

열상장비용 줌무초점망원경 설계

홍경희 · 김창우

육군사관학교, 국방과학연구소

(1994년 6월 30일 받음)

열상장비용 줌망원경계통을 설계하였다. 대물경계는 4배로부터 14배까지 배율이 변화할 수 있는 줌광학계통으로 설계하였고 접안경은 초점거리 25 mm의 삼중렌즈계통으로 설계하였다. 처음에는 대물경계와 접안경을 구분하여 설계하고 후에 이를 통합하여 무초점계로 설계하였다. 1st order optics에 의해 계통을 확립하고 3rd order optics에 의해 초기설계를 얻었으며 후에 유한광선추적으로 모든 고차수차를 포함하는 ray aberration 또는 angular aberration이 최소가 되도록 최적화 하였다. 최종설계를 회절광학적 MTF를 계산하여 성능을 평가하였다.

I. 서 론

II. 계통확립

전장감시를 하거나 표적탐지 또는 표적지시를 위한 열상장비가 군에 매우 중요한 장비이다. 민간용으로도 야간경계 뿐만 아니라 화재경보를 위해 많이 사용되며 압이나 신경과 진단에도 열상장비가 매우 유익하게 이용되고 있다. 이제 한국군에도 우리 지형에 알맞는 열상장비를 독자적으로 개발하여 갖추어야 하는 시점에 왔고 민수용으로도 앞에서 언급한 바와 같이 개발의 필요성이 촉구된다. 열상장비를 2차원 검출기를 사용하면 매우 고가로 개발하여야 하며 특히 고분해를 얻으려면 그 비용이 막중하다. 그러나 주사형으로 개발하면 단일 검출기로도 결상이 가능하므로 비용이 훨씬 절감된다. 이미 본 연구팀과 국방과학연구소에서 주사장치의 광계통을 설계 및 시제품을 제작하여 성능시험을 한바 성공적인 것으로 분석된 바 있다. 본 연구에서는 주사장치 앞부분에 장착되는 적외선 망원경계통을 자체 개발하고자 하여 물체의 거리가 30 meter로부터 무한거리까지에 걸쳐 결상이 가능하도록 zoom afocal telescope의 광학계통을 설계하였다.

이를 위해 계통의 분석, 줌배율에 적합한 굴절능배분을 위한 계통분석, 계통의 확립, Seidel 수차특성분석, 광선수차특성 분석을 거쳐 최종설계를 실시하였다. Gauss광학에 근거하여 계통을 확립하고 Seidel 제1차 수차를 계산하며 기초설계를 보완하였다. 다음에는 광선수차를 계산하며 최적설계를 찾았다.

1. 계통 분석

본 연구에서는 아래 사양에 의거 IR 무초점계 망원경계통을 설계하였다.

사용과장영역 : 8 μm ~ 12 μm

배율범위 : 4배 ~ 14배

출사동 직경 : 12 mm

출사동시계각 : 24도

최장 경통 길이 : 300 mm 이내

대물경은 몰색화 4군중렌즈로 하고 대안렌즈는 3중렌즈로서 몰색화 한다. 4군렌즈에는 여러가지 형태가 있다.^[1] 그중에서도 첫번째 렌즈와 마지막 렌즈는 고정하고 중간에 2군과 3군만 이동하는 M4a 2411의 형태로 택하였다.^[2] 이 형태가 구동이 편리할 것으로 판단하였다.

