

체결구조에 의한 Athermalized Tessar형 렌즈설계

박성찬 · 문희종 · 이만형

(주) 금성사 영상미디어연구소

(1993년 1월 19일 받음)

광학계가 설계된 초기 조건에서부터 환경 변화가 생겼을 때, 광학계 변수의 재설정 및 그 보상 방법에 관해 해석적으로 접근했다. 환경 변화에서도 가장 중요한 것은 온도 변화이며, 이에 대한 해석을 통해 온도 보상을 위한 방법에 관해 구체적으로 논했다. 그리고 Tessar 렌즈에 렌즈 체결 구조를 적절히 선정함으로써, 온도 변화에도 성능이 매우 안정된 광학계를 얻었다.

I. 서 론

광학계를 구성할 때 주위 환경 조건에 대한 고려가 매우 중요한 요인으로 등장하는 경우가 종종 발생한다. 예를 들면 리소그래피용 광학계는 온도 변화에 매우 민감하게 성능변화가 발생하여 반도체 제조 공정시 불량률이 발생하므로 스텝퍼 주위의 온도를 일정하게 유지시키는 장치가 필요하다. 실외에서 광학계를 사용할 때 낮과 밤, 겨울과 여름에 따른 온도 변화 및 기압 변화에 의한 광학계의 성능저하를 최소화 하기 위해서는 많은 노력이 필요하다.^[1,2] 실제로 천체망원경의 경우 적외선 영역에서 사용되는 광학유리는 온도 변화에 따른 굴절률 변화가 크기 때문에 설계시점부터 이런 요인들을 고려하지 않으면 안된다. 렌즈설계시 기준온도 및 압력은 20℃, 760 mmHg 이지만, 환경변화는 초기광학계에 많은 변형을 가져온다. 온도 변화에 의한 렌즈 및 경통(mount) 이 팽창 또는 수축되고, 굴절률의 변화 및 렌즈와 경통의 팽창정도의 차에 의한 응력변형(strain) 등이 발생하여 초점 어긋남 및 광학계의 수차변동이 생기며, 결국 성능이 떨어지게 된다.

본 논문에서는 이러한 환경변화 요인에 따른 렌즈계의 재설정 및 그 보상방법에 관해 논하겠다. 그리고 Tessar형 렌즈계에^[3] 대해서 렌즈의 체결구조를 적절히 조합하여 온도변화에 대한 성능저하를 최소화 할 수 있음을 보였다.

II. 환경변화에 대한 모델링과 보상방법

온도변화에 대한 곡면의 변화계수 β 는 수심도 범위 내에서 선폽창계수로 대체할 수 있으므로^[4], 즉 $\beta = dr/dr \approx \alpha$ (α : 선폽창계수)이므로 온도변화에 대한 단렌즈의 초점거리 변화는 다음과 같은 식으로 주어진다.^[4,6]

$$\frac{df}{dT} = f \left(-\frac{1}{n-1} \cdot \frac{dn}{dT} + \alpha \right) \quad (1)$$

단, f : 초점거리, T : 온도.

$$\alpha = \frac{1}{r_1} \frac{dr_1}{dT} = \frac{1}{r_2} \frac{dr_2}{dT}$$

위 식에서 dn/dT 는 온도 1℃ 변화시 굴절률 변화를 나타내며, α 는 온도에 대한 선폽창계수이다. 일반적으로 널리 사용되는 렌즈 및 경통의 재질에 관한 온도 특성은 표 1과 같다. 표 1에서 보듯이 glass 계열은 온도에 대한 광학 특성이 상당히 안정되어 있지만 플라스틱 재료인 PMMA(아크릴)과 적외선용 Germanium, ZnS 등은 온도변화에 매우 민감한 성질을 갖고 있다.^[5] 식 (1)에서 PMMA를 이용한 렌즈계를 구성할 때 PMMA 렌즈의 온도에 따른 굴절률 변화 및 선폽창계수에 의한 영향을 살펴보면

$$-\frac{1}{n-1} \frac{dn}{dT} = 22 \times 10^{-5}, \quad \alpha = 6.3 \times 10^{-5} \quad (2)$$

이므로 온도를 20℃ 상승시킨 경우 초점거리 변화(Δf)는

표 1. Thermal properties of optical materials and mounts.

