

## 비냉각 열상카메라의 자동 비열화 시스템 설계

김현수\* · 김현규

국방과학연구소, 제4체계본부, 기술본부, 대전 305-600

(2005년 6월 24일 받음)

야외에서 사용되는 비냉각 열상카메라는 넓은 온도영역에서 사용되기 때문에 온도에 따른 초점 보정 (비열화)이 요구된다. 초점보정에는 모터를 사용하여 보정하는 능동적 (active)인 방법과 렌즈 재료의 열적변화가 서로 상쇄되도록 설계하거나 광기구적으로 보상하는 수동적 (passive)인 방법을 사용한다. 본 논문에서는 액체의 열팽창 계수를 이용하여 외부의 구동장치이나 조절장치 없이 넓은 온도영역 ( $-30^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ )에 걸쳐 초점을 보정하는 비냉각 열상카메라의 자동 비열화 시스템을 설계하고 비열화 성능을 분석하였다. 분석결과 전체 온도범위에 걸쳐 성능조건을 만족하였다. 본 연구에 사용된 광학계는 장파장 적외선 영역 ( $8 \sim 12 \mu\text{m}$ )에서 비냉각 열상장비용으로 사용하기 위한 F/1.0 회절광학계이다. F/1.0 회절광학계는 2매의 Germanium 렌즈로 구성되며, 첫째 렌즈의 후면에는 비구면과 회절면을 적용하였으며, 나머지 면에 대해서는 모두 비구면을 적용하였다. 성능기준은 시계의 가장자리에서 열상광학계의 Nyquist 주파수인 11.11 cycles/mm에서 MTF가 0.5 이다.

PACS numbers: 42.15.Eq

Keywords: 비냉각, 비열화, 비구면, 수치구경, 회절면, Defocus, DOE.

### I. 서 론

비냉각 열상카메라를 위하여 적외선 광학계에 사용되는 렌즈의 재질은 온도변화에 따른 굴절률변화가 크기 때문에 온도변화에 따른 초점변화 (비열화)를 반드시 보정해 주어야 된다. 특히 우리나라와 같이 년중 온도변화가 큰 지역에서 운용되는 적외선 광학장비는 온도변화에 따른 defocus를 보정해야 주어져 되는 데, 지금까지는 주로 능동적인 방법, 즉 모터 또는 manual로 defocus를 보정하여 왔다 [1].

본 연구에서는 비구면 및 회절면 [2-5]을 사용함으로써 광학계의 성능을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 광학계에 사용되는 렌즈 수를 감소시킬 수가 있으며, 또한 렌즈 수가 감소되면 온도변화에 따른 민감도가 줄어들 것이라는 데에 착안하여 장파장 적외선 영역 ( $8 \sim 12 \mu\text{m}$ )에서 두 매의 Germanium 렌즈로 비구면과 회절면을 사용하여 비냉각 열상장비용의 F/1.0 회절광학계 (이하 F/1.0 회절광학계라 칭함.)를 설계하고 넓은 온도영역 ( $-32^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ )에 걸쳐 수동식(passive) 비열화 시스템을 설계하여 온도변화에 따른 비열화 성능을 분석하였다.

비열화분석 결과에 따라 온도보정을 위하여 렌즈 경통의 재질과 검출기 마운트의 재질의 열팽창계수 차이가 큰 두 가지 재질을 사용하여 자동으로 비열화할 수 있도록 시도하였다. 이 경우에는 전체 경통길이가 매우 증가하기 때문에 검출기 마운트에 열팽창계수가 큰 액체를 채워 넣어서 체팽창을 이용한 온도보정 비열화 시스템을 고안하였다. 액체를 이용한 체팽창으로 온도변화에 따른 defocus의 보정은 주어진 온도범위에서 요구성능을 만족하였으며 경통의 길이를 대폭 줄일 수 있는 장점이 있었다.

사용된 검출기의 크기는 가로 세로가 각각 14.4 mm와 10.8 mm 이며, 픽셀 크기는  $45 \mu\text{m}$ 로, fill factor는 무시하였다. 목표성능으로는 전 온도영역에 걸쳐 시야 가장자리에서 광학계의 Nyquist 주파수인 11.1 cycles/mm 일 때 MTF를 0.5로 하였다.

