

20:1 줌 열영상 장비 비열화 분석 및 시험

김현숙 · 최세철 · 이국환 · 박용찬 · 김현규[†]

국방과학연구소 기술연구본부

Ⓣ 305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 35-5

(2001년 4월 6일 받음, 2001년 7월 3일 수정본 받음)

본 연구에서는 넓은 운용온도에서 열영상 장비의 광학성능을 유지하도록 하기 위한 비열화 분석 및 시험을 수행하였다. 비열화 분석은 광학계 설계를 위한 컴퓨터 프로그램인 Code-V와 SIGMA2100으로 수행하였으며, 비열화 시험은 열영상 장비와 콜리메이터를 온도챔버에 함께 넣어 온도에 따른 영상을 녹화하였다. 2차원배열 검출기를 사용한 20:1 줌 열영상 장비를 가지고 비열화 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 줌계적을 보상하였다. 비열화 시험을 통하여 온도변화에 따라 줌계적이 적절히 작동되어 $-32^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위 내에서 만족할 만한 광학성능이 유지되는 것을 확인하였다.

분류코드 : SM.010, SM.020, SM.040.

I. 서 론

열영상 장비는 적외선 광학계로 구현되며, 적외선 광학계는 주로 Si, Ge, ZnS 또는 ZnSe와 같은 광학재료를 사용한다. 이러한 광학재료들은 온도에 따른 굴절률의 변화가 크고, 재료의 분산능이 가시광선 영역에서 사용하는 재료들에 비하여 상대적으로 작다.^[1] 그 뿐만 아니라 광학부품의 마운트와 경통과 같은 기구부품도 온도변화에 따라 수축 팽창하기 때문에 고분해능 열영상 장비의 경우 온도변화는 결코 무시할 수 없는 요소이다. 다시 말하면 열영상 장비의 광학성능은 온도변화에 민감하기 때문에 상온 근처의 좁은 온도 영역에서 사용할 때는 큰 문제가 되지 않지만, 운용온도 범위가 넓은 경우에는 적절한 비열화(athermalization) 보상 시스템이 필요하다.^[2,4]

비열화 보상 방법은 크게 기계적인 방법과 광학적인 방법으로 구분할 수 있는데 기계적인 방법에는 수동식과 능동식이 있으며, 열영상 장비의 용도나 사용 온도 범위 또는 광학계의 구성에 따라 달라질 수 있다.^[1,2,4]

본 연구에 사용된 열상장비는 줌 광학계로서 배율변환을 위한 배율렌즈와 보정렌즈를 갖고 있으며, 이 두 렌즈는 각각 별도의 모터에 의해서 광축방향의 미소변위가 가능하도록 설계되어 있다.^[5] 그러므로 본 장비의 경우는 기계적 능동식 비열화(mechanical active athermalization)를 구현하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

기계적 능동식 비열화를 구현하기 위해서는 최적 설계된 광학계에 대하여 민감도를 분석하여 최적 초점조정 요소를 선정하고, 광학계 설계 프로그램인 Code-V를 이용하여 온도 및 배율에 따른 초점 이동량을 계산한다. 열영상 광학계의 온도 및 배율에 따른 초점 이동량, 즉 defocus는 열영상 장비의 영상의 질 저하를 유발시키므로, 이를 제거해 주어야 한다.

비열화 보상이란 민감도 분석에 의하여 선정된 초점조정 요

소를 이용하여 온도변화에 따른 초점이동량(defocus)을 제거하는 것을 의미한다. 본 열영상 장비에는 배율렌즈와 보정렌즈의 구동 프로그램이 있으며, 비열화 보상을 위해서 온도에 따른 각 렌즈의 구동량을 구동 프로그램에 입력하여 온도변화에 따라 자동적으로 구동되도록 만들 수 있다.

실제로 온도변화에 따라 렌즈가 구동되었을 때 영상의 질이 어느 정도 유지되는가를 확인하기 위해서 이를 검증할 필요가 있다. 온도변화를 가하면서 시험하기 위해서는 열영상 장비와 콜리메이터를 온도시험기에 넣고 시험을 진행하여야 한다. 이때 콜리메이터에 부착된 분해능 표적은 열영상 장비에서 영상 신호를 온도시험기 외부로 연결하여 모니터로 관찰할 수 있다.

비열화 시험은 열영상 장비의 운용온도($+55^{\circ}\text{C}\sim-32^{\circ}\text{C}$) 범위 내에서 2회에 걸쳐 진행하였으며, 1차 시험은 비열화 보상을 위한 구동 프로그램을 내장한 상태에서 $20^{\circ}\text{C}\pm 20^{\circ}\text{C}$ 범위 내에서는 10°C 간격으로 그 외 범위 내에서는 5°C 간격으로 시험하였다. 2차 시험은 비열화 보상을 하지 않은 상태에서 10°C 간격으로 시험하였다.

II. 이론적 배경

본 장에서는 온도변화가 열영상 광학계의 성능에 미치는 영향을 알아보기로 한다. 서론에서 언급한바와 같이 적외선 광학재료는 온도에 따른 굴절률의 변화가 가시광선 광학재료에 비하여 크다는 점에 유의하여야 한다. 그 외에 온도에 따른 렌즈의 곡률반경과 두께의 변화를 생각할 수 있다. 또한 렌즈의 마운트 및 광학계의 위치를 잡아주는 경통의 팽창수축에 의한 효과도 고려대상이 된다.^[2]

열영상 광학계를 설계, 제작할 때는 상온(20°C)을 기준으로 작업하지만 실제 열영상 장비는 $-32^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ 온도범위에서 운용되기 때문에 일반적으로 운용온도가 상온에서 많이 벗어날수록 열영상 광학계의 성능저하가 크게 발생한다. 이러한 광학성능저하는 구면수차 또는 코마와 같은 Seidel 수차특성을

[†]E-mail: hkim@add.re.kr

나쁘게 하기도 하지만 대부분의 경우 defocus(초점이동량)로 발생하게 되고, 온도변화에 따른 광학성능의 보상도 발생될 defocus를 제거하는 방법을 택하게 된다.

그러면 온도변화가 열영상 광학계에 발생시키는 defocus를 알아보기로 하자. 여기서는 개념을 쉽게 파악하기 위해서 단일 렌즈를 가지고 설명하고자 한다.

온도변화에 따라 defocus를 발생시키는 요인은 렌즈의 굴절률, 곡률반경 및 두께의 변화 그리고 광학계 경통의 팽창수축을 생각할 수 있는데, 렌즈두께의 변화가 미치는 영향은 아주 작기 때문에 고려대상에서 제외한다.