Materials	Exp. Coefficient ($\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)	dn/dT ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
BK7	71	1.7
SK16	63	0.6
F ₂	82	2.9
SiO ₂	5	10.0
PMMA	630	-110
GERMANIUM	61	396
Al 7075	236	-
Al 6061	234	-
SS 416	99	-
INVAR 35	5.6	-

$$\Delta f = f \cdot \Delta T \cdot 28.3 \times 10^{-5} = 5.66 \times 10^{-3} \cdot f \quad (3)$$

로 주어진다. 따라서 초점거리 100 mm인 렌즈는 20°C 온도 상승시 약 0.566 mm 만큼 초점거리가 길어진다. 실제로, 현재 프로젝션 TV에 사용되는 투영렌즈는 PMMA 또는 PC(Poly Carbonate) 플라스틱 재질에 비구면을 채용하고 있는데, TV Set 동작시 CRT의 온도가 상승함에 따라 투영렌즈의 굴절률이 떨어지고, 열팽창에 의해 성능이 저하되므로 이런 점을 고려하여 렌즈 및 Set 설계를 하지 않으면 안된다. 또한 CD(Compact Disk)의 Pick Up용 광학계의^[6] 대물렌즈에도 플라스틱 비구면 1장을 사용하여 광학계를 구성하므로 온도에 의한 상면 이동 및 성능저하가 발생하므로 주의가 필요하다. 현재 CD Pick Up 시스템에는 이런 점을 해결하기 위하여 auto-focus unit가 내장되어 있다. 적외선용 광학계에서 사용되는 Germanium, ZnS는 온도에 의한 굴절률 변화가 매우 크기 때문에 천체망원경처럼 실외에서 사용하는 경우 이 점을 고려하여 시스템을 설계해야 한다.

1. 환경 변화에 대한 모델링

광학계에 환경변화가 모든 곳에서 균일하게 발생하여 온도 및 기압에 대한 gradient가 없다고 할 때, 즉 soak 상태에서 광학계는 다음과 같은 규칙에 의거 재조정된다.^[7]

- (1) 진공 상태의 굴절률을 1.0으로 하고, 이것을 기준으로 하여 공기의 굴절률을 재조정 한다.
- (2) 렌즈사이의 공기의 굴절률은 gas 종류와 압력에 따라 변한다.
- (3) 각 파장에 대해 glass table 상에 있는 온도에 따른 굴절률 변화(dn/dT)에 의거 glass의 굴절률을 변화 시

킨다.

(4) 렌즈 및 경통은 각각의 온도에 대한 선폽창계수에 따라 scaling 시킨다.

(5) 렌즈와 경통은 항상 접촉한 상태로 존재하며, 그렇지 않은 경우는 가상면(dummy surface)를 적절히 설정한다.

예를 들어 그림 1과 같이 알루미늄 경통으로(AL 7075) 체결된 두개의 볼록렌즈(BK7)를 상온에서 40°C 까지 사용할 때, 렌즈의 두께, 곡률 및 공기간격은 렌즈의 팽창계수와 알루미늄의 팽창계수에 따라 scaling 된다. 또한 굴절률은 온도에 따른 dn/dT 값 만큼 변하게 되며, 상황에 따라 마지막 렌즈면과 상면 사이에도 알루미늄 경통으로 체결되어 있다고 설정할 수 있다. 그림 2와 같이 렌즈가 각기 다른 재질로 구성된 cemented doublet인 경우는 다음과 같다. 우선 각각의 렌즈는 온도에 따라 두께, 곡률 및 굴절률이 조정되고, 접촉면의 곡률은 각각 scale된 곡률의 평균치로 설정되며 이에 따른 접촉면의 곡률이 변화된 것을 보상하기 위하여, 각각 단 렌즈의 굴절능이 접촉전과(온도변화에 따라 독립적으로 scaling된 상태) 동일하게 되도록 doublet의 바깥쪽 면들의 곡률을 각각 조정한다.

