-1.4509	-5.999	0.080443	0.10412
12	33 (R)	0.7729	-0.942	0.094227	0.14283
15	33 (R)	0.5002	-0.704	0.115575	0.21480
16	26 (R)	-0.8579	*****	0.140768	0.31848
20	33 (R)	0.0988	-0.154	0.134112	0.28912
21	33 (F)	-0.0451	0.126	0.249882	1.00000
25	33 (F)	0.2071	-1.000	0.249882	1.00000
26	33 (R)	-0.2722	0.359	0.105340	0.17847
31	33 (R)	-0.1803	0.377	0.220638	0.78053
					TOTAL: 5.03557

PREDICTED NARCISSUS INDUCED TEMPERATURE DIFFERENCE: 1.322 Degrees C					

- T_{DET} : 검출기의 온도(°K)
- T_{BAC} : 배경의 온도(°K)

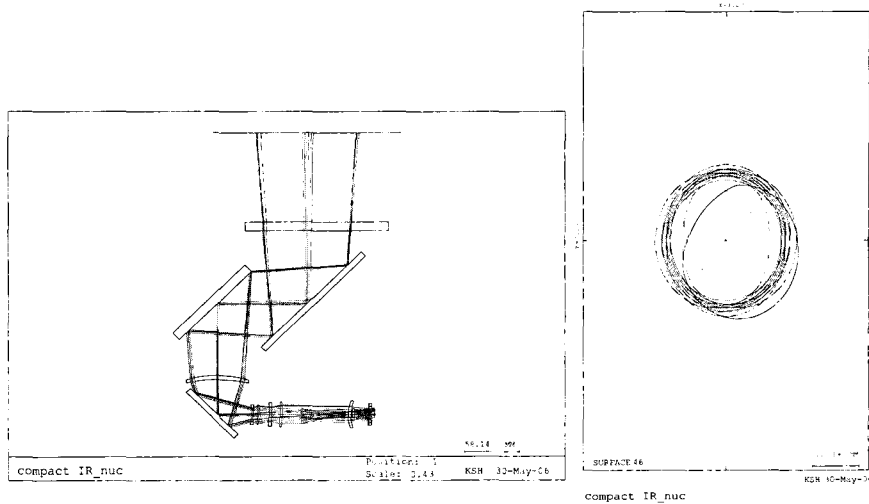


그림 6. 영상보정용 렌즈를 삽입하였을 때 광학계 레이아웃(좌)과 1 Km 떨어진 곳에서의 Footprint(우).

본 적외선 광학계의 나르시시스는 NAR이라는 명령어를 써서 수행한 결과를 토대로 분석하여, 설계단계마다 배경의 온도차가 1.5℃ 이하가 되는지 확인하며 설계하였다. 수차보정이 잘 될수록 배경의 온도차가 급격히 증가하기 때문에 수차보정과 나르시시스 보정의 중간지점을 찾는 것이 중요하다.

III. 영상 기반 검출기 불균일 보정을 위한 Defocus용 서터 렌즈의 설계

영상 장비의 성능을 저하하는 적외선 검출기 및 시스템의 불균일 성분은 영상화질을 불균일하게 만든다. 따라서 우수한 열상 획득과 최대의 시스템 성능을 확보하기 위하여 검출기의 불균일 보상이 필수적이다. 불균일 보상은 디지털 신호처리를 통하여 실시하고, 불균일 보상 시 기준 온도를 제공하여 주기 위하여 광학적으로 Defocusing 된 영상을 제공해 주기로 하였다. Defocusing 된 영상을 제공하는 방법에는 별도의 렌즈를 사용하지 않고 배울 렌즈를 배울 위치에서 보상 렌즈 방향으로 이동시켜 상을 Defocusing하거나 별도의 영상보정렌즈를 삽입하여 상을 Defocusing하는 방법이 있다. 첫 번째 방법은 본 연구의 광학계에 적용시키고자 할 때, 다음과 같은 문제점으로 인해 두 번째 방법을 선정하였다. 첫째, 배울렌즈를 고배율의 위치로 보내서 Defocusing하는 경우에는 배울 렌즈 구동거리 안에서 완전히 상이 균일해지는 위치가 없다. 둘째, 열상 모듈 앞의 근거리(4 m 이내)에 물체가 있는 경우 Defocusing을 해도 상이 완전히 뭉개지지 않는다. 셋째, Defocusing 위치에서 Narcissus도 완전히 제거되지 않았으므로 오히려 Narcissus를 반영하게 된다. 영상보정용 렌즈는 배울렌즈와 축거울 1사이에 삽입하는 형태로 설계되었다. 그림 6은 영상보정용 렌즈를 추가한 광학계의 레이아웃이다. 이때, 대물렌즈로부터 1 km 떨어진 곳에서 Footprint를 보면 모든 Filed에 대해 비슷한 상을 보이므로 상이 Defocusing 되는 것을 알 수 있다.