2. 군별 굴절능 결정

무한물점에 대하여 줌연립방정식을 세워서 각 군의 굴절능을 결정한다. 줌렌즈계의 배치는 그림 1과 같다. 각 렌즈군의 굴절능을 k1, k2, k3, k4라 하고 전체굴절능은 K라 한다. 최저배율의 렌즈군과의 거리를 Z10, Z20, Z30, Z40라 하고 최고 배율에서의 렌즈군과의 거리를 Z11, Z21, Z31, Z41이라 하였다. 본 연구에서는 최저 배율이 4.0배이고 최고 배율이 14.0이다. 따라서 접안렌즈의 초점거리를 25 mm로 하였다. 전체 광통길이가 300

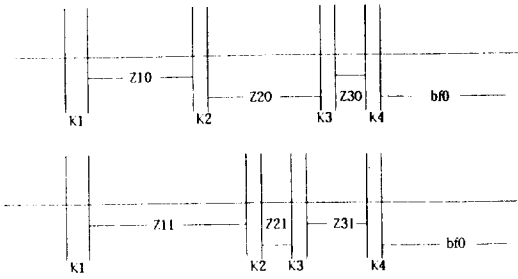


그림 1. 4군 zoom 렌즈의 개략도.

mm를 넘지않기 위해 뒷초점거리를 95 mm로 하고 첫 번째 렌즈군과 마지막 렌즈군까지의 거리를 100 mm로 하여 참고문헌 [1]에 발표된 방법으로 각군의 굴절능을 표 1과 같이 결정하였다. 이 때 얇은렌즈군사법에 의해 렌즈모양에 관계없는 총굴절능, 색수차 및 petzval sum이 최소가 되도록 고려하여 표 1에 제시한 4가지 해중에서 세번째 해를 선택하였다. 이 계통의 최저 배율과 최고 배율에서의 얇은렌즈군사에 의한 수차특성 및 입사고는 표 2와 같다.

표 1. ZOOM 렌즈군의 굴절능 결정

조 건	Z10=43.0 Z20=42.0 Z30=15.0 BF0=95.0 EF0=1,000.0 AM0= 4.0			
	Z11=58.0 Z21=15.0 Z31=27.0 BF1=95.0 EF1=3,500.0 AM1=14.0			
굴절능해	K1	K2	K3	K4
1	-0.1353056E-01	-0.1486167E+00	0.8207643E-01	-0.7665701E+00
2	0.3484574E-02	-0.9394822E-01	0.6988306E-01	-0.2076075E+00
3	0.1185462E-01	-0.6025568E-01	0.2964683E-01	-0.9337238E-02
4	0.3746279E-01	0.8966351E-01	-0.3292750E+00	0.6903642E-01

표 2. 줌렌즈계통의 1st order aberration

h(1)=24.00000	d(3)=42.00000	d(4)=15.00000	d(5)=95.00000
d(2)=43.00000	u(i)	hp(i)	up(i)
h(i)	.2845109E+00	.0000000E+00	.3490659E-01
.2400000E+02	-.4244594E+00	-.1500983E+01	.1253494E+00
.1176603E+02	.4528889E+00	-.6765656E+01	-.7523091E-01
.2959333E+02	.2400000E+00	-.5637193E+01	-.2259510E-01
.2279999E+02	cl(i)	pez(i)	ct(i)
pk(i)	.7497841E-02	-.2961434E-02	-.0000000E-00
.1185462E-01	-.9159761E-02	-.1505263E-01	.1168503E-02
-.6025568E-01	.2850965E-01	.7406153E-02	-.6517906E-02
.2964683E-01	-.8300046E-01	-.3881943E-02	.2052148E-01
-.9337238E-02			
efl = .1000000E+03 tk = .9999999E-02			
tcl = -.5615272E-01 tct = .1517208E-01 tpez = -.8566987E-02			
h(1)=84.00000	d(3)=15.00000	d(4)=27.00000	d(5)=95.00000
d(2)=58.00000	u(i)	hp(i)	up(i)
h(i)	.9957881E+00	.0000000E+00	.3490659E-01
.8400000E+02	-.5855795E+00	-.2024582E+01	.1568992E+00
.2624429E+02	.4528892E+00	-.4378070E+01	.2710328E-01
.3502798E+02	.2400003E+00	-.5109858E+01	.7481524E-01
.2279998E+02	cl(i)	pez(i)	ct(i)
pk(i)	.9184855E-01	.2961434E-02	.0000000E+00
.1185462E-01	-.4557155E-01	-.1505263E-01	.3515559E-02
-.6025568E-01	.3994245E-01	.7406153E-02	-.4992317E-02
.2964683E-01	-.8300034E-01	-.3881943E-02	.1860177E-01
-.9337238E-02			
efl = .3499995E+03 tk = .2857147E-02			
tcl = .3219103E-02 tct = .1712501E-01 tpez = -.8566987E-02			

