

카메라 광학계에 있어서 플라스틱렌즈의 활용

글 : 강건모 / 삼성항공산업(주)
제1공장 카메라 개발팀

본 자료는 한국광학회 광기술분과 주최로 지난 3월18일~19일에 개최된 제3회 광기술워크샵논문집 '한국광학기술의 현황과 전망'중에서 일부를 발췌한 것이다. -편집자 주-

1. 서 론

광학기에 있어서 플라스틱 사진렌즈는 1959년 미국의 이스트만 코닥사에서 F8의 TRIPLET 렌즈가 최초로 채용된¹⁾ 이후 안경렌즈나 저가격의 카메라 렌즈등에는 널리 사용되어 왔다. 특히 최근에는 비구면 가공기술이 보편화되고 사출성형기술의 눈부신 발전에 힘입어 플라스틱 렌즈의 채용은 대단히 광범위해지고 있다.

플라스틱 렌즈를 채용하는 주요 목적과 이유는 다음과 같다.

광학기의 소형 경량화를 달성하기 위해서는 렌즈매수의 절감이 요구되는 데, 이 경우 성능을 유지하기 위해서는 비구면의 도입이 일반적이다.

최근에는 광학유리의 경우에도 다양한 제조 공정에 의한 비구면 렌즈가 도입되고 있으나 아직은 제조 원가가 비싸고, 금형수명이 짧으며 광학유리의 제조업체가 아닌 경우는 접근하기가 어려운 것이 단점으로 지적되고 있다. 이에 반하여 플라스틱 렌즈의 경우는 광학유리에 비해 온도변화에 대하여 굴절율의 변화가 크다는 점등 여러가지 단점이 있음에도 불구하고, 비교적 용이한 방법으로 비구면 도입이 가능하며, 사출성형에 의한 대량생산이 가능하여 제조 원가가 저렴하다는 장점이 있다.

플라스틱을 렌즈 소재로 한다고 하여서 렌즈 설계 과정의 커다란 줄기가 바뀌는 것은 아니다. 그러나 광학유리와는 다른 플라스틱의 물리적 특성을

설계의 시작 시점부터 세밀하게 고려하지 않으면 안된다. 특히 플라스틱렌즈는 고가의 금형투자가 이루어져야 하고, 시제품 제작이 어려우므로 설계 시점부터 충분한 고려가 되지 않을 경우 제조시 많은 문제점이 나올 가능성이 많고 재설계 이후의 제조기간까지의 시간이 많이 소요되므로 특별한 주의를 기울여야만 할 것이다. 본 논문에서는 주로 카메라의 촬영광학계에 사용되는 플라스틱렌즈의 온도변화에 대한 상점이동 보상 설계방법에 대해 논의하고자 한다.