2. 보상방법

위와 같이 환경변화가 발생할 때, 이에 대한 해결 방법은 다음과 같은 것이 가능하다.

- (1) 광학계를 구성하고 있는 한 개 이상의 렌즈를 이동 시킨다.
- (2) 온도특성에 입각한 적절한 glass 및 경통 재질의 선택.

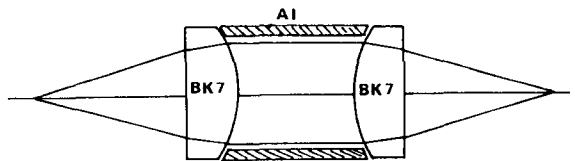


그림 1. Separated lens case by Al spacer.

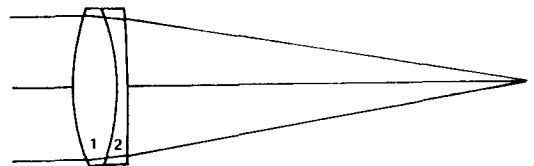


그림 2. Doublet lens case.

- (3) 상면의 이동(refocus).
- (4) 광학계를 구성하고 있는 각 면에서의 수차 발생량의 최소화.
- (5) 반사광학계의 활용.

위 방법 중 (3)은 렌즈와 시스템이 고정된 상태에서 특별한 장치, 즉 촛점조절장치가 없으면 매우 곤란하게 되며 실제로 대형 광학계에서는 적용 불가능하게 된다. 제 (4)의 방법은 이미 알려진 바^[8]와 같이 온도에 따른 광학계의 변수 변화도 렌즈 제조시 허용공차와 같은 맥락에서 적용할 수 있지만, 환경변화가 매우 클 때는 곤란하다. 위 방법은 촛점조절이 가능할 때 매우 효과적이다. 그러나 반사광학계는 온도에 따른 공기의 굴절률 변화는 매우 작기 때문에 식 (1)에서 보듯이 공기의 굴절률 변화에 의한 성능변화는 거의 무시할 수 있으며, 또한 반사면의 재질과 경통의 재질이 같은 경우 온도에 따른 광학계의 변수변화는 단지 전체 광학계의 scale up/down에 불과하므로 성능변화는 그다지 크지 않다.

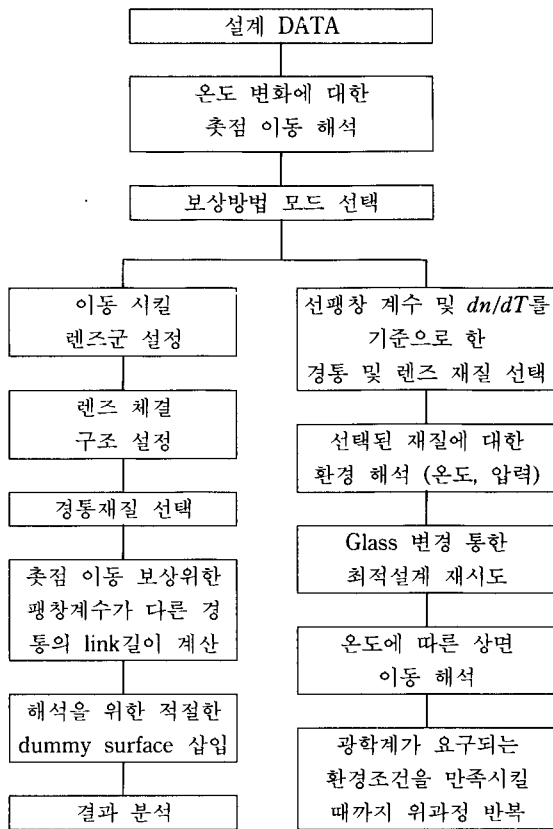


그림 3 Flow chart for athermalized optical system design.

