

열상장비용 직병렬주사광학계

김창우 · 김현숙 · 홍석민 · 김재기

국방과학연구소

(1994년 3월 28일 받음)

원적외선 영역인 8~12 μm 대역의 열상장비 주사광학계를 설계 제작하였다. 검출기로 5개 소자의 SP-RITE HgCdTe를 사용하는 직병렬 주사를 위해 수평 및 수직주사에는 각각 회전다면거울과 진동평면거울을 사용하였으며, 주사연결거울로는 구면거울을 사용하여 주사거울의 크기 및 입사동에서의 동수차를 최소화 하였다. 주사광학계는 $40^\circ \times 26.67^\circ$ 의 넓은 주사시야를 갖는다. 회절 변조전달함수의 계산결과 회절한계의 성능을 만족하였으며, 제작 및 시험 결과 고분해능의 열영상을 얻을 수 있었다.

I. 서 론

열상장비는 물체에서 방출되는 적외선 영역의 복사에너지를 감지하여 눈으로 볼 수 있는 가시광 영상으로 변환시켜 주는 관측장비이다. 따라서 열상장비는 물체에서 반사되는 빛의 세기 차이가 아닌 물체의 온도 및 복사율에 따른 복사에너지 차이를 영상화하므로, 빛이 전혀 존재하지 않는 야간이라 할지라도 관측이 가능하고, 안개 또는 연막과 같이 시계가 불량한 조건에서도 표적탐지 능력이 우수하여 군사장비로 개발 사용되어 왔으며 최근에는 인쇄회로 기판의 검사와 분석, 위성에 의한 기상관측, 의료기기 등 산업용으로도 그 응용범위가 점차 확대되어 가고 있다.

원적외선 영역인 8~12 μm 파장대역의 고분해능 열상장비에 사용하는 HgCdTe 검출기는 현재 완전한 2차원 배열이 실용화 되어있지 않으므로, 열상장비는 크게 나누어 적외선 에너지를 모아 집속시켜주는 망원경계와 제한된 숫자의 검출기를 이용하여 2차원 시야를 순차적으로 읽어 들이는 주사장치 및 검출기로부터 나온 출력신호를 영상재현 장치에 맞도록 처리하는 신호처리부로 구성된다.

본 연구에서는 수직방향으로 배열된 5개의 SPRITE HgCdTe 소자를 사용하는 직병렬 주사방식의 주사장치를 설계 제작하였다. 수평방향의 주사거울로는 31,500 rpm으로 회전하는 6면의 다면거울(polygon)을 사용하였으며, 수직주사거울로는 galvanometer에 의해 60 Hz로 진동하는 평면거울을 사용하여 실시간 영상재현에 적합

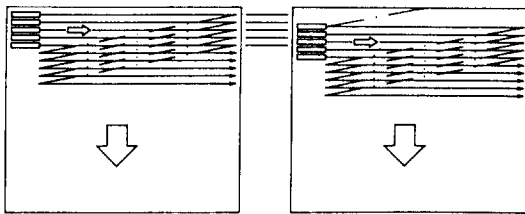
한 주사광학계를 설계하였다. 수평 및 수직주사에 각각 별도의 거울을 사용하므로 가공이 용이한 띠 모양의 구면거울을 주사연결거울(scan relay mirror)로 설계하여 각 주사거울의 크기를 최소화 하고 주사장치를 소형화 하였다. 최종적으로 적외선 광을 검출기 소자에 집속시켜주는 결상렌즈계는 Ge 렌즈 2매와 ZnSe 렌즈 1매로 설계하여 주사광학계의 성능이 회절한계를 만족하도록 하였다.

II. 주사장치 광계통의 결정

열상장비 시스템 설계로부터 결정된 시스템 F수는 3.2 이고 주사시야는 수평 40° , 수직 26.67° 로 3:2의 양상비(aspect ratio)를 가지며, 영상은 표준모니터의 525개 주사선 중에서 420개의 주사선에 재현한다. 주사시야가 비교적 넓은 이유는 공통모듈(common module) 개념에 따른것으로 넓은 시야를 갖는 주사장치를 표준화 하고, 장비의 용도에 맞게 적절한 배열의 무초점 망원경과 주변장치를 구성하면 주사장치는 모든장비에 공통으로 사용할수 있는 장점을 갖는다. 본 연구에 사용한 검출기는 SPRITE HgCdTe로 총 8개의 소자중에서 5개의 소자만 사용하였으며, 주요제한은 표 1과 같다.^[1] 각 소자 사이에는 0.0125 mm의 간격이 있어 수직방향의 분해능을 결정하는 소자 중심사이의 거리는 0.075 mm이며, 변조전달함수 값이 0이 되는 공간주파수는 16 cycles/mm이다. 시스템으로부터 주어진 F수 및 주사시야와 검출기의 제한으로부터 주사장치의 유효초점거리를 계

