《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji Volume 9, Number 3, June 1998
(Journal of the Optical Society of Korea - Korean Edition)

원적외선 대역 4:1 줌 망원경 광학계 설계

김현숙 · 김창우 · 용석민
국방과학연구소

(1998년 2월 26일 받음, 1998년 3월 30일 수정본 받음)

원적외선인 7.6 μm~10.3 μm 파장대역에서 회절한계 성능을 만족하는 무초점 줌 망원경 광학계를 설계하였다. 기계보정식 4군 줌 방식을 적용하여 줌 대물부를 설계하였으며 접안부는 고정초점 렌즈로 구성하였다. 망원경의 줌 비(zoom ratio)는 4.05로 배율을 2.0배에서 8.1배 까지 연속적으로 가변할 수 있으며, 총 5개의 렌즈군에 9매의 렌즈로 구성하였다. 줌 대물부는 F/1.3의 텔리포토 형태로 설계하여 최고배율 초점거리에 비해 광학계의 길이가 작아 시스템 적용성이 우수하도록 하였으며, 초점조절 렌즈를 줌밍 렌즈군의 뒤에 놓아 물체까지의 거리에 따라 초점을 조절하도록 설계하였다. 광학계에 사용된 재질은 색수차 보정을 위하여 대물부의 렌즈 1매만 ZnSe를 적용하고 나머지 렌즈는 모두 Ge을 적용하였으며, 총 18면의 곡률중 1면만 비구면을 적용하고 나머지 면은 모두 구면을 적용하였다. 설계된 망원경의 8.1 배율에서의 시야는 ± 2.31°, 대물부 유효구경은 163 mm 이며, 모든 배율에서 회절한계 성능을 만족하는 것으로 평가되었다.

I. 서 론

줌 광학계는 광학기술에 있어 꾸준하고도 현저한 발전을 보인 분야 중 하나이다. 특히 8 μm~12 μm 파장대역의 적외선 줌 렌즈는 군사적인 응용을 목적으로 꾸준히 발전해 왔으며 점차 그 사용범위가 확대되어 가고 있다. 초기 적외선 줌 렌즈는 주로 전방관측용 열상장비(Forward Looking InfraRed) 시스템의 적외선 망원경에 이용되었으나 최근에는 미사일의 접근을 모의시험 하기 위한 표적 시뮬레이터, 적외선 탐색 및 추적장비(InfraRed Search and Track), 레이저 빔 편승(Laser Beam Riding) 시스템 등 여러분야에서 다양하게 응용되고 있다.[1]

이중 열상장비 분야에 있어서는 최근 적외선 검출기 및 시스템 설계기술의 눈부신 발전으로 60만개 화소 수준의 고분해능에 등가잡음온도차(noise equivalent temperature difference)가 수 십 mK 정도인 열상장비 제작이 가능하다. 이러한 장비의 성능을 뒷받침하기 위해서는 시스템 적용성이 우수한 회절한계 성능의 적외선 광학계가 요구되고 있으며, 이와 함께 관측능력 및 운용성의 극대화를 위해 줌 광학계의 적용이 확대되고 있다. 따라서 열상장비에 적용되는 줌 망원경 설계의 중점은 줌 범위의 확장이나 광학적 성능 등 기본적인 사양은 물론, 시야각 전 범위에서의 고분해능 유지, 부피의 소형화 및 기구/광학적 구현의 단순화 등에 설계의 초점을 맞추고 있다. 특히, 1990년대에 들어서는 다이아몬드 터닝 머신을 이용한 Ge 및 Si 초자의 비구면(aspheric surface) 가공과 회절렌즈(diffractive optics) 가공이 용이해 지면서 이를 적외선 광학계에 적용하여 필요한 렌즈매수를 최소한으로 줄이는 노력이 활발히 진행되고 있다.[1-3]

본 논문에서는 이러한 배경에 따라 주사방식 2세대 열상장비에 적용 가능한 줌 망원경 광학계의 설계에 관한 연구내용을 기술하고자 한다. 먼저 논문의 II장에서는 열상장비의 시스템 요구조건에 따라 줌 망원경 광학계를 설계하기 위한 사양을 도출하고 이로부터 줌 렌즈의 형태 및 방식을 결정한 내용을 기술하였다. III장에서는 본 설계에 적용된 줌 렌즈군의 굴절능 결정 및 궤적해석에 대한 1차항 근축설계 기법에 대해 기술하고 그 결과를 바탕으로 얻어진 줌 대물렌즈의 초기 설계치를 제시하였다. IV장에서는 감쇄최소자승법에 의한 최적화 설계의 접근방법 및 결과를 상세히 기술하고 최종 설계된 줌 망원경 광학계에 대한 성능을 분석하였으며 V장에서 결론을 맺었다.

II. 시스템 요구조건에 따른 줌 망원경 설계사양

주사방식 2세대 열상장비에 사용되는 검출기는 광기전성(photovoltaic) HgCdTe 검출소자에 Si CCD를 readout 장치로 결합시킨 것으로 그림 1과 같이 수직 방향으로 480개의 소자가 배열되어 있고 수평방향으로는 시간지연 적분을 위한 4개의 소자가 각각 배열되어 총 1,920개의 소자로 구성된다. 검출소자 하나의 크기는 수직방향으로 28 μm, 수평방향으로 25 μm 이며 검출기가 반응하는 응답 파장대역은 7.6 μm~10.3 μm[4] 이다. 이러한 검출기 배열로 양상비(aspect ratio) 4 : 3의 2차원 영상을 읽어들이기 위해서는 수평방향의 주사장치가 필요하며, 수평 주사선 1개당 1250개의 샘플을 읽어 480 주사선에 총 60만개의 화소를 구성한다. 따라서 전체적인 광학계의 구조는 고정된 작은 입사동이 주사거울에 위치하고 고정배율에 넓은 시야를 갖는 주사광학계와 그 앞에 놓여 배율기로 작용하는 무초점 줌 망원경계로 구성된다. 이를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다.