2. 플라스틱 렌즈의 특성

2.1 플라스틱 렌즈의 장단점

플라스틱 렌즈를 이용하기 위해서는 먼저 플라스틱 렌즈

〈표-1〉 플라스틱 렌즈의 장·단점

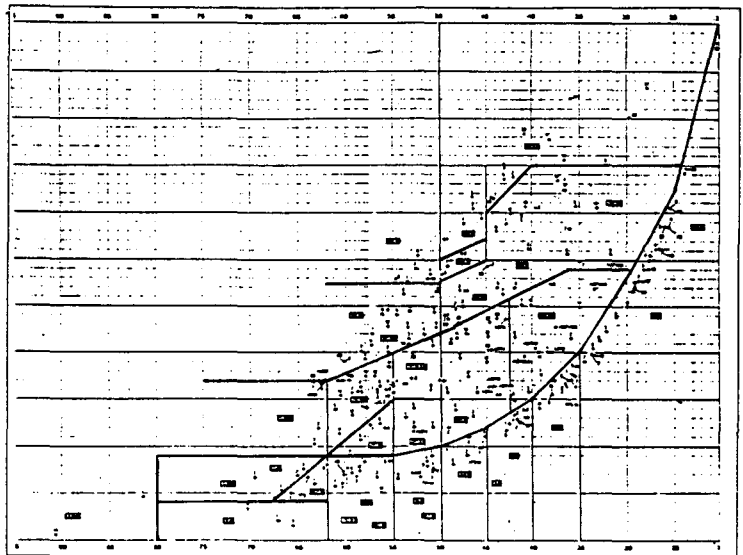
장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> - 비중이 작아서 제품을 경량화하기 쉽다. - 내충격성이 우수하다. - 대량생산이 용이하다. - 재료비가 싸다. - 형상의 자유도가 높고, 렌즈결합 부위를 일체화할 수 있다. - 비구면 도입이 용이하다. 	<ul style="list-style-type: none"> - 이용할 수 있는 플라스틱의 굴절율이 낮고, 종류도 한정되어 있다. - 상처나기 쉽다. - 외력에 변형되기 쉽다. - 열팽창이 광학유리의 약 10배 정도 크다. - 온도 및 습도에 의한 굴절율의 변화가 크다. - 평면의 성형이 어렵다. - 소량생산이나 시제품 제작이 어렵다. - 정전기가 발생하기 쉬워, 먼지 등이 붙기 쉽다. - 접합 및 Coating이 어렵다. - 세척이 어렵다. - 내열성, 내습성이 나쁘다. - 균질성이 나쁘고, 복굴절을 일으킨다. - 성형시의 잔류응력등에 의한 수축이 발생하기 쉽다.

의 특성과 이로인한 장단점을 파악하지 않으면 안된다. 광학유리와 비교했을 때 플라스틱 렌즈의 대표적인 장단점은 〈표-1〉과 같다. (1,2),3),4),5),6),7)

2.2 플라스틱 렌즈 소재의 종류

플라스틱 렌즈용 소재는 기본적으로 종류가 한정되어 있으며, 광학유리에 비해 굴절율이 낮기때문에 설계의 자유도가 그만큼 적다고 할 수 있다. 〈그림-1〉은 일반적으로 사용되고 있는 광학유리의 굴절율 및 아베상수의 특성도이며,⁸⁾ 〈표-2〉에는 대표적인 광학용 플라스틱의 특성이 나와있다.^{9),10)}

일반적으로 많이 이용되는



〈그림-1〉 광학유리의 굴절율 및 분산 특성도

플라스틱의 경우 굴절율은 1.49에서 1.6 사이, 아베상수는 30에서 60 사이가 된다. 광학유리의 경우 굴절율이 1.45에

서 2, 아베상수가 20에서 95까지 분포되어 있고, 일반적으로 많이 이용되고 있는 경우의 광학유리도 굴절율이 1.5에서

<표-2> 대표적인 광학용 플라스틱의 물성

파장(μm)	PMMA	PS	PC	SAN
1.01398	1.483115	1.572553	1.567248	1.551870
0.85211	1.484965	1.576196	1.570981	1.555108
0.70652	1.487552	1.581954	1.576831	1.560119
0.65627	1.489201	1.584949	1.579864	1.562700
0.64385	1.489603	1.585808	1.580734	1.563438
0.58929	1.491681	1.590315	1.585302	1.567298
0.58756	1.491757	1.590481	1.585470	1.567440
0.54607	1.493795	1.595010	1.590081	1.571300
0.48613	1.497760	1.604079	1.599439	1.579000
0.47999	1.498258	1.605241	1.600654	1.579985
0.43584	1.502557	1.615446	1.611519	1.588640
0.40466	1.506607	1.625341	1.622447	1.597075
0.36501	1.513613	1.643126	1.643231	1.612490
열팽창계수 °C ⁻¹	68×10 ⁻⁶	70×10 ⁻⁶	66×10 ⁻⁶	65×10 ⁻⁶
dN/dt, °C ⁻¹	-105×10 ⁻⁶	-140×10 ⁻⁶	-107×10 ⁻⁶	-110×10 ⁻⁶
비 중	1.19	1.06	1.20	1.09

1.85, 아베상수의 경우는 23에서 80이상의 분포를 보이고 있다.