### II. 최적화 과정

비냉각 열영상 장치에 사용하기 위한 F/1.0 광학계는 전통적으로 3개 이상의 구면 또는 비구면을 사용하여 설계하여 왔다. 본 논문에서는 DOE (diffractive optical element)의 좋은 수차 특성을 이용하여 수치구경 (NA: numerical aperture)을 크게 할 수 있다는 것에 착안하여

\*E-mail: kimhs@add.re.kr

[6], 비냉각 열영상 장치에 사용하기 위하여 2매의 Germanium 렌즈로 F/1.0 회절 광학계를 설계하여 광학적 성능 및 비열화를 분석하였다.

검출기가 선택되면 광학의 요구사양을 결정할 수 있으며, 또한 시야 (FOV: field of view)가 결정되면 광학계의 초점을 결정할 수 있다. 본 연구에서는 광학계의 성능을 고려하여 초점거리를 171.73 mm로 결정하였으며, 가로·세로 영상면의 크기가 각각 14.4 mm, 10.8 mm이므로 수평방향의 시야는 4.8°, 대각선의 시야는 6°이다[최적화 과정에 대해서는 참고문헌 6. 참조].

### III. 회절렌즈의 제작 가능성 분석

이 절에서는 위에서 설계한 회절면의 제작가능성에 대해 고찰하기로 한다. 광축에 대해 회전대칭인 DOE의 위상 프로파일 함수는 식 (1)과 같으며,

$$\phi = m \frac{2\pi}{\lambda_0} \sum C_n r^{2n} \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 회절차수를,  $C_n$  은 회절계수를,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 을 나타낸다.

설계파장( $\lambda_0$ )에서 재료의 굴절률이  $n_0$ 일 때 회절면의 깊이는 식 (2)와 같다.

$$d = \frac{\lambda_0}{n_0 - 1} \quad (2)$$

그리고 회절링의 개수는 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$N = \frac{1}{\lambda_0} \sum C_n r_{max}^2 \quad (3)$$

Table 1은 II절에서 최적화한 F/1.0 회절광학계의 회절링의 개수, 반경, 간격을 각각 나타낸 것이다. 회절링의 개수는 5.6 개, 회절링의 최소 간격은 7.9 mm, 회절링의 깊이는 3.3  $\mu$ m이다. 이 정도의 회절면은 다이아몬드 회전방식의 고정밀 CNC (computer numerical control) 선반을 사용하면 충분히 가공할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Radii and spaces of diffraction ring for the F/1.0 diffractive optics.

Position of Ring	1st	2nd	3rd	4th	5th	Last (5.6)
Radius of Ring (mm)	35.61	50.08	61.05	70.21	78.14	82.35
Spacing of Ring (mm)	35.66	14.42	10.97	9.16	7.93	4.21
Total No. of Rings : 5.6						

### IV. 비열화 분석

온도변화는 광학계의 성능에 나쁜 영향을 미치기 때문에 렌즈설계에 있어서 가장 중요한 변수중의 하나이다. 온도가 변함에 따라 렌즈재료의 수축 또는 팽창과 굴절률이 변하기 때문에 광학계의 성능은 온도에 따라서 많은 영향을 받게 되며, 또한 렌즈재료와 렌즈를 지지하고 있는 경통사이의 열팽창계수의 차이에 의한 응력에 의해서도 광학계의 성능이 영향을 받는다.

광학계의 열적인 특성변화에 의한 defocus를 보정하는 비열화 (athermalization) 방법에는 크게 두 가지로 구분할 수 있는 데, 즉 렌즈재료의 열적변화가 서로 상쇄되도록 설계하거나 광기구적으로 보상을 하는 수동적 (passive)인 방법과 광학계를 구성하고 있는 렌즈를 이동시켜 defocus를 보정하는 능동적인 방법이 있다. 한 가지 방법만으로는 요구되는 비열화 조건을 만족시킬 수 없을 때에는 두 가지 모두를 사용하여 비열화를 수행하기도 한다.

F/1.0 회절광학계에 대해 비열화를 분석하기 전에, 먼저 회절렌즈의 온도변화에 따른 defocus 정도를 간략하게 고찰하기로 하자. 근축광선의 경우, 온도변화에 따른 회절렌즈의 초점거리변화 (defocus)의 총량( $\delta$ )은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \left( -\frac{f}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} + 3\alpha_\lambda \cdot f - \alpha_h \cdot L \right) \cdot \Delta T \quad (4)$$

여기서  $n$ 은 렌즈재료의 굴절률,  $f$ 는 초점거리,  $\alpha_\lambda$ 와  $\alpha_h$ 는 렌즈재료와 경통의 열팽창계수,  $\Delta T$ 는 온도변화,  $L$ 은 광학계의 첫 번째 면에서 초점면까지의 거리를 각각 나타낸다. 식 (4)의 두 번째 항에서  $\alpha_\lambda$ 는 재료의 곡률반경의 변화 [7]에 의한 것이며,  $2\alpha_\lambda$ 는 회절면에 의한 것 [8]을 나타낸다.