줌 망원경 광학계의 설계사양은 시스템 요구조건으로부터 주어진 전체 광학사양과 주사광학계의 사양에 의해 결정된다. 최고 배율에서 주어진 시야는 3.7°×2.78°이며, 최저 배율에서는 15°×11.25°이고 F-수는 배율에 관계없이 F/1.75를 유

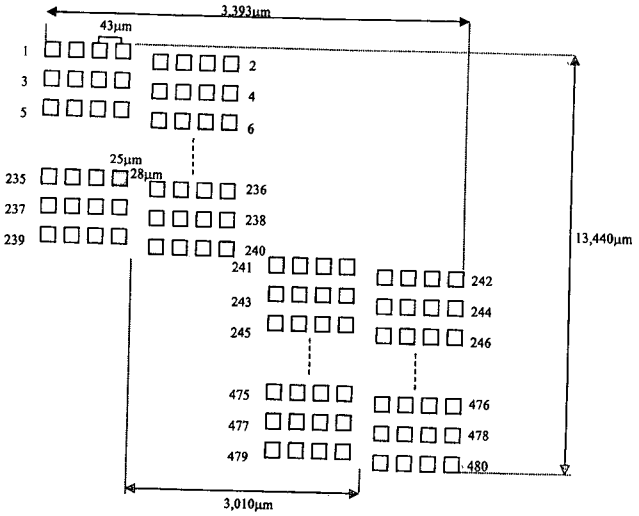

그림 1. 480×4 검출기의 기하학적 구조.

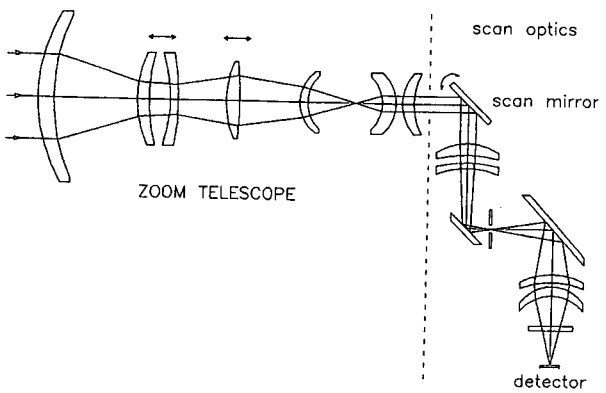

그림 2. 적외선 줌 망원경이 적용되는 열상장비의 전체 광학계 구성.

지하여야 한다. 또한 주사광학계의 시야는 30°×22.5°이며, 유효초점거리는 33.78 mm, 입사동의 직경은 20.15 mm 이다. 따라서 이러한 광학계 사양과 시스템으로부터 주어진 기타 요구조건을 기준으로 설정된 줌 망원경 광학계의 설계사양을 정리해 보면 표 1과 같다.

표 1에서 줌 망원경의 시야는 시스템에서 사용하는 직사각형 시야를 포괄하는 원형 시야를 나타낸다. 광투과율 70% 이상을 만족 시키려면 렌즈의 매수가 제한된다. 각 렌즈면의 반사방지 코팅 투과율과 Ge의 흡수계수를 기준으로 산정하면 전체 렌즈의 매수는 10매 이내로 제한된다. 또한 광학계 성능에 대한 설계목표는 망원경 출사동에서 680 cycle/rad을 기준 공간주파수로 다파장 MTF 값을 설정하였다. 이 주파수는 검출소자 한개의 수평방향 크기인 25 μm에 해당하는 순간시야(instantaneous field of view) 2개를 한 주기로 하는 것으로 대물공간에서는 최고배율인 8.1배 일때 5500 cycle/rad의 값이며, 나머지 배율에서는 배율에 역비례하여 작아진다. 전체 시스템이 F/1.75 이므로 이 주파수에서 중심파장 9 μm에 대한 회절 MTF 값은 0.6 이다.[5] 따라서 표 1의 설계 목표치는 제작 및 조립에서의 성능저하를 고려하여 Rayleigh 한계치에 의한 값 보다도 크게 설정하였으며, 시야내에서는 축상과 실제

표 1. 줌 망원경 광학계 설계사양

파장대역(wave band)	7.6 μm~10.3 μm
중심파장(center wavelength)	9.0 μm
구 경(aperature)	~163 mm
배 율(magnification)	×2~×8.1
출사동 시계각	±18.75°
망원경 길이	≤300 mm
투과율(transmission)	≥70%
다파장 변조전달함수 (polychromatic MTF), at 5500 cycles/rad(×8.1)	axial 0.55 0.6 field 0.50 0.8 field 0.40

재현 영상에서 수직 및 수평 끝단 위치에서의 MTF 값을 설정하였다.