표 1. SPRITE HgCdTe 검출기의 주요 제원

Material	n-type HgCdTe
Element type	horned SPRITE
Number of elements	8
Element dimension	0.0625 mm width, 0.7 mm length
Nominal sensitive area	0.0625 × 0.0625 mm
Operating band	8 ~ 12 μm
Cut-off wavelength(50%)	11.5 μm
Cold shield FOV	F/2.2
Cut-off spatial frequency	16 cycles/mm
Bias field	3 V/mm (at 1.8 × 10 ⁶ pixels/sec)
Detectivity(500 K, 20 kHz, 1)	≥ 11 × 10 ¹⁰ cm Hz ^{1/2} Watt ⁻¹
Responsivity(500 K, 800 Hz)	20 × 10 ⁴ V/Watt



1st FIELD 2nd FIELD
그림 1. 연속된 2 필드에 의한 주사선.

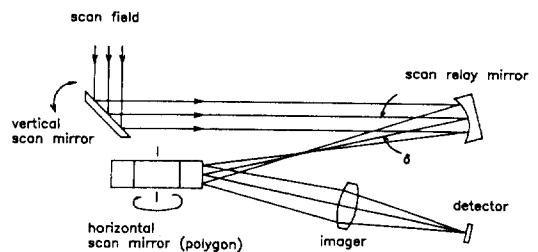


그림 2. 주사광학계의 구성.

산하면 33.8 mm가 되고, 입사동의 직경은 10.5 mm가 된다.

주사방식은 수직방향으로 배열된 5개의 검출기 소자를 사용하는 직병렬 주사방식으로 수직주사에는 선형성이 좋은 galvanometer에 의해 구동되는 평면거울을 사용하고, 수평주사에는 synchronous 모터에 의해 고속으로 회전하는 6면의 알루미늄 다면거울을 사용하였다. 필드율(field rate)이 60 Hz이고 화면율(frame rate)이 30 Hz인 표준 모니터에 맞는 주사를 위해 평면거울은 60 Hz로 진동하며, 다면거울은 31,500 rpm으로 회전한다. 평면거울이 1회 수직주사하는 시간인 1/60초 동안 6면의 다면거울은 52.5회의 수평주사를 하여 1회에 5개씩 총 262.5개의 주사선을 읽어들인다. 그 다음의 연속된 필드에서는 수직주사의 시작점이 수평주사 0.5회 만큼의 시간지연을 가진 후에 새로운 수평주사가 시작되고 검출기 소자의 갯수가 홀수이므로 앞선 필드에서 읽어들이 주사선 사이를 주사하게 된다. 따라서 다면거울 한면에 의한 1회 수평주사에 5개의 주사선을 얻는 것만 다를 뿐 표준 모니터의 전자 주사선과 유사한 방법으로 주사를 하며, 연속된 2 필드를 합하면 비월주사된 525개의 완전한 한 화면의 시야를 주사하게 된다. 그림 1은 이를 가시적으로 나타낸 것이다.

주사광학계의 구성도는 그림 2와 같다. 광로를 따라 주사기 입사동에 수직주사거울이 놓이고 주사연결거울 및 다면 거울에서 반사된 후 결상렌즈에 의해 검출기에 집중된다. 그림에서는 작게 보이지만 실제로는 지면방향으로 길쭉한 띠 모양의 주사연결거울은 다면거울의 회전에 의해 수평방향으로 뿌려진 광축을 주사기 입사동인 평면거울의 중심에 모아주는 역할을 한다. 따라서 각 주사거울의 크기를 최소화 할 수 있으며, 주사시야 내의 모든 주광선이 수직주사거울 중심을 통과하게 되어 입사동에서의 동수차(pupil aberration)가 없으므로 주사 장치 앞에 망원경계를 놓을때 망원경 대물렌즈의 유효구경이 필요이상으로 커지는 것을 방지한다. 주사연결 거울에서 광축의 비축각 δ 에 의한 비축수차를 없애기 위해서는 비구면거울을 사용할 수도 있으나 가공이 용이한 구면거울을 사용하고 광학계 배열상에 문제가 없는 범위내에서 δ 를 가능한 작게하는 방법을 택하였다.