따라서 환경변화에 따른 그 보상이 필요한 광학계는 반사광학계를 적절히 이용하면 유리하다. 마지막으로 방법 (1) 및 (2)에 의한 보상방법은 어떤 특별한 장치나 제한없이 적용할 수 있는 것으로 특히 온도 변화에 대한 보상방법으로 유용하며 흐름도는 그림 3과 같다. 그림 3에서 방법 (2)에 비해 (1)은 임의로 설계된 광학계에 대해서 렌즈 재질 또는 경통의 재료를 바꾸지 않고 곧바로 적용할 수 있다는 점에서 유리하기 때문에 본 논문에서는 방법 (1)을 Tessar형 렌즈계를 적용하여 환경 해석을 하고자 한다.

III. 결과 및 토의

그림 4는 3군 4매 Tessar형 렌즈^[3](EFL=100 mm, F/3.5, 표 2)로서 그림 5 및 그림 6의 수차특성 및 MTF를 고려해 볼 때, 사진기용 렌즈로서 충분한 성능을 갖추고 있다. 본 렌즈는 상온(20℃)에서 설계 되었고, 그림 7-(a)와 같이 모두 Al 경통으로 체결되었을 때 온도를 40℃로 올린 경우, 온도 상승에 의한 광학계의 설계 변수는 표 3에서 주어진 glass 및 경통의 온도특성에 따라 변하며, 표 4 및 5는 그 결과이다. 모든 렌즈 및 경통은 온도 상승에 해당되는 열특성 만큼 굴절률, 두께, 공기간격이 조정되었음을 알 수 있다. 첫번째 렌즈인 doublet의 중심곡률(R_2')은 다음과 같이 계산되었다. 우선 온도상승에 의한 각면의 곡률은 접촉면이 없다는 가정하에 독립적으로 scaling 되며 그 값은 각각 $R_1' = 36.8392$, $R_{21}' = -81.388$, $R_{22}' = -81.3909$, $R_3' = 113.5027$ mm이고, 각각의 단렌즈의 촛점거리는 $f_1' = 37.5793$, $f_2' = -85.85279$ 이며, 이때 doublet 렌즈의 촛점거리는 62.160 mm이다. 여기서 R_{21}' 과 R_{22}' 은 접촉면에서 각각 glass 재질의 선행창계수에 따라 조정된 곡률이며, 실제로 이들은 접촉된 상태이고 온도변화에 따른 팽창의 차이에 의한 strain이 발

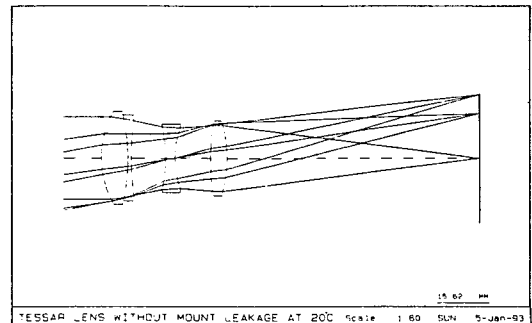


그림 4. Schematic diagram of Tessar lens.

생하여 결국 접촉면의 곡률은 다음과 같이 평균화 된다.

$$R_2' = \frac{R_2(1 + 20 \alpha_{LaK9}) + R_2(1 + 20 \alpha_{LLF1})}{2} \quad (4)$$

$$= -81.3895$$

그리고 제 2 면의 변경된 곡률반경에 대한 각각의 차이는 각각의 단렌즈의 초점거리가 f_1' 및 f_2' 과 동일하도록 R_1' 및 R_3' 을 bending의 원리에 따라 재조정 하였으므로, doublet 렌즈의 초점거리도 같게 된다. 그리고 모든 렌즈는 알루미늄 경통으로 체결되었고, 마지막 렌즈와 상면과도 알루미늄 경통으로 연결되어 있다고 가정했다. 그림 8과 9는 40°C 에서의 광선수차 및 MTF 값이다. 그림 8의 광선수차를 보면 구결광선(sagittal ray)과 자오광선(tangential ray)의 상면만곡 수차가 축상에서 0이 아니고 일정한 양의 (-) 값을 갖고 있다. 이것은 상온에서 40°C 로 온도가 상승함에 따라 발생한 것이고, 여타의 초점조절 장치가 없다고 가정했으므로 이러한 초점 어긋남은 곧바로 그림 9의 MTF 곡선에서 특히 구결광선의 MTF 값을 저하 시키는 요인이 된다.