열상장비용 줌 망원경은 요구되는 운용환경 때문에 내부가 밀폐된 시스템으로 설계되어야 한다. 또한 대물부 첫 번째 렌즈는 구경 및 무게가 커서 기계적인 구동이 어렵다. 따라서 어떠한 방법을 택하여도 외부에 노출되는 대물부 첫 번째 렌즈는 하우징에 고정되어야 한다. 이는 줌 방식을 결정할 때 대물 첫번째 렌즈는 움직이지 않는 고정렌즈 방식으로 설계해야 한다는 제약을 의미한다. 따라서 광학계의 줌 방식은 상면의 안정성과 시스템적으로 요구되는 광학계의 성능을 고려하여 기계보정식 4군 줌 렌즈 방식을 택하였다. 배율변화의 역할인 줌밍은 대물부에서 이루어지도록 하고 접안부를 고정초점 렌즈로 구성하여 Keplerian 형태의 망원경을 구성하게 된다. 망원경의 길이를 최소화 하기 위해서는 Galilean 형태의 광학계도 고려할 수 있으나, 이 경우 대물렌즈의 구경에 고정된 입사동을 두기 어려우므로 구경이 지나치게 커져 실용성이 없다.[6]

줌 망원경의 설계개념을 가시적으로 표현하면 그림 3과 같다. 줌 대물부의 전체적인 광학적 구성은 전장길이를 고려하여 텔리포토(telephoto) 형태로 하고 구경이 제일 큰 제 1렌즈군은 밀폐와 구동성을 고려하여 고정한다. 줌밍의 역할은 제 2렌즈군인 가변자(variator)와 제 3렌즈군인 보상자(compensator) 렌즈군을 움직여 배율을 변화시키며 제 4렌즈군인 초점조절 렌즈를 두어 물체의 거리에 따른 초점을 조절할 수 있도

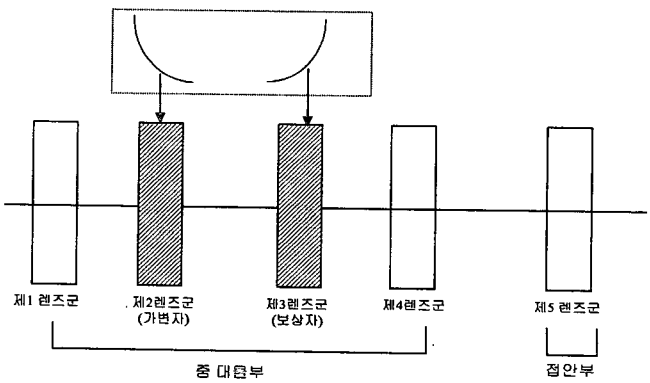

그림 3. 줌 망원경 설계 개념도.

록 한다. 최종적으로 고정초점 접안부를 대물부 뒤에 놓아 망원경을 구성한다.

III. 줌 대물부의 초기설계 및 1차 최적화

3.1. 줌 대물부의 초기설계

줌 렌즈군의 굴절능을 결정하는 1차항 근축설계 이론으로는 여러 가지 방법이 제안되고 있으며 본 설계에서는 이들 중 T.Kryszczynski[7]에 의한 방법과 국내에서 현재 많이 사용하고 있는 방법을[8,9] 조합하여 초기설계에 적용하였다. 이 방법의 원리는 줌 범위 양끝단에 놓여 있는 각 렌즈군의 위치와 그에 관련되는 주요 변수값을 안다면, 줌밍의 양 끝단에서 대응되는 렌즈군의 굴절능이 서로 같아야 한다는 기본원칙에 따라 원하는 해를 얻게되는 것이다.

각 렌즈군의 굴절능 결정을 위한 1차항 식의 전개는 Gauss 광선추적을 이용한 기본식을 이용하였다. 다만 원하는 각 렌즈군의 굴절능 해를 얻기 위해서는 같은 계산과정을 무수히 반복하여야 하며 이를 개선하기 위해 본 설계에서는 굴절능 결정에 관련되는 일련의 과정을 FORTRAN 프로그램으로 완성하고 이를 이용하여 각 렌즈군의 굴절능 값을 결정하였다.

또한 앞에서 제시된 방법에 의해 결정된 굴절능 값은 방법의 특성상 줌 범위 양끝단에 대해서만 구속조건을 만족시키는 해이므로 중간 배율에 대해서는 확인이 안된 상태이다. 그러므로 앞의 방식에 따라 줌 렌즈군의 굴절능을 구한 후 최적설계로 넘어가기 전에 광학적 해가 존재하지 않는 특이점이 줌 구간 중간에 존재하는지 검증하여야만 한다. 따라서 본 설계에서는 이러한 특이점의 존재 여부를 확인하기 위한 FORTRAN 프로그램을 작성하여 줌 궤적에 대한 검증과정을 거친 후 최종적인 굴절능값을 결정하였다. 이와같은 과정을 거친 후 최종적으로 얻어진 각 렌즈군의 굴절능 값과 1차항 특성은 표 2와 같으며 그때 검증된 줌 궤적은 표 3과 같다. 이상의 데이터로부터 각 렌즈군에 곡률과 두께를 부여하고 각 군의 굴절능을 변하지 않는 범위내에서 3차항 구면수차와 색수차를 고려하여 얻은 줌 대물부의 초기설계치를 표 4에 보였다. 표에서 보는 것과 같이 부(-)의 굴절능을 갖는 가변자인 제2군에 색수차 보정을 위한 ZnSe를 추가하였고[10] 초점조절 렌즈인 제4군에 Ge 렌즈 1매를 추가하여 총 6매의 렌즈로 대물부를 구성하였다.