식(4)에서 온도변화가 10 °C일 때 F/1.0 회절광학계의 defocus에 영향을 미치는 정도를 항목별로 계산해 보기로 하자. 연구에서 사용된 광학계는 초점거리 171.73 mm, 설계파장에서 렌즈의 굴절률 4.0031, 온도에 따른 렌즈의 굴절률 변화율  $400 \times 10^{-6}/K$ , 렌즈의 열팽창계수  $61 \times 10^{-7}/K$ , 렌즈경통의 열팽창계수 및 경통의 길이는 각각  $-1.8 \times 10^{-7}/K$ 와 234.4 mm 이다. 여기서 온도변화에 따른 팽창 또는 수축에 의한 defocus 양을 최소로 하기 위하여 렌즈경통의 재료는 열팽창계수가 작은 것을 선정하였다.

먼저, 온도변화에 따른 굴절률 변화에 의한 defocus 양은 식 (5)와 같고,

$$\Delta f_n = -\frac{f}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T = \frac{171.73}{4.0031-1} \cdot 400 \times 10^{-6}/^{\circ}C \approx -228.7 \mu m \quad (5)$$

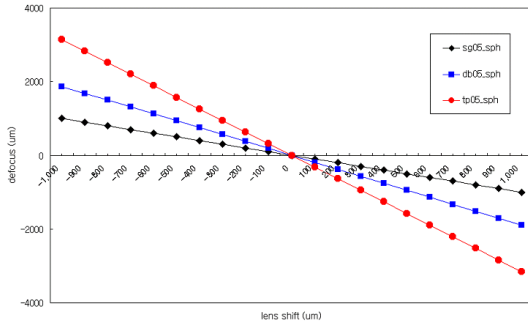


Fig. 1. Sensitivity analysis with moving the first lens for one, two, and three lenses.

온도변화에 따른 곡률반경 변화에 의한 defocus 양은 식 (6)과 같으며,

$$\Delta f_R = 3\alpha_\lambda \cdot f \cdot \Delta T = 3 \times 61 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C} \times 171.73 \text{ mm} \cdot 10^\circ\text{C} \approx 21.4 \text{ } \mu\text{m} \quad (6)$$

온도변화에 따른 광학계 경통의 팽창수축에 의한 defocus 양은 식 (7)과 같다.

$$\Delta f_h = -\alpha_h \cdot L \cdot \Delta T = 1.8 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C} \times 234.4 \text{ mm} \cdot 10^\circ\text{C} \approx 0.4 \text{ } \mu\text{m} \quad (7)$$

위의 계산에서 알 수 있듯이, 온도변화에 따른 defocus에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 렌즈 재질의 굴절률 변화로써  $10^\circ\text{C}$ 만 변화해도 광학계 성능에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 목표성능을 유지하기 위해서는 온도변화에 따른 defocus를 보정해 주거나 온도를 일정하게 유지해야 되는 것을 알 수 있다. 그러나 군사용으로 사용되는 광학계의 경우에는 휴대용으로 많이 사용되기 때문에 온도를 일정하게 유지하기 위한 장치의 사용에는 많은 제한이 따르게 되므로 다른 방법을 모색해야 되며, 본 연구에서는 그 방법을 제시하기로 한다.

비열화 분석에 사용된 프로그램은 ORA (Optical Research Associates) 사의 Code V 이다. 이 프로그램은 회절면의 경우 온도변화에 따른 비구면 계수 및 위상계수를 자동으로 보상하지 않기 때문에 수동 (manual)으로 계수 값을 보정해 주어야 된다. 즉, ENV 옵션을 사용하여 특정온도에서 렌즈의 환경변수를 설정하여 입력한 후, DOE 면에 대해 식 (8)과 식 (9)를 수기로 입력해야 된다. 식 (8)은 온도에 따른 비구면 계수의 변화를, 식 (9)는 회절계수의 변화를 각각 나타낸다.