방법 1)을 이용하여 온도변화에 의한 초점어긋남을

표 2. The lens data of Tessar type at 20°C .

No.	Radius	Thickness	Glass	Apertures
Obj	Infinity	Infinity		
1	36.8344	8.0000	LaK9	14.933
2	-81.3776	1.0615	LLF1	13.780
3	113.4842	10.4448		13.125
4	56.6150	2.8035	SF7	10.841
Sto	34.0303	10.7703		10.462
6	98.6494	4.9487	LaK9	11.712
7	-52.5375	77.8536		12.027
Img	Infinity	0.0000		

표 3. Thermal expansion and refractive index gradients for each component.

No.	Radius		Thickness		Glass		
	Exp. Coefficient ($\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)		Exp. Coefficient ($\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)		dn/dT ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
					656.3 nm	546.1 nm	486.1 nm
1	63.929		63.929		2.06	2.50	2.85
2	81.786		81.786		1.26	1.80	2.36
3	81.786		236.000		—	—	—
4	79.714		79.714		3.34	4.10	5.04
5	79.714		236.000		—	—	—
6	63.929		63.929		2.06	2.50	2.85
7	63.929		236.000		—	—	—

없애기 위해서는 Tessar 렌즈에서 어느 한군을 이동시켜야 하는데 일반적으로 초점거리가 짧은 렌즈군을 이동시키면 작은 이동만으로도 초점면의 이동을 제어할 수 있고, 다음에서 기술되는 link길이 또한 작게 되기 때문에 매우 유리하다. 본 광학계에서 온도변화에 따른 초점 어긋남을 없애기 위해 표 4에서 주어진 렌즈 data를 기본으로 하여 3면과 4면 사이의 거리(d_3)와 5면과 6면 사이의 거리(d_5)만을 변수로 잡고, 전체광학계의 길이는

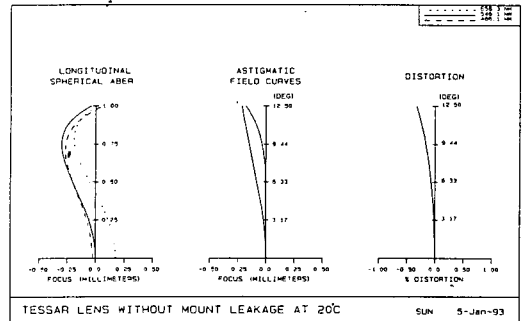


그림 5. Ray aberrations of Tessar lens at 20°C .

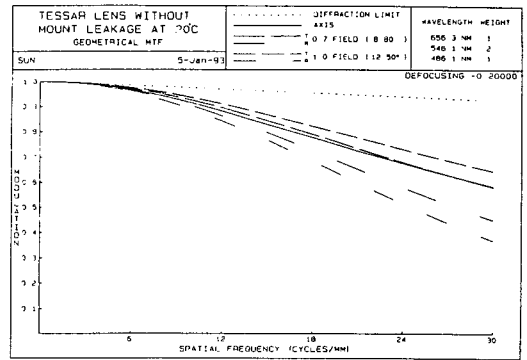


그림 6. The MTF of Tessar lens at 20°C .

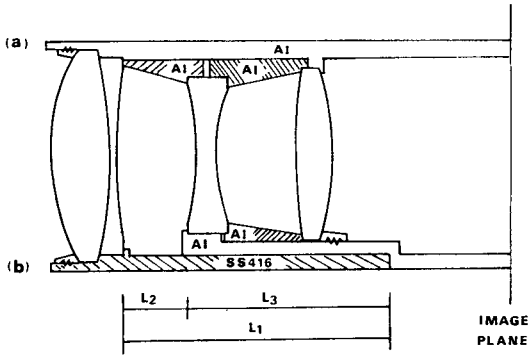


그림 7. The mounting structure of Tessar lens, (a) without mount leakage (b) with mount leakage.