표 3. 줌렌즈계통의 줌계적

조 건	M=3 대안경 초점거리=25.0 대물경 뒷초점거리=95.0 허용오차=0.2E-05 최대배율=14.0 최소배율=4.0 각 렌즈군의 굴절능은 표 1의 세번째 해를 적용 대물경의 경통길이=100.0 (단위 : mm)			
	줌 배율	1군과 2군 간격	2군과 3군 간격	3군과 4군 간격
줌계적	4.0	43.0	42.0	14.99998
의 해	9.0	56.58707	27.92995	15.48297
	14.0	57.99998	15.0	27.00002

표 4. 기초설계제원

(단위 : mm)

Surf.	Curvature	Refract.index	Thickness(X4)	Thickness(X14)
1	0.7500000E-02	4.0030	20.000	20.000
2	0.4220852E-02	1.0000	39.356	49.856
3	-0.2500000E-01	4.0030	7.500	7.500
4	-0.4813240E-02	1.0000	41.650	11.450
5	-0.1000000E-01	4.0030	8.500	8.500
6	-0.1952020E-01	1.0000	12.067	31.767
7	-0.8339640E-02	2.4503	6.000	6.000
8	0.3299982E-03	1.0000	96.450	96.450

표 1에서 u, h는 각각 가장자리광선의 광축각과 입사고를 의미하고 AMO 및 AM1은 각각 최저 배율과 최고 배율에 대한 각배율을 의미하고 K1, K2, K3 및 K4는 각 렌즈군의 굴절능을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 2개 또는 4개의 해를 얻을 수 있다. 표 2에서 up와 hp는 각각 주광선의 광축각 및 입사고를 의미하며 d는 렌즈간의 간격을 나타낸다. pk, cl, pez 및 ct는 각각 굴절능, 종색수차, petzval sum 및 횡색수차를 의미하며 tk, tcl, tct 및 tpez는 각각 계통의 전체적인 굴절능, 종색수차, 횡색수차 및 petzval sum을 의미한다. 이들 수차는 얇은렌즈 근사에 의한 Seidel 파면수차이다. 표 3에는 이와같이 얻은 렌즈군의 구성에서 배율에 따른 줌계적을 참고문헌 [1]에서와 같은 방법으로 구한 것이다.

III. 초기설계

1. 기초설계 및 Seidel 제1차수차 보정

위에서 확립된 계통으로부터 각 렌즈의 두께를 부여하고 각 군의 굴절능을 변화시키지 않고 bending을 하여 렌즈의 모양을 변화시켜가며 Seidel 제1차수차를 최소화하도록 노력하였다. 우선은 구면수차와 코마를 중점적으로 제거하고 비축수차는 대안렌즈 쪽의 출사동의 위

표 5. Seidel 1st order aberrations (단위 : mm)

Aberration	ma=4.0	ma=14.0
Spherical aberration	0.156770E+02	0.331238E+01
Comma aberration	0.414697E+01	0.785169E+00
Longitudinal	-0.831112E-01	-0.146945E-01
Chromatic aberration		

표 6. 접안경 초기설계제원 (단위 : mm)

Surface	Curvature	Thicness	Material
1	-0.1837496e-2	7.5	Ge
2	-0.1061882e-1	3.11	air
3	-0.5399394e-2	6.5	CdTe
4	0.5570862e-3	3.11	air
5	0.1039405e-1	7.5	Ge
6	0.1490183e-2		

치를 조정하여 최소화 한다. 우선 stop의 위치는 뒤로 미루고 축상물점에 대하여 구면수차와 코마 및 종색수차를 최소화 하였다. 이와 같이 하여 얻는 기초설계의 제원은 표 4와 같고 최저 배율과 최고 배율에서의 Seidel 제1차수차값은 표 5와 같다.