$$A'_{2n} = A_{2n} / (1 + \alpha\Delta T)^{2n-1} \quad (8)$$

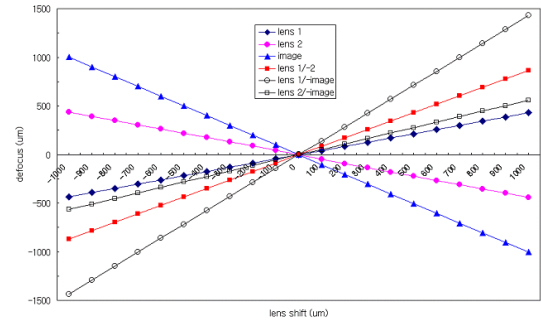


Fig. 2. Sensitivity analysis of the F/1.0 diffractive optics with moving lenses and image plane.

$$C'_n = C_n / (1 + \alpha\Delta T)^{2n} \quad (9)$$

여기서  $A_{2n}$ 과  $C_n$ 은  $20^\circ\text{C}$ 에서 DOE가 적용된 면의 비구면 계수와 회절면 계수이다.

먼저, 온도변화에 따른 비열화 분석을 하기 전에 광학계를 구성하고 있는 렌즈의 수에 따른 온도 민감도를 알아보기 위하여 반시야 각이  $5^\circ$ , 장점함수 값이 100, 유효 초점거리 100 mm인 단매, 2매, 3매로 각각 구성된 3개의 서로 다른 광학계를 설계하여 첫째 렌즈를 앞·뒤로 움직였을 때의 초점변화 정도를 분석하였다.

Fig. 1은 위의 3가지 광학계에 대해, 일반적으로 렌즈의 이동에 의한 상의 변화가 민감한 첫째 렌즈를 앞뒤로 각각 1 mm 씩 움직였을 때의 defocus 양을 나타낸 것이다. sg05\_sph는 단매, db05\_sph는 2매, tp05\_sph는 3매로 구성된 렌즈를 각각 나타낸다. Fig. 1에서 보듯이 렌즈의 개수가 증가함에 따라 대물렌즈의 이동에 따른 민감도가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 회절렌즈를 사용함으로써 사용되는 렌즈의 수를 줄일 수 있기 때문에 민감도를 감소시키는 효과가 있으므로, 본 연구에서와 같이 사용되는 렌즈의 개수를 줄이는 것도 역시 비열화에 기여할 수 있는 것으로 판단된다. 대물렌즈의 민감도가 높다는 것은 대물렌즈의 미소변위에 대하여 defocus량의 변화가 크기 때문에 보정을 위해서는 상대적으로 상면에 놓인 검출기의 이동량이 커져서 불리한 요소로 작용할 가능성이 크다는 것을 의미한다.

또한 효과적인 수동식 비열화를 위하여 최적화 된 F/1.0 회절광학계를 구성하고 있는 렌즈(렌즈 1과 렌즈 2)와 상면을 가능한 조합으로 이동했을 때, 이동에 따른 민감도를 분석하였다. Fig. 2는 실온 ( $20^\circ\text{C}$ )에서 F/1.0 회절광학계의 렌즈 또는 상면을 이동했을 때의 민감도를 나타낸 것이다. Lens 1은 첫째 렌즈를, lens 2는 두 번째 렌즈를, image는 상면을 각각 나타낸다. 음의 부호가 있는 것은 움직이는 방향이 서로 반대라는 것을 나타낸다. 즉 lens 1/-2의 경우 렌즈 1이 오른쪽으로 이동하면

Table 2. Amount of defocus with varying temperature and compensation values by the correction barrel (unit:  $\mu\text{m}$ ).

temperature. ( $^{\circ}\text{C}$ )	amount of defocus <sup>1</sup>	distance range of compensation <sup>2</sup>		amount of compensation as temperature <sup>3</sup>
		min.	max.	
-30	986.33	945	1036	980.26
-25	886.57	844	937	882.23
-20	787.01	744	837	784.21
-15	687.63	643	738	686.18
-10	588.46	543	639	588.16
-05	489.46	443	540	490.13
00	390.66	345	442	392.11
05	292.03	245	343	294.08
10	193.59	144	244	196.05
15	95.32	47	146	98.03
20	0	0	0	0
25	-100.69	-150	-51	-98.03
30	-198.44	-248	-149	-196.05
35	-296.01	-346	-247	-294.08
40	-393.42	-444	-344	-392.11
45	-490.66	-541	-442	-490.13
50	-587.74	-638	-540	-588.16
55	-684.55	-734	-637	-686.18
60	-781.24	-830	-734	-784.21
65	-877.32	-926	-832	-882.23
70	-974.19	-1021	-929	-980.26

1. 온도변화에 따른 F/1.0 광학계의 defocus 양.
2. MTF가 0.5일 때, 온도변화에 따른 시야 가장자리에서 Nyquist 주파수를 만족하기 위한 영상면의 최소 및 최대 이동변위량.
3. 보정경통에 의한 영상면의 이동량 [5.1 절 참조].