주사광학계의 광계통을 펼친 그림으로 나타내면 그림 3과 같다. 그림에서 α_H 및 α_V 는 각각 수평 및 수직 주사각인 40°와 26.67°이고, D 는 입사동의 크기 즉, 주사기 구경인 10.5 mm이다. 그림의 d 는 입사동의 주사연결거울에 의한 상의 크기로 다면거울의 유효구경을 나타내며, l 과 l' 는 각각 주사연결거울로부터 수직주사거울 및 다

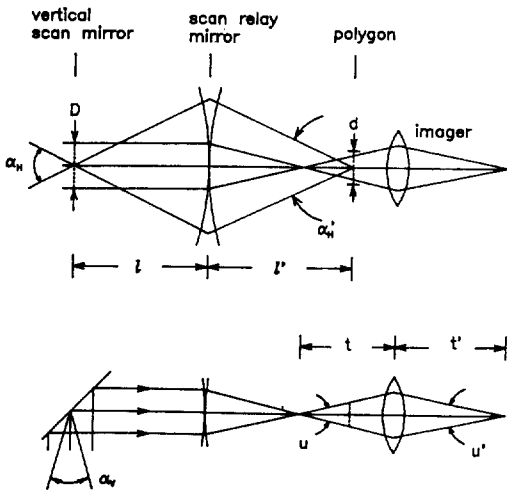


그림 3. 주사광학계의 광계통.

면거울까지의 거리이다. 주사연결거울의 곡률반경을 R 이라 하면, 주사연결거울과 각 주사거울 사이의 거리에 대한 관계식과 주사연결거울의 배율 M_{relay} 및 결상렌즈의 배율 M_{imager} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{2}{R} \quad (1)$$

$$M_{relay} = \frac{\alpha_H}{\alpha'_H} = \frac{l'}{l} = \frac{d}{D} \quad (2)$$

$$M_{imager} = \frac{l'}{t} = \frac{u}{u'} = \frac{D/0.5R}{F_{수}} \quad (3)$$

식 (2)에서 알 수 있듯이, 주사연결거울의 배율이 작을수록 수평주사 거울인 다면경의 유효구경 d 가 작아지므로 다면경을 작게 만들 수 있다. 또한 다면경의 면수가 6면이므로 한면에 의해 주사할 수 있는 수평각은 유효구경을 무시하면 최대 120° 가 되며, 주사연결거울의 배율이 작을수록 H' 가 커지므로 수평주사효율이 커진다. 그러나 주사연결거울의 배율이 작아지면 상대적으로 주사연결거울에서의 구면수차가 커지므로 구면거울을 사용하기 어렵다. 따라서 주사효율은 다소 떨어지더라도 연결거울의 배율을 1 근처의 값으로 결정하고, 곡률반경 R 을 충분히 크게하여 연결거울 자체의 F 수를 크게하는 방법을 택하였다. 이렇게 할 경우 시스템 F 수를 맞추기 위해서는 자연히 결상렌즈의 배율이 작아지고, 이에따라 연결거울에 의한 구면수차와 그림 2에서의 δ 에 의한 비축수차가 결상렌즈에 의해 축소되므로 최종적인 결상

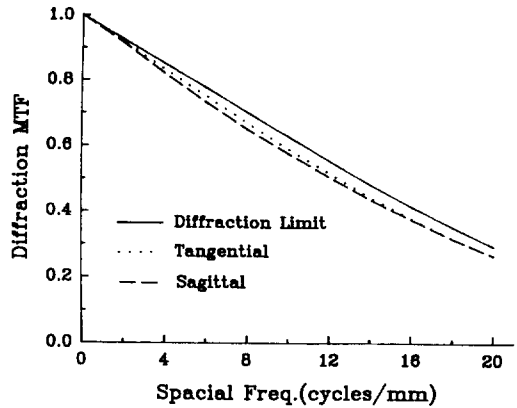


그림 4. 수평주사각 중심에서의 회절 MTF.