표 7. 대물경계의 초기설계 제원 (단위 : mm)

Surface	Curvature	Thickness			Material
		pos.1	pos.2	pos.3	
1	0.7447592e-2	20.0			Ge
2	0.3940295e-2	29.855	43.510	44.855	air
3	-0.7016295e-2	7.0			Ge
4	0.2950159e-2	5.263			air
5	-0.1016285e-2	7.0			Ge
7	0.6989605e-2	32.468	14.954	5.468	air
8	0.1451688e-2	8.0			Ge
9	-0.3574459e-2	4.958			air
10	0.1500000e-2	8.0			Ge
11	-0.3985486e-2	6.003	9.862	18.003	air
12	0.0	2.0			air
13	0.1065345e-2	6.0			ZnSe
14	0.7738547e-2				

표 8. 대물경계의 최적화 설계제원 (단위 : mm)

Surface	Radius	Thickness			Material
		pos.1	pos.2	pos.3	
1	141.4608	20.0			Ge
2	198.5632	38.466	67.849	69.190	air
3	283.2451	7.0			Ge
4	101.6773	5.878			air
5	-351.7929	7.0			Ge
6	349.8206	41.909	18.697	4.000	air
7	-288.2184	8.0			Ge
8	-160.3448	0.142			air
9	163.5235	8.0			Ge
10	443.27606e-2	9.100	3.000	16.356	air
11	plane	2.0			air
12	1738.68955e-2	6.0			ZnSe
13	573.35457e-2	100.012			
14	plane				

표 9. 접안경의 설계제원 (단위 : mm)

Surface	Radius	Thicness	Material
1	plane	27.50	air
2	103.2089	7.5	Ge
3	157.1266	3.11	air
4	47.4747	6.5	CdTe
5	35.3922	3.11	air
6	36.8135	7.5	Ge
7	64.9900	16.498	air
8	plane		

2. 초기설계 확립

접안경 설계는 보통의 3중렌즈와 동일 하므로 여기서는 그 방법에 대한 설명은 생략하고 초기설계의 제원만 표 6에 제시하였다. 또한 위에서 얻은 대물경계의 설계 제원으로 유한광선을 추적하면 재질의 굴절률이 매우 높기 때문에 어떤 면에서 전반사가 일어난다. 따라서 굴절능이 큰 2번째 렌즈와 3번째 렌즈의 굴절능을 2분하여 전반사를 피하였다. 이리하여 얻은 초기 설계의 제원은 표 7과 같다. 표 7에서 pos.1, pos.2 및 pos.3는 각각 zoom position 1, 2 및 3을 의미한다. 이 때 배율은 각각 4,10, 및 14배일 때이다.

IV. 최적화 설계

1. 대물경계의 최적화

우선은 대물경계와 접안경계를 분리하여 설계하였다. 대물경계는 줌의 형태로서 초기설계를 바탕으로 Kidger사의 SIGMA59 프로그램을 이용하여 광선수차가 최소화 되도록 최적화 하였다. 광선수차로서 0.0080 mm부터 0.0120 mm까지를 파장 영역으로 하고 중간 파장을

표 10. 무초점 줌 망원경 계통의 최적화 설계제원 (단위 : mm)