표 3. 근축설계를 통해 검증된 각 렌즈군의 줌 궤적 (단위 : mm)

1군과 2군 간격	2군과 3군 간격	3군과 4군 간격
84	57.59	0.09
86	53.43	2.25
88	48.03	5.65
90	41.11	10.57
92	32.22	17.46
94	20.60	27.08
96	4.78	40.9
96.21	2.8	42.67

3.2. 줌 대물부의 1차 최적화 설계

줌 대물부의 1차 최적화 설계 과정에서 중점을 둔 부분은 Seidel 3차항 구면수차와 코마수차이다. 초기 줌 대물부는 제1렌즈군의 큰 구경에 의해 발생되는 구면수차가 심각하였으며 큰 텔리포토 비율에 의해 과도하게 굴절되어 수차 보정이 어려운 렌즈면들이 발생하게 되었다.

본 설계에서는 이를 해결하기 위한 방법으로 렌즈 매수의 추가보다는 비구면을 사용하는 방법을 택하였다. 다만 비구면을 사용하는 목적을 단순히 구면수차만을 줄이는 것이 아니라 코마나 비점수차 같은 비축수차도 함께 줄이는 방향으로 그 효과를 확대하여 stop이나 pupil 근처로부터 멀리 떨어진 면에 비구면을 설정하여 이들을 동시에 보정하도록 하였다. 만약 비구면을 stop이나 pupil 근처에 설정하면 주광선의 높이가 zero가 되어 비축수차는 보정할 수 없게 된다.[11]

이와같은 원리에 따라 줌 대물부의 1차 최적화 설계에서는 비구면을 제 4렌즈군을 구성하는 첫번째 렌즈의 뒷면에 적용하였다. 1차 최적화 설계과정을 거친 결과 얻어진 줌 대물부의 8.1배와 2.0배에서의 광학적 배치는 그림 4에 보였으며 Seidel 3차항 수차를 계산하면 표 5와 같다.

표 2. 근축설계를 통해 최종적으로 구한 각 렌즈군의 굴절능 값 및 1차항 특성

굴절능	제1렌즈군 : 0.008207197 mm^{-1} 제3렌즈군 : 0.01035627 mm^{-1}	제2렌즈군 : -0.04903340 mm^{-1} 제4렌즈군 : 0.01391993 mm^{-1}		
	입사고 h(mm)	근축각 u	petzval	
2.0배				
제1렌즈군	20.0	0.149389	0.001865728	· h(1)/u(4)=EFL
제2렌즈군	7.9263810	-0.153709706	-0.015889752	· 20/0.248110385
제3렌즈군	17.17201989	0.151637828	0.004441773	=80.609 mm
제4렌즈군	17.06435703	0.248110385	0.001412203	· Σ = -0.008170048
8.1배				
제1렌즈군	40.0	0.2987618	0.001865728	· h(1)/u(4)=EFL
제2렌즈군	11.25612722	-0.131663837	-0.015889752	· 40/0.122661494
제3렌즈군	11.62478597	0.075044503	0.004441773	=326.100 mm
제4렌즈군	8.422637027	0.122661494	0.001412203	· Σ=-0.008170048

표 4. 줌 대물부의 초기설계 데이타(8.1배) (단위 : mm)

	SURF	RADIUS	SEPN	GLASS	Index(center)	DISP	CLRAD
1	S	INFINITE	0.0000	AIR	1.000000	0.000000	63.0
2	S	124.66609	11.9203	GE	4.003286	0.003485	63.0
3	S	172.38688	66.9853	AIR	1.000000	0.000000	62.0
4	SZ	144.65240	2.3178	ZnSe	2.406534	0.024378	22.2
5	S	86.62720	3.9535	AIR	1.000000	0.000000	22.26
6	S	-249.57059	1.6556	GE	4.003286	0.003485	22.2
7	S	124.66609	61.5218	AIR	1.000000	0.000000	23.0
8	SZ	254.83537	3.5099	GE	4.003286	0.003485	26.0
9	S	-2424.80016	2.0198	AIR	1.000000	0.000000	26.0
10	SZ	74.64734	3.6423	GE	4.003286	0.003485	24.0
11	S	113.155641	2.4105	AIR	1.000000	0.000000	24.0
12	S	745.60587	2.5165	GE	4.003286	0.003485	24.0
13	S	358.82642	0.0000	AIR	1.000000	0.000000	24.0

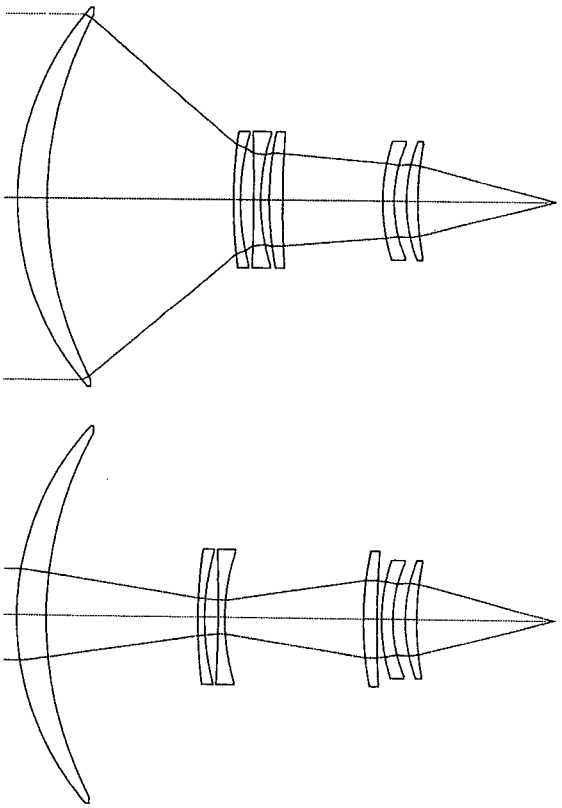

그림 4. 1차 최적화 설계된 줌 대물부 layout.
① 최고배율 (8.1배) ② 최저배율 (2.0배)