면에서의 광선수차를 줄일 수 있다. 전체적인 광학계의 크기 및 배열을 고려하여 결정한 주사연결거울의 곡률반경 R 은 110 mm이며 l 은 121 mm이고 δ 은 10° 이다. 따라서 l' 와 주사연결거울의 배율은 각각 100.8 mm 및 0.83이 되며, 다면거울에서의 유효구경 d 는 8.8 mm이다. 주사연결거울의 배율이 1보다 작으므로 수평주사시야 40° 주사를 위해 다면거울은 24° 를 회전하여 48° 를 주사하며, 수직주사 거울은 주사기 입사동에 놓이므로 광학계의 수차에는 영향을 미치지 않는다.

III. 수치설계 및 제작

열상장비는 한계분해능이 전적으로 검출기 성능에 의해 결정되므로 광학계는 회절한계의 성능이 요구된다. 따라서 전 주사시야에서 회절한계의 90% 이상의 MTF 값을 결상렌즈를 포함한 수치설계의 최종 목표로 설정하였다. 결상렌즈는 처음 Ge 렌즈 1매와 ZnSe 1매의 총 2매로 시작하였으나 최적화 과정에서 색수차 보정을 위해 Ge 렌즈 1매를 추가하였다. 결상렌즈의 초기 굴절능 결정시에는 Ge의 열분산계수가 매우 크므로 온도에 따른 초점거리 변화를 고려하였으나, 이를 회절한계 허용범위내로 보정하기 위해서는 열분산계수가 다른 여러 매의 렌즈로 구성하거나 결상렌즈를 온도에 따라 움직여 주는 기계적인 방법이 필요하므로 유한광선 수차 및 색수차에 중점을 두었다.^[2] 광학차자로 Ge을 주로 사용하는 열상광학계에서 온도에 따른 초점거리 변화는 초점거리가 짧은 주사광학계 보다는 앞에 놓이는 망원경계에 의한 변화가 크다. 따라서 주사광학계에서는 설계된 수치로부터 온도가 변함에 따라 초점거리 변화외에 각 광선

표 2. 주사광학계의 제원

surface #	description	thickness	radius of curvature	material (n)	clear aperture
1	entrance pupil	121 mm	∞	—	10.5 mm
2	relay mirror	0	-110 mm tilt 5.0°	air -1	22×90 mm
3	dummy surface	100.8 mm	∞ tilt 5.0°	air -1	0
4	polygon	0	∞ tilt -10.0°	+1 air	12×20 mm
5	dummy surface	45 mm	∞ tilt -10.0°	+1 air	0
6	lens	3.5 mm	73.43 mm	Ge	22 mm
7		2.7 mm	-539.14 mm		
8	lens	4.2 mm	-52.51 mm	ZnSe	22 mm
9		9.35 mm	-69.26 mm		
10	lens	3.0 mm	132.48 mm	Ge	22 mm
11		30.6 mm	67.65 mm		
12	focal plane	—	∞	—	—

수차의 특성변화가 없음을 확인하였으며, 초점거리 변화는 망원경계의 렌즈를 움직여 보정하는 방법을 택하였다. 최종 설계된 주사광학계의 제원은 표 2와 같다.

그림 4는 설계된 주사광학계의 수평주사각 중심에서의 회절 MTF를 계산한 결과이다. 계산에는 기준 파장인 10 μm 의 가중치를 1로 주고 8 μm 및 12 μm 의 가중치는 검출기의 파장에 따른 응답도를 고려하여 각각 0.5로 주었다. 계산 결과를 보면 회절한계의 성능을 만족함을 알 수 있으며, tangential MTF값과 sagittal MTF값이 차이가 나는 것은 주사연결거울에서의 비축각 δ 에 따른 것이다. 그림 5는 공간주파수 8 cycles/mm에서 수평주사각에 따른 회절 MTF를 계산한 결과이다. 다면거울이 회전하는데 따른 다면거울에서 주사연결거울 및 결상렌즈 까지의 거리변화는 모두 보정하였으며, 입사동을 주사각 만큼 먼저 tilt시킨 후 주사연결거울 이후의 광축을 주사각에 따라 tilt시키는 방법으로 계산하였다.^[3] 계산 결과를 보면 수평주사각에 따른 MTF 변화가 매우 작음을 알 수 있다.