면	곡률반경	간격			유효경	매질
		4배 위치	10배 위치	14배 위치		
1	141.4608	20.0			194.66	G-Ge
2	198.5632	38.466	67.849	69.19	188.10	Air
3	283.2451	7.0			69.00	G-Ge
4	101.6773	5.878			62.93	Air
5	-351.7929	7.0			63.20	G-Ge
6	349.8206	41.909	18.697	4.0	63.35	Air
7	-288.2184	8.0			63.86	G-Ge
8	-160.3448	0.142			65.91	Air
9	163.5235	8.0			66.21	G-Ge
10	443.2760	9.10	3.0	16.356	64.48	Air
11	plane	2.0			52.43	Air
12	1738.6895	6.0			52.69	G-ZnSe
13	573.3545	116	320		51.15	Air
14	-64.9900	7.5			40.00	G-Ge
15	-36.8135	3.0			40.00	Air
16	-35.3922	6.5			40.00	G-ZnSe
17	-47.4747	3.0			40.00	Air
18	-157.1266	7.5			40.00	G-Ge
19	-103.2089	26.492			40.00	Air
20	plane				12.00	

0.0100 mm로 하였으며 위 3가지 파장에 대해 색수차도 최소화 하였다. 결과 설계제원은 표 8과 같으며 이에 대한 ray-fan, schematic diagram, spot diagram 및 기하적인 MTF를 참고만 하고 지면관계상 제시하지 않았다.

2. 접안경계통의 최적화

접안경은 eye relief를 27.5 mm로 정하고 반시계각 24도로 하였으며 초점거리를 25 mm로 하였다. 광선수차와 색수차를 최소가 되도록 최적화한 결과 설계제원은 표 9에, 제시한 바와 같고 schematic diagram, ray-fan 등은 지면관계상 제시하지 않았다.

3. 망원경 계통의 계통의 최적화

대물계와 접안경을 연결하여 afocal system으로 구성하였다. 그리고 각수차(angular aberration)이 최소가 되도록 최적화 하였다. 접안경의 CdTe는 가공의 편이도가 ZnSe만 못하여 대체하였다. 그 결과 eye-relief는 26.492 mm가 되었고 제원은 표 10에 제시한 바와 같다. 대물경 첫번째 면에서부터 접안경 마지막 면까지의 거리가 297.386 mm이고 최대유효경이 194.66 mm이다.

배율이 각각 4배, 10배, 14배일 때의 개략도, 각수차, 파면수차 그리고 회절광학적 MTF가 각각 그림 2, 그림 3, 그림 4에 제시한 바와 같고 경통길이를 0.5 mm 연장할 때 회절광학적인 MTF가 그림 5에 제시한 바와 같다.