단일 렌즈에 대한 초점거리는 근축광선 추적식에 의하여 다음과 같이 정의된다:

$$f = \frac{K}{n-1} \quad (1)$$

여기서 f 는 초점거리, n 은 굴절율이며, $K = R_1R_2/(R_1 + R_2)$ 이다. 이때 R_1 과 R_2 는 렌즈의 곡률반경이다. 온도 변화는 렌즈의 굴절률 변화를 가져오고, 렌즈의 굴절률 변화는 렌즈의 초점거리 변화를 유발하므로 초점거리는 렌즈의 굴절율에 대한 함수 관계가 성립한다. 따라서 위 식을 굴절율 n 으로 편미분하면 다음 식과 같다:

$$\frac{\partial f}{\partial n} = -\frac{K}{(n-1)^2} \quad (2)$$

위 식을 다시 온도변화에 따른 초점거리변화 식으로 표현하면

$$\Delta f_n = -\frac{K}{(n-1)^2} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T = -\frac{f}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T \quad (3)$$

가 된다.

다음으로 온도변화에 따른 렌즈의 곡률반경의 변화는 $\Delta R = R \cdot \alpha_R \cdot \Delta T$ 로서 초점거리 변화는

$$\Delta f_R = \alpha_R \cdot f \cdot \Delta T \quad (4)$$

가 된다. 여기서 α_R 은 렌즈의 열팽창계수이다.

다음은 온도변화에 따른 광학계 경통의 팽창수축에 의한 초점거리의 변화를 알아보기로 하자. 단일 렌즈와 초점면 사이가 경통의 팽창수축에 따라 선형으로 길이가 변한다고 가정하면 경통에 의한 초점거리의 변화는 단순히 다음과 같은 관계식을 만족하게된다:

$$\Delta f_h = \alpha_h \cdot L \cdot \Delta T \quad (5)$$

여기서 α_h 는 경통 재료의 열팽창계수이고, L 은 렌즈로부터 초점면까지의 경통 길이이다.

그러면 여기서 온도변화에 의한 초점거리 변화(defocus)의 총량을 δ 라고 하면, 그 δ 는 다음과 같이 표현된다:

$$\delta = \left\{ -\frac{f}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} + \alpha_l \cdot f + \alpha_h \cdot L \right\} \Delta T \quad (6)$$

위 식을 사용하면 온도변화에 의한 굴절률, 곡률반경 및 경통의 길이 변화에 따른 defocus를 계산할 수 있으며, 여기서

이주 간단한 예를 들어 계산해 보기로 하자. 계산을 단순화하기 위하여 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 로 가정하고, Ge 재질인 단일렌즈의 직경을 10 cm F/#를 2.5로 가정하면 초점거리 f 는 25 cm가 된다. 먼저 온도변화에 따른 굴절율변화에 의한 defocus를 계산하면

$$\Delta f_n = -\frac{f}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T = -\frac{250 \text{ mm}}{4.004-1} \cdot 300 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 10^\circ\text{C} \quad (7)$$

가 된다. 여기서 Ge은 $n = 4.004$ 이고, $\partial n / \partial T = 300 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 을 갖는다.

다음은 온도변화에 따른 곡률반경의 변화에 의한 defocus를 계산하면

$$\Delta f_R = \alpha_R \cdot f \cdot \Delta T = 6.1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 250 \text{ mm} \cdot 10^\circ\text{C} = 15.3 \text{ } \mu\text{m} \quad (8)$$

가 된다. 이 때 α_R 은 Ge의 열팽창계수이다.

다음은 온도변화에 따른 광학계 경통의 팽창수축에 의한 defocus를 계산하면

$$\Delta f_h = \alpha_h \cdot L \cdot \Delta T = 23 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 250 \text{ mm} \cdot 10^\circ\text{C} = 57.5 \text{ } \mu\text{m} \quad (9)$$

가 된다. 이 때 α_h 는 알루미늄 경통의 열팽창계수이다.

위 계산결과에서 보듯이 defocus에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 온도변화에 따른 굴절율 변화에 기인하는 것으로 나타났다. 온도 10°C 변화에 의해 defocus가 수백 μm 생기므로 defocus를 반드시 보상해주어야 한다.

III. 비열화 시뮬레이션

3.1. 실험대상 열영상 장비

본 비열화 분석 및 실험을 위해 연구된 장비는 줌 비 20:1의 적외선 줌 광학계가 장착된 3~5 μm 파장대역의 열영상 장비 연구시제이다. 장비에 사용된 검출기는 320×240 초점면 배열(FPA:focal plane array) 검출기로 HgCdTe 재질이다. 검출기 픽셀(pixel) 한 개의 크기는 가로, 세로 각각 30 μm 이며 90%의 fill factor를 갖는다. 따라서 시계를 결정하는 검출기의 크기는 가로, 세로 각각 9.6 mm 및 7.2 mm이며, 대물구경의 크기를 줄이기 위해 콜드 쉴드의 F-number는 F/2.5로 하였다.

표 1. 줌 렌즈 광학계 설계사양

파장대역(wave band)	3.7 μm ~4.8 μm	
중심파장(center wavelength)	4.2 μm	
구경(aperture)	110 mm	
줌 비(zoom ratio)	20:1	
줌 광학계 시계	최고배율 ($\times 20$)	2.0 $\times 1.5^\circ$
	최저배율 ($\times 1.0$)	40 $\times 30^\circ$
줌 광학계 초점거리	최고배율 ($\times 20$)	275.0 mm
	최저배율 ($\times 1.0$)	13.78 mm
F-Number	F/2.5	
투과율(transmission)	$\geq 70\%$	
광학계 총 길이	315 mm	

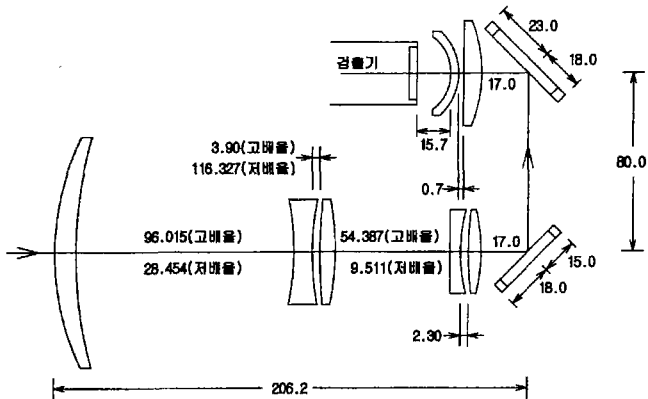


그림 1. 비열화 대상 열영상 장비의 줌 광학계 layout(협시계).

위의 같은 검출기 사양을 바탕으로 광학계는 넓은 시계가 확보되어 전반적인 상황 인식에 유리하며 표적의 세밀한 관측까지도 가능한 줌(zoom) 방식으로 구성하였다. 특별히 줌 광학계의 줌 비(zoom ratio)는 통상적인 3~4 정도를 대폭 확장하여 최대배율 20배, 최저배율 1배인 줌 비 20:1의 광학계로 설계하여 최저배율의 시계 40°×30°에서 최대배율의 시계 2°×1.5°가 보장되도록 하였다.