2.3 플라스틱 렌즈의 온도

특성

광학계에 있어서 광선의 진행은 페르마의 원리를 따른다. 페르마의 원리란 광선이 매질을 진행할 때 그 광로장이 최소가 되는 경로를 따라 진행된다는 것을 의미한다.

광로장은 광학계의 각 요소에서 n·l로 표시되는데 n은 굴절율, l은 광선 경로의 기하학적 길이가 된다.

온도 변화에 대한 광로장의 변화는 1) 식과 같다.

$$\frac{\partial(n \cdot l)}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} l + \frac{\partial l}{\partial t} n \dots 1)$$

여기서 $\partial n / \partial t$ 는 굴절율의 온도 의존성이며 $\frac{1}{l} \cdot \frac{\partial l}{\partial t}$ 는 선팽창계수가 된다.

얇은 렌즈의 경우 제1면의 곡률반경을 r₁, 제2면의 곡률반경을 r₂라 하면 초점거리 f는

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \dots 2)$$

온도변화에 의한 초점거리의 변화는

$$-\frac{1}{f^2} \cdot \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \{ (n-1)$$

$$\cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \}$$

$$= \frac{\partial(n-1)}{\partial t} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$+ (n-1) \frac{\partial}{\partial t} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (n-1)$$

$$\cdot \left(-\frac{1}{r_1^2} \cdot \frac{\partial r_1}{\partial t} + \frac{1}{r_2^2} \cdot \frac{\partial r_2}{\partial t} \right)$$

.....3)

여기서

$$\frac{1}{r_1} \cdot \frac{dr_1}{dt} = \frac{1}{r_2} \cdot \frac{dr_2}{dt} = \frac{1}{l}$$

$$\cdot \frac{dl}{dt} = \alpha \text{는 선팽창 계}$$

수가 된다.4)

4)식을 3)식에 대입하면

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{f^2} \cdot \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \\
 & + (n-1) \cdot \left(-\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \alpha \\
 & = \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \left\{ \frac{\partial n}{\partial t} - (n-1) \alpha \right\} \\
 & \dots\dots\dots 5)
 \end{aligned}$$

2)식과 5)식에 의해

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f}{\partial t} &= -\frac{f}{(n-1)} \\
 & \left\{ \frac{\partial n}{\partial t} - (n-1) \alpha \right\} \\
 & = \left\{ -\frac{1}{(n-1)} \frac{\partial n}{\partial t} + \alpha \right\} f \\
 & \dots\dots\dots 6)
 \end{aligned}$$

따라서 온도상승 Δt^0 에 대한 초점거리의 변화량 Δf 는

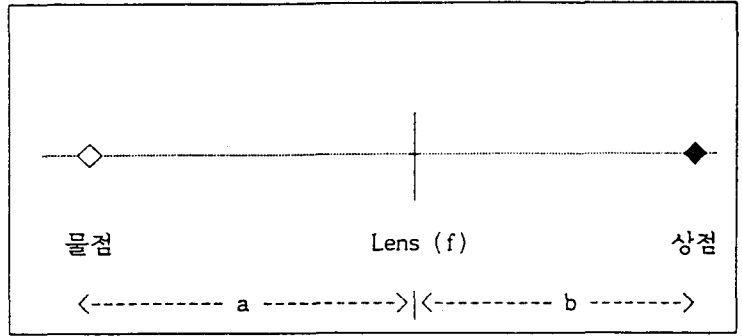
$$\Delta f = \left\{ -\frac{1}{(n-1)} \frac{\partial n}{\partial t} + \alpha \right\} f \Delta t \dots\dots\dots 7)$$

굴절율에 대해서도 선팽창과 동일한 개념으로

$$n_s = \frac{1}{(n-1)} \frac{\partial(n-1)}{\partial t} \dots\dots\dots 8)$$

$$\Delta f = (-n_s + \alpha) \cdot f \Delta t \dots 9)$$

7), 9) 식으로 부터 단렌즈에 있어서 온도 변화에 대한 초점거리의 변화는 초점거리에 비례하는 것을 알 수 있다. 또한 <표-2>로부터 온도변화에 대한 초점거리의 변화는 선팽창



<그림-2> 광학계의 결상관계

보다는 주로 굴절율의 변화에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

3. 온도변화에 의한 상점위치의 변화

일반적으로 광학계에 있어서 초점거리의 변화가 곧바로 상점위치의 변화를 의미하는 것은 아니다. 따라서 온도에 따라 플라스틱 렌즈의 초점거리가 변하여도 광학계 전체의 상점위치는 공간적으로 고정시킬 수 있다.