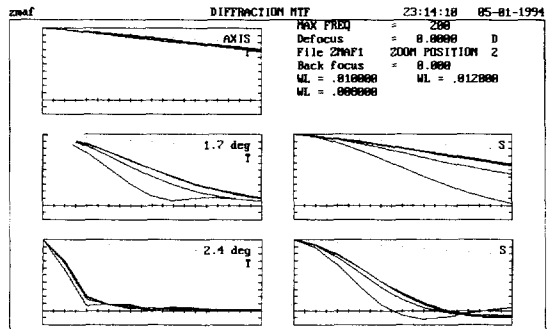
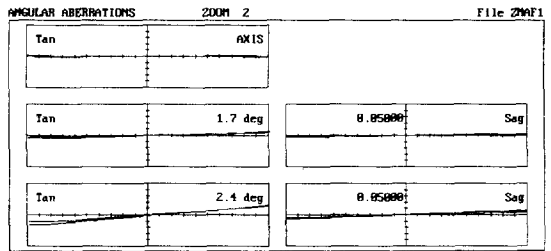
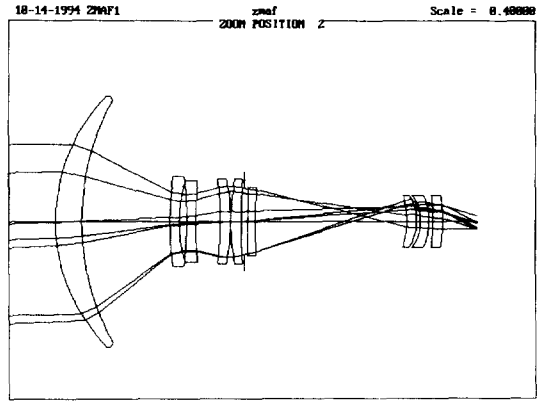
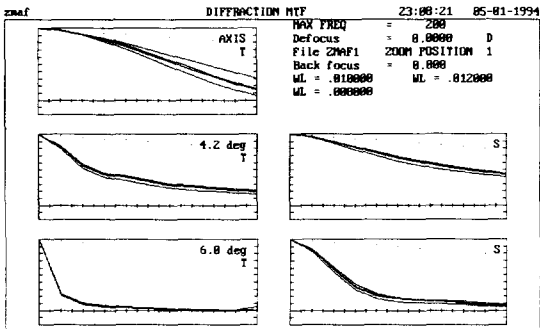
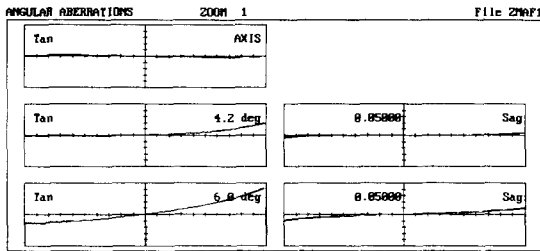
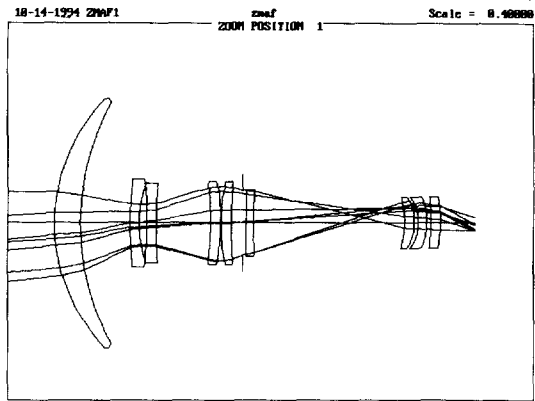


그림 2. 열상장비용 망원경의 설계 및 성능평가(4배).

그림 3. 열상장비용 망원경의 설계 및 성능평가(10배).

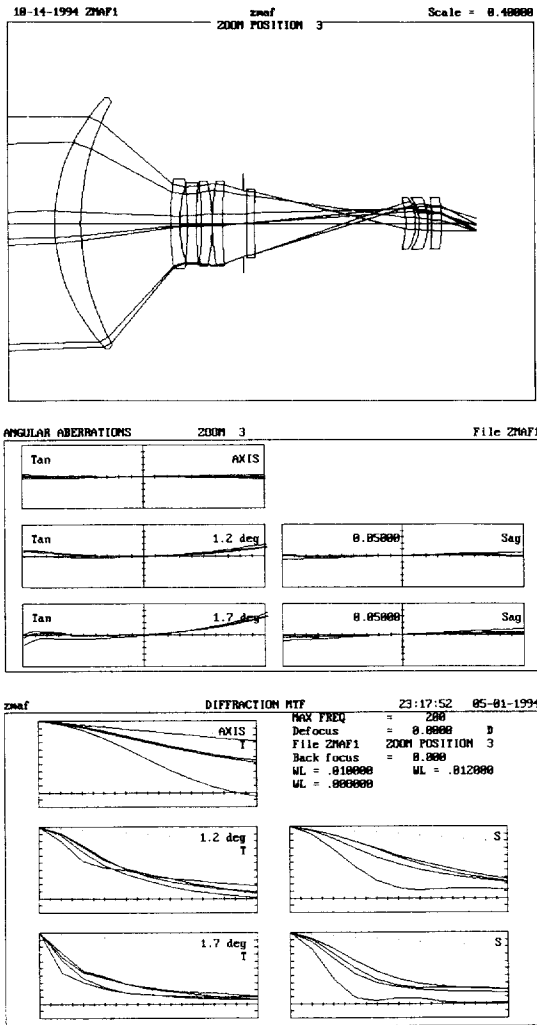


그림 4. 열상장비용 망원경의 설계 및 성능평가(14배).