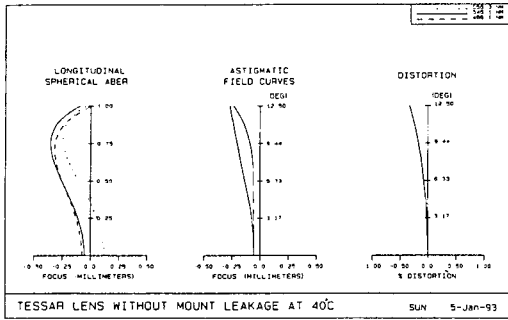


그림 8. Ray aberrations of Tessar lens without mount leakage at 40°C.

고정시킨 상태에서 최적설계를 한 결과, 40°C에서 초점 맞춤을 위해서는 세번째 렌즈를 -0.020699 mm 만큼, 즉 $\Delta d_3 = -0.020699$, $\Delta d_5 = 0.020699$ 만큼 이동시키는 것이 필요함을 알 수 있었다. 온도변화에 대해 초점조절을 위해 세번째 렌즈를 이동시키기 위해 그림 7-(b)와 같은 경통구조를 생각해 보자. 외경통과 내경통의 재질을 각기 다른 것으로 사용한다고 가정하고, 각각의 선팽창계수를 α_1, α_2 할 때 초점 맞춤을 위해 필요한 외경통의 길이 L_1 은 다음과 같다.

$$(L_2 + L_3) \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) = L_3(1 + \alpha_2 \cdot \Delta T) + L_2(1 + \alpha_{Al} \cdot \Delta T) + \Delta d_3 \quad (5)$$

L_3 에 대해 풀면

$$L_3 = \frac{L_2(\alpha_{Al} - \alpha_1) + \Delta d_3 / \Delta T}{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (6)$$

단, $L_1 = L_2 + L_3$

표 4. The lens data of Tessar type without mount leakage at 40°C.

No.	Radius	Thickness	Glass	Apertures
Obj	Infinity	Infinity	Air*	-
1	36.8389	8.0010	LaK9*	14.940
2	-81.3895	1.0617	LLF1*	13.800
3	113.5056	10.4502	Air*	13.132
4	-56.6240	2.8039	SF7*	10.846
Sto	34.0357	10.7757	Air*	10.467
6	98.6620	4.9493	LaK9*	11.717
7	-52.5442	77.8904	Air*	12.033
Img	Infinity	0.0000	-	-

표 5. Refractive index of materials at 40°C and 760 mmHg.

Materials	656.3 nm	546.1 nm	486.1 nm
Air*	1.000254	1.000256	1.000257
LaK9*	1.687662	1.694524	1.700321
LLF1*	1.545010	1.551445	1.557025
SF7*	1.634898	1.644708	1.653436

표 6. The lens data of Tessar type with mount leakage at 20°C.

No.	Radius	Thickness	Glass	Apertures
Obj	Infinity	Infinity	-	-
1	36.8344	8.0000	LaK9	14.933
2	-81.3776	1.0615	LLF1	13.780
3	113.4842	76.3099		13.125
4	Infinity	-65.8652		dummy surface
5	-56.6150	2.8035	SF7	10.841
Sto	34.0303	10.7703		10.462
7	98.6494	4.9487	LaK9	11.712
8	-52.5375	77.8536		12.027
Img	Infinity	0.0000		-

식 (6)에서 L_2 는 3면과 4면 사이의 광축상의 거리가 아니고, edge 두께(거리)이며, $\Delta T = 20^\circ\text{C}$, $\Delta d_3 = -0.020699$ mm 이다. 만약 외경통을 스테인리스 스틸 (SS416, $\alpha_1 = 99 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), 내경통 및 간격환을 Al 7075를 사용한다면, 외경통의 link 길이 L_1 은 75.543 mm가 되며 표 6은 그 결과이다. 표 6의 렌즈 data를 20°C에서 40°C로 앞의 방법과 동일하게 온도를 상승시킨 경우의 렌즈 data는 표 7이며 그림 10과 그림 11은 40°C에서의 광선수차도 및 MTF 곡선이다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 렌즈계의 초점이 제대로 맞추어졌음을 알 수 있고, 이는

표 7. The lens data of Tessar type with mount leakage at 40°C.