렌즈 2는 왼쪽으로 움직이는 것을 나타낸다. 음의 값은 렌즈를 왼쪽으로 이동했을 때의 defocus 양을 나타내며, 양의 값은 오른쪽으로 이동했을 때의 값을 각각 나타낸다.

Fig. 2에서 보듯이 렌즈 1과 상면을 서로 반대 방향으로 움직이는 것이 민감도가 가장 예민한 것으로 나타났다. 따라서 렌즈 1과 상면을 서로 반대방향으로 움직이도록 광학계를 설계하면 온도에 따른 defocus를 쉽게 보정할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 온도에 따른 열팽창계수가 음의 큰 값을 가지는 재질이 없기 때문에 가능한 한 렌즈의 이동은 작게 하고 상면을 이동시키는 것이 좋다는 것을 알 수 있다.

Table 2는 온도변화가  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 일 때, 온도변화에 따른 F/1.0 회절광학계의 defocus 양과 성능조건을 만족하기 위해 보정해 주어야 될 최대 및 최소 defocus 양을 나타낸 것이다. 최대 defocus 양은  $-30^{\circ}\text{C}$ 에서  $986.3\mu\text{m}$ 로 나타

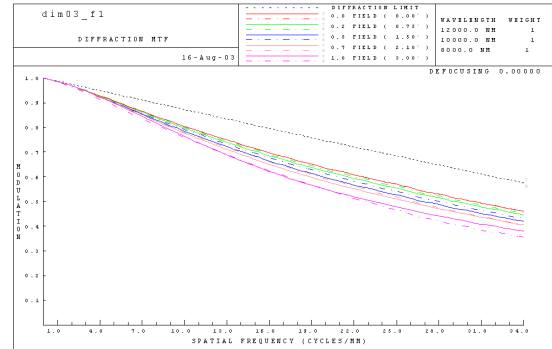


Fig. 3. MTF curves accomplished athermalization at  $-30^{\circ}\text{C}$ .

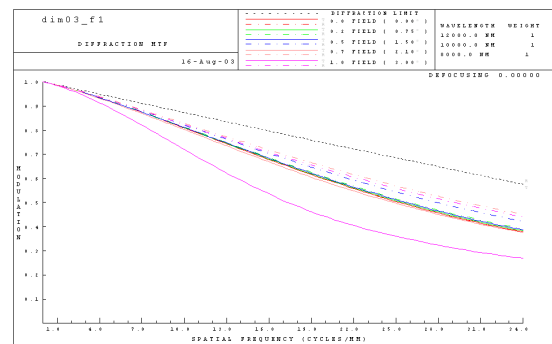


Fig. 4. MTF curves accomplished athermalization at  $+70^{\circ}\text{C}$ .

났다. 마지막 열 (column)은 보정경통에 의해 온도변화에 따라 보정된 defocus 양을 나타낸 것이다. 여기서 광학계의 경통은 온도변화에 따라 선형적으로 변하는 것으로 가정하였으며, 광학계의 외부 경통에 의한 defocus는  $2\mu\text{m}$  정도로 무시하였다 [보정경통의 길이에 대해서는 5.1 절 참조].

Table 3은 위의 보정경통에 대해 온도변화에 따라 defocus가 자동으로 보정되었을 때, 시계 가장자리에서 MTF가 0.5일 때의 보정된 공간 주파수 값을 나타낸 것이다. Table 3의 모든 값들은 성능조건( $11.1\text{ cys/mm}$ )을 만족함으로써 자동 비열화가 가능한 것으로 판단된다. Fig. 3과 4는  $-30^{\circ}\text{C}$ 와  $+70^{\circ}\text{C}$ 에서 defocus를 보정했을 때, 시야별로 F/1.0 회절광학계의 MTF 값의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3과 4에서 알 수 있듯이 상면 중앙의 영상을 중요시한 결과[참고문헌 6. 참조], 0.7 시야까지는 온도변화에 따른 성능차가 어느 정도 일정하게 나타났지만 시야 가장자리에서는 가중치(0.5)가 상대적으로 작기 때문에 성능차가 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 저온에서 보다 고온에서 시야별 성능차가 크게 나타났다. 이는 온도가 증가함에 따라 굴절률이 증가할 뿐만 아니라 곡률반경이 증가하기 때문에 근축광선에서 보다

Table 3. Values of spatial frequency of the 50 percents MTF with varying temperature at the edge field of view.