여기서 광계통은 실제크기의 0.4배이며 angular aberration의 단위는 rad이다. MTF는 최대 1.0부터 0.0까지로 눈금하나가 0.1이며 무초점계에서는 공간주파수 대신에 각주파수로 나타내고 그 단위는 lps/rad이다. 대구경 열상장비로서 이정도이면 만족할 만한 성능으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구 결과 열상장비용 줌 망원경계의 설계를 얻었다. 비교적 훌륭한 성능을 나타내고 있다. 앞으로 계속하여 더 정진하면 더욱 훌륭한 결과를 얻을 수 있다고 확신한다. 본 연구를 통하여 적외선 줌망원경계의 설계 방법과 특징을 파악할 수가 있어서 상당한 소득이 있

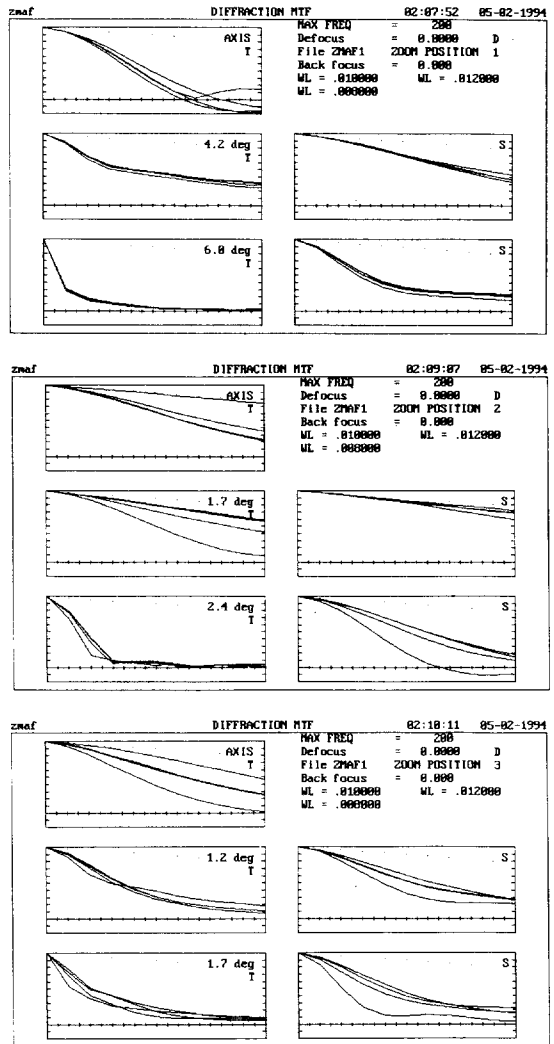


그림 5. 망원경계의 0.5 mm 초점이동시 회절 MTF.

었다.

감사의 글

본 연구를 수행하는동안 재정적으로 도와주신 한국광학기술개발주식회사와 물심양면으로 후원해 주신 국방과학연구소에 심심한 감사를 드리는 바이다.

참 고 문 헌

[1] 정진호, 정해빈, 응용물리, 3, 29(1990).
 [2] M. Robert, Optical Engineering, 23, 117(1984).

Optical Design of Afocal Zoom Telescope System for Thermal Imagery

Kyung Hee Hong and Chang-Woo Kim

Korea Military Academy, Agency for Defence Development, Seoul, 139-799, Korea

(Received: June 30, 1994)

A IR zoom telescope system was designed for thermal imagery. The magnification is 4-14 and the focal length of eye piece is 25 mm. First, the frame was built up with first order optics and started design with 3rd order optics. There after, we can get the final design by optimization technique through finite ray tracing. The optical system was optimized with ray aberration or angular aberration including higher orders. Finally, The performance of the optical system was accessed by calculating the diffraction MTF from the design data.