<그림-2>와 같이 물체거리를 a, 상점거리를 b, 단렌즈의 초점거리를 f라 하면 다음의 식 10)을 만족하는 결상관계가 성립된다.

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \dots\dots\dots 10)$$

배율을 m이라 하면 $m=b/a$ 이므로 a, b를 m과 f로 표현하면

$$a = \frac{(1-m) \cdot f}{m} \dots\dots\dots 11)$$

$$b = (1-m) \cdot f \dots\dots\dots 12)$$

온도에 의해 초점거리가 변할 때 상점위치의 변화는 10)식으로부터

$$\frac{\Delta b}{b^2} = \frac{\Delta f}{f^2} \dots\dots\dots 13)$$

따라서 12)식을 13)식에 대입하여 정리하면

$$\Delta b = (1-m)^2 \cdot \Delta f \dots 14)$$

9)식을 14)식에 대입하면

$$\begin{aligned}
 \Delta b &= (1-m)^2 \cdot \{ (-n_s + \alpha) \cdot f \Delta t \} \\
 &\simeq -(1-m)^2 \cdot n_s \cdot f \Delta t \\
 &\dots\dots\dots 15)
 \end{aligned}$$

15)식에 의하면 Δb 가 0인 조건은 배율 m이 1인 경우이다. 그러나 결상광학계에서 배율이 1인 경우는 존재하지 않는다.

따라서 결상광학계에 있어

서 플라스틱 단렌즈만으로는 온도변화에 의한 상점위치의 변화는 피할 수 없게 된다.

3.2 광학계의 일부로 플라스틱 렌즈가 1매 존재하는 경우

<그림-3>과 같이 플라스틱 렌즈가 광학계의 일부로 1매 존재하는 경우를 살펴보면, L_1 은 플라스틱 렌즈 전방의 렌즈군이며, L_2 는 플라스틱 렌즈 후방의 렌즈군이다. 플라스틱 렌즈를 L_p 라 하고 플라스틱 렌즈의 배율을 m_p , L_2 렌즈의 배율을 m_2 라 하면, 온도변화에 의한 플라스틱 렌즈의 초

점거리 변화를 Δf_p 라 할때, 플라스틱 렌즈의 상점위치의 변화 Δb_p 는 14)식에 의해

$$\Delta b_p = (1 - m_p)^2 \cdot \Delta f_p \dots 16)$$

또한 플라스틱 렌즈의 온도변화에 대한 상점위치의 변화에 따라 L_2 에 대한 물점위치가 변화하므로 전체광학계의 상점위치도 Δf_p 만큼 영향을 받게 된다.

이때의 플라스틱 렌즈의 상점위치의 변화에 의한 전체 광학계에 대한 상점위치의 영향 Δf_b 는 다음과 같다.