Temperature(°C)	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70
MTF (cycles/mm)	22.6	24.2	25.6	26.4	27.2	27.4	25.8	23.8	21.6	19.4	17.2

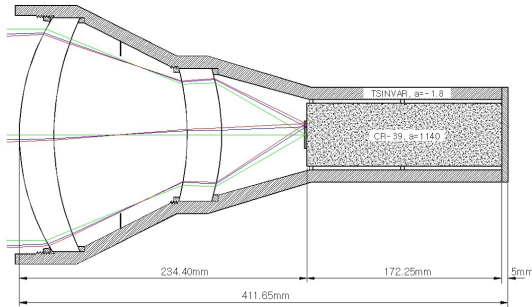


Fig. 5. Schematic diagram of auto athermalization system utilized linear expansion of solid.

는 가장자리에서의 MTF 값의 변화가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

## V. 온도보정을 위한 자동비열화 시스템 설계

### 1. 고체의 선팅창을 이용한 자동 비열화시스템 설계

IV. 절에서 상면을 이동시키는 것이 defocus를 보정하는 데 유리하다는 것을 알았다. 따라서 광학계의 경통은 가급적이면 열팽창이 작은 재질을 사용하고 보정경통은 열팽창 계수가 큰 재질을 사용하는 것이 defocus를 보정하는 데 효과적이라는 것을 알 수 있다.

따라서 여기서는 온도변화에 따른 열팽창을 서로 상쇄시키기 위하여 경통과 상면이 서로 반대 방향으로 움직이도록 경통의 재질을 열팽창계수가 음인 TSINVAR ( $\alpha_h = -1.8 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ )를 사용하였다. 또한 온도변화에 따른 영상면의 이동을 크게 하기 위하여 보정경통의 재질은 열팽창계수가 큰 CR-39 (Allyl Diglycol Carbonate,  $\alpha_c = 1.140 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ )을 사용하였다.

식 (10)은 온도변화에 따른 defocus를 보정하기 위한 보정경통의 길이를 계산하는 식을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 보정해야 될 defocus 양을 defocus 값이 가장 큰  $-30^\circ\text{C}$ 와  $+70^\circ\text{C}$ 에서의 산술평균값을 사용하였다.

$$(\alpha_h + \alpha_c) \times L_c \times \Delta T = \text{amount of defocus (AOD)} \quad (10)$$

여기서  $\alpha_h$ 와  $\alpha_c$ 는 보정경통의 외부 및 내부 재질의 열팽창계수,  $\Delta T$ 는 최대 온도변화량,  $L_c$ 는 보정경통의 길이

를 각각 나타낸다. 식 (10)으로부터 보정경통의 길이는

$$L_c = \frac{\text{AOD}}{(\alpha_h + \alpha_c) \times \Delta T} = \frac{(0.98633 + 0.97419)/2}{(1.140 - 1.8) \times 50} \times 10^7 \approx 172.25\text{mm} \quad (11)$$

이며, 광학계의 경통에 의한 열팽창은 무시하였다.

Fig. 5는 위의 결과들을 근거로 하여 설계한 광학계 경통의 모양을 나타낸 것이다. 광학계 경통의 전체 길이는 411.65 mm 이다. 여기서 광학계의 외부 경통과 보정경통을 고정시키기 위한 체결부의 두께를 5 mm로 하였다.

### 2. 액체의 체팽창을 이용한 자동 비열화시스템 설계

고체의 선팅창을 이용한 비열화시스템 설계는 넓은 온도범위에서 광학성능은 만족하고 있으나, 비구면과 회절면을 사용하여 렌즈 매수를 줄임으로서 달성된 장비의 소형경량화를 아무 의미 없는 것으로 되돌려 놓았다. 따라서 이 절에서는 다른 방법으로 수동식 비열화 방법, 즉 액체의 체팽창을 이용하여 온도를 보정함으로써 광학성능과 소형경량화를 모두 만족시키고자 시도하였다.