IV. 줌 망원경의 최적화 설계 및 결과분석

4.1. 적외선 줌 망원경의 최적화 설계의 특징

1차 최적화 설계된 줌 대물부와 개략 설계된 접안부를 붙여 망원경 상태에서 최적화를 진행하였으며 이러한 최적화 설계과정의 특징을 몇가지 요약하면 다음과 같다. 첫째 특징은 광선수차의 보정이다. 가장 좋은 망원경은 각각 무수차계에 가깝도록 설계된 대물부와 접안부를 붙여서 사용하는 것이지만 사용 재질이 한 두가지로 제한된 원적외선 접안부를 이와 같이 설계 하기란 쉽지 않으며, 열상장비에서 망원경 중간 대물부 초점면에서의 광학적 성능은 의미가 없다. 따라서 본 설계에서는 줌 대물부와 접안부 각각에 대한 광선수차 크기를 줄이기 보다는 그 수차 특성이 서로를 보상하는 방법으로 최적화를 하였으며, 접안부는 3매의 Ge 렌즈로 구성하였다. 그림 5는 최종 설계된 줌 대물부와 접안부에 대한 최고배율에서의 광선수차 특성을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 줌 대물부나 접안부 모두 각각의 수차는 잘 보정되지 않았지만, 크기나 모양이 마치 쌍둥이 처럼 일치함을 알 수 있다. 따라서 둘을 결합하여서 망원경을 만들 경우 서로의 수차특성을 정확히 보상하므로 만족할 만한 우수한 성능의 줌 망원경을 얻을 수 있다.

두 번째 특징은 색수차 보정이다. 본 적외선 줌 망원경은 가시광선에 비하여 10배나 넓은 파장대역을 사용하므로 색수차 보정이 중요한 문제중 하나이다. 본 설계에서도 색수차 보정을 위해 부(-) 굴절능을 갖는 가변자의 첫 번째 렌즈에 색분산 계수가 큰 ZnSe 재질을 사용하였다. 그러나 이 렌즈만으로 종색수차(axial color)는 거의 없앨 수 있었으나 횡색수차(lateral color)는 개선되지 않았으며, 이는 망원경의 MTF 성능을 떨어뜨리는 결정적인 원인이 되었다. 따라서 본 설계에서는 횡색수차를 최소화 하기 위해 각 파장의 주광선을 한점에 무리하게 모이도록 하는 방법을 지양하고 가능한 한 이들을 가까이 모이게 하면서 주광선이 아니라도 어느 한 점에 모이도록 최적화하여 줄이는 방법을 택하였다. 이를 위해 최적화 과정에서 각각의 광선에 대한 가중치를 계속 변화시키면서 반복계산을 하였다.

그림 6과 그림 7은 이와같은 방법에 의해 설계된 줌 망원경 광학계의 최고배율과 최저배율에서의 파장에 따른 광선수차 특성을 보인 것이다. 고배율을 살펴보면 중심파장 뿐만아니라 나머지 파장들에서도 수차가 매우 잘 보정되어 있으며 비축수차 또한 세파장 모두에 대해 잘 보정되었음을 알 수 있

표 5. 1차 최적화 설계된 줌 대물부의 Seidel 3차항 수차

#	S1	S2	S3	S4	S5	C1	C2
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	3.873493	0.255872	0.016902	0.062185	0.005224	0.038132	0.002519
3	1.459542	-0.316230	0.068516	-0.045298	-0.005030	0.010918	-0.002366
4	-3.081646	0.341034	-0.037741	0.027920	0.001087	-0.072815	0.008058
5	0.605788	-0.216008	0.077023	-0.056608	-0.007280	0.037433	-0.013348
6	-2.333055	0.270899	-0.031455	-0.011265	0.004960	-0.007408	0.000860
7	-0.689264	-0.440819	-0.281925	-0.082251	-0.232909	-0.005704	-0.003648
8	0.467381	0.344924	0.254551	0.052461	0.226572	0.004928	0.003637
9	0.001508	-0.006756	0.030261	-0.016351	-0.062312	0.000509	-0.002282
10	-0.007967	-0.018924	-0.044948	0.094473	0.117631	0.001448	0.003440
11	-0.172632	-0.239926	-0.333451	-0.124408	-0.636337	-0.003628	-0.005042
12	0.147012	0.219848	0.328769	0.110208	0.656464	0.003454	0.005166
13	0.057036	-0.045225	0.035859	-0.060023	0.019160	0.001503	-0.001192
	ASPHERIC	SURFACE 11					
	-0.141122	-0.102201	-0.074015	0.000000	-0.053602		
	0.186073	0.046488	0.008346	-0.048957	0.033629	0.008772	-0.004196