$$\Delta f_b = \Delta b_p \cdot m_2^2 \dots\dots\dots 17)$$

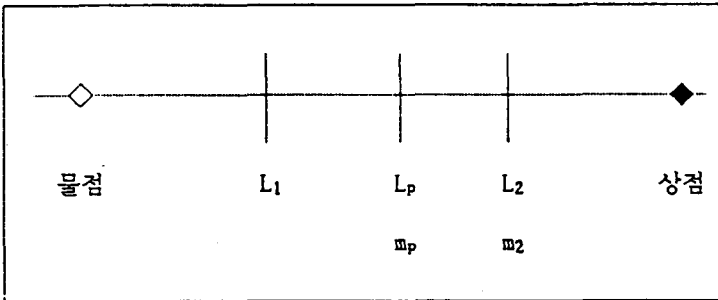
16)식을 17)식에 대입하면

$$\Delta f_b = (1 - m_p)^2 \cdot \Delta f_p \cdot m_2^2 \dots\dots\dots 18)$$

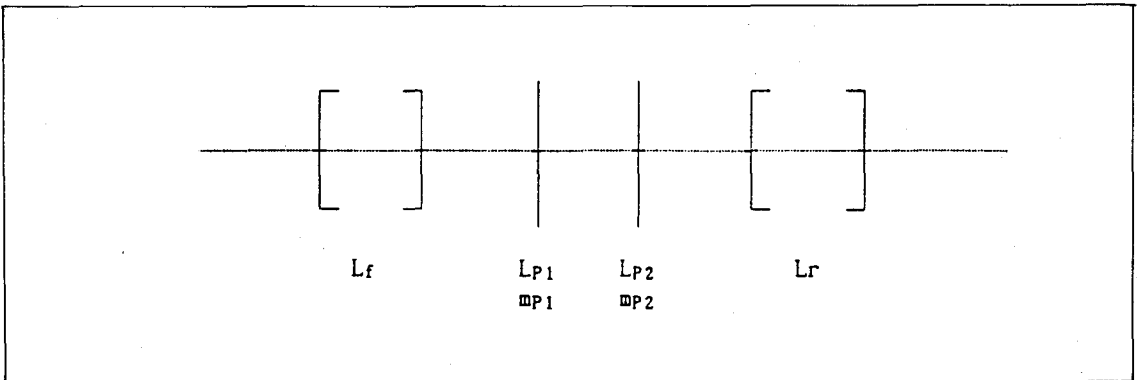
18)식으로부터 온도에 의해 플라스틱 렌즈의 초점거리 변화에 대해서도 전체 광학계의 상점위치가 변하지 않기 위해서는 $m_p = 1$ 이 되거나 $m_2 = 0$ 이 되어야 한다.

이것은 플라스틱 렌즈의 굴절능이 거의 없는 경우와 플라스틱 렌즈를 통과한 축상광선이 광축에 평행한, 즉 플라스틱 렌즈가 AFOCAL인 경우에 대하여 성립하는 것을 의미한다.

$m_p = 1$ 인 경우는 플라스틱 렌즈가 광학계 전체의 굴절능에는 커다란 영향을 주지 않으면서 수차보정을 수행하는 경우이다.



<그림-3> 광학계의 일부로 플라스틱렌즈가 1매 존재하는 경우



<그림-4> 인접한 2매의 렌즈가 플라스틱인 경우

3.3 광학계의 일부로 인접한 2개의 렌즈가 플라스틱인 경우

〈그림-4〉에서 L_{p1} , L_{p2} 는 플라스틱 렌즈이고 L_r 는 L_{p1} 의 전군광학계, L_r 은 L_{p2} 의 후군광학계이다. L_{p1} , L_{p2} 렌즈의 배율을 각각 m_{p1} , m_{p2} 라 하면 온도변화에 대한 L_{p1} 의 초점거리 변화를 Δf_{p1} 이라 하면, 16)식에 의해 L_{p1} 의 상점위치의 변화 Δb_{p1} 은

$$\Delta b_{p1} = (1 - m_{p1})^2 \Delta f_{p1} \quad \dots 19)$$

a_{p2} 를 L_{p2} 의 물점위치, L_{p2} 의 초점거리를 f_{p2} 라 하면

$$-\frac{1}{a_{p2}} + \frac{1}{b_{p2}} + \frac{1}{f_{p2}} \quad \dots 20)$$

물점위치가 미소하게 변한다면 20)식은

$$-\frac{\Delta a_{p2}}{a_{p2}^2} + \frac{\Delta b_{p2}}{b_{p2}^2} = -\frac{\Delta f_{p2}}{f_{p2}^2} \quad \dots 21)$$

그런데 $\Delta a_{p2} = -\Delta b_{p1}$ 이므로 21)식에 대입하여 정리하면

$$\Delta b_{p2} = -\frac{b_{p2}^2}{a_{p2}^2} \Delta b_{p1} + \frac{b_{p2}^2}{f_{p2}^2} \Delta f_{p2} \quad \dots 22)$$