3.2. 비열화 시뮬레이션

3.2.1 민감도(sensitivity) 분석

본 연구시제의 비열화 시뮬레이션을 위해 먼저 배울렌즈와 보정렌즈의 이동에 따른 영상의 defocus 민감도(sensitivity)를 분석하였다.

줌 광학계의 민감도는 배울렌즈와 보정렌즈를 1.0 mm 씩 이동시킬 때 상면에서 영상의 defocus에 미치는 변화량을 구하여 분석하였으며 계산된 값은 아래의 표 2와 같다. 표에서 수치의 단위는 λ/mm 이다.

위의 표 2로부터 알 수 있듯이 배울렌즈를 1.0 mm 이동시켰을 때 상면에서 defocus의 변화량이 $3.0333 \lambda/\text{mm}$ 로 민감도가 매우 큰 것을 알 수 있으며 보정렌즈에 대한 defocus 민감도도 $1.0705 \lambda/\text{mm}$ 로 작지 않음을 알 수 있다. 따라서 온도 변화에 따른 영상의 defocus를 보정 할 경우 배울렌즈 단독에 대한 보상이 가능하며, 때에 따라서는 두 렌즈의 조합으로도 가능함을 알 수 있다. 그러나 10배 근처의 중배율에서는 배울렌즈와 보정렌즈 모두 1.0 mm 이동에 대한 defocus 민감도가 매우 작으며, 특히 배울렌즈의 경우 민감도가 $-0.0377 \lambda/\text{mm}$ 로 이는 배울렌즈를 아무리 움직여도 defocus에는 영향이 없음을 보여준다. 즉, 온도변화에 따른 defocus를 보상하기 위해 배울렌즈를 아무리 많이 움직여도 영상의 defocus는 개선되지 않음을 의미한다. 또한 두 렌즈의 민감도 부호가 역전됨으로서 고배율의 경우와 달리 렌즈를 반대 방향으로 이동시켜

표 2. 비열화 대상장비의 defocus 민감도(sensitivity) 분석

구분	20배	17.5배	15배	12.5배	10배	7.5배	5배	2.5배	1배
배울렌즈	3.0333	2.0633	1.2281	0.5494	-0.0377	-0.0821	-0.2614	-0.2444	-0.1299
보정렌즈	1.0705	0.8592	0.6380	0.4205	0.2837	-0.2270	-0.4327	-0.6813	-0.8589

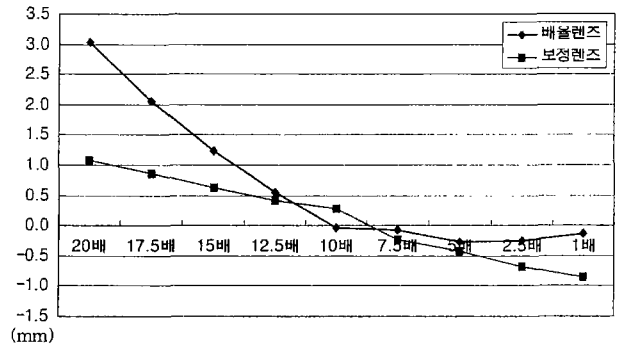


그림 2. 비열화 대상 열영상 장비의 민감도(sensitivity) 분석.

야 고배율과 같은 방향의 defocus 변화를 얻을 수 있다. 마지막으로 저배율의 경우 배울렌즈와 보정렌즈의 민감도가 고배율 만큼은 좋지 않으나 중배율처럼 심각한 상황은 아니며 두 렌즈의 적절한 조합을 통해 defocus 보상이 가능하나 전체적인 상황이 여의치 않다면 보정렌즈 단독으로도 비열화 보상이 가능할 것으로 판단된다. 이들에 대한 이해를 돕기 위해 앞의 표를 그림으로 다시 표현해보면 그림 2와 같다.

3.2.2 비열화 줌 궤적 시뮬레이션

줌 광학계가 장착되는 열영상 장비의 작동온도 범위는 $+55^{\circ}\text{C}$ 에서 -32°C 이며, 줌 광학계의 비열화 보상은 이 온도 구간 내에서 정확하게 이루어져야 한다. 따라서 이러한 비열화 보상을 위해 본 줌 광학계에서는 배율 전환을 위해 움직이는 배울렌즈와 보정렌즈의 줌 궤적을 온도 구간 별로 마련하여 온도센서를 통해 읽어들이는 온도의 궤적으로 두 렌즈를 움직이도록 하는 방법을 채택하였다.

비열화 보상을 위한 온도 구간별 줌 궤적의 시뮬레이션을 위해 SIGMA2100이라는 광학계 설계 소프트웨어를 사용하였으며 온도변화에 따른 렌즈재질의 굴절률 변화량 및 팽창율은 제작에 사용되는 렌즈재질의 공급 회사(Eagle-Picher Technologies 사)로부터 제공받은 자료를 이용하였다. 또한 렌즈와 렌즈를 연결하는 기구 프레임은 알루미늄으로 시뮬레이션 하였으며 SIGMA2100에서 제공되는 기본값을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 각종 치수는 아래의 표 3과 같다.

연구시제의 줌 광학계는 줌 비가 20:1이나 되는 시스템이기 때문에 각 배율에서 측정 성능은 회절한계의 성능을 가지나 비축으로 갈수록 그 성능이 많이 저하된다. 따라서 SIGMA2100을 이용한 줌 궤적의 비열화 시뮬레이션은 온도구간을 5°C 로 나누어 계산하였으며, 각 온도별로 두 렌즈의 위치를 최적화

표 3. 렌즈 재질 및 기구물 재질의 온도에 따른 특성

구분	Si	Ge	Al
dn/dt	1.5 E-4	4.0 E-4	-
$\alpha(1/K)$	2.6 E-6	6.0 E-6	2.4 E-5

(단위 : λ/mm)

표 4. 비열화 대상장비의 온도변화에 따른 defocus 분석

구분	고배율(20배)	중배율(10배)	저배율(1배)
+55°C	-0.862 mm	-0.479 mm	-0.344 mm
-30°C	+1.327 mm	+0.705 mm	+0.531 mm

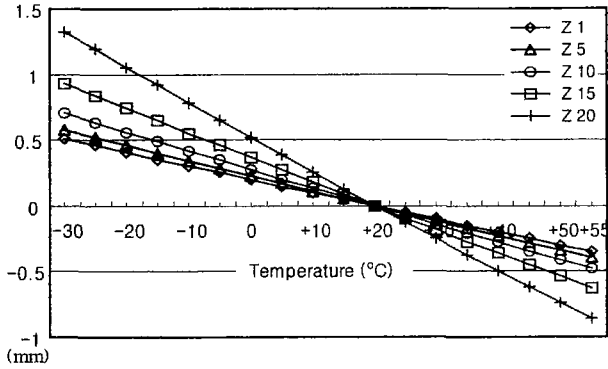


그림 3. 비열화 대상장비의 온도변화에 따른 defocus 분석.