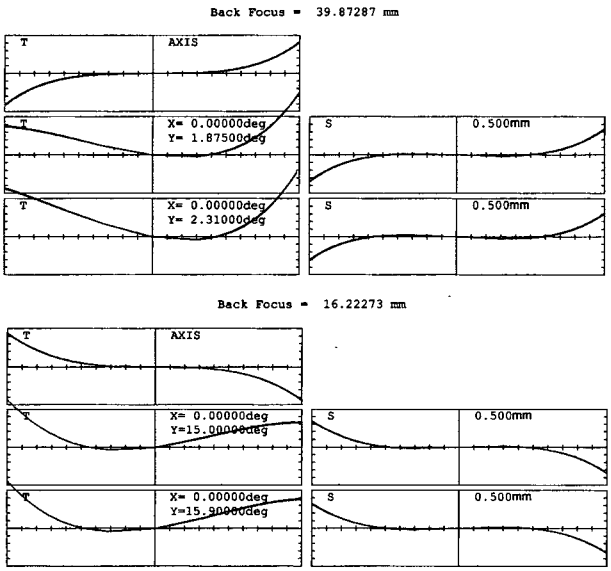

그림 5. 최적화 설계된 줌 망원경(8.1배)의 광선수차 특성 비교. ① 줌 대물부의 광선수차 ② 접안부의 광선수차

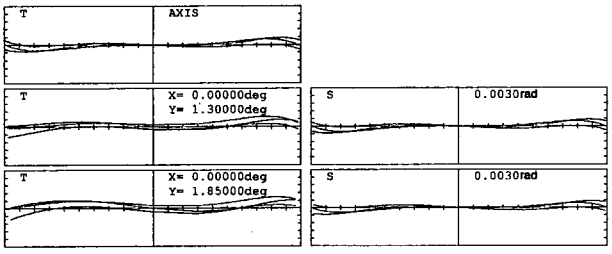

그림 6. 최종 설계된 줌 망원경의 고배율 광선수차 특성 (8.1배).

다. 전체적으로 세파장이 동시에 모이는 곳은 없지만 중심파장에 대해 장파장과 단파장이 만나는 점이 존재하며 파장간의 간격도 많이 줄어들어 최적화의 초기단계에서 보다 횡색수차가 많이 개선되었다.

세 번째 특징으로는 제작 및 조립성을 고려한 줌 궤적의 결

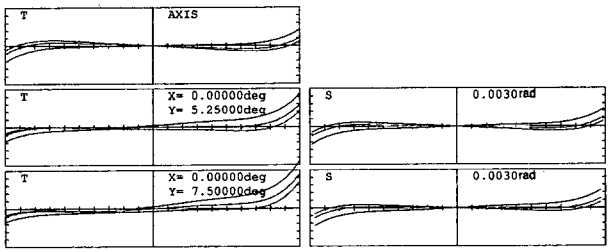

그림 7. 최종 설계된 줌 망원경의 저배율 광선수차 특성 (2.0배).

정이다. 줌 렌즈를 설계하고 만드는데 있어 가장 중요하게 고려해야 하는 사항중의 하나는 제작 가능하도록 줌 궤적을 설계하고 그 궤적에 맞게 줌 렌즈를 구동하는 일이다. 이번 줌 망원경을 설계하는데 있어 구동의 편의성을 위하여 가변자와 보상자의 줌 궤적은 그 형상이 가능한한 단순하도록 많은 노력을 하였다. 따라서 앞의 수차보정을 위한 최적화 과정에서도 8.1배 및 2.0배 외에 중간 배율인 5배를 동시에 최적화 하였으며, 이 과정 중간 중간 궤적 계산을 수행하여 전체적인 궤적 형태를 검증하였다. 최종적으로 설계된 줌 망원경의 궤적은 그림 8과 같다.

4.2. 설계결과 및 성능분석

최적화 과정을 통해 설계 완료된 적외선 줌 망원경의 광학계 layout은 그림 9와 같으며 설계제원은 표 6과 같다. 전체 광학계는 5개의 렌즈군에 총 9매의 렌즈로 이루어지며 줌 대물부는 6매, 접안부는 3매의 렌즈로 구성된다. 대물부의 F-수는 F/1.3으로 설계되어 망원경의 전체 길이가 308 mm로 163 mm의 큰 구경에도 불구하고 짧게 설계되었다.

줌 망원경 광학계를 구성하는 각 렌즈군의 최종 설계결과를 정리하면 다음과 같다. 그림 9에서 제 1렌즈군은 1매의 Ge 렌즈로 제일 앞에 놓이며 양의 굴절능을 갖는다. 직경은 유효구경이 163 mm로 고정되며, 고배율에서 상대적으로 큰 구경을 사용함으로써 발생하는 구면수차를 줄이기 위해 의도