19)식과 12)식을 22)식에 대입하면

$$\Delta b_{p2} = -\frac{b_{p2}^2}{a_{p2}^2} (1 - m_{p1})^2 \cdot$$

$$\begin{aligned} & \cdot \Delta f_{p1} + \frac{b_{p2}^2}{f_{p2}^2} \Delta f_{p2} \\ & = -m_{p2}^2 \cdot (1 - m_{p1})^2 \\ & \cdot \Delta f_{p1} + (1 - m_{p2})^2 \cdot \Delta f_{p2} \\ & \dots \dots \dots 23) \end{aligned}$$

플라스틱 소재의 온도분산을 아래와 같이 정의하면

$$W_i = \frac{n_i(T) - 1}{n_i(t_1) - n_i(t_2)} \quad \dots 24)$$

또한 온도에 의한 초점거리의 변화 Δf_i 는

$$\Delta f_i = \frac{f_i}{W_i} \Delta t \quad \dots 25)$$

24)식과 25)식을 23)식에 대입하면

$$\begin{aligned} \Delta b_{p2} = & \{ (1 - m_{p2})^2 \cdot \frac{f_{p2}}{W_{p2}} \\ & - m_{p2}^2 \cdot (1 - m_{p1})^2 \\ & \cdot \frac{f_{p1}}{W_{p1}} \} \Delta t \quad \dots 26) \end{aligned}$$

온도변화에 관계없이 Δb_{p2} 가 0이 되어야만 광학계 전체의 상점위치는 온도변화에 대해서도 일정한 상점위치를 가지게 된다. 따라서 이 조건을 만족시키기 위해서는 27)식을 만족하는 사용자정의 수차를 최적화의 조건으로 설정하면 온도변화에 대해서도 상점이동은 발생하지 않는다. 그러나 온도분산이 유사한 경우에는 플라스틱렌즈 전체의 굴절능이 18)식을 만족하는 조건으

로 최적화하여도 실용상 문제는 되지 않는다. 이때 $m_{p12} = m_{p1} \cdot m_{p2}$ 가 1이 되면 된다.

$$\frac{(1 - m_{p2})^2}{m_{p2}^2 \cdot (1 - m_{p1})^2} = \frac{W_{p2}}{W_{p1}} \cdot \frac{f_{p1}}{f_{p2}} \quad \dots 27)$$

4. 설계예

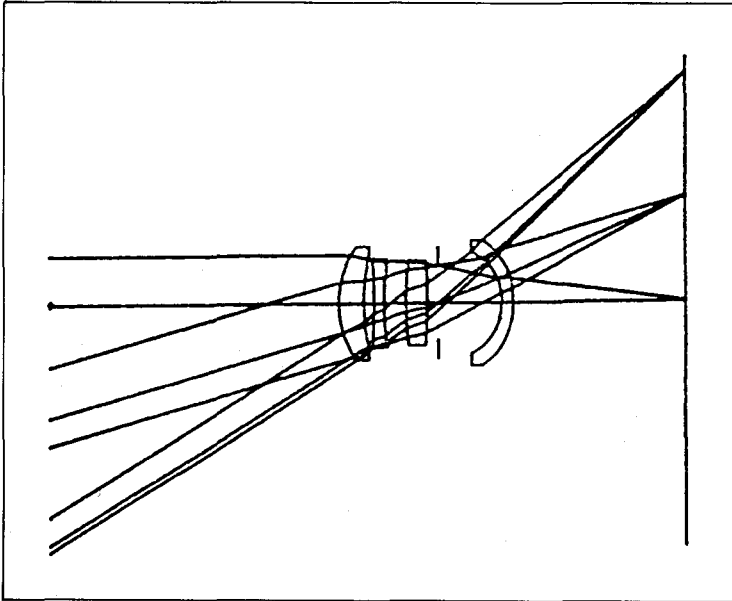
4.1 플라스틱 렌즈를 1매 사용한 경우

앞에서도 언급한 바와같이 광학용 플라스틱의 굴절율은 일반적으로 작다. 굴절율이 작다는 것은 그만큼 곡률반경이 작아지고, 이는 구면수차와 페즈발 합을 증대시킨다. 구면수차의 경우는 비구면을 도입하면 쉽게 보정할 수 있지만 페즈발 합은 보정할 수가 없다.