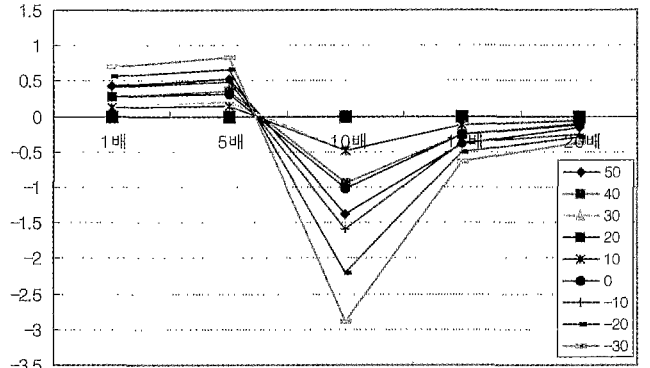
할 때 성능에 대한 판단기준은 각 파장에 대한 축상 RMS spot이 가장 작게 되는 위치로 정하였다.

비열화를 위한 줌 궤적을 구하기 전에 온도변화에 따른 각 줌 배율의 defocus를 계산하여 보았으며 결과는 표 4와 그림 3에 보였다. 그림에서 보듯이 고배율인 20배에서 광학계의 defocus는 +55°C일 때 -0.862 mm, -30°C일 때 +1.327 mm이며 저배율로 갈수록 초점거리가 작아짐에 따라 온도에 따른 defocus 양이 줄어 +55°C일 때 -0.344 mm, -30°C일 때 +0.531 mm이다. 이와 같은 양은 one-quarter wave Rayleigh criteria를 적용할 경우 중심파장에 대한 허용 가능한 초점심도인 0.05 mm에 비하면 매우 큰 수치로 별도의 보상 메커니즘이 없으면 제대로 된 영상을 관측할 수 없다.

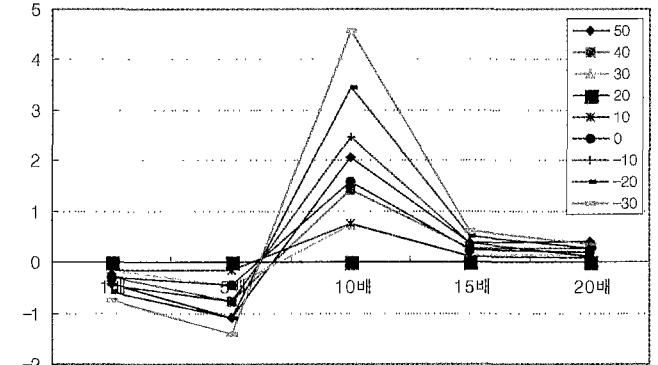
광학계 성능에 심각한 악 영향을 미치는 이와 같은 온도에 따른 영상의 defocus를 보정하기 위하여 각 온도와 배율에 따른 배율렌즈와 보정렌즈의 최적위치를 구하는 시뮬레이션을 수행하였다. 물론 모든 다른 광학계의 마찬가지로 최초 시스템을 설계하는 기준 온도는 20°C이었으며 이를 기준으로 +방향과 -방향으로 온도 변화량 ΔT 를 주어가며 비열화 보상 줌 궤적을 구하였다. 이때 모든 줌 배율에 대한 시뮬레이션은 방대한 데이터량 및 시간에 대한 소요로 대표성을 가지는 배율

표 5. 비열화 대상장비의 온도변화에 따른 줌 궤적 분석

배율	렌즈구분	온도 (단위 : mm)										
		55°C	50°C	40°C	30°C	20°C	10°C	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	
1배	배율렌즈	28.703	28.632	28.488	28.346	28.203	28.068	27.925	27.783	27.641	27.500	
	보정렌즈	9.104	9.176	9.322	9.467	9.613	9.763	9.908	10.053	10.199	10.344	
5배	배율렌즈	78.504	78.422	78.258	78.092	77.923	77.756	77.585	77.412	77.238	77.062	
	보정렌즈	25.075	25.227	25.534	25.841	26.151	26.459	26.771	27.084	27.399	27.715	
10배	배율렌즈	87.294	87.507	87.947	88.401	88.881	89.373	89.902	90.467	91.087	91.778	
	보정렌즈	40.335	40.019	39.362	38.679	37.950	37.199	36.377	35.489	34.499	33.376	
15배	배율렌즈	93.080	93.143	93.271	93.399	93.528	93.655	93.782	93.908	94.035	94.161	
	보정렌즈	46.648	46.584	46.454	46.325	46.195	46.070	45.943	45.817	45.691	45.567	
20배	배율렌즈	95.956	95.979	96.028	96.079	96.133	96.203	96.264	96.383	96.433	96.503	
	보정렌즈	53.744	53.671	53.528	53.392	53.257	53.177	53.062	53.137	52.980	52.894	



① 배율렌즈



② 보정렌즈

그림 4. 비열화 대상장비의 온도변화에 따른 줌 궤적 분석.

인 20배, 15배, 10배, 5배, 1배에 대해서만 실시하였다.

시뮬레이션 결과는 표 5와 같다. 표에서 보듯이 20배에서 비열화 보상을 위한 궤적의 이동량(55°C에서 -30°C로 변화할 경우의 궤적의 이동량)이 배율렌즈와 보정렌즈 각각 +0.547 mm, -0.85 mm이며, 1배에서는 -1.203 mm, +1.24 mm이다. 그러나 앞의 민감도 분석에서 예상했듯이 중배율인 10배에서는 이동량이 각각 +4.484 mm, -7.0 mm로 다른 배율의 이동량 보다 10배 이상 이동거리가 더 필요하다. 또한 저배율에서 고배율로 이동할 때 배율렌즈와 보정렌즈에 대한 이동량의 부호가 바뀌는 궤적의 역전이 발생한다. 이와 같은 분석을 보다 가치적으로 나타내기 위하여 앞의 표 5의 결과를 그림 4에 보였다.