표 3. 비열화 보상을 위한 렌즈 이동량 계산

온도 Tem (℃)	비열화 보정전		비열화 보정후	
	Defocus (mm)	EFL_before (mm)	Focus (mm)	EFL (mm)
-30.0	-0.4494	49.7786	-0.0916	47.3405
:	:	:	:	:
-25.0	-0.4105	49.6944	-0.0855	47.4762
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
25.0	-0.0285	48.8697	-0.0292	48.8746
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
60.0	0.2323	48.3096	0.0055	49.9017

대물렌즈 앞에 놓이는 세 가지 광학부품 즉, 광속분할기, 전면 거울, 전면 창은 적외선 카메라와 함께 시스템 안에 구성되어 적외선 카메라의 관측 방향을 통제하는 역할을 한다. 따라서 본 적외선 광학계와 영상보정 렌즈를 설계할 때는 시스템이 요구하는 전면 거울의 구동각도 범위에서 고/저 배율 및 영상보정 기능 수행시에 표적으로부터 들어오는 영상이 상 가림에 의한 Vignetting없이 검출기에 도달할 수 있도록 하였다.

적외선 광학계는 온도 변화에 따른 굴절률 변화가 큰 Ge 재질을 굴절렌즈로 주로 사용하기 때문에 이 장비와 같이 사계절의 기후 변화가 뚜렷한 우리나라에서 야외에서 주로 사용되는 경우, 비열화 보정이 필요하다. Code V의 Env 기능을 사용하여 -30도~60도까지 온도변화에 따른 각 재질의 굴절률 변화와 열팽창 계수를 입력한 후 초점면 이동량을 분석하였고, 배울변환을 위해 광축방향으로 구동하게끔 되어있는 렌즈를 사용하여 초점면 이동을 보상해주었다. 표 3에서 Del 값이 저배율에서 비열화 보상을 위한 렌즈의 이동량 (mm)이며 일정한 온도 간격으로 이동량을 계산하여 그 간격

만큼의 온도 변화를 감지하였을 때, 실시간으로 렌즈를 이동량만큼 구동시키도록 신호처리하였다.

IV. 제작 결과 및 결론

본 연구에서는 Defocus용 서터 렌즈에 의한 영상 기반 불균일 보정이 적용된 적외선 카메라용 광학계를 설계 및 제작하였다. 그림 7은 위의 설계를 반영하여 제작한 광학계 모듈의 사진이다. 광학계는 기본 광학계의 렌즈 총 6매와 영상보정용 렌즈 2매, 광경로를 접어주기 위한 3개의 거울만으로 소량의 부품으로 구성된 광학계이며, 비싸고 부거웠던 기존의 냉각 열상장비가 점점 소형화, 경량화 되는 세계적인 추세에 맞게 설계되어 공간이 좁은 시스템에 열상을 적용하기