보정경통의 재질로 고체를 사용할 경우에는 열팽창 계수가 큰 재질이 없을 뿐만 아니라, 특히 음의 열팽창을 이 큰 재질이 없으며 또한 선팅창 되는 양만 이용하기 때문에 보정경통의 길이가 길어지는 단점이 있었다. 따라서 체팽창을 선팅창으로 활용할 수 있는 액체를 사용하여 온도변화에 따른 초점거리변화를 보정할 경우 경통의 길이를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

액체를 사용하여 온도변화에 따른 초점거리변화를 보정할 경우, 고려사항으로는 온도조건을 만족하는 액체를 선정하는 것이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있으며, 경량화 조건을 만족시키기 위해서는 비중이 낮은 액체를 선정하는 것 또한 중요하다고 할 수 있다. Table 4는 이러한 조건들을 만족하는 5가지 액체에 대한 물성표를 나타낸 것이다. 비냉각 열상장비의 사용온도 범위는  $-30^\circ\text{C}$ 에서  $+70^\circ\text{C}$ 까지 넓은 온도범위에서 사용되기 때문에 이런 온도범위에서 액상이 변하지 않으며, 보정경통의 무게를 가볍게 하기 위하여 비중이 작은 물질들을 선택하였다.



Table 4. Material characteristics for several liquids to apply for athermalization.

classification	melting point (°C)	boiling point (°C)	expansion coefficient ( $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ )	specific gravity ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
1-Butanol	-88.6	117.7	1.12	0.8095
Heptane	-90.6	98.4	1.26	0.6795
1-Hexanol	-47.4	157.6	1.03	0.8136
Nonane	-53.5	150.8	1.08	0.7192
1-Pentanol	-77.6	138.0	1.02	0.8148

\* Courtesy of CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th Edition.

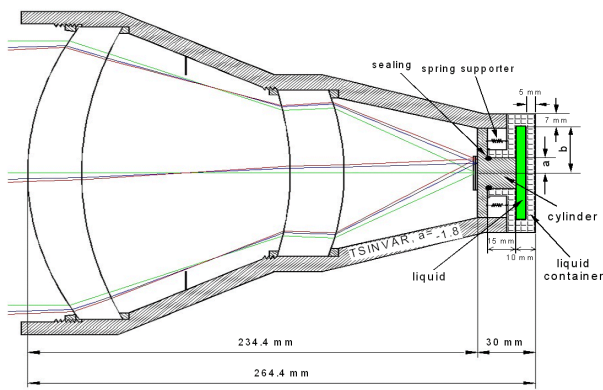


Fig. 6. Schematic diagram of auto athermalization system utilized volume expansion of liquid.

Fig. 6은 액체의 체팽창을 이용하여 온도변화에 따른 광학계의 초점거리 변화를 보정하기 위한 F/1.0 회절광학계의 비열화 시스템을 나타낸 것이다. 초점거리 변화를 보정하기 위하여 액체를 사용하기 때문에 보정경통을 밀봉형으로 설계하였다. Table 4의 액체 중에서 팽창계수가 가장 작은 액체 (1-Pentanol)에 대해 액체용기의 내부 깊이를 5 mm로 제한하기 위하여 액체용기의 반경을 19.6 mm (Fig. 6에서 b)로 하였다. 상면을 움직이는 실린더의 길이는 인장 스프링의 장착공간을 고려하여 15 mm로 하였으며, 실린더의 반경은 검출기의 장착을 고려하여 10 mm (Fig. 6(a))로 하였다. 광학계의 외부 경통의 재질은 5.1 절에서와 같이 TSINVAR를 사용하였으며, 액체용기의 온도변화에 따른 팽창·수축은 고려하지 않았다.

액체의 체팽창을 이용할 경우 보정경통의 길이는 팽창계수가 가장 작은 1-Pentanol에 대해 30 mm로써 5.1 절의 172.25 mm와 비교하여 1/6 (17.4 %) 수준이며, 광학계 전체의 길이는 264.4 mm로 411.65 mm에서 35.8 % 감소하였다.

## VI. 결 론

본 논문은 비구면과 회절면을 동시에 사용하여 장파장 적외선 영역에서 비냉각 열상장비의 광학계로 사용할 수 있는 F/1.0 회절광학계를 설계하여,  $-30^{\circ}\text{C}$ 에서  $+70^{\circ}\text{C}$ 까지 넓은 온도범위에 걸친 수동식(passive) 비열화 가능성 분석 및 자동 비열화 시스템 설계에 대한 연구결과이다. 연구결과 사용 온도범위( $-30^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ )에서 목표성능을 잘 만족함으로써 비냉각 열상카메라의 자동 비열화 시스템으로 사용 가능할 것으로 판단된다.