앞의 표 5에서 언급한 바와 같이 그림 4를 보면 줌 배율 5

배와 10배 사이에서 궤적의 역전이 발생하는 것을 쉽게 알 수 있다. 즉, 기준이 되는 20°C를 중심으로 배울렌즈의 위치는 고배율에서 +55°C가 20°C 밑에 있으며 -30°C는 위에 있으나, 저배율에서는 +55°C가 20°C 위에 있고 -30°C가 밑에 있다. 또한 보정렌즈도 마찬가지로 역시 궤적의 역전이 발생하며 배울렌즈와는 반대로 줌 궤적이 이동한다. 이러한 현상은 앞의 민감도 분석에서 예측되었던 일로 표 2의 defocus 민감도 분석 결과를 보면 배울렌즈와 보정렌즈 모두 중배율 근처에서 1 mm 이동에 대한 defocus의 민감도가 반대 부호로 바뀌는 것을 알 수 있다. 이는 온도 변화에 의해 발생하는 일정한 defocus에 대해 고배율과 저배율에서 기준 줌 위치에 대해 각기 다른 방향으로 렌즈가 움직여야 비열화 보상이 이루어짐을 의미한다. 이와 같은 결과는 추후에 비열화를 위한 줌 궤적을 마련하여 실제 구동하는 데는 별다른 문제점은 없으나, 줌 궤적의 역전이 발생하는 바로 그 배율에 대해서는 물리적으로 어떤 일이 발생할지는 또 다른 시뮬레이션을 통해 검증해야만 할 것이다.

3.3. 비열화 보상을 위한 구동 프로그램

본 시험에 사용된 줌 광학계 구동장치는 87C196KB 마이크로 컨트롤러와 스텝모터로 구성되며, 비열화 보상에 필요한 광학계 내부 온도 정보는 DALLAS사의 DS1620 디지털 온도센서를 이용하여 획득한다. 제어용 컴퓨터인 87C196KB 마이크로 컨트롤러에 탑재되는 광학계 구동 프로그램은 배율변환, 초점조정과 같은 렌즈구동과 온도측정, 줌궤적 선택과 같은 비열화 보상관련 루틴 등으로 구성된다. 그림 5는 비열화 보상을 위한 광학계 구동장치의 프로그램 순서도를 보여주고 있다. 각 루틴에서 처리하는 사항을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 광학계 초기화

주프로그램에서 제일 먼저 수행되는 과정은 광학계 초기화이다. 이 루틴은 전원을 켤 때와 컴퓨터 초기화 신호가 발생할 때 수행된다. 초기화 과정에서는 임의의 위치에 있는 2개 렌즈(배울렌즈와 보정렌즈)를 최저배율 위치로 이동시키는 작업을 수행한다. 이것을 위하여 우선 2개의 렌즈를 초기위치(광스위치 위치)로 이동시킨다. 다음으로 광스위치 출력신호를 측정하여 각 렌즈를 미세 조정함으로써 정확한 초기위치를 찾는다. 각 렌즈의 초기위치를 찾은 후 최저배율로 이동시키도록 한다.

(2) 광학계 온도 측정

비열화 보상에 필요한 온도정보를 획득하기 위한 루틴으로서 광학계의 내부 온도를 측정하는 루틴이다. 사용된 센서는 DALLAS사의 DS1620 디지털 온도센서로서 -55°C에서 +125°C 범위를 측정할 수 있으며, 측정오차는 0.5°C이다. DS1620 온도센서는 측정된 데이터를 9 bit 길이로 직렬 전송하며, 상위 bit는 부호를 나타낸다. 직렬데이터 송수신 인터페이스는 EPLD 소자를 이용하여 구현하였으므로 제어 컴퓨터에서는 온도 데이터를 16 bit 길이로 읽으면 된다. 다만 부호 bit를 감안하여 데이터를 처리해야 한다. 비열화 보상에서 요구하는 온도오차는 1°C 정도면 충분하다. 따라서 DS1620에서 측정된 데이터를 오른쪽으로 1 bit 이동 후 1 byte(8 bit) 데

이터로 변환시키면 간단히 해결된다.

(3) 줌궤적 선택

광학계 온도 측정루틴에서 얻은 온도정보를 이용하여 해당 온도에 적합한 줌궤적을 선택하는 루틴이다. 비열화 보상을 위한 줌 궤적은 +55°C에서 -30°C까지 5°C 단위의 표로 구성되어 있다. 따라서 매 5°C 줌궤적에 대하여 ±2~3°C 한도 내에서 하나의 궤적을 선택하도록 설계하였다.

(4) 메시지 처리 및 프로그램 분기

이 루틴은 무한반복을 만들기 위한 루틴으로서 배율변환이나 초점조정 등의 메시지 유무를 검사한다. 만일 시스템으로부터 처리를 요구하는 메시지가 있으면 프로그램 분기를 통하여 해당 사항을 처리하도록 한다. 처리할 새로운 메시지가 존재하지 않으면 광학계 내부온도 측정과 측정온도에 해당하는 줌궤적 선택을 무한 반복하게 된다.

(5) 초점조정

초점조정 메시지를 처리하는 루틴이다. 초점조정은 대물렌즈의 이동을 통하여 이루어지며, 대물렌즈 이동은 직류모터를 이용하고 있다. 이 루틴은 원초점조정과 근초점조정의 2개 루틴으로 구성된다. 일단 초점조정이 시작되면 조정 메시지가 소멸되거나 원 또는 근 초점 조정 제한범위에 도달할 때까지 계속된다. 렌즈이동의 제한을 위해 사용된 스위치는 대물렌즈 기구부에 의해 작동되며, 스위치 신호가 발생하면 인터럽트가 발생하여 모터구동을 정지시키도록 하였다.

(6) 배율변환

배율변환 처리 메시지에 따라 저배율 또는 고배율로 배울렌즈를 이동시키는 작업을 처리하는 프로그램으로서 구동변위 추출과 렌즈이동 그리고 후처리 과정으로 구성된다. 배율전환

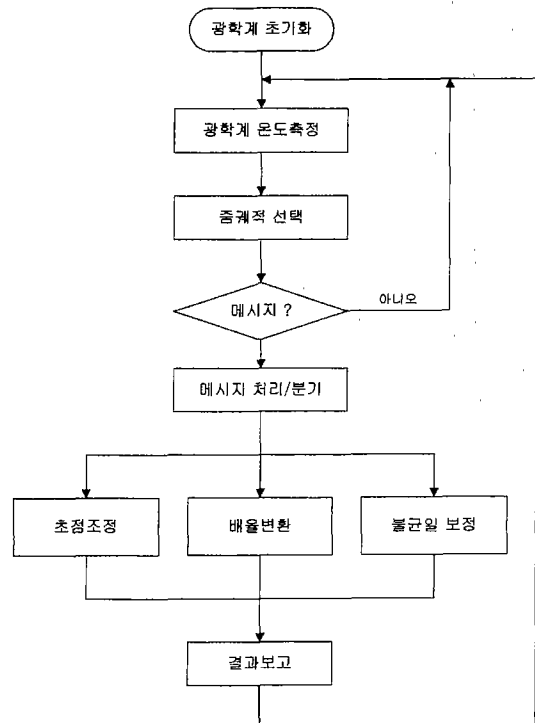


그림 5. 비열화 보상을 위한 광학계 구동프로그램 순서도.