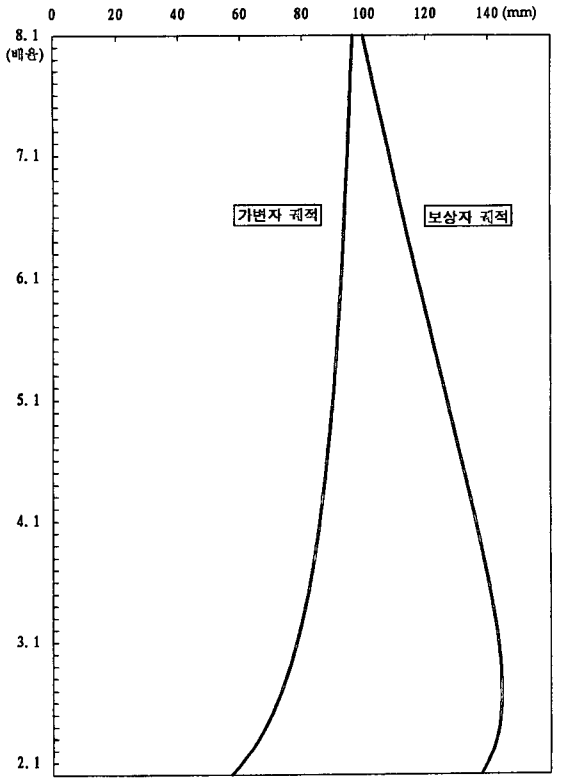

그림 8. 최종 설계된 줌 망원경의 궤적

적으로 구면수차가 과 보정(over-corrected) 되도록 설계하였다. 제 2렌즈군인 가변자는 두개의 음의 굴절능을 갖는 렌즈

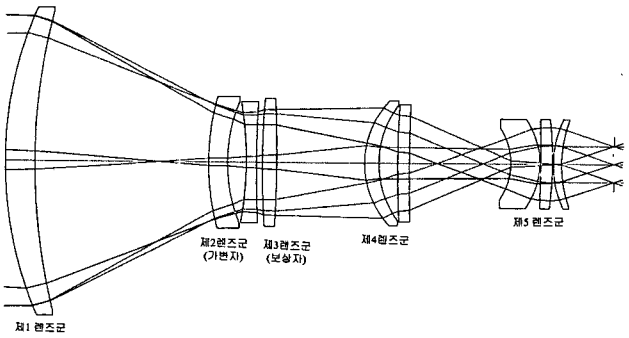

그림 9. 최종 설계된 적외선 줌 망원경의 광학계 layout

로 구성되며 광축을 따라 움직여 망원경의 배율을 바꾸는 줌밍의 역할을 한다. 이 렌즈군은 고배율에서 구면수차가 덜 보정(under-corrected) 되도록 설계되어 제 1렌즈군의 과 보정된 구면수차를 보상하게 되며, 망원경 전체의 색수차 보정을 위해 Ge보다 색 분산이 큰 ZnSe를 앞장 렌즈에 사용하여 색수차를 보정하였다.

제 3렌즈군인 보상자는 양의 굴절능을 가지며 제 2렌즈군과 마찬가지로 광축을 따라 움직이며 배율을 변화시킬 때 초점면의 이동이 없도록 보상한다. 제 4렌즈군은 양의 굴절능을 갖는 두 매의 Ge렌즈로 구성된다. 이 렌즈군은 물체까지의 거리 변화에 따라 초점을 맞추는 초점조절 렌즈의 역할을 하며 제일 앞의 1면에 비구면을 적용하여 줌 망원경의 구면수차 및 비축수차 보정을 하였다. 이때 비구면은 conic constant 만으로 설계되었으며, 그 값은 -0.11439로 렌즈의 외경에서 구

표 6. 최종 설계된 적외선 줌 망원경 광학계의 설계제원(8.1배) (단위:mm)

	SURF	RADIUS	SEPN	GLASS	Index(center)	DISP	CLRAD
1	S	218.37	16.5000	GE	4.003286	0.003485	81.5
2	S	347.89	96.2370	AIR	1.000000	0.000000	81.0
3	SZ	140.52	10.5000	ZnSe	2.406534	0.024378	37.0
4	S	90.10	10.5000	AIR	1.000000	0.000000	34.0
5	S	-198.59	5.7000	GE	4.003286	0.003485	33.0
6	S	647.05	3.2812	AIR	1.000000	0.000000	34.0
7	SZ	470.35	8.0000	GE	4.003286	0.003485	37.0
8	S	-800.51	49.1334	AIR	1.000000	0.000000	37.0
9	AZ	50.32	8.0000	GE	4.003286	0.003485	36.0
10	S	54.68	10.5000	AIR	1.000000	0.000000	32.5
11	S	564.73	6.5000	GE	4.003286	0.003485	34.0
12	S	993.88	56.1031	AIR	1.000000	0.000000	33.0
13	S	-36.48	16.0000	GE	4.003286	0.003485	20.0
14	S	-43.78	0.5000	AIR	1.000000	0.000000	25.0
15	S	-853.74	6.5000	GE	4.003286	0.003485	25.0
16	S	-209.13	0.5000	AIR	1.000000	0.00000	25.0
17	S	59.68	4.5000	GE	4.003286	0.003485	25.0
18	S	72.00	28.0540	AIR	1.000000	0.000000	24.0
19	S	INFINITE	0.0000	AIR	1.000000	0.000000	20.0

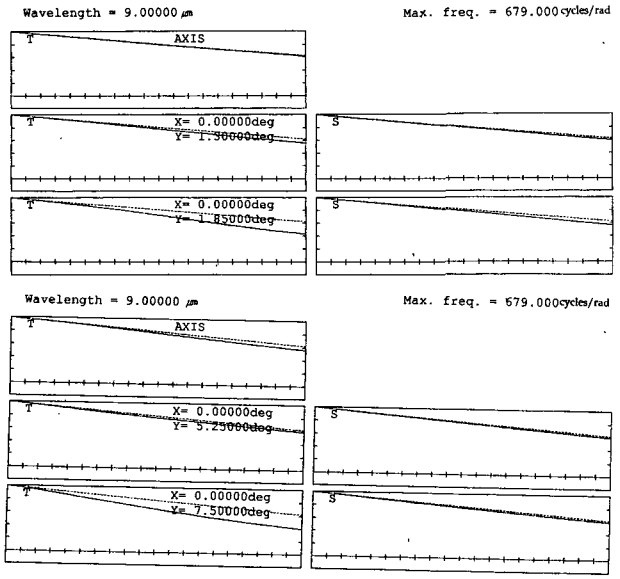

그림 10. 최종 설계된 줌 망원경의 MTF 특성
① 최고배율 (8.1배) ② 최저배율 (2.0배)

면으로 부터 벗어나는 양은 -0.28 mm 정도이다. 제5 렌즈군은 3매의 Ge 렌즈로 구성되며 줌 대물부에 의해 초점면에 맺힌 영상을 시준하여 무초점 망원경계를 형성하는 접안부 역할을 한다.