No.	Radius	Thickness	Glass	Apertures
Obj	Infinity	Infinity	Air*	-
1	36.8389	8.0010	LaK9*	14.940
2	-81.3895	1.0617	LLF1*	13.800
3	113.5056	76.3250	Air*	13.128
4	INFINITY	-65.8959	Air*	dummy surface
5	-56.6240	2.8039	SF7*	10.846
Sto	34.0357	10.7757	Air*	10.467
7	98.6620	4.9493	LaK9*	11.717
8	-52.5442	77.8904	Air*	12.033
Img	Infinity	0.0000	-	-

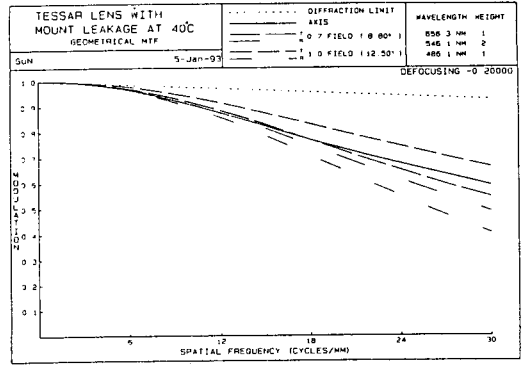


그림 11. The MTF of Tessar lens with mount leakage at 40°C.

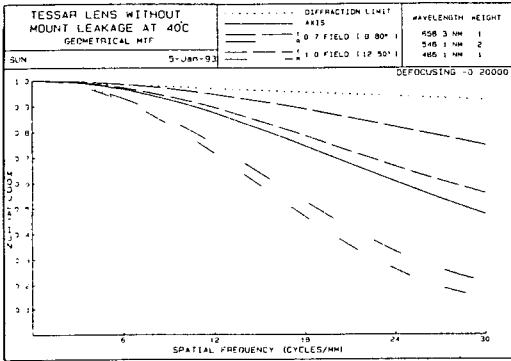


그림 9. The MTF of Tessar lens without mount leakage at 40°C.

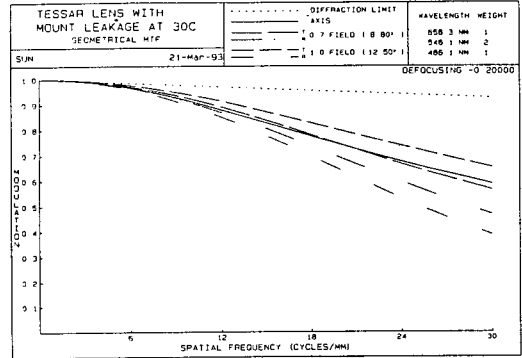


그림 12. The MTF of Tessar lens with mount leakage at 30°C.

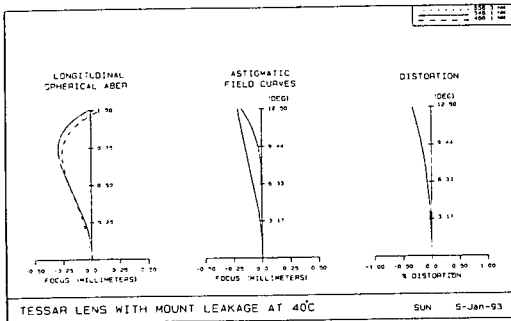


그림 10. Ray aberrations of Tessar lens with mount leakage at 40°C.