따라서 플라스틱렌즈를 1매 사용하여 온도변화에 대한 상면이동을 억제하고 페즈발 합을 작게하기 위해서는 주광선이 굴절면의 곡률중심을 지나면서 축상광선의 상고가 낮은 곳에 있는 Field Flattener로 이용하는 방법을 생각할 수 있는데 당사에서 생산했던 〈그림-5〉의 AF-SLIM의 제4렌즈가 대표적인 경우다.

4.2 플라스틱렌즈를 2매 사용한 경우

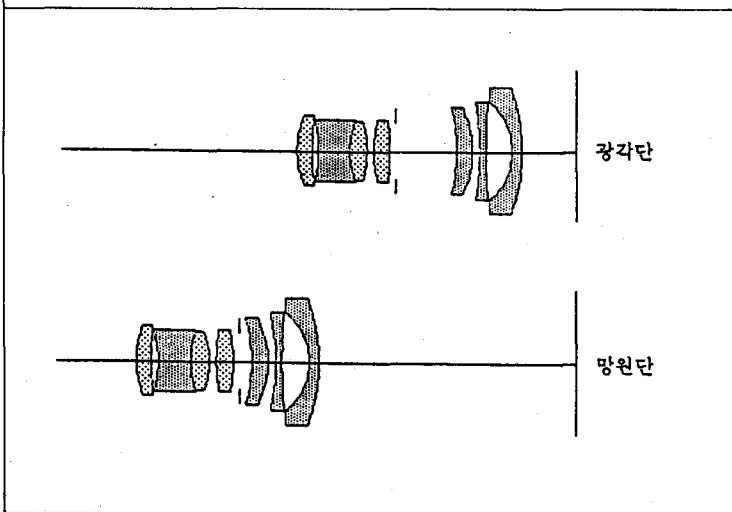
렌즈서터용 2매 줌카메라에 대해 2매의 플라스틱렌즈를 사용하여 설계를 실시하였다.



〈그림-5〉 AF-SLIM 광학계의 광로도

온도보상과 함께 요구되는 기본 규격은 다음과 같다.

- | | |
|---|------------------------------------|
| 1) 초점거리
: $f=38\text{mm} \sim f=80\text{mm}$ | 3) 광각단에서의
뒷초점거리 : 8.5mm 이상 |
| 2) 렌즈밝기
: $F/3.8 \sim F/7.5$ | 4) 조리개경
: $\phi 10\text{mm}$ 이하 |
| | 5) 망원단에서의 광학계 전장
: 77mm 이하 |



〈그림-6〉 플라스틱렌즈를 2매 채용한 줌렌즈의 구성도

6) MINIMUM EDGE

: 1mm 이상

위의 규격에 덧붙여 플라스틱렌즈를 채용한다는 것은 제조원가의 절감이 목표이므로 원가절감 효과가 큰 제2군에 대해 플라스틱 렌즈를 채용하였다.

설계된 줌 렌즈의 구성도는 〈그림-6〉과 같다. 〈그림-6〉에서 제5렌즈와 제6렌즈가 비구면 플라스틱렌즈이고 굴절력의 부호는 반대이며 그 절대값은 같도록 설계되어있다.