을 수행하는 과정은 다음과 같다. 처리 메시지에 따라 배울전환 방향이 결정되면 먼저 각 방향에 대한 배울이동 한계를 점검한다. 해당 방향으로 배울이동이 가능하면 이동할 위치까지의 구동변위를 추출한다. 이 때 사용되는 증폭적인 현재 광학계 내부 온도에 해당하는 궤적으로서 증폭적 선택루틴에 의해 이미 결정된 궤적이다. 렌즈이동을 위한 제반 준비가 완료되면 스텝모터를 구동하여 배울변환을 수행한다.

(7) 불균일 보정

열영상의 불균일성을 보정할 때 사용하는 기능으로서 배울렌즈와 보정렌즈를 강제로 초점이 흐린 영역으로 이동시키기 위한 루틴이다. 신호처리기로부터 불균일 보정 메시지가 전달되면 미리 지정된 위치로 이동하게 되며, 해제 메시지가 전달되면 원래 배울위치로 이동하게 된다.

(8) 결과보고

수신된 각 메시지에 대응되는 프로그램을 수행한 후 그 결과를 신호처리기로 전달하는 루틴이다. 초점조절과 불균일 보정 프로그램을 수행한 후는 특별한 정보전달 없이 수신 메시지 상태를 다시 전달하며, 배울변환 후에는 현재 배울에 대한 시계정보를 전달한다.

IV. 실험 장치 및 방법

4.1. 실험장치

열영상 장비의 비열화 시험을 위해 가장 필요한 장비는 비열화를 확인할 수 있는 시준기(collimator)이다. 물론 온도 시험기의 내부와 외부를 연결해 주는 창(window)이 적외선 투과 재질인 게르마늄으로 만들어져 있다면 온도 시험기 안에 시준기를 넣지 않아도 되므로 별도의 비열화된 시준기가 필요치 않다. 그러나 이러한 적외선 전용 온도 시험기를 갖추지 못한 조건에서 비열화 시험을 실시하기 위해서는 대상이 되는 열영상 장비는 물론 시준기를 온도 시험기 안에 함께 설치하여야 열영상 장비에 무한대로부터의 표적을 제공할 수 있다. 그런데 이때 표적 제공을 위한 시준기가 비열화 되어 있지 않으면 즉, 온도 변화에 따라 시준기에서 제공되는 표적이 무한대의 위치로부터 변화하게 되면 열영상 장비에 대한 표적의 기준이 변하게 되므로 관측되는 열 영상에 대한 정확한 판단을 할 수 없게 된다. 즉, 영상이 흐리게 되었을 때 그 원인이 열영상 장비의 비열화가 안된 탓인지 아니면 시준기 문제인지 원인 규명이 어려워진다.

비열화 시험을 위해 사용된 시준기는 이스라엘 CI SYSTEM사에서 구입한 SR-9-FTC이며, 초점에 대한 안정도는 -35°C에서 +72°C 범위 내에서는 유효한 것으로 시스템 사양에 나와 있으며 이에 대한 검증 시험은 1999년 1월에 국방과학연구소 환경시험장에서 실시한 바 있다.

비열화 시험에 사용된 온도 시험기는 국방과학연구소 환경시험장에 있는 고도시험 겸용 장비로 가로 1.5 m, 세로 1.5 m이며, 열영상 장비 및 시준기의 배치는 그림 6과 같다. 그리고 실제 비열화 시험을 위한 장비의 배치 장면은 그림 7과 같다.

시험기 내의 온도는 밖에서 자동 및 수동으로 제어 할 수

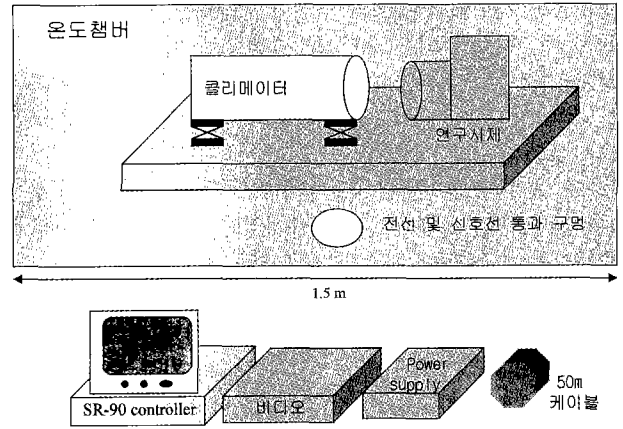


그림 6. 비열화 시험 장치.

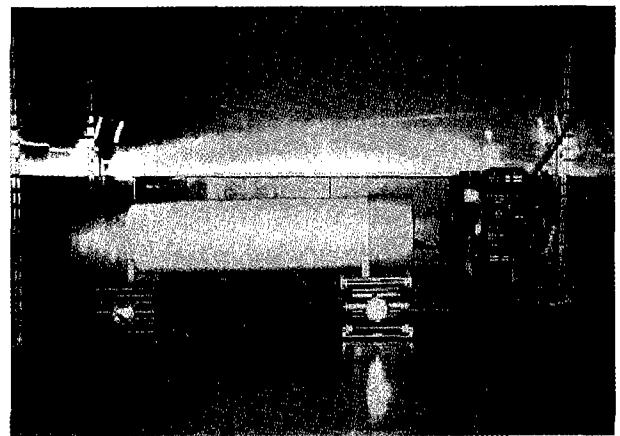


그림 7. 비열화 시험 장면.

있으며 챔버 내의 온도에 대한 확인은 시준기의 온도 제어를 위해 사용되는 controller의 온도센서를 통해 보여지는 온도와 시험기 제어판의 온도 차이를 비교하였다. 시험을 진행하면서 온도를 비교하여 본 결과 둘 사이에는 1~2°C 정도 차이가 났으며 이는 온도 센서 위치의 차이와 자체 교정에 의한 차이로 판단되며 비열화 시험에는 지장이 없는 차이이다.