광학계의 성능조건으로는 전 온도범위에 걸쳐 시야의 가장자리 (반사야 각  $3^{\circ}$ )에서 검출기의 Nyquist 주파수인 11.11 cycles/mm 일 때의 MTF를 0.5로 하였다.  $-30^{\circ}\text{C}$ 와  $+70^{\circ}\text{C}$  일 때 시야 가장자리에서의 분해능은 MTF가 0.5일 때 공간주파수는 각각 22.6 cycles/mm와 17.2 cycles/mm로 전 온도영역에서 Nyquist 주파수인 11.11 cycles/mm를 상회하였다.

온도보정을 위한 비열화를 두 가지 방법으로 시도하였다. 첫째는 고체의 선팽창계수를 이용하는 것이고, 둘째는 액체의 체팽창을 선팽창으로 변환시켜 온도변화에 따른 defocus를 보정하는 것이다. 고체를 사용한 경우에는 보정경통의 길이가 너무 길어 회절면을 사용하여 광학계를 경량화 시키는데 기여하지 못하는 것으로 나타났다. 액체의 체팽창을 사용한 경우에는 고체를 사용하는 것보다 보정경통의 길이는 82.6 %, 광학계의 전체 길이는 35.8 % 정도 작게 설계할 수 있었다.

액체를 사용할 경우에 있어서의 과제로는 온도변화에 따른 열팽창 특성을 정밀하게 측정하여 최적의 조건을 찾아내는 것과 오랜 시간이 경과해도 밀봉특성이 변하지 않도록 보정경통을 설계하고 제작하는 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. S. Kim, S. C. Choi, G. W. Lee, Y. C. Park and H. K. Kim, Hankook Kwanghak Hoeji, **12**, 281 (2001).
- [2] Kudo, H. Wada, T. Okamura, M. Kobayashi and K. Tanikawa, Opt. Eng., **41**, 1787 (2002).
- [3] C. Sweatt, J. Opt. Soc. Am., **67**, 803 (1977).
- [4] Stone, Applied Optics, **27**, 2960 (1988).
- [5] P. Schaub, Ph. D. Dissertation, the University of Arizona, 1999.
- [6] H. S. Kim, D. H. Lee, H. K. Kim and G. W. Lee, Hankook Kwanghak Hoeji, **14**, 369 (2003).

- [7] M. Lloyd, *Thermal imaging systems*, 2nd ed. (Plenum Press, New York, 1979), p. 257.
- [8] R. Irving, D. Hasenauer and J. F. Isenberg, *Holographic and diffractive optical elements of advanced topics in Code V seminar notes of Optical Research Associates* (Pasadena, 2001), p. 78.

## Design of an Auto-Athermalization System for the Uncooled Thermal Imaging Camera

Hyeon-Soo KIM\* and Hyun-Kyu KIM

*Agency for Defense Development, Daejeon 305-600*

(Received 24 June 2005)

In the field, the uncooled thermal imaging camera should be refocused because it is operated in the wide temperature range. There are two types of method to fulfill the refocusing; one is the active method that corrects the defocus with a motor or a manual knob, the other is the passive method that compensates for the defocus canceling the thermal changes between lenses each other or for the optomechanics. In this paper, we designed the auto-athermalization system for the uncooled thermal imaging camera without any external driving equipment or adjusting mechanism over the wide temperature,  $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$  and also analysed the performance of the athermalization of it. The result was satisfied with the requirement of the performance. The optics used for analysis is the F/1.0 diffractive optics for the uncooled thermal imaging system in the long wavelength infrared,  $8\text{ }\mu\text{m} \sim 12\text{ }\mu\text{m}$  region. The F/1.0 diffractive optics was composed of two germanium lenses; the rear surface of the first lens was designed by both of the aspheric and diffractive surface, the others were the aspheric surfaces. The required MTF was 0.5 at the edge field of view when the Nyquist frequency is 11.11 cycles/mm.

PACS numbers: 42.15.Eq

Keywords: Uncooled, Athermalization, Aspheric surface, Diffractive surface, Defocus, Diffractive optical element, Numerical aperture

\*E-mail: kimhs@add.re.kr