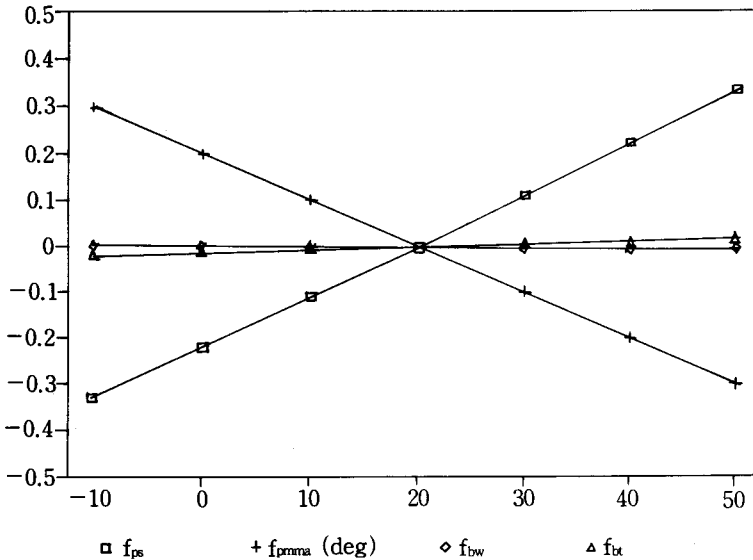
또한 설계성능은 당사에서 기존에 생산하고 있는 제품과 동등수준 이상으로 설계되었다.

〈그림-7〉은 온도 변화에 대한 상점의 이동은 Simulation 결과이다. 30°C 변할 때 광각단에서 0.0006mm, 망원단에서 0.016mm가 변하여 실용상 전혀 문제가 되지않는 수준임을 알 수 있다.

6. 결 론

플라스틱렌즈를 사용하는 결상광학계의 경우, 온도변화에 대한 상점위치의 변화를 보상하기 위해서는 다음과 같은 방법들이 제시될 수 있다.

- 1) 1매의 렌즈를 쓰는 경우는 광학계의 Power 배치시 굴절능이 극히 작아도 되는 위치



〈그림-7〉 플라스틱렌즈를 채용한 2배 줌렌즈의 온도변화에 대한 상점위치의 변화

에 플라스틱 렌즈를 채용한다.

2) 2개의 플라스틱 렌즈를 인접해서 채용할 경우는 플라스틱렌즈 각각의 굴절능은 적절하게 부여하되 플라스틱렌즈 전체의 굴절능의 합은 극히 작도록 한다. 단 이 경우 플라스틱 소재의 온도 분산의 차가 큰 경우는 27)식이 만족되는 굴절능으로 배치한다.

3) 플라스틱렌즈를 통과한 축상광선이 광축과 평행한 광선, 즉 플라스틱렌즈가 Afocal 부가 되도록 설계한다.

본 논문에서는 3)의 방법에 대해서는 직접 설계를 실시하지는 않았기 때문에 실시예를 제

시하지 않았다. 그리고 위의 3 가지 방법을 적절히 조합하고 확장하면 이론적으로는 더욱 많은 수의 플라스틱렌즈가 채용될 수 있을 것이다.

그러나 플라스틱렌즈의 매수가 지나치게 많아지면, 플라스틱의 고유물성인 복굴절에 의한 Flare가 발생할 소지가 있으므로 조심해야할 것이다.

7. 참고문헌

1. 中川治平, 렌즈設計工學, 東海大學出版會, 東京, pp. 186, (1986)
2. 光工學 핸드북, 朝倉

- 書店, pp331, (1985)
3. Rudolf Kinglake, Lens Design Fundamentals, Academic Press, pp.11~12, (1978)
4. 光應用技術, 光學機器用材料, IV-3, 社團法人 日本 オプトメカトロニクス協會, pp.70, (1992)
5. 光學技術, 光學材料, VOL14, 光學工業技術協會, pp.54, (1982)
6. Warren J. Simth, Modern Optical Engineering (2nd Edition), McGraw-Hill, Inc, pp. 178, (1990)
7. 美馬精一, 光學プラスチックの種類と適材基準, 光學部品の加工測定技術, トリケツプス, pp.17, (1986)
8. OPTICAL GLASS, $n_d - \nu_d$ Diagram, HOYA
9. Richard M. Altman, John D. Lytle, Optical-design techniques for polymer optics, SPIE, VOL 237, p.380, (1980)
10. Warren J. Smith, Modern Optical Engineering (2nd Edition), McGraw-Hill, Inc, pp.179, (1990)