4.2. 시험절차

1차 및 2차 비열화 시험에 대한 시험 절차는 서로 동일하다. 그림 7과 같이 장비를 온도 시험기 내에 설치하고 장비가 정상 작동하는지에 대한 확인을 한다. 장비가 정상 작동하는 것을 확인한 다음에는 시험기의 온도를 +55°C로 올린다. 이때 저온 시험에 대비하여 제습을 함께 병행한다. +55°C로 장비가 안정화 된 후 장비를 동작시켜 광학계의 증 궤적이 고배율과 저배율로 이동할 때 시준기에서 제공되는 표적의 선명도를 관찰한다. 이때 열 영상의 선명도가 떨어진다 해도 장비에 대해서는 별도의 조작을 가하지 않으며 오직 배울 변환을 통한 각 배울에서의 영상만을 확인한다. 비열화 증 궤적의 열 영상은 비디오로 기록한다. +55°C에서의 영상을 확인한 후 챔버의 온도를 +50°C로 내리며 앞에서와 마찬가지로 열 영상을 관찰·기록한다. 이와 같은 순서로 챔버의 온도를 내려가며

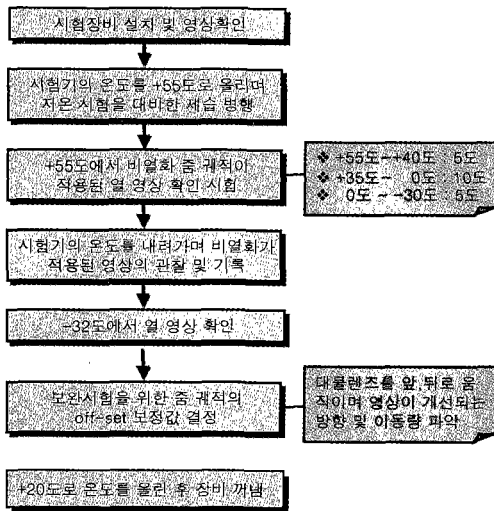


그림 8. 비열화 시험 절차.

비열화 시험을 진행한다. 이때 시험하는 온도는 앞에서 언급한 바와 같이 +20°C를 중심으로 $\pm 20^\circ\text{C}$ 근처에서는 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 로 그 외의 온도범위에 대해서는 $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ 로 시험하였다.

비열화 시험 결과는 관찰자가 판단하기에 만족스러울 수도 있고, 아닐 수도 있다. 만약 만족스럽지 못한 결과를 얻게 된다면 다음의 비열화 시험 계획을 수립하여야 하며 본 비열화 시험에서는 다음과 같이 준비하였다. 비열화 줌 제적을 적용한 시험 결과가 만족스럽지 못할 경우 이에 대한 원인은 여러 가지로 추측할 수 있겠으나 과거 광학계 설계와 시험을 통한 경험을 바탕으로 예측해 볼 때 설계에 관련된 변수와 제작 변수의 불일치에서 오는 경우가 많으며 이런 경우는 줌 제적을 그대로 유지하고 전체적인 제적의 off-set 만을 보정하는 방법으로 충분히 수정되리라 판단된다. 따라서 본 시험에서는 이에 대한 판단 기준량을 결정하기 위하여 비열화 시험의 최저 온도인 -32°C에 대한 영상 확인 작업이 끝난 후 초점조절 렌즈인 대물렌즈를 앞·뒤로 움직이며 영상이 개선되는 방향을 파악한다. 이와 같은 과정에서 파악된 방향은 추후 시험을 위한 비열화 줌 제적의 off-set 방향이 되며 그 양은 장비를 온도 시험기에서 꺼낸 뒤 최초 장비를 입고할 때 표시해 두었던 기준점으로부터 대물렌즈가 얼마나 이동하였는지를 측정함으로써 알 수 있다. 즉, 대물렌즈의 민감도에 대한 배율렌즈와 보정렌즈의 민감도 비율을 알고 그 방향을 정확하게 안다면 대물렌즈의 이동을 통하여 확보한 데이터를 배율렌즈나 보정렌즈의 이동량으로 환산할 수 있다. 추후 보완시험에 대한 부가 시험을 끝낸 후 시험기의 온도를 +20°C로 올려 유지시킨 후 꺼낸다. 이와 같은 일련의 과정을 간단히 요약하면 그림 8과 같다.

4.3. 실험결과

비열화 시험 목적은 시뮬레이션을 통하여 계산된 비열화 보정값이 실제 제작된 열영상 광학계에 적용 가능한지 여부에 대한 판단과 분석에서는 예상치 못했던 여러 가지 주변요소들을 파악하는데 있다.

연구시제에 대한 비열화 시험은 2회에 걸쳐 실시되었다. 1차 시험은 시뮬레이션을 통하여 얻어진 비열화 줌 제적이 연구시제에 잘 적용되는지에 대한 확인 시험이었으며, 2차 시험은 비열화 줌 제적을 적용하기전의 원래 줌 제적에 대한 열영상의 defocus를 관찰하는 시험이었다.

비열화 시뮬레이션을 통하여 계산된 줌 제적은 +55°C부터 -30°C까지 이나 실제 비열화 시험에서는 +55°C에 대한 열영상은 불균일 보상이 제대로 이루어지지 않아 얻을 수 없었으므로 실제 시험은 +50°C부터 이루어졌다. 또한 저온에 대한 비열화 시험은 계산된 -30°C를 요구되는 최저 온도인 -32°C까지 적용하여 실시하였다. 온도구간은 시험에 소요되는 시간을 절약하기 위하여 광학계 설계의 기준이 되는 +20°C를 중심으로 $\pm 20^\circ\text{C}$ 근처에서는 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 로 나누어 시험을 실시하였으며, 그 외의 온도범위에 대해서는 $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ 로 나누어 시험하였다. 또한 각각의 온도에서 다음 온도 구간으로 이동하는데 소요되는 시간 간격은 2시간으로 설정하여 1시간 30분은 장비가 온도에 적응하는 시간으로 나머지 30분은 열영상을 관찰하는 시간으로 할애하였다. 물론 이와 같은 시간의 배분이 충분히 긴 시간이라고는 할 수 없으나 열영상 장비의 부피가 매우 작고 장비를 에워싸는 경통이 없어 외부에 노출되어 있는 것을 감안하면 이와 같은 시간 배분은 충분하리라 판단하였다.

비열화 시험을 실시한 결과 만족스러운 보상 결과를 얻었다. 비열화 시뮬레이션을 통하여 계산된 줌 제적을 열영상 장비에 적용하여 온도에 따른 열영상의 변화를 관찰 한 결과 대체로 우수한 보정 효과를 얻을 수 있었다. 표적은 1배율과 20배율을 동시에 판단할 수 있는 표적이 적당치 않아 관심의 대상인 고배율에 비중을 두어 표적을 선택하였으며 저배율에서는 +20°C 영상과 비교하는 정도로 기준을 삼았다. 다만 +55°C에서는 검출기의 불균일 보상을 위한 보정값이 적당하지 않아 영상이 포화되어 제대로 된 영상을 얻을 수 없었으며 실질적인 비열화 시험은 +50°C에서부터 이루어졌다. 설계 기준 온도인 +20°C를 중심으로 가장 온도 차이가 큰 -30°C에 대한 비열화 보정 전의 영상과 보정 후의 영상을 비교하면 그림 9와 같다. 그림에서 보듯이 비열화 보정 전의 영상은 표적의 모서리 부분이 많이 뭉개어져 영상이 선명하지 않지만 보정 후의 영상은 선명하게 개선되었음을 보여준다.