좋다. 또한 재질을 두 가지 이상으로 제한하여 가격과 소재 수급기간을 단축시켰으며, 수차보정에도 가능한 비구면 2매만을 사용하여 비구면의 최소화 사용에 집중하였다. 또한 검출기의 불균일 보상을 위하여 기존에 도입되었던 영상 보정용 렌즈 대신 새로운 형태의 영상보정용 렌즈를 도입하여 불균일 보상을 실시하였고, 이에 따라 그림 8과 같은 우수한 영상의 질을 확보할 수 있었다. 제작된 장비의 탐지거리 성능을 예측할 수 있는 최소분해가능 온도차의 측정값은 2 cy/mrad의 공간주파수에서 0.1°C 이하로 우수하였다. 한편, 영상의 질을 향상시키기 위한 노력으로 수평방향으로 미세주사 거울을 첨가하였으며, 온도에 따른 초점이동을 자동으로 보상해 주기 위하여 비열화 보상을 적용해주었다. 즉, 영상의 품질을 유지하면서 소형화 시켰다는 점에서 다양한 분야로의 활용이 기대된다.

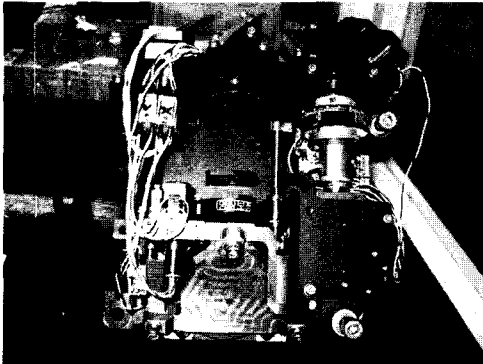


그림 7. 제작된 적외선 카메라 모듈.



그림 8. 이중배율 적외선 카메라의 영상.

참고문헌

- [1] J. M. Lloyd, Thermal Imaging Systems (PLENUM press), New York, p 257-267, 1982.
- [2] 김창우, 김현숙, 이국환, 초점면 배열 열상 연구시제품 개발결과(국방과학연구소, 대전, 1999), p. 225, 241-248.
- [3] 김창우, 김현숙, 주사방식열상 공통모듈 설계(국방과학연구소, 대전, 2002), p73-77.
- [4] Francis A. Jenkins, Fundamentals of Optics (McGraw-Hill) p. 44-57.
- [5] Robert E. Fischer, Biljana Tadic-Galeb, Optical system design (McGraw-Hill), p. 129-155.
- [6] 이종웅, 박성찬, 박종대, 임천석, Code V를 이용한 광학 설계실습(북스힐, 서울, 2005), p 183-199.
- [7] Max J. Riedl, Optical Design Fundamentals for Infrared Systems (SPIE, United States of America, 1995), p 19-35.
- [8] Warren J. Smith, Modern Optical Engineering (Mc Graw Hill, 2000), p 21-89.
- [9] Warren J. Smith, Modern Lens Design (Mc Graw Hill, 2005), p 11-84.
- [10] 홍석민, 송인섭, 김창우, 유위경, 김현숙, "320×240 적외선 검출기를 이용한 열상센서의 설계", 한국광학회지, 2004.10, p 423-428.

Design of Two Zoom Infrared Camera using Noise Uniformity Correction by Shutter Lens

Gyou Bong Ahn, Seo Hyun Kim[†], Jae Chul Jung, and Mun Shin Jo

San 14, Nongseo-Dong, Giheung-Gu, 449-712, Korea

[†]*E-mail: lucidus.kim@samsung.com*

Chang Woo Kim and Hyun Sook Kim

Agency for Defence Development P.O Box 35-5, Daejeon 305-600, Korea

(Received April 4, 2007, Revised manuscript April 13, 2007)

This paper describes the design technology for a third generation thermal imaging system, which is more compact than before, using a 320×240 mid-IR focal plane detector. The third generation non-scanning thermal imaging system was constructed as a compact thermal imaging module as a reconnaissance, surveillance and navigation sensor for helicopter and infantry vehicles in the 1980's~1990's and now, we designed a new compact infrared camera and studied a new type of non-uniformity correction lens for this camera.

OCIS code : 220.3620, 080.2740, 110.3080.