그림 10은 최종 설계된 줌 망원경의 최고배율과 최저배율에서 중심파장(9.0 μm)에 대한 MTF 값을 나타낸 것이다. 그림에서 위의 점선은 회절한계치를 나타내며 아래의 곡선이 계산치를 나타낸 것이다. 세 파장을 모두 고려한 다파장 MTF를 계산한 결과 기준 공간주파수에서 축상 MTF 값은 고배율 및 저배율 각각 0.55 및 0.55로 설계 목표값인 0.55를 모두 만족하였으며, 나머지 배율에 대하여 계산한 결과 모두 만족함을 알 수 있었다. 또한 0.6 field에 대해서도 각각 0.49 및 0.48로 목표치인 0.5에 거의 근접한 만족스러운 결과를 얻었다. 다만, 영상을 기준으로 수평 끝단인 0.8 field에서는 모든 배율에서 목표치인 0.4를 만족하거나 근접하였으나, 최저 배율인 2배율에서만 약간 떨어지는 0.32로 계산되었다. 이밖에 배율을 0.1 배율의 등간격으로 나누어 모든 배율에서 다파장 MTF 값을 계산하여 분석한 결과 모두 설계 목표치를 만족하였다.

V. 결 론

고분해능의 2세대 열상장비용 적외선 줌 망원경 광학계를 설계하였다. 설계된 광학계는 7.6 μm~10.3 μm의 원적외선 파장대역에서 사용되는 무초점 줌 망원경으로 배율이 2.0배에서 8.1배까지 연속적으로 가변되며, 이에 따른 시야각은 ±9.37°에서 ±2.31°이고 대물부의 유효구경은 163 mm, 출사동의 직경은 20.15 mm 이다. 줌 망원경 광학계는 5개의 렌즈군에 총 9매의 렌즈로 구성되며 대물부 F-수가 1.3으로 작고 텔리포토 형태로 설계하여 전체적인 망원경 길이를 짧게 하였다. 따라서 대물부 구경이 큼에도 불구하고 망원경의 총 길이가 308 mm로 매우 작게 설계되었다. 9매의 렌즈중 1매의 재질만 색수차 보정을 위해 ZnSe를 사용하였고 나머지 렌즈는 모두 Ge 재질만 사용하였으며, 총 18개의 렌즈면 중에서 1면만 수차보정을 위해 비구면을 사용하고 나머지 면은 모두 구면으로 설계하여 제작이 용이토록 하였다.

설계된 줌 망원경의 광학적 성능을 평가하기 위해 모든 배율 범위에서 0.1배율의 등간격으로 다파장 MTF 값을 계산하여 분석한 결과, 모두 설계목표치를 만족하는 회절한계의 우수한 성능을 갖는 것으로 평가되었다. 또한 가변자와 보상자의 이동 궤적이 모두 선형에 가까운 완만한 기울기를 가지도록 설계되어 스테핑 모터를 이용한 구동이 용이함을 알 수 있었다.

설계된 줌 망원경은 현재 제작중에 있으며 정밀한 lead screw 및 스테핑 모터를 사용하여 ±5 μm의 정확도로 구동시킬 예정이다. 앞으로 계속되는 연구에서는 능동적 비열화 (active athermalization)에 중점을 두어 이론적으로 계산된 비열화 보상값을 온도 챔버내에서 실험적으로 측정 및 결정하는 연구와 비구면 및 회절렌즈를 이용하여 소형 경량으로 설계하는데 중점을 두고 수행할 예정이다.

참고문헌

[1] P. Nory, Proc. SPIE **CR38**, 142 (1991).
[2] A. Mann, Opt. Eng. **31**, 1064 (1992).
[3] A. Mann, Opt. Eng. **33**, 109 (1994).
[4] Technical specification, BD660XX, 0000/000-0/31.03.94/008-4/NTC, Sofradir.
[5] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, second edition (McGraw-Hill, Inc., New York, 1966).
[6] I. A. Neil, US PATENT, No. 4,659,171 (1987).
[7] T. Kryszczynski, SPIE 2539, 180 (1995).
[8] 정진호, 정해빈, 응용물리 **3**, 29 (1990).
[9] 홍경희, 김창우, 한국광학회지 **6**, 1 (1995).
[10] M. Shechterman, US PATENT, No. 5,022,724 (1991).
[11] W. J. Smith, *Modern lens design*, (McGraw-Hill, Inc., 1992).

Design of 4:1 IR zoom afocal telescope

Hyun-Sook Kim, Chang-Woo Kim and Seok-Min Hong
Agency for Defense Development P.O. Box 35, Taejon 305-600, Korea

(Received February 26, 1998, Revised manuscript received March 30, 1998)

A high performance afocal zoom telescope has been designed to operate in the 7.6 μm to 10.3 μm waveband for thermal imaging system. This IR zoom telescope is characterized by using of two movable optical element groups, variator and compensator, with mechanically compensated method and the positioning of these groups is controlled by means of a computerized program. The optical performance over the entire 4:1 zoom range and ±2.31~±9.36 degrees field of view is near diffraction limit while maintaining a constant F-number. The all refracting surfaces of this system except only one aspheric surface are spherical curvature and the material for the optical elements is selected Ge and ZnSe which is used for correction of chromatic aberration.