제작된 주사광학계의 배열은 그림 6과 같으며, 검출

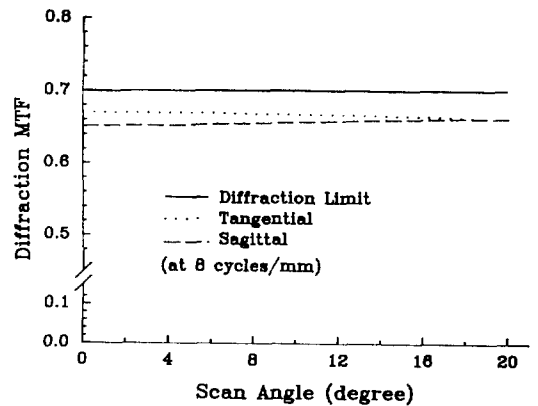


그림 5. 수평주사각에 따른 MTF(at 8 cycles/mm).

기를 제외한 크기는 가로 세로 및 높이가 각각 10 cm, 10 cm 및 15 cm 정도이다. 전체적인 주사광학계의 크기를 줄이기 위해 수평주사거울과 주사연결거울 사이에 2매의 평면거울을 사용하여 광축을 접었으며, 다면거울에서의 광축의 입사각에 대한 반사각은 20°로 하여 다

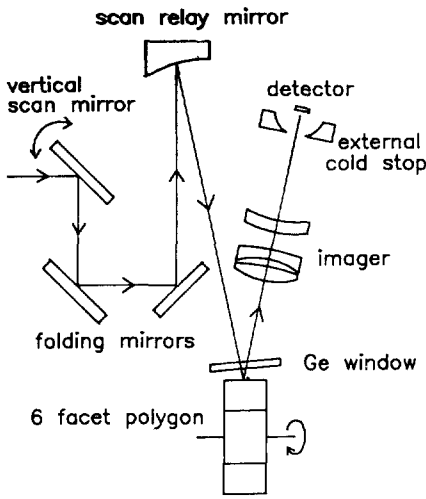


그림 6. 제작된 주사광학계.



그림 7. 표준 모니터에 재현된 열영상.

면거울의 회전 중심축이 수평방향에 놓이도록 하였다. 그림에서 외부 콜드스톱(external cold stop)은 검출기의

배경잡음을 줄이기 위한 것이다. 검출기 소자면에 놓인, 77 K로 냉각되는 원래의 콜드스톱 F수는 2.2로 설계된 주사광학계 F수인 3.2보다 작다. 따라서 외부 콜드스톱은 광학계를 통하여 표적으로부터 입사하는 직외선 광 이외의 장비 내부로부터 입사하는 복사광을 차단해주는 역할을 하며, 검출기 소자쪽의 구면은 거울 코팅을 하여 자체의 복사에너지는 없다.^[4] 그림 7은 제작된 주사광학계를 사용하여 표준 모니터에 재현된 실시간 열영상이다.

IV. 결 론

수평 및 수직주사거울에 각각 6면의 회전 다면거울과 진동평면거울을 사용하여 표준 모니터 실시간 영상재현에 알맞는 직병렬 주사광학계를 설계 제작하였다. 주사 연결거울로는 가공이 용이한 구면거울을 사용하였고 구면거울의 배율을 조정하여 각 주사거울의 크기 및 입사동에서의 동수차를 최소화 하였으며, 전체적인 주사광학계의 크기를 10 cm×10 cm×15 cm 정도의 소형으로 만들 수 있었다. 제작된 주사광학계는 40°×26.67°의 넓은 주사시야를 가진다. 회절 변조전달함수의 계산결과 전체 수평주사각에 대하여 회절한계 성능을 만족하였으며, 매우 우수한 고분해능의 열영상을 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] A. Blackburn et al, Infrared Physics. **22**, 57(1982).
- [2] M. Roberts, Athermalisation for Infrared Optics: A Review, SPIE. **1049**, 72(1989).
- [3] GENII Reference Manual, Genesee Optics Software, Inc., Rochester, New York(1989).
- [4] G. Krause, SPIE. **915**, 44(1988).

A Serial-Parallel Scanner Optics for Thermal Imaging System

Chang Woo Kim, Hyun Sook Kim, Seok Min Hong and Jai Ki Kim
Agency for Defense Development, Taejon 305-600, Korea

(Received: March 28, 1994)

We have designed and constructed a scanner optics for thermal imaging system operating in 8 ~ 12 μm band. The scanner consists of rotating polygon and oscillating mirror for serial-parallel scan using 5 elements SPRITE HgCdTe. A spherical mirror is used for scan relay mirror to minimize size of the scan mirrors and pupil aberration. The scanner has 40°×26.67° wide scan field of view and the calculated diffraction MTF shows diffraction limited performance. As a result we have obtained high resolution thermal image.