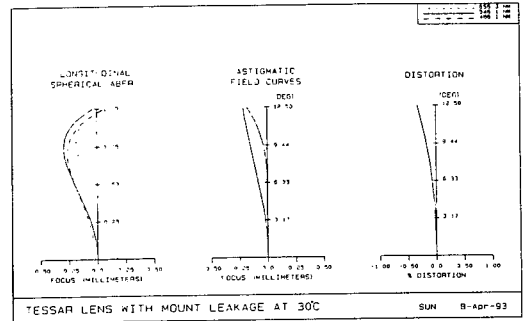


그림 13. Ray aberrations of Tessar lens with mount leakage at 30°C.

결국 그림 11에서 처럼 모든 field 및 방향에서 MTF가 일정하게 높은값을 유지하고 있다. 그리고 온도 20°C 와 40°C 사이에서의 렌즈성능을 알아보기 위하여 30°C 에서

MTF 및 광선수차도를 계산한 것이 그림 12, 13이다. 그림 12, 13에서 볼 수 있듯이 30°C 에서도 초점 어긋남이 없고, 본 체결구조를 이용한 렌즈계는 여전히 높은 MTF

값을 보이고 있으며, 전체적으로 20~40°C 사이의 온도 범위에서 연속적으로 온도변화에 대해 일정한 성능을 유지하고 있음을 알 수 있다.

사관학교의 홍경희 교수님, 청주대학교의 이종웅 교수님과 포항공대 가속기연구소의 나승유 박사님께 감사드립니다.

IV. 결 론

참 고 문 헌

환경변화에 대한 광학계의 설계치의 변화에 대한 이론적인 근거를 설정하고, 환경변화시에 광학성능을 안정시키기 위한 방법에 관해 구체적으로 접근하였다. 설명된 접근 방법중에서도 기존의 설계치를 변경하지 않고, glass 및 경통의 열특성을 고려하여 렌즈의 체결구조를 적절히 변경 시킴으로써, 환경조건중 가장 중요하고 큰 영향을 주는 온도변화에 대한 해석을 통하여, 훨씬 안정된 성능을 갖는 광학계를 설계할 수 있음을 보였다. 본 논문에서 다루지 못한 내용, 즉 습도변화, 압력변화, 그리고 tilt 및 decenter 광학계에 대한 해석은 다음 기회로 미루기로 한다.

[1] J. R. Lloyd, *Thermal Imaging System* (Planum Press, NewYork, 1975).
 [2] 홍경희 외 4명, "주사장치 광계통 설계연구", 국방과학연구소 (1990).
 [3] W. J. Smith, *Modern Lens Design* (McGraw-Hill Inc., NewYork, 1992) chap. 12.
 [4] G. G. Slyusarev, *Aberration and Optical Design Theory* (Adam Hilger Ltd., Bristol, 1984) chap. 4.
 [5] 原田磐夫, "Plastic Lens の 現狀", *텔레비ジョン學會誌*, Vol 38, No. 9, p 807 (1984).
 [6] 小倉磐夫, "先端光學機器, 材料と 最近の 話題", *工業材料*, Vol. 35, No. 5, p 2 (1991).
 [7] *Code-V Reference Manual* (Optical Research Associates, California, 1992) Ver. 7.50, chap. 6.
 [8] 박성찬, 이상수, "허용공차를 고려한 렌즈설계", *응용물리*, Vol. 6, No. 2, p 115 (1993).

V. 감사의 글

본 연구가 진행되는 동안 성심 성의껏 도와주신 육군

The Design of athermalized Tessar Type by Optimization of Mounting structure and Materials

Sung Chan Park, Hee Jong Moon and Man Hyoung Lee
Image & Media Laboratory, Gold Star, Seoul 137-140, Korea

(Received: January 19, 1993)

When environmental changes are occurred, the analytic approaches to the reset and compensation of a optical system are presented. It is shown that the temperature change is the most impotant factor among the environmental changes, and useful discussion for athermalization were given. Finally we could obtain thermally stable Tessar system by optimization of mounting structure and materials.