앞에서도 언급한 바와 같이 비열화 1차 시험에서는 시뮬레이션을 통하여 얻어진 줌 제적이 적용된 연구시제의 온도 변

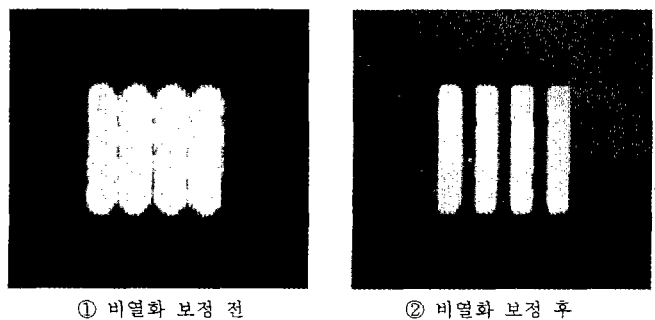


그림 9. 비열화 적용 전·후의 열 영상 비교(-30°C).

화에 따른 열 영상을 관찰하였으며, 2차 시험에서는 비열화 되기 전의 열 영상을 관찰하였다. 2차 시험 결과 비열화를 적용하기 전의 열 영상을 분석하여 보면 온도 변화에 따라 영상이 흐려지는 정도가 전체적으로 그리 심각하지는 않았다. 따라서 인뜻 생각하면 비열화 줌 궤적을 적용할 필요 없이 단순한 초점조절 렌즈의 이동을 통하여 온도에 따라 영상의 흐려짐을 보정 할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이럴 경우 줌이러는 고유의 장점은 더 이상 유지하기 어려우며 배율을 바꿀 때 마다 초점을 매번 맞추어야 하는 불편함이 따르게 된다. 왜냐하면 영상의 흐려지는 정도가 크든 작든 각 배율별로 다르기 때문에 어느 한 배율에서 초점조절 렌즈를 이용하여 영상을 선명하게 맞추어 놓고 다른 배율로 이동하게 되면 더 이상 초점이 맞지 않고 영상이 흐려지게 될 것이기 때문이다. 특히, 중배율의 경우 앞의 민감도 분석에서 예측된바와 같이 열영상의 흐려지는 정도가 고배율에 비해 더 심해 표적의 선명도가 많이 저하된다. 따라서 비열화된 줌 궤적을 적용하지 않고 단순히 초점조절 렌즈를 이용하여 영상을 보정하기는 어려우며 각 배율에 따른 보상 정도가 차별화 되는 줌 궤적이 필요함을 알 수 있었다.

비열화 보상에 대한 보완시험을 위해 마지막 시험 온도인 -32°C 영상을 관찰 한 후 대물렌즈를 앞·뒤로 움직여 영상이 개선되는지에 대한 확인시험을 실시하였다. 시험 결과 줌 렌즈를 움직이기에 따라 영상이 다소 개선되는 결과를 얻기는 하였으나 눈에 띄는 효과는 아니었다. 영상이 최대한으로 개선되었을 때 대물렌즈가 이동한 거리 및 방향은 배율렌즈 방향을 향하여 약 -0.14 mm 움직였으며 민감도 분석 결과를 바탕으로 계산해 보면 상면에서 0.52 mm 의 defocus에 해당하는 양으로 배율렌즈의 경우 0.24 mm , 보정렌즈의 경우 0.67 mm 를 움직여야 보상되는 defocus 양이다. 이러한 보상량은 그리 큰 수치는 아니며 시뮬레이션 적용 결과 또한 그 온도에서 최상의 영상이라고는 할 수 없으나 온도 변화에 대한 영상의 defocus가 거의 개선된 우수한 결과라고 보여진다. 시뮬레이션을 통해 계산된 줌 궤적의 적용이 효과적으로 광학계의 비열

화를 달성할 수 있음을 확인하는 시험이었다.

V. 결 론

본 연구에서는 넓은 운용온도 범위에서도 열영상 장비의 광학성능이 유지될 수 있도록 비열화 보상을 시도하였다. 열영상 광학계에 사용되는 적외선 광학재료의 온도변화에 따른 굴절률 변화가 광학성능에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 이론적으로 조사하였다. 그리고 열영상 광학계의 비열화 이론을 토대로 연구시제에 대한 비열화 시뮬레이션을 수행하였다.

비열화 시험은 2차에 걸쳐 수행되었으며, 1차는 비열화가 보상된 줌 궤적을 전자적으로 내장하여 열영상 장비 운용온도에 따라 자동적으로 배율렌즈와 보정렌즈가 보상된 줌궤적에 따라 이동하도록 조치하였다. 그리고 2차 시험은 비열화 보상이 전혀 되지 않은 줌 궤적을 그대로 사용하여 1차 시험과 같은 방법으로 수행하였다. 그 결과 운용온도가 상온(20°C)에서 멀어질수록 광학성능이 현저히 저하됨을 확인하였다. 1차 시험과 2차 시험에서 얻어진 영상을 비교한 결과 $-32^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 온도범위에서 보상된 줌궤적이 만족할 만한 영상을 제공한다는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] J. M. Lloyd, *Thermal Imaging System* (Honeywell Inc. Radiation Center, Lexington, Ma., 1975), Chapter 6.
- [2] R. E. Fischer and B. Tadic-Galeb, *Optical System Design* (McGraw-Hill, New York, 2000), pp. 250-254.
- [3] R. Simmons, "Athermalisation of a fast infrared telescope objective," *Proc. SPIE*, vol. 2539, pp. 137-149, 1995.
- [4] M. Shechterman, "Zoom athermal telescope having 18.5 magnification range for 8-12 μ range FLIR systems," *Proc. SPIE*, vol. 2539, 108-117, 1995.
- [5] 김현숙, 김창우, 홍석민, "3.7-4.8 μm 파장대역 FLIR 시스템을 위한 20:1 줌 렌즈 광학계 설계 및 제작," *한국광학회지*, 제10권 제6호, pp. 462-467, 1999.

Analysis and test of athermalizaion for 20:1 zoom thermal imaging system

Hyun-Sook Kim, Se-Chol Choi, Guk-Whan Lee, Yong-Chan Park, and Hyun-Kyu Kim[†]

Agency for Defense Development, Taejon 305-600, KOREA

[†]E-mail: hkim@add.re.kr

(Received April 6, 2001 ; Revised manuscript received July 3, 2001)

In this study we carried out athermalization analysis and tests to meet the required optical performance for thermal imaging systems even if the systems were operating over a wide temperature range. By using optical design programs such as Code-V and SIGMA2100, the simulation for athermalization was done with FPA thermal imaging system. In the athermalization test putting the thermal imaging system and collimator into a temperature chamber, the images depending on the temperature were recorded on video tape. In particular, the zoom thermal imaging system with two dimensional array detector was tested to check the result of the athermalization simulation. As a result, it was proved to meet the required optical performance for the thermal imaging system within $-32\sim+50^{\circ}\text{C}$ temperature range.

Classification codes : SM.010, SM.